



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
&
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
&
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Χρήση του πρότυπου ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11ax στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΠΟΥΡΝΟΥΤΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

(ΑΕΜ: 75)

Επιβλέπων : Δημήτριος Ι. Βέργαδος
Επίκουρος Καθηγητής

Καστοριά, Μάρτιος - 2023

Χρήση του πρότυπου ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11ax στο Διαδίκτυο των
Πραγμάτων – Μπουρνούτος Βασίλειος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
&
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
&
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Χρήση του πρότυπου ασύρματης επικοινωνίας ΙΕΕΕ 802.11αχ στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΠΟΥΡΝΟΥΤΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

(ΑΕΜ: 75)

Επιβλέπων : Δημήτριος Ι. Βέργαδος
Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18/03/2023

.....
Άγγελος Μιχάλας
Καθηγητής

.....
Δημήτριος Ι. Βέργαδος
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Σπυρίδων Νικολάου
Λέκτορας

Καστοριά, Μάρτιος – 2023

Copyright © 2023 – Μπουρνούτος Βασίλειος

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 Δυτικής Μακεδονίας.

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

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους διδάσκοντες του ΔΠΜΣ «Προηγμένες Τεχνολογίες Πληροφορικής και Υπηρεσίες» και ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Ι. Βέργαδο, για την πολύτιμη και καθοριστική βοήθειά τους στην υλοποίηση αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Τα σύγχρονα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*Wireless Local Area Networks, WLANs*) αναπτύσσονται σε ανομοιογενή περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από διαρκώς αυξανόμενη συγκέντρωση ασύρματων σταθμών (*STAs*) και *Access Points (APs)* σε περιορισμένο γεωγραφικά χώρο, ενώ καλούνται να υποστηρίξουν εφαρμογές που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων όπως βίντεο υψηλής ανάλυσης και εφαρμογές *cloud*.

Η εργασία αυτή αρχικά παρουσιάζει τις βασικές τεχνολογίες του πρότυπου IEEE 802.11ax, συμπεριλαμβανομένων των βελτιώσεων του φυσικού επιπέδου (*PHY*), του επιπέδου *MAC*, της χωρικής επαναχρησιμοποίησης (*Spatial Reuse, SR*) και της απόδοσης ενέργειας.

Στη συνέχεια ερευνά και αναλύει διεξοδικά τις τεχνικές απαιτήσεις και τις προοπτικές χρήσης του IEEE 802.11ax σε εφαρμογές διαδικτύου των πραγμάτων (*Internet Of Things, IoT*).

Τέλος, εξετάζεται η απόδοση του IEEE 802.11ax σε διαφορετικά σενάρια εφαρμογών *IoT*, μέσω προσομοιώσεων με χρήση της ολοκληρωμένης πλατφόρμας προσομοίωσης σε επίπεδο σύνδεσης, *MATLAB WLAN Toolbox*.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν ότι το IEEE 802.11ax ικανοποιεί τις απαιτήσεις *short range* εφαρμογών *IoT* σε σενάρια εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, χαμηλής και υψηλής πυκνότητας, η επίτευξη όμως των επιδόσεων που περιγράφονται στα *MCS10* και *MCS11* επιτυγχάνονται μόνο σε σχεδόν άριστες συνθήκες ζεύξης, κάτι που η τεχνολογική ετερογένεια των συσκευών και η συνύπαρξη ραδιοσημάτων καθιστά ουτοπική.

Λέξεις Κλειδιά: *high efficiency, WLAN, IoT, 802.11ax, spatial reuse, OFDMA, MU-MIMO, target wake time (TWT), 1024-QAM*

Abstract

Contemporary wireless local area networks (Wireless Local Area Networks, WLANs) are developed in heterogeneous environments characterized by an ever-increasing concentration of wireless stations (STAs) and Access Points (APs) in a limited geographical area, while they are called upon to support applications that require high data transmission rates such as high definition video and cloud applications.

This paper first introduces the core technologies of the IEEE 802.11ax standard, including physical (PHY) and MAC layer improvements, spatial reuse (SR), and energy efficiency.

It then thoroughly researches and analyzes the technical requirements and prospects for the use of IEEE 802.11ax in Internet of Things (IoT) applications.

Finally, the performance of IEEE 802.11ax in different IoT application scenarios is examined, through simulations using the comprehensive link-level simulation platform, MATLAB WLAN Toolbox.

The simulation results confirm that IEEE 802.11ax meets the requirements of short-range IoT applications in indoor and outdoor, low- and high-density scenarios, but achieving the performance described in MCS10 and MCS11 is only achieved in near-perfect link conditions, which the technological heterogeneity of the devices and the coexistence of radio signal makes it utopian.

Key Words: *high efficiency, WLAN, IoT, 802.11ax, spatial reuse, OFDMA, MU-MIMO, target wake time (TWT), 1024-QAM*

Περιεχόμενα

1.	Επισκόπηση του 802.11ax.....	8
1.1	Προτυποποίηση του 802.11ax	8
1.2	Σχεδιαστικοί στόχοι του IEEE 802.11ax.....	10
1.3	Η πορεία προς το IEEE 802.11ax	12
1.3.1	Η επέκταση του Wi-Fi στα 6 GHz.....	13
1.3.2	Wi-Fi 6E.....	15
1.3.3	Wi-Fi 6 Release 2	16
1.4	Τεχνικές βελτιώσεις του IEEE 802.11ax.....	17
1.4.1	Το PHY frame του 802.11ax.....	18
1.4.2	OFDMA	21
1.4.3	MU-MIMO	36
1.4.4	Target Wake Time (TWT).....	42
1.4.5	BSS Coloring.....	47
1.4.6	1024-QAM	49
1.4.7	Πίνακας MCS	54
2.	Χρήση του 802.11ax στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	59
2.1	Κριτήρια επιλογής ασύρματης τεχνολογίας για IoT	60
2.2	Πρότυπα ασύρματης σύνδεσης που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT	65
2.3	Σύνδεση συσκευών IoT σε WLAN.....	68
2.3.1	Wi-Fi Protected Setup (WPS).....	68
2.3.2	Access Point Mode	69
2.3.3	Wi-Fi Easy Connect	69
2.3.1	Wi-Fi Direct.....	70
2.3.2	Proprietary.....	71
2.4	Το 802.11ax ως πρότυπο IoT.....	71
2.4.1	Το 802.11ax έναντι των άλλων προτύπων IOT.....	72
2.4.2	Υπέρ και κατά της χρήσης του 802.11ax σε IoT εφαρμογές	73
3.	Προσομοίωση υλοποιήσεων IoT με χρήση του 802.11ax (IoT)	76
3.1	Μελέτη απόδοσης σε Trigger-Based Uplink πακέτα.....	77
3.2	Σενάριο βιομηχανικής εφαρμογής multinode IoT	82
3.3	Μελέτη απόδοσης OFDMA και MU MIMO	86
	Συμπεράσματα.....	89
	Προτάσεις μελλοντικής επέκτασης	91
	Αναφορές.....	92
	Παράρτημα Κώδικα	99

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Η δομή του πεδίου HE-SIG-B	19
Εικόνα 2. Η δομή του preamble στο 802.11ax	19
Εικόνα 3. Οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι HE PPDU του 802.11ax	20
Εικόνα 4. Ορθογωνιότητα των subcarriers στο OFDM	21
Εικόνα 5. OFDM στο 802.11ac	22
Εικόνα 6. OFDM στο 802.11ax	22
Εικόνα 7. Κατανομή των subcarriers στα OFDM και OFDMA	24
Εικόνα 8. Πιθανοί συνδυασμοί RUs σε κανάλι 20MHz	25
Εικόνα 9. Κατανομή RUs σε κανάλια των 20, 40 και 80MHz	26
Εικόνα 10. Ο αλγόριθμος DCF	27
Εικόνα 11. QoS με τη μέθοδο EDCA	29
Εικόνα 12. Downlink OFDMA	31
Εικόνα 13. Παράδειγμα μετάδοσης DL MU OFDMA	31
Εικόνα 14. Uplink OFDMA	34
Εικόνα 15. Παράδειγμα μετάδοσης UL MU OFDMA	34
Εικόνα 16. Διαδικασία MU EDCA	35
Εικόνα 17. Διαφορά MU-MIMO και SU-MIMO	37
Εικόνα 18. Χωρική πολυπλεξία και ποικιλομορφία στο MIMO	38
Εικόνα 19. Beamforming στο MIMO	39
Εικόνα 20. SU MIMO	39
Εικόνα 21. MU MIMO	40
Εικόνα 22. UL MU MIMO	40
Εικόνα 23. Legacy Power Save mode	43
Εικόνα 24. Individual TWT στο 802.11ax	45
Εικόνα 25. Broadcast TWT στο 802.11ax	46
Εικόνα 26. Opportunistic Power Save (OPS)	46
Εικόνα 27. Legacy OBSS	48
Εικόνα 28. 802.11ax OBSS	48
Εικόνα 29. 16-QAM (4 bits/symbol)	50
Εικόνα 30. 256-QAM και 1024-QAM	50
Εικόνα 31. Constellation diagram και EVM	51
Εικόνα 32. Σύγκριση απόστασης και ταχύτητας δεδομένων ασύρματων τεχνολογιών ..	63
Εικόνα 33. Wi-Fi Easy Connect	70
Εικόνα 34. Σύγκριση απόδοσης OFDMA και MU-MIMO	88

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Οι γενιές το Wi-Fi.....	9
Πίνακας 2. Σύγκριση PHY των 802.11n, 802.11ac, 802.11ax και 802.11be	11
Πίνακας 3. Ζώνες και προδιαγραφές συσκευών στα 6GHz.....	15
Πίνακας 4. Καινοτομίες του 802.11ax	17
Πίνακας 5. Συνδυασμοί RUs ανά εύρος καναλιού στο 802.11ax.....	23
Πίνακας 6. Όρια EVM ανά διαμόρφωση σήματος	52
Πίνακας 7. MCS στο 802.11ax με OFDM.....	56
Πίνακας 8. MCS στο 802.11ax με OFDMA	56
Πίνακας 9. Παράμετροι HT και VHT OFDM	57
Πίνακας 10. Παράμετροι HE OFDM	58
Πίνακας 11. Παράμετροι HE OFDMA.....	58
Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά ασύρματων πρότυπων IoT	66
Πίνακας 13. Περιπτώσεις χρήσης και τεχνολογίες συνδεσιμότητας για εφαρμογές IoT	68
Πίνακας 14. Σύγκριση απόδοσης OFDMA και MU-MIMO.....	87

Εισαγωγή

Από τη σύλληψη του Internet of Things (IoT), ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών και τεχνολογιών έχουν αναπτυχθεί, ώστε να γίνει εφικτή η υλοποίησή του.

Όσο μικρή ή μεγάλη και να είναι μια υποδομή IoT, το πιο ουσιαστικό κομμάτι της, είναι το σύστημα της ασύρματης επικοινωνίας, που λειτουργεί ως γέφυρα για την παράδοση δεδομένων και μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ των συνδεδεμένων IoT συσκευών και του διαδικτύου.

Καθώς οι συσκευές IoT ενσωματώνονται διαρκώς και περισσότερο στην καθημερινότητά μας, γίνεται επιτακτικότερη η ανάγκη υποστήριξής τους από την υποδομή ασύρματης δικτύωσης του εκάστοτε περιβάλλοντος στο οποίο αυτές λειτουργούν.

Η εργασία αυτή μελετά τη δυνατότητα γεφύρωσης του χάσματος μεταξύ των παραδοσιακών δικτύων ασύρματης δικτύωσης και των απαιτήσεων του IoT, με τη χρήση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11ax.

Αρχικά περιγράφονται οι καινοτομίες του 802.11ax και στη συνέχεια αναλύεται η δυνατότητα υποστήριξης της αυξανόμενης πυκνότητας των ασύρματων συσκευών, του όγκου των δεδομένων και της ανάγκης σε ενεργειακή αυτονομία.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφονται οι τροποποιήσεις στα επίπεδα PHY και MAC και συγκρίνονται με τα προηγούμενα πρότυπα IEEE 802.11.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι δυνατότητες του 802.11ax στην υποστήριξη διαφορετικών IoT εφαρμογών. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των ασύρματων τεχνολογιών που ανταγωνίζονται στο πλαίσιο IoT.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 3 εξετάζονται διάφορα σενάρια με τροποποιήσεις στην πυκνότητα συσκευών, όγκου δεδομένων, απόστασης, σηματοθορυβικού λόγου και ενεργειακών απαιτήσεων. Η μέτρηση της απόδοσης του συστήματος γίνεται με προσομοιώσεις με την εργαλειοθήκη WLAN Toolbox του MATLAB R2022b.

1. Επισκόπηση του 802.11ax

Το IEEE 802.11ax, γνωστό και με την εμπορική ονομασία του ως Wi-Fi 6 (2.4 GHz και 5 GHz) και Wi-Fi 6E (6 GHz), είναι ένα πρότυπο για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και αποτελεί διάδοχο του 802.11ac. Έχει σχεδιαστεί για να βελτιώνει την αποδοτικότητα και να μειώνει τη συμφόρηση σε σενάρια χρήσης υψηλού συνωστισμού με τη χρήση τεχνολογιών όπως 8x8 uplink/downlink MU-MIMO, OFDMA, 1024-QAM, TWT και BSS Coloring. Λειτουργεί σε ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 1 και 7.125 GHz, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών 2.4 και 5 GHz καθώς και της πολύ ευρύτερης ζώνης των 6 GHz (π.χ. 5.925–7.125 GHz στις ΗΠΑ, μια ζώνη πλάτους 1.2 GHz) [1].

Ως διάδοχος του προτύπου 802.11ax, θεωρείται το IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), που βρίσκεται επί του παρόντος υπό μελέτη και στοχεύει σε δίκτυα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης. Ωστόσο, είναι μόνο στα αρχικά του στάδια και δεν αναμένεται να εισαχθεί πριν από το 2024 [1].

1.1 Προτυποποίηση του 802.11ax

Τα πρότυπα Wi-Fi ορίζονται από το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) και συγκεκριμένα από την ομάδα εργασίας (working group) του 802.11, η οποία συστάθηκε το Σεπτέμβριο του 1990. Η ομάδα εργασίας του 802.11 αποτελείται από περίπου 400 ενεργά μέλη και από περισσότερες από 200 εταιρείες ασύρματης τεχνολογίας. Περιλαμβάνει μόνιμες επιτροπές (standing committees), ομάδες μελέτης (study groups) και πολλές ομάδες εργασιών (task groups). Η ομάδα αυτή συνεδριάζει 6 φορές το χρόνο, ενώ ενδιάμεσα, γίνονται πολλά προσωρινά συνέδρια με σύσταση ειδικών ομάδων εργασίας, όπου καλούνται ειδικοί για να ενημερώσουν και να επεκτείνουν τα τεχνικά πρότυπα του Wi-Fi [2].

Όταν το IEEE ολοκληρώσει κάποιο πρότυπο, η εστίαση μεταβαίνει στη Wi-Fi Alliance (www.wi-fi.org), το φόρουμ της βιομηχανίας, που κατέχει το εμπορικό σήμα Wi-Fi, όπου με μια σειρά δοκιμών (plugfests) δοκιμάζεται η διαλειτουργικότητα και εξασφαλίζεται η συμβατότητα όλων των συσκευών που θα παραχθούν από τη βιομηχανία με αυτό το πρότυπο.

Σε αντίθεση με την παραπάνω διαδικασία, αν και η προτυποποίηση του 802.11ax δεν είχε ακόμα ολοκληρωθεί από την IEEE, η Wi-Fi Alliance ξεκίνησε την πιστοποίηση της τεχνολογίας

802.11ax τον Αύγουστο 2019, με μια νέα πιστοποίηση που ονομάζεται Wi-Fi CERTIFIED 6, δίνοντας το έναυσμα για την παραγωγή συσκευών που υποστηρίζουν αυτή την τεχνολογία από πολλούς κατασκευαστές όπως η Qualcomm (IPQ8074 SOC), η D-Link (AX 6000 Ultra Wi-Fi) και η Asus (RT-AX88U) [3].

Τα τελευταία χρόνια η Wi-Fi Alliance αποδίδει ένα όνομα σε κάθε σημαντική πιστοποίηση σχετική με το φυσικό (PHY) και το MAC επίπεδο που εκδίδει, ώστε να βοηθήσει τους χρήστες να επιλέξουν ευκολότερα εξοπλισμό (Access Points, Routers κλπ). Έτσι το Wi-Fi 4 προσδιορίζει συσκευές που υποστηρίζουν την τεχνολογία 802.11n (2009), το Wi-Fi 5 την 802.11ac (2014) και το πιο πρόσφατο Wi-Fi 6 προσδιορίζει συσκευές που υποστηρίζουν τεχνολογία 802.11ax (2019). Ο Πίνακας 1 [1] εμφανίζει την εξέλιξη του πρότυπου IEEE 802.11 και τις αντίστοιχες ονομασίες που αποδίδει η Wi-Fi Alliance.

Πίνακας 1. Οι γενιές το Wi-Fi

Generation	IEEE Standard	Adopted	Maximum Linkrate (Mbit/s)	Radio Frequency (GHz)
Wi-Fi 7	802.11be	(2024)	1376 to 46120	2.4/5/6
Wi-Fi 6E	802.11ax	2020	574 to 9608	6
Wi-Fi 6		2019		2.4/5
Wi-Fi 5	802.11ac	2014	433 to 6933	5
Wi-Fi 4	802.11n	2008	72 to 600	2.4/5
(Wi-Fi 3)*	802.11g	2003	6 to 54	2.4
(Wi-Fi 2)*	802.11a	1999	6 to 54	5
(Wi-Fi 1)*	802.11b	1999	1 to 11	2.4
(Wi-Fi 0)*	802.11	1997	1 to 2	2.4
*(ανεπίσημες ονομασίες)				

1.2 Σχεδιαστικοί στόχοι του IEEE 802.11ax

Η εξάπλωση του Wi-Fi από το 1997 μέχρι σήμερα, υπήρξε τόσο μεγάλη που έφτασε να απειλεί την ίδια του τη βιωσιμότητα. Ο αριθμός των δημόσιων σημείων πρόσβασης (hotspots) Wi-Fi αναμένεται να φτάσει τα 628 εκατομμύρια το 2023 [6]. Υψηλή συγκέντρωση ανθρώπων σε χώρους και περιοχές σημαίνει αυτόματα και μεγάλο πλήθος Wi-Fi συσκευών. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις, WLANs υλοποιούνται σε ανομοιογενή περιβάλλοντα όπως συνεδριακά κέντρα, στάδια, υπαίθρια hotspots, αεροδρόμια, εκθεσιακοί χώροι κλπ με μεγάλο αριθμό τερματικών. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η χρήση πολλών Access Points (APs) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα επικάλυψης (ιδιαίτερα στα περιορισμένα κανάλια της μπάντας των 2.4 GHz) ή ανεπαρκούς εμβέλειας (ειδικά στα 5 GHz). Επιπρόσθετα, το φάσμα των 2.4 GHz συνωστίζεται ακόμα περισσότερο από τη λειτουργία μη Wi-Fi συσκευών που λειτουργούν σε αυτές τις συχνότητες, όπως ασύρματα τηλέφωνα, baby monitors, φούρνοι μικροκυμάτων και συσκευές Bluetooth [4].

Επιπλέον, η μετάδοση σε πραγματικό χρόνο ήχου και εικόνας υψηλής ευκρίνειας και η χρήση εφαρμογών cloud, δημιουργεί την ανάγκη για υψηλότερο throughput, κάτι που αναμένεται να ενταθεί στο άμεσο μέλλον. [4]

Για τους παραπάνω λόγους, το IEEE 802.11ax ορίζει τροποποιήσεις στα επίπεδα PHY και MAC που επιτρέπουν βελτίωση τουλάχιστον κατά τέσσερις φορές της μέσης απόδοσης ανά σταθμό σε σενάρια πυκνής ανάπτυξης, διατηρώντας ή βελτιώνοντας την αποδοτικότητα ισχύος ανά σταθμό. Οι τροποποιήσεις αφορούν τη λειτουργία σε ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 1 GHz και 7.125 GHz διατηρώντας την συμβατότητα προς τα πίσω και τη συνύπαρξη με παλαιότερες συσκευές IEEE 802.11 που λειτουργούν στην ίδια ζώνη [5]. Ο Πίνακας 2 [31] παρουσιάζει τις βασικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στο 802.11ax και τα προηγούμενα πρότυπα αλλά και με το επερχόμενο 802.11be.

Πίνακας 2. Σύγκριση PHY των 802.11n, 802.11ac, 802.11ax και 802.11be

	802.11n High Throughput (HT) WLAN	802.11ac Very High Throughput (VHT) WLAN	802.11ax High Efficiency (HE) WLAN	802.11be Extremely High Throughput (EHT)
Frequency band (GHz)	2.4 and 5	5	2.4, 5, and 6 GHz	2.4, 5, and 6
Multiplexing scheme	OFDM	OFDM	OFDMA	OFDMA
Channel bandwidth (MHz)	20, 40	20, 40, 80, 160, 80+80	20, 40, 80, 160, 80+80	20, 40, 80, 160, 320
Subcarrier spacing (for non-legacy portion)	312.5 kHz	312.5 kHz	78.125 kHz	78.125 kHz
Symbol duration, not including guard interval (μsec)	3.2	3.2	3.2, 6.4 or 12.8	3.2, 6.4 or 12.8
Guard interval/cyclic prefix (μsec)	0.8	0.4 or 0.8	0.8, 1.6 or 3.2	0.8, 1.6 or 3.2
Number of spatial streams	4	8	8	16
Multi-user (MU) technology	Not available	MU-MIMO: downlink only, up to 4 users	MU-MIMO: downlink and uplink, up to 8 users OFDMA: downlink and uplink	MU-MIMO: downlink and uplink, up to 8 users OFDMA: downlink and uplink, with multiple RUs (MRU) to a STA
Resource unit (RU) size (# of subcarriers, also known as tones)	Full channel bandwidth	Full channel bandwidth	26, 52, 106, 242, 484, 996, 2*996	Small size: 26, 52, 78, 106, 132 Large size: 242, 484, 996, and combinations
Data subcarrier modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM, 4096QAM
Channel coding	BCC (mandatory) LDPC (optional)	BCC (mandatory) LDPC (optional)	BCC (mandatory) LDPC (mandatory)	BCC (mandatory) LDPC (mandatory)
Maximum theoretical data rate	600 Mbps	6933.3 Mbps	9607.8 Mbps	> 30 Gbps

1.3 Η πορεία προς το IEEE 802.11ax

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές Wi-Fi που ήταν επικεντρωμένες στην αύξηση του ονομαστικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, το 802.11ax εστιάζει στην αύξηση της αποδοτικότητας με την καλύτερη και αποτελεσματικότερη χρήση του υπάρχοντος φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Για το λόγο αυτό αναφέρεται και ως πρότυπο HEW (High Efficiency WLAN) [7].

Το 802.11ax χειρίζεται την πυκνότητα των πελατών (clients) πιο αποτελεσματικά μέσω νέων μεθόδων διαμοιρασμού καναλιών (channel-sharing) που υπόσχονται πραγματικές επικοινωνίες πολλαπλών χρηστών τόσο στο downlink όσο και στο uplink. Για το σκοπό αυτό εισάγει ένα πλήθος τεχνολογιών όπως τα ευρύτερα κανάλια, το OFDMA για αποδοτικότερη χρήση καναλιού, το uplink (UL) MU MIMO για βελτίωση της χωρητικότητας, το Spatial Reuse (SR) για φασματική απόδοση, το Target Wake Time (TWT) για διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας, το 1024 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) για αύξηση απόδοσης και άλλες πρόσθετες βελτιώσεις [8].

Ιστορικά, η εξέλιξη των προτύπων που αναφέρονται στο PHY και MAC επίπεδο του Wi-Fi χαρακτηρίζεται κυρίως από σημαντική αύξηση των ονομαστικών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων: 2 Mbit/s με το IEEE 802.11-1997, 11 Mbit/s το 802.11b, 54 Mbit/s τα 802.11a/g, 600 Mbit/s το 802.11n και πάνω από 1 Gbit/s με το 802.11ac. Αυτές οι ταχύτητες έχουν επιτευχθεί μέσω ταχύτερων ρυθμίσεων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, ευρύτερων καναλιών και της υιοθέτησης τεχνολογιών πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output, MIMO) [9].

Ανάλυση όμως του 802.11ac, έδειξε ότι καθώς τα δίκτυα τείνουν να γίνονται πυκνότερα σε κόμβους και οι μεταδόσεις ογκωδέστερες, ο υψηλός ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτικός για την απόδοση ενός δικτύου Wi-Fi και ότι η περαιτέρω αύξηση του throughput απαιτεί νέες προσεγγίσεις [10].

Ήδη από το 2003, είχε αρχίσει η επικράτηση φορητών συσκευών με ασύρματη σύνδεση, ενώ το 2007, όταν η Apple παρουσίασε το iPhone, τα smartphones άρχισαν να 'πλημμυρίζουν' τις ασύρματες επικοινωνίες, ώσπου το 2012 ξεπέρασαν τις πωλήσεις υπολογιστών.

Για αυτό το λόγο, τον Μάιο του 2013, η ομάδα μελέτης High Efficiency WLAN Study Group (HEW SG), της ομάδας εργασίας IEEE 802.11, εξετάζοντας τη δυνατότητα βελτίωσης της χρήσης φάσματος με σκοπό την ενίσχυση του throughput σε σενάρια υψηλής πυκνότητας APs και τερματικών, κατέληξε ότι αυτό είναι εφικτό. Ακολούθησε η κατάθεση των σχετικών εγγράφων Project Authorization Request (PAR) και Criteria for Standard Development (CSD) και η έγκρισή τους από την IEEE 802 LMSC (LAN/MAN Standards Committee). Η HEW SG μετατράπηκε σε TGax (Task Group AX) και τον Μάιο του 2014 ξεκίνησε η διαδικασία μελέτης και προτυποποίησης της τροποποίησης (amendment) IEEE 802.11ax [5].

Τελικά το πρότυπο IEEE 802.11ax οριστικοποιήθηκε την 1η Σεπτεμβρίου 2020, όταν το προσχέδιο 8 έλαβε 95% έγκριση στο ψηφοδέλτιο χορηγών και έλαβε την τελική έγκριση από το Συμβούλιο Προτύπων IEEE την 1η Φεβρουαρίου 2021. Το πρότυπο 802.11ax δημοσιεύτηκε επίσημα τον Μάιο του 2021 [8].

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε αυτό επίσημο πρότυπο (Μάιος 2021) και όχι σε προγενέστερα προσχέδια όπως το Draft 3.0 (2018) ή το Draft 4.0 (2019) που αποτέλεσαν βάση για την πλειοψηφία των αναφορών στο πρότυπο 802.11ax.

1.3.1 Η επέκταση του Wi-Fi στα 6 GHz

Σε διεθνές επίπεδο, δεν υπάρχει συναίνεση για δέσμευση της χρήσης των 6 GHz και διάφορες ομάδες μελετούν εάν αυτή η ζώνη πρέπει να εκχωρηθεί για χρήση με άδεια ή χωρίς άδεια.

Τον Οκτώβριο του 2018, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (Federal Communications Commission, FCC) πρότεινε τη διάθεση φάσματος έως και 1200 MHz για χρήση από συσκευές σε μη αδειοδοτημένες ζώνες (unlicensed bands) στα 6 GHz (5,925-7,125 GHz). Ο σχεδιασμός προέβλεπε τη δυνατότητα χρήσης αυτής της ζώνης με τρόπο που δεν εμποδίζει τη λειτουργία των αδειοδοτημένων υπηρεσιών που θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούν αυτό το φάσμα.

Σε εκείνα τα τμήματα της ζώνης 6 GHz (5.925-6.425 GHz και 6.525-6.875 GHz) που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από point-to-point συνδέσεις, η FCC προτείνει τη χρήση ενός αυτοματοποιημένου συστήματος συντονισμού συχνότητας, για την προστασία τους από

παρεμβολές από μη αδειοδοτημένες συσκευές που χρησιμοποιούν Wi-Fi ή άλλες τεχνολογίες συμπεριλαμβανομένου και του, ενδεχομένως στο μέλλον, unlicensed 5G.

Στις υπόλοιπες περιοχές της ζώνης (6.425-6.525 GHz και 6.875-7.125 GHz), η χρήση θα περιορίζεται σε συσκευές που λειτουργούν σε εσωτερικούς χώρους και είναι χαμηλής ισχύος.

Στις 23 Απριλίου 2020, η FCC ψήφισε ομόφωνα την έγκριση χρήσης των 1200 MHz φάσματος σε συσκευές χωρίς άδεια με τις παραπάνω προβλέψεις. Αυτή η εξέλιξη χαιρετίστηκε ευρέως ως μια μεγάλη νίκη για το Wi-Fi [16].

Σε παγκόσμιο επίπεδο πλέον, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Νότια Κορέα, η Σαουδική Αραβία, η Βραζιλία, η Χιλή και η Γουατεμάλα έχουν ανοίξει 1200 MHz στη ζώνη των 6 GHz.

Η Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τη χρήση τους φάσματος των 6 GHz από μη αδειοδοτημένες συσκευές είναι περίπλοκη.

Τον Νοέμβριο του 2020, η Ευρωπαϊκή Διάσκεψη των Διοικήσεων Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT) δημοσίευσε την πρόθεσή της να ανοίξει ένα αρχικό φάσμα 480 MHz για συσκευές χαμηλής ισχύος σε εσωτερικούς χώρους (Low Power Indoor, LPI) και συσκευές πολύ χαμηλής ισχύος (Very Low Power, VLP) που μπορούν να λειτουργούν τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους.

Τον Ιούνιο του 2021, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, EC) το ανώτερο ρυθμιστικό όργανο για τις τηλεπικοινωνίες στην Ευρώπη, ενέκρινε τη διάθεση 480 MHz (5945 – 6425) φάσματος στη ζώνη 6 GHz για δίκτυα Wi-Fi.

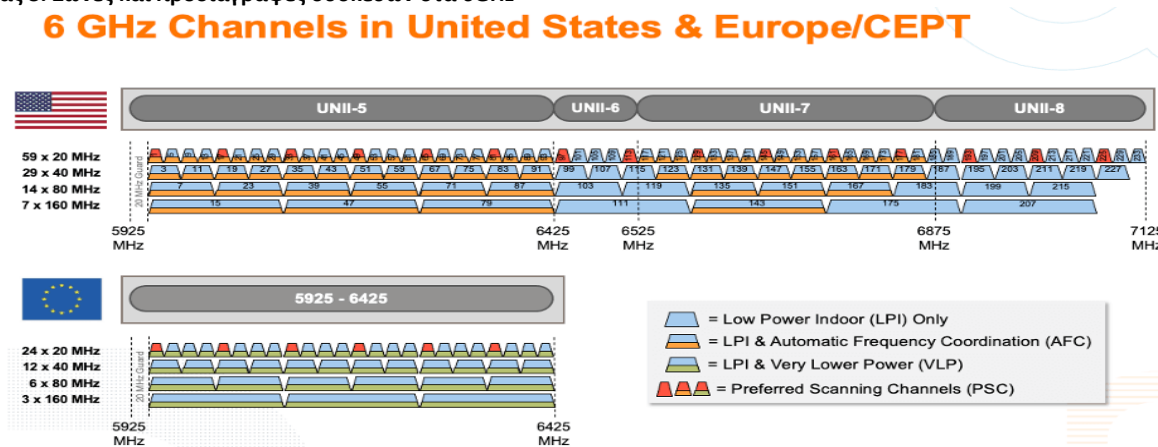
Το Ηνωμένο Βασίλειο και η Δανία αποκλίνουν ελαφρώς από την ευρωπαϊκή συμφωνία. Το ΗΒ επιτρέπει ελαφρώς υψηλότερη ισχύ μετάδοσης και επιτρέπει λίγο περισσότερο φάσμα για χρήση (5925 - 6425 MHz), σύμφωνα με τις προτάσεις που δημοσίευσε τον Ιούνιο του 2018, η Ofcom (ο οργανισμός που ρυθμίζει τις επικοινωνίες στο Ηνωμένο Βασίλειο). Η Δανία θα έχει λίγο λιγότερο φάσμα (5975 - 6425 MHz), τουλάχιστον αρχικά, λόγω του μετρώ της Κοπεγχάγης που χρησιμοποιεί επί του παρόντος τη ζώνη έως και 5975 MHz για συστήματα ελέγχου τρένων που βασίζονται στην επικοινωνία (Communication-Based Train Control Systems, CBTC) [16].

Οι Wi-Fi συσκευές που χρησιμοποιούν τη ζώνη των 6 GHz, διακρίνονται, ανάλογα με την ισχύ και την περιοχή χρήσης τους, στις παρακάτω κατηγορίες [17]:

- Standard Power (SP) AP: Λειτουργούν σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους και ρυθμίζονται μέσω μιας υπηρεσίας αυτόματου συντονισμού συχνότητας (Automated Frequency Coordination Service, AFC) για τον μετριασμό της παρεμβολής σε υπάρχουσες αδειοδοτημένες υπηρεσίες, όπως δορυφορικές υπηρεσίες και υπηρεσίες τηλεοπτικών εκπομπών.
- Low Power Indoor (LPI) AP: Λειτουργούν αποκλειστικά εσωτερικά σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος όπου δεν απαιτείται AFC.
- Very Low Power (VLP) AP: Για κινητές εφαρμογές εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου με πολύ μικρή κάλυψη.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι ζώνες και οι προδιαγραφές των συσκευών που παρέχονται για μη αδειοδοτημένη χρήση στα 6 GHz σε Ευρώπη και ΗΠΑ [16].

Πίνακας 3. Ζώνες και προδιαγραφές συσκευών στα 6GHz



1.3.2 Wi-Fi 6E

Το Wi-Fi 6E χρησιμοποιεί την ίδια υποκείμενη τεχνολογία με το Wi-Fi 6, αλλά λειτουργεί και στο μη αδειοδοτημένο φάσμα των 6 GHz που είναι διαθέσιμο για Wi-Fi.

Στις αρχές του 2020, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των Η.Π.Α. (Federal Communications Commission, FCC) ψήφισε ομόφωνα τη διάθεση 1.200 megahertz φάσματος στη ζώνη των 6 GHz για χρήση χωρίς άδεια στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το νέο αυτό φάσμα 6 GHz που διατίθεται για Wi-Fi είναι υπερδιπλάσιο από τα χρησιμοποιήσιμα κανάλια στις ζώνες 2.4 GHz και 5 GHz μαζί, τριπλασιάζοντας συνεπώς, το διαθέσιμο φάσμα χωρίς άδεια που διατίθεται για Wi-Fi.

Στα τέλη του 2020, η Wi-Fi Alliance ανακοίνωσε το Wi-Fi 6E (Expanded) ως επέκταση για την πιστοποίηση των χαρακτηριστικών 802.11ax και των δυνατοτήτων Wi-Fi 6 στη ζώνη των 6 GHz (5925-7125 GHz) με επτά κανάλια 160 MHz. Το Wi-Fi 6E είναι το εμπορικό όνομα που προσδιορίζει συσκευές 802.11ax που λειτουργούν στα 6 GHz.

Αυτή η νέα ζώνη παρέχεται για χρήση χωρίς άδεια σε περίπου 30 χώρες σε όλο τον κόσμο από το 2020. Η προσθήκη αυτής της ζώνης αυξάνει το συνολικό εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο στο Wi-Fi στα 2 GHz και μειώνει τη συμφόρηση Wi-Fi σε πολυσύχναστα δίκτυα προσφέροντας ένα τεράστιο πλεονέκτημα για δίκτυα IoT και για εφαρμογές υψηλής απόδοσης [11] όπως 4K/8K video streaming και εικονική/επαυξημένη πραγματικότητα (augmented/virtual reality, AR/VR) [12]. Τα ευρύτερα κανάλια προσφέρουν χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και υψηλότερη απόδοση από το Wi-Fi 6 σε άλλες ζώνες καθώς αυτή η μπάντα είναι λιγότερο απασχολημένη από άλλα πρότυπα.

1.3.3 Wi-Fi 6 Release 2

Στις 5 Ιανουαρίου του 2022, η Wi-Fi Alliance ανακοίνωσε την έγκριση του Wi-Fi 6E Release 2 [13], με βασικές τροποποιήσεις την υποστήριξη του Uplink Multi-User MIMO και τη βελτίωση της διαχείρισης ενέργειας, σε όλες τις ζώνες που υποστηρίζονται από Wi-Fi 6 (2.4 GHz, 5 GHz και 6 GHz), φέρνοντας χωρητικότητα, αποτελεσματικότητα, κάλυψη και οφέλη απόδοσης σε οικιακά, επιχειρηματικά και μεγάλα δημόσια δίκτυα.

Οι συσκευές Wi-Fi CERTIFIED Release 2 υποστηρίζουν τρεις λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας με στόχο την βελτίωση των βιομηχανικών εφαρμογών και των εφαρμογών Internet of Things (IoT). Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν το broadcast target wake time, το extended sleep time και το dynamic multi-user spatial multiplexing power save (SMPS). Αυτή η τριάδα χαρακτηριστικών επιτρέπει σε πολλαπλές συσκευές να λαμβάνουν εκτεταμένες περιόδους ύπνου (IoT συσκευές με θεωρητική περίοδο αφύπνισης ως 24 ώρες), επιτρέπουν συγκεκριμένους χρόνους "αφύπνισης" (χωρίς re-association) για τη μετάδοση δεδομένων και επιτρέπει τη δυναμική απενεργοποίηση redundant receive chains (δυναμική απενεργοποίηση και ενεργοποίηση μη χρησιμοποιούμενων κεραιών) για βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας [13].

1.4 Τεχνικές βελτιώσεις του IEEE 802.11ax

Οι πρωταρχικοί στόχοι του IEEE 802.11ax είναι η βελτίωση της απόδοσης κατά τουλάχιστον τέσσερις φορές ανά σταθμό σε σύγκριση με το IEEE 802.11ac, ενώ παράλληλα βελτιώνει την απόδοση ισχύος και υποστηρίζει πυκνά δίκτυα. Για το σκοπό αυτό προσθέτει νέες δυνατότητες στα επίπεδα PHY και MAC. Περιλαμβάνει επίσης ορισμένες τροποποιήσεις για συμβατότητα προς τα πίσω με συσκευές παλαιού τύπου που λειτουργούν με βάση το IEEE 802.11n στη ζώνη των 2.4 GHz και το IEEE 802.11n/ac στη ζώνη των 5 GHz [14]. Ο Πίνακας 4 [1] παρουσιάζει τις καινοτομίες που εισάγει το 802.11ax, οι οποίες αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

Πίνακας 4. Καινοτομίες του 802.11ax

Features	Benefits
MU OFDMA	Higher throughput
	Overhead reduction
	High spectral efficiency
Longer OFDM symbol	Higher efficiency for indoors
	Robustness for outdoors
Spatial reuse	Spectral efficiency
	Increased capacity
	Higher throughput
TWT	Reliability
	Lower latency
	Power saving
	Reduced jitter
MU MIMO	Up to 8× capacity increase in uplink
	Up to 2× capacity increase in downlink
1024-QAM	25% higher data rate

1.4.1 Το PHY frame του 802.11ax

Στο IEEE 802.11 κάθε μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου φυσικού επιπέδου (physical layer protocol data unit, PPDU) περιέχει πεδία προοιμίου (preamble fields) και πεδία δεδομένων (data fields). Τα preamble fields περιέχουν πληροφορίες για τη μορφή του διανύσματος μετάδοσης (transmission vector, TXVECTOR). Τα data fields περιέχουν το ωφέλιμο φορτίο χρήστη (payload) και τις κεφαλίδες υψηλότερου επιπέδου, όπως πεδία ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) και τον κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (CRC). Η δομή των PPDUs ποικίλλει μεταξύ των εκδόσεων 802.11. Ο χαρακτηρισμός HE (High Efficiency) αναφέρεται σε πλαίσια του 802.11ax.

Τέσσερις νέες μορφές πλαισίων (frames) και πεδίων preamble εισάγονται για την υποστήριξη των νέων χαρακτηριστικών του 802.11ax. Η γενική δομή του frame παραμένει ίδια για συνύπαρξη και συμβατότητα προς τα πίσω. Η Εικόνα 2 απεικονίζει αυτές τις νέες μορφές πλαισίων. Το νέο preamble περιλαμβάνει πεδία για την αναγνώριση των χρησιμοποιούμενων υποκαναλιών και τη μορφή του frame. Αποτελείται από δύο μέρη, τα legacy πεδία (non-HE) και τα HE. Τα πεδία legacy υποστηρίζουν τα πρότυπα IEEE 802.11n/ac, ενώ τα πεδία HE διαβάζονται μόνο από Wi-Fi 6 συσκευές.

Τα νέα πεδία preamble HE που διαφοροποιούν τις μορφές πλαισίων είναι τα ακόλουθα:

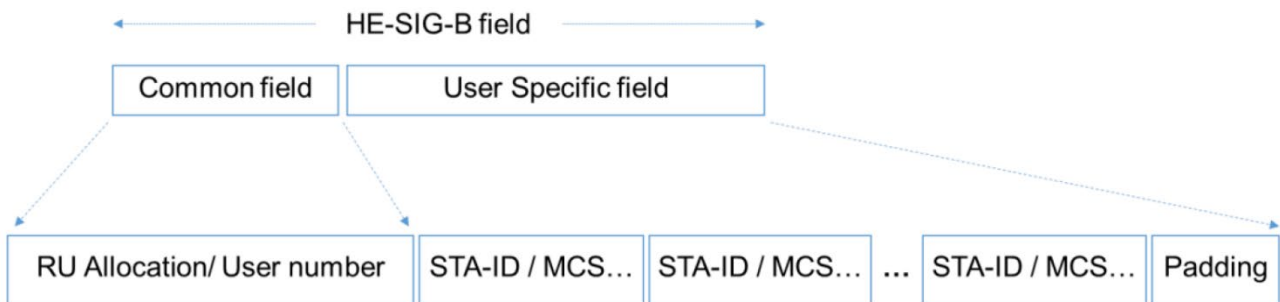
Repeated Legacy (non-HT) SIGNAL (RL-SIG): Ανιχνεύει την αρχή του πλαισίου HE.

HE-SIG-A: Είναι κοινό πεδίο και στις τέσσερις μορφές πλαισίων του 11ax. Μεταφέρει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τους τύπους μεταδόσεων και έχει μήκος δύο συμβόλων OFDM. Οι πληροφορίες σε αυτό το πεδίο διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου και το εάν η μετάδοση είναι single-user, multi-user ή Trigger-Based. Περιέχει πληροφορίες σχετικά με το πακέτο για τον προσδιορισμό του τύπου σύνδεσης (uplink ή downlink), το BSS color, τη διάρκεια TxOP, το bandwidth, τον αριθμό των spatial streams και την κωδικοποίηση. Για μια Extended Range (ER) μετάδοση ενός χρήστη, αυτό το πεδίο επαναλαμβάνεται άλλη μια φορά για να βελτιωθεί η ευρωστία έναντι των παρεμβολών και η αποδυνάμωση του σήματος σε σενάρια εξωτερικού χώρου [15].

HE-SIG-B: Χρησιμοποιείται σε μεταδόσεις multi-user downlink. Χωρίζεται σε δύο τμήματα.

Το πρώτο είναι ένα κοινό τμήμα που μεταφέρει πληροφορίες κατανομής των RUs και είναι αποκωδικοποιήσιμο από όλους τους σταθμούς του ίδιου υποκαναλιού.

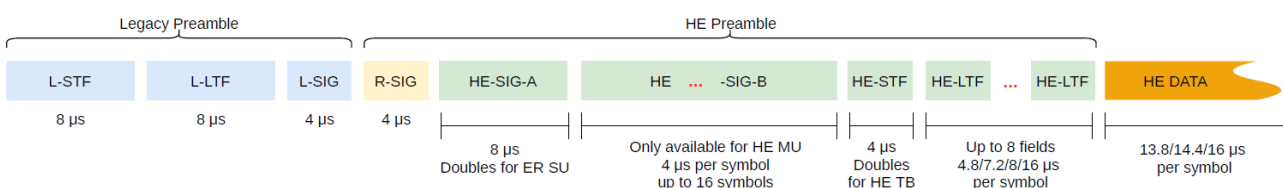
Το δεύτερο τμήμα είναι ξεχωριστό για κάθε χρήστη, έχει μεταβλητό μήκος (αντίστοιχο του πλήθους των STAs) και περιέχει συγκεκριμένες πληροφορίες για κάθε χρήστη, όπως MCS, αριθμό χωρικών ροών, κωδικοποίηση το και αναγνωριστικό σταθμού (station ID). Η Εικόνα 1 παρουσιάζει τη δομή του πεδίου HE-SIG-B.



Εικόνα 1. Η δομή του πεδίου HE-SIG-B

HE-STF και HE-LTF: Τα πεδία HE short training field (STF) και HE long training field (LTF) είναι ειδικά για τις λειτουργίες MIMO. Το πρώτο συγχρονίζει έναν δέκτη με το εισερχόμενο πλαίσιο σε χρόνο και συχνότητα. Το δεύτερο είναι υπεύθυνο για το beamforming και τη χωρική ποικιλομορφία spatial diversity. Σε πλαίσια Trigger-Based (TB), η διάρκεια του HE-STF είναι διπλάσια.

Η δομή του preamble εξαρτάται από το τύπο του frame, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Η δομή του preamble στο 802.11ax

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι HE PPDU που ορίζονται από τα preamble πεδία [5]:

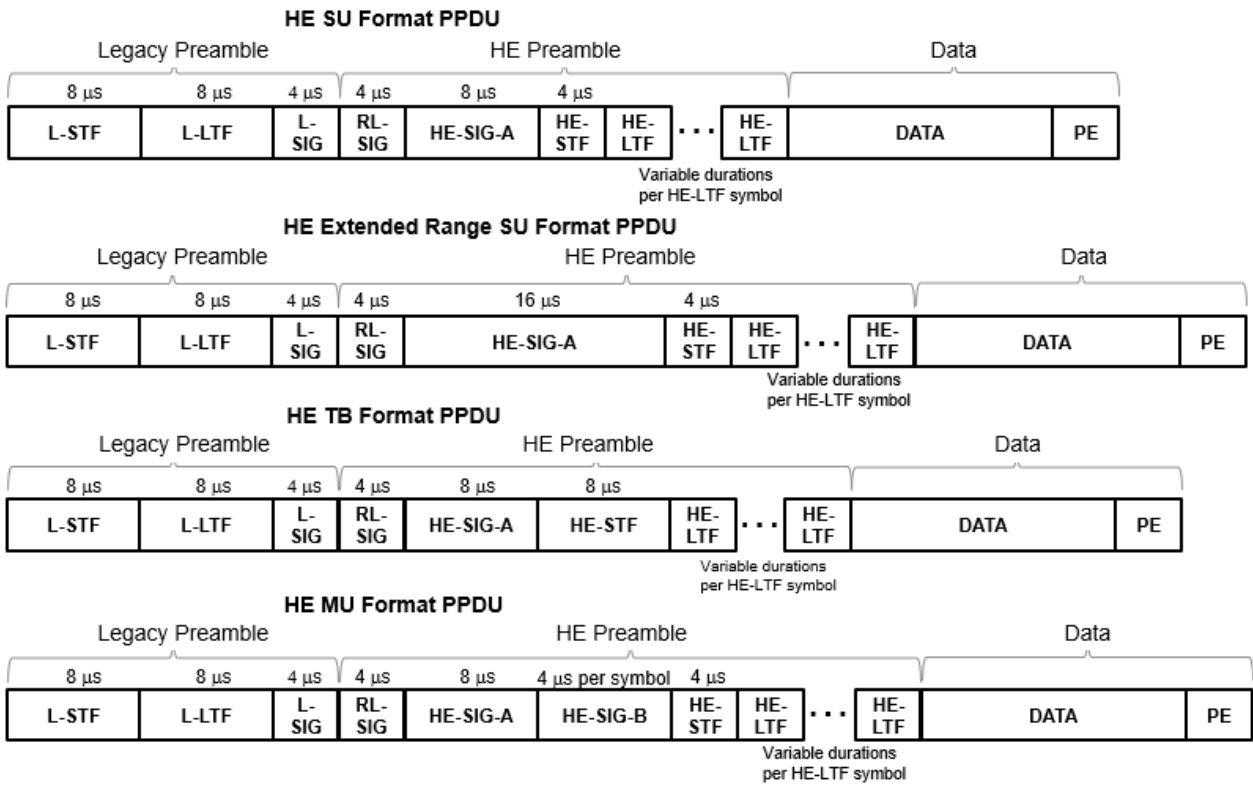
HE Single-user (SU) PPDU: Χρησιμοποιείται για μεταδόσεις ενός χρήστη.

HE ER SU PPDU: Είναι το ίδιο με Single-user, αλλά έχει σχεδιαστεί για εξωτερικά περιβάλλοντα με εκτεταμένο εύρος μετάδοσης Extended transmission Range.

HE Trigger-Based (TB) PPDU: Χρησιμοποιείται για multi-user uplink μεταδόσεις ως απόκριση σε Trigger Frame (TF) που στέλνεται από το AP.

HE MU PPDU: Προσθέτει το πεδίο HE-SIG-B στο Single-user frame για μια ή πολλαπλές downlink μεταδόσεις.

Το format του HE Preamble μπορεί να είναι από τα τέσσερα παραπάνω. Η Εικόνα 3 παρουσιάζει αυτά τα formats και τα HE πεδία που περιέχει το καθένα.



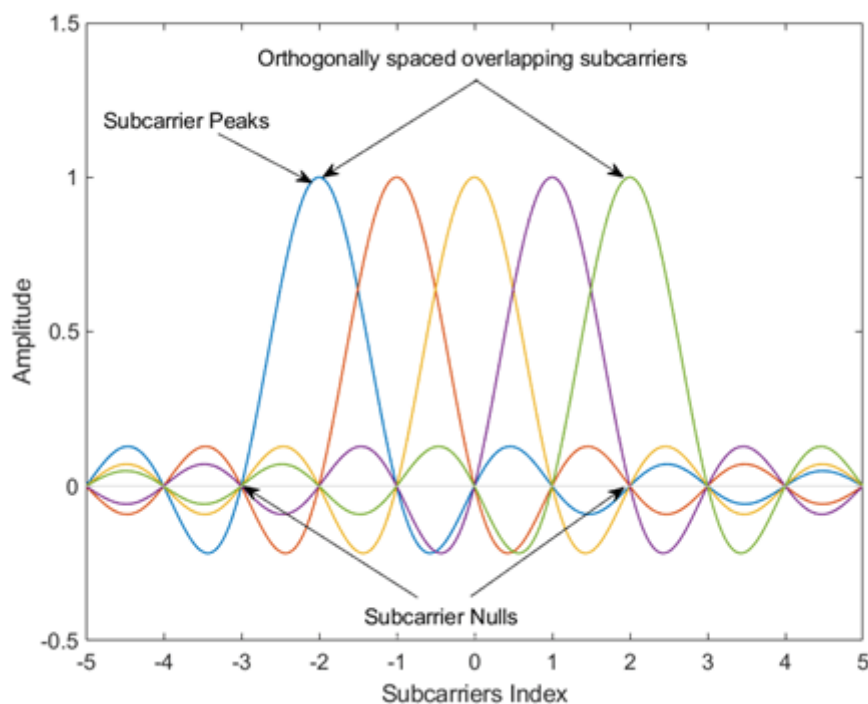
Εικόνα 3. Οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι HE PPDUs του 802.11ax

1.4.2 OFDMA

Το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) προέρχεται από το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στις επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας.

Το OFDM είναι ένα σχήμα πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (frequency-division multiplexing, FDM), για τη μετάδοση δεδομένων όπου ένα κανάλι υποδιαιρείται σε πολλαπλούς υποφορείς δεδομένων (subcarriers), οι οποίοι στο 802.11ax αποκαλούνται τόνοι (tones) και τα δεδομένα μεταδίδονται παράλληλα.

Για να ελαχιστοποιηθεί η παρεμβολή μεταξύ των subcarriers (inter-carrier interference), οι συχνότητες επιλέγονται κατάλληλα ώστε να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, τα subcarriers μπορεί να επικαλύπτονται στη συχνότητα, όμως στο σημείο που ένα subcarrier έχει το μέγιστο amplitude, τα γειτονικά του έχουν το ελάχιστο.

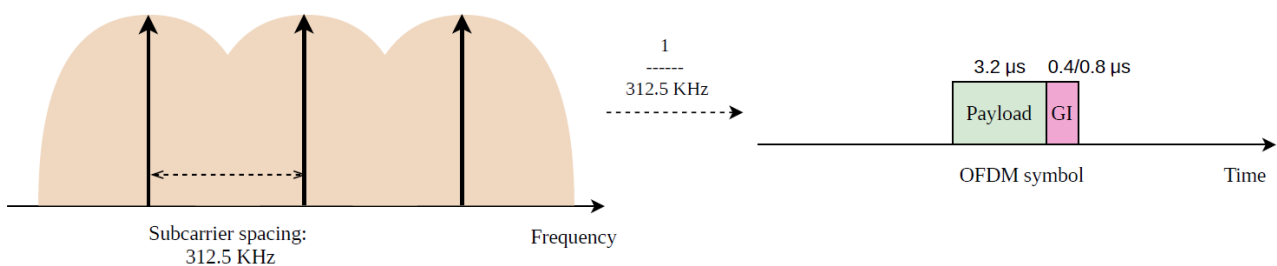


Εικόνα 4. Ορθογωνιότητα των subcarriers στο OFDM

Ο χρόνος που αποδίδεται για τη μεταφορά ενός σήματος αποκαλείται χρόνος ή διάρκεια συμβόλου (symbol time ή symbol duration). Για να αποφευχθεί η παρεμβολή στο χρόνο, προστίθεται ένα χρονικό διάστημα ασφαλείας (Guard Interval, GI) μετά από κάθε σύμβολο.

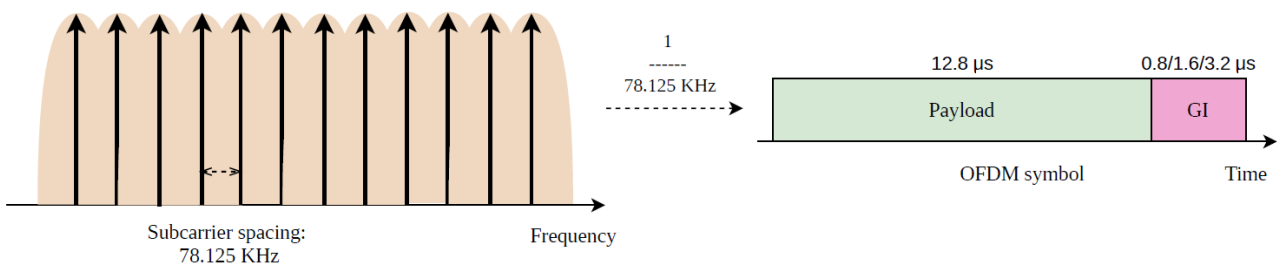
Όταν το κανάλι χωρίζεται σε πολλά subcarriers, πυκνώνει η διάταξή τους και αυξάνεται η πληροφορία που μπορεί να διακινηθεί, γεγονός που αυξάνει το symbol time και το απαιτούμενο ενδιάμεσο GI.

Στην Εικόνα 5 [1], παρουσιάζεται η χρήση του OFDM από το 802.11ac. Η απόσταση μεταξύ των subcarriers είναι 312.5 KHz, η διάρκεια του συμβόλου είναι 3.2 μ s και το GI διαρκεί 0.4 (Short GI) ή 0.8 μ s (GI).



Εικόνα 5. OFDM στο 802.11ac

Στην Εικόνα 6 [1], παρουσιάζεται η χρήση του OFDM από το 802.11ax. Η απόσταση μεταξύ των subcarriers είναι 78.125 KHz, η διάρκεια του συμβόλου είναι 12.8 μ s και το GI διαρκεί 0.8 (GI), 1.6 (2*GI) ή 3.2 (4*GI) μ s.



Εικόνα 6. OFDM στο 802.11ax

Στο OFDM, όλα τα subcarriers του καναλιού αποδίδονται σε έναν χρήστη. Συνεπώς, σε πυκνά δίκτυα, πολλοί σταθμοί ανταγωνίζονται για πρόσβαση στο μέσο αυξάνοντας την πιθανότητα

σύγκρουσης, η οποία μειώνει την απόδοση. Για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα, το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί το OFDMA.

Η τεχνολογία OFDMA (χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην τεχνολογία LTE), υιοθετείται για πρώτη φορά στο WLAN από το πρότυπο IEEE 802.11ax για να βελτιώσει τη χρησιμοποίηση φάσματος.

Η τεχνολογία OFDMA, διαιρεί τα υπάρχοντα κανάλια 802.11 σε μικρότερα δευτερεύοντα κανάλια, τα οποία σχηματίζουν μονάδες πόρων (Resource Units, RUs) που διαφέρουν μεταξύ τους σε εύρος, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μετάδοσης.

Τα δεδομένα μεταφέρονται παράλληλα σε πολλούς σταθμούς μέσω των RUs, τα οποία μπορούν να έχουν ελάχιστο εύρος 26 tones (στο 11ax τα subcarriers αποκαλούνται tones, όπως αντίστοιχα στο LTE αποκαλούνται resource blocks) ή πολλαπλάσια του 26. Συγκεκριμένα, ένα RU μπορεί να αποτελείται από 26/52/106/242/484/996/2*996 tones (subcarriers). Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει το πλήθος από RUs που υποστηρίζονται από διαφορετικά bandwidths καναλιών.

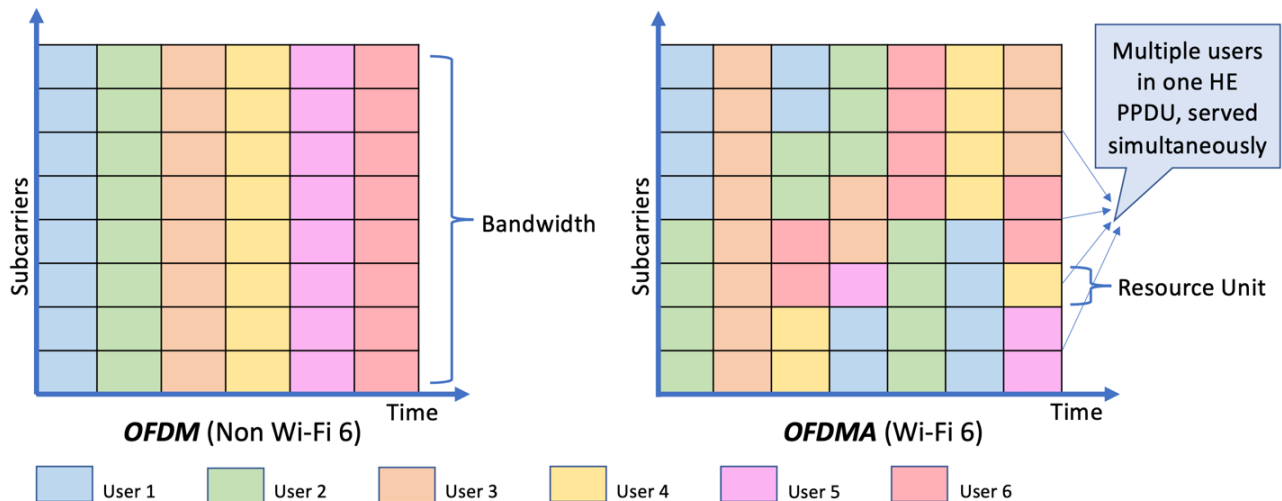
Πίνακας 5. Συνδυασμοί RUs ανά εύρος καναλιού στο 802.11ax.

RU Size	20MHz	40MHz	80MHz	160MHz
26 subcarriers	9	18	37	74
52 subcarriers	4	8	16	32
106 subcarriers	2	4	8	16
242 subcarriers	1	2	4	8
484 subcarriers	N/A	1	2	4
996 subcarriers	N/A	N/A	1	2
2*996 subcarriers	N/A	N/A	N/A	1

Το πλάτος ενός RU των 26 tones είναι περίπου 2 MHz ($78.125 \text{ KHz} * 20$). Μόνο ένα RU αποδίδεται σε κάθε χρήστη. Το Access Point καθορίζει το εύρος των RUs και το χρόνο χρήσης τους από κάθε χρήστη εξετάζοντας τους buffers τους και άλλους παράγοντες όπως το SNR (Signal-to-noise ratio).

Τα RUs διαφέρουν μεταξύ τους όχι μόνο σε εύρος αλλά και σε διάρκεια. Το εύρος ζώνης ενός καναλιού χωρίζεται σε συχνότητα και χρόνο, σχηματίζοντας μπλοκ. Τα APs κατανέμουν αυτά τα μπλοκ στους χρήστες για τις μεταδόσεις uplink. Το φάσμα ενός τέτοιου μπλοκ είναι ένα RU και η διάρκεια του ονομάζεται TxOP. Ένα TxOP είναι αρκετά μεγάλο για την αποστολή ενός ή πολλών πακέτων και τη λήψη των πακέτων αναγνώρισης (ACKs). Για να αποφευχθούν οι παρεμβολές, τα RUs που χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς πομπούς δεν πρέπει να αλληλεπικαλύπτονται (δηλαδή, πρέπει να χρησιμοποιούν μη γειτονικά RUs).

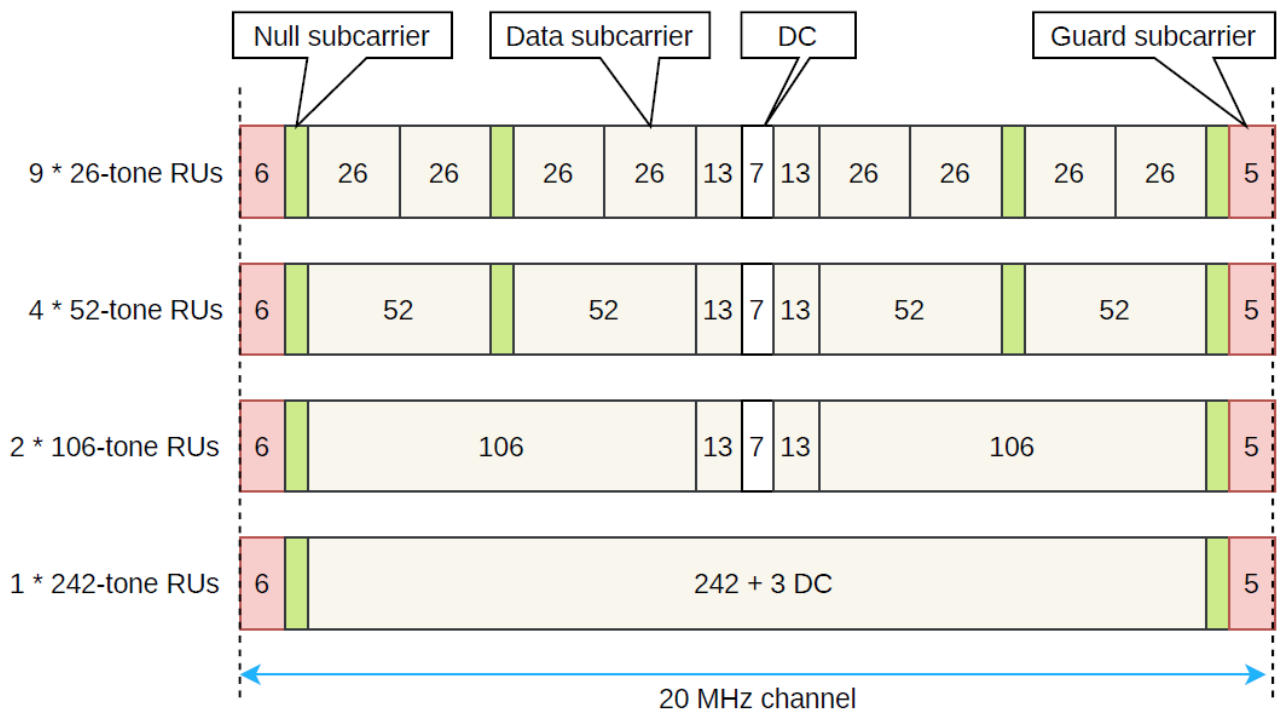
Η ανάθεση των RUs και TxOPs επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση μεταξύ πολλών STAs και του AP τους, μέσα σε ένα μόνο κανάλι. Στην Εικόνα 7, παρουσιάζεται η διαφορά του διαμορισμού του φάσματος του καναλιού στο OFDM και το OFDMA.



Εικόνα 7. Κατανομή των subcarriers στα OFDM και OFDMA

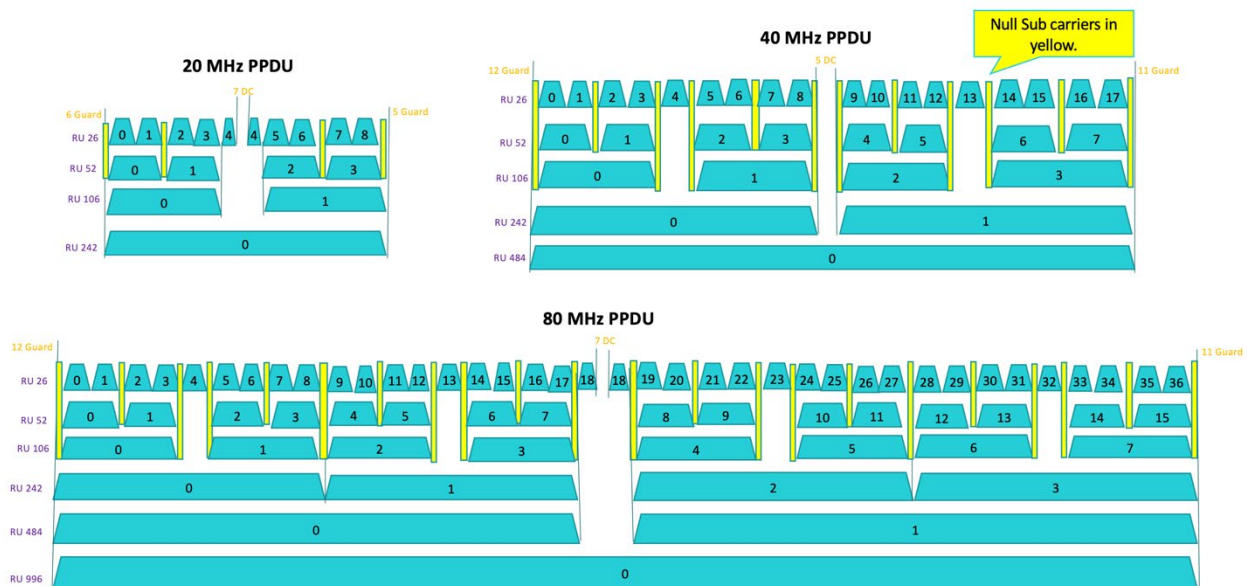
Στο 11ax, το εύρος των tones (στο 11ax τα subcarriers αποκαλούνται tones) είναι 78.125 KHz, δηλαδή 4 φορές μικρότερο από τα 312.5 KHz του 11ac. Αυτό βοηθά στην αύξηση της αποδοτικότητας αλλά καθιστά τη σύνδεση πιο ευαίσθητη στον θόρυβο. Για το λόγο αυτό, εκτός από τις ροές δεδομένων, απαιτούνται και διαστήματα ασφάλειας ώστε να μειώνονται τα λάθη στις μεταδόσεις. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8 [1], ένας τόνος μπορεί να είναι:

- data: για μεταφορά δεδομένων.
- guard: ο αριθμός τους εξαρτάται από το εύρος του καναλιού. Σε ένα κανάλι 20 MHz είναι 11 και βρίσκονται στην αρχή και το τέλος του καναλιού.
- null: διαχωρίζουν subcarriers και κανάλια.
- DC (direct conversion): υποδεικνύουν το κέντρο του καναλιού. Τα μεγέθη τους μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τα μεγέθη των RUs.



Εικόνα 8. Πιθανοί συνδυασμοί RUs σε κανάλι 20MHz

Έτσι, ένα Access Point μπορεί να έχει ως 9 ταυτόχρονες downlink ή uplink μεταδόσεις σε ένα κανάλι εύρους 20MHz, 18 μεταδόσεις σε κανάλι 40MHz, 37 σε κανάλι 80MHz και 74 σε κανάλι 160MHz. Αυτό μειώνει σημαντικά τον ανταγωνισμό για πρόσβαση στο κανάλι και το overhead στο επίπεδο MAC. Έτσι, μειώνει την καθυστέρηση και βελτιώνει τη διακίνηση σε πυκνά δίκτυα. Φυσικά, οι υπολογισμοί για αυτές τις παράλληλες μεταδόσεις απαιτούν αυξημένη υπολογιστική ισχύ από το AP και πολύ καλό SNR. Στην Εικόνα 4 εμφανίζεται η πιθανή κατανομή RUs σε κανάλια των 20, 40 και 80MHz



Εικόνα 9. Κατανομή RUs σε κανάλια των 20, 40 και 80MHz

Το IEEE 802.11ax υποστηρίζει OFDMA και στις δύο κατευθύνσεις uplink και downlink, όχι όμως ταυτόχρονα. Στο downlink, το AP καθορίζει την κατανομή των RUs με βάση τα πακέτα ζεύξης και τις προτεραιότητες των χρηστών. Στο uplink, το AP ειδοποιεί τους σταθμούς ότι οι πόροι μπορούν να διατεθούν μέσω των πλαισίων και οι σταθμοί διαπραγματεύονται με το AP σχετικά με την κατανομή των μονάδων πόρων και το πλαίσιο συγχρονισμού [11].

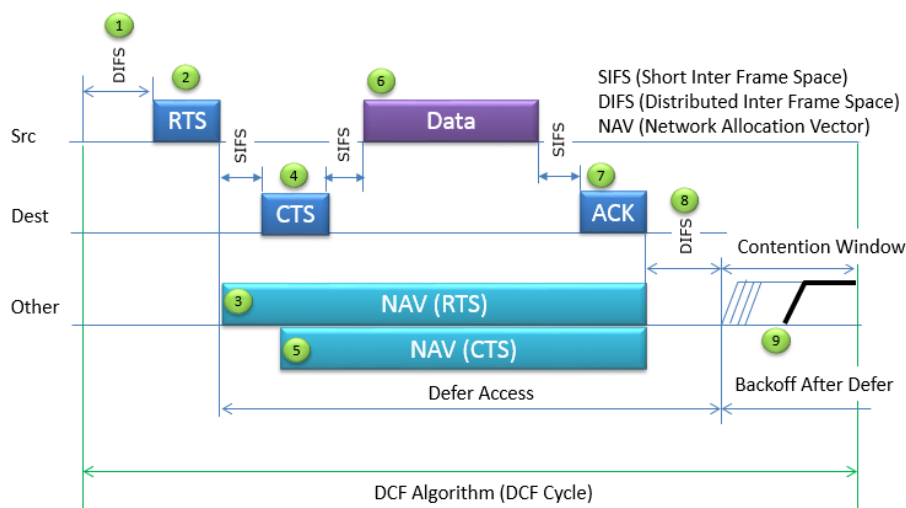
Το IEEE 802.11ax συνεχίζει να υποστηρίζει το OFDM για να διατηρήσει προς τα πίσω συμβατότητα με τα πρότυπα 802.11a/g/n/ac. Εύλογα προκύπτει το συμπέρασμα πως η παρουσία πολλών legacy σταθμών σε ένα δίκτυο, ακυρώνει μερικώς τα πλεονεκτήματα του 802.11ax.

1.4.2.1 Πρόσβαση στο κανάλι (Channel access)

Ο τρόπος που οι κόμβοι σε ένα ασύρματο δίκτυο, αποκτούν πρόσβαση στο κανάλι επηρεάζει όχι μόνο την απόδοση του δικτύου αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα του ανταγωνισμού μεταξύ των κόμβων, αλλά και την γενικότερη ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), καθώς μπορεί καθορίσει προτεραιότητες στην πρόσβαση, ανάλογα με τις ανάγκες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέθοδοι DCF και EDCA. Άλλες μέθοδοι πρόσβασης όπως PCF (Point Coordination Function) και HCCA Hybrid Controlled Channel Access) δεν λαμβάνονται υπόψη, καθώς εφαρμόζονται σπάνια σε συσκευές υλικού [63].

Distributed Coordination Function (DCF)

Το DCF είναι ένα σχήμα τυχαίας πρόσβασης που βασίζεται στο CSMA/CA. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής (Εικόνα 10 [62]):



Εικόνα 10. Ο αλγόριθμος DCF

1. Ο κόμβος πομπός (Src) ελέγχει αν εάν το κανάλι είναι ελεύθερο (idle) ή όχι. Εάν το κανάλι είναι ελεύθερο για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (DIFS : DCF Inter Frame Space), πηγαίνει στο βήμα 2.
2. Ο Src στέλνει RTS (Request To Send) στον κόμβο παραλήπτη (Dest).

3. Όλες οι άλλες συσκευές στο δίκτυο ενημερώνουν το NAV (Network Allocation Vector) τους με βάση τις πληροφορίες διάρκειας (duration information) στο RTS, έτσι ώστε να μην επιχειρήσουν την πρόσβαση στο κανάλι μέχρι να ολοκληρωθεί η επικοινωνία μεταξύ Src και Dest.
4. Ο Dest στέλνει CTS (Clear To Send) στη συσκευή Src.
5. Όλες οι άλλες συσκευές ενημερώνουν το NAV τους με βάση τις πληροφορίες διάρκειας στο CTS.
6. Μετά από ένα SIFS, ο Src στέλνει δεδομένα στον Dest.
7. Μετά από ένα SIFS, ο Dest στέλνει ACK στον Src.
8. Μετά την ολοκλήρωση ενός κύκλου μετάδοσης δεδομένων, όλες οι συσκευές (συμπεριλαμβανομένων των Src και Dest) θα πρέπει να περιμένουν για ακόμα ένα DIFS.
9. Στη συνέχεια, κάθε συσκευή σταματά για ένα συγκεκριμένο χρόνο backoff (αυτή η περίοδος backoff καθορίζεται τυχαία για κάθε συσκευή).

Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)

Η μέθοδος βελτιωμένης πρόσβασης EDCA βασίζεται στην παλαιού τύπου διαδικασία DCF εισάγοντας όμως τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες πρόσβασης (access categories , AC) ή κλάσεις κυκλοφορίας (traffic classes) για διαφοροποίηση υπηρεσιών στο επίπεδο MAC, παρέχοντας πρόσβαση με προτεραιότητα σε πακέτα υψηλότερης προτεραιότητας:

- **Voice (AC_VO):** Η ουρά υψηλότερης προτεραιότητας με ελάχιστη καθυστέρηση, που την καθιστά ιδανική για εφαρμογές όπως η φωνή μέσω IP (VoIP) και η ροή πολυμέσων.
- **Video (AC_VI):** Η δεύτερη ουρά υψηλότερης προτεραιότητας με χαμηλή καθυστέρηση δίνεται σε αυτήν την ουρά. Οι εφαρμογές βίντεο δρομολογούνται σε αυτήν την ουρά.
- **Best effort (AC_BE):** Κατανέμει το εύρος ζώνης ή την κυκλοφορία βέλτιστης προσπάθειας, όπως κίνηση από συσκευές παλαιού τύπου ή κίνηση από εφαρμογές ή συσκευές που δεν υποστηρίζουν QoS. Οι περισσότερες τυπικές εφαρμογές IP χρησιμοποιούν αυτήν την ουρά.

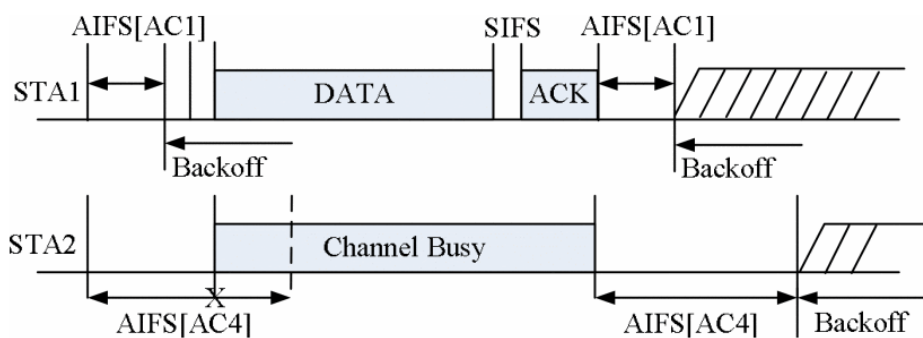
- **Background traffic (AC_BT):** Ουρά χαμηλής προτεραιότητας με υψηλή απόδοση. Εφαρμογές, όπως το FTP ή εκτυπώσεις, που δεν είναι ευαίσθητες στο χρόνο αλλά απαιτούν υψηλή απόδοση μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν την ουρά.

Αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το μέγεθος του CW (contention window) στον μηχανισμό back-off ανά κατηγορία. Η διαφοροποίηση των υπηρεσιών παρέχεται με τις ακόλουθες μεθόδους [63]:

- Arbitration Interframe Space (AIFS): Είναι παρόμοιο με το DIFS που χρησιμοποιείται στο DCF, διαφέρει όμως ανάλογα με την κατηγορία πρόσβασης. Ένας σταθμός υψηλής προτεραιότητας περιμένει για μικρότερο χρόνο AIFS πριν μειώσει την τιμή του backoff.
- Variable Contention Window: Δίνοντας μικρότερα παράθυρα διενέξεων στην κυκλοφορία υψηλότερης προτεραιότητας, δαπανάται λιγότερος χρόνος στην κατάσταση back-off, με αποτέλεσμα πιο συχνή πρόσβαση στο μέσο.
- Transmission Opportunity (TxOP): Επιτρέπει σε έναν σταθμό που έχει πρόσβαση στο μέσο να μεταδίδει έναν αριθμό μονάδων δεδομένων χωρίς να χρειάζεται να διεκδικήσει πρόσβαση στο μέσο. Το όριο TxOP ορίζεται ανά traffic class.

Πολλαπλές ουρές AC μπορούν να υπάρχουν σε έναν μόνο σταθμό, που ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το φυσικό μέσο. Αυτό θεωρείται ως εικονική διαμάχη (virtual contention).

Στην Εικόνα 11 [64] παρουσιάζεται ένα παράδειγμα απόδοσης προτεραιότητας, όπου στα πακέτα του STA1 αποδίδονται μικρότερα AIFS και άρα μεγαλύτερη προτεραιότητα.



Εικόνα 11. QoS με τη μέθοδο EDCA

1.4.2.2 Downlink OFDMA

Οι ταυτόχρονες μεταδόσεις με το MU-OFDMA μπορούν είτε να πραγματοποιηθούν από τον σταθμό στο AP (uplink/UL-OFDMA) είτε από το AP στον σταθμό (downlink/DL-OFDMA). Κατά τη διάρκεια ενός μεμονωμένου TXOP, το AP επιλέγει εάν θα εκκινήσει συγχρονισμένη κίνηση uplink ζεύξης ή συγχρονισμένη κίνηση downlink ζεύξης.

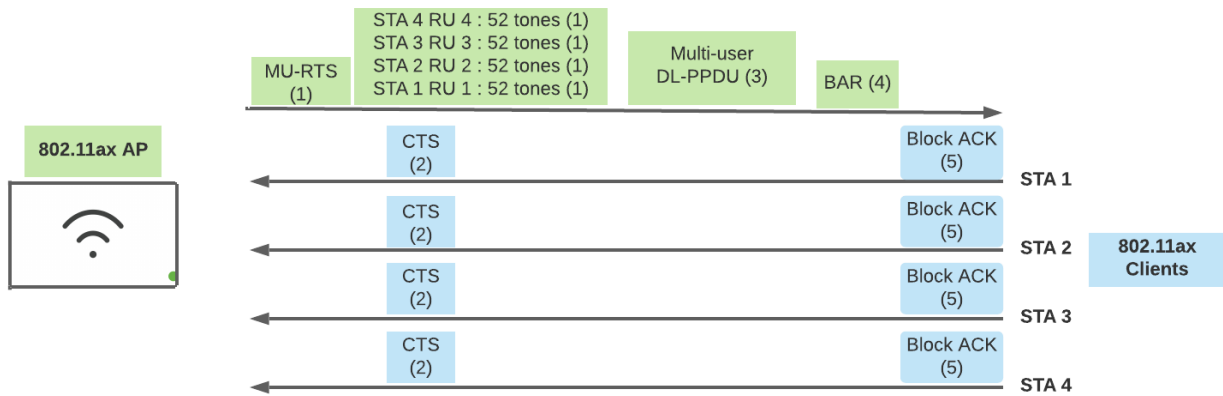
Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν τις διαφορετικές διαδικασίες για το UL-OFDMA και το DL-OFDMA.

Η downlink ζεύξη δεν χρειάζεται εκ των προτέρων σηματοδότηση για την ενεργοποίηση ή την εκκίνηση μεταδόσεων. Το ίδιο το AP γνωρίζει τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν. Χρειάζεται μόνο να στείλει τα δεδομένα με κατάλληλο τρόπο που περιλαμβάνει πληροφορίες όπως STA IDs, RUs, MCS και ID, RU, MCS και το coding mode. Όλες οι πληροφορίες είναι γραμμένες στο πεδίο HE SIG B στο πλαίσιο downlink πολλαπλών χρηστών. Αφού λάβει το πεδίο, ο κάθε σταθμός γνωρίζει πλέον εάν είναι ο παραλήπτης του πακέτου, ποιο είναι το RU και το coding mode και να προχωρήσει ή όχι στην αποδιαμόρφωση του πακέτου.

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία DL-OFDMA (Εικόνα 12 [18]). Εδώ, το AP έχει δεδομένα έτοιμα για αποστολή σε πολλαπλούς συνδεδεμένους (associated) πελάτες 802.11ax και θα μεταδώσει σε κάθε πελάτη παράλληλα.

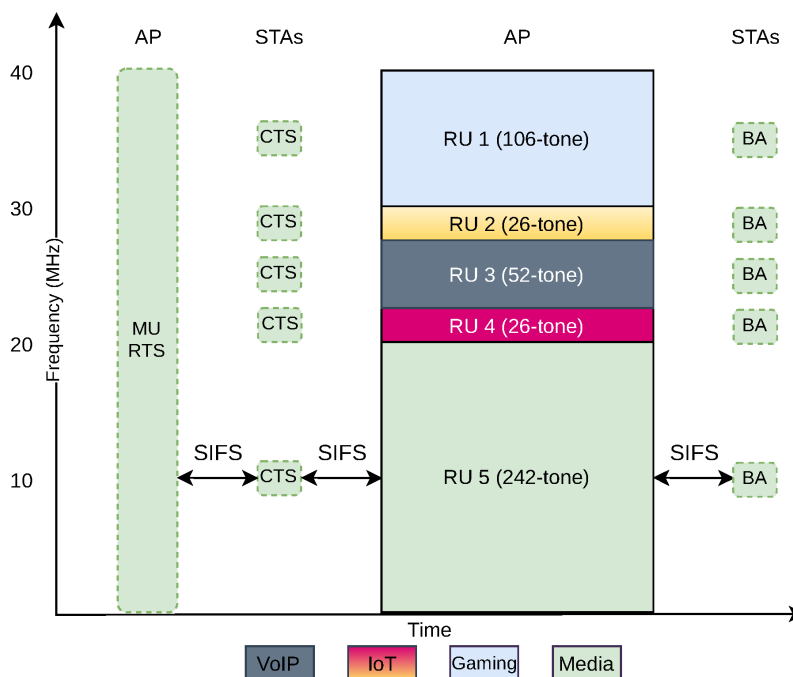
1. Το AP στέλνει ένα multiuser request-to-send (MU-RTS) frame στα συνδεδεμένα STAs.
 - a. Το MU-RTS frame περιέχει μια λίστα με αναθέσεις RU για κάθε STA και βοηθά στο συντονισμό της ανταλλαγής frames.
 - b. Το MU-RTS frame περιέχει επίσης ένα χρονόμετρο (network allocation vector, NAV) για να ειδοποιεί τους πελάτες πόσο χρόνο θα διαρκέσει η ανταλλαγή.
 - c. Αυτό το frame μεταδίδεται με χρήση OFDM σε ολόκληρο το κανάλι, έτσι ώστε οι legacy STAs να παραμένουν σιωπηλοί κατά την ανταλλαγή OFDMA frames.
2. Οι σταθμοί 802.11ax αποστέλλουν απαντήσεις clear-to-send (CTS) παράλληλα χρησιμοποιώντας τις εκχωρημένες RU τους.
3. Το AP μεταδίδει τα δεδομένα σε κάθε σταθμό παράλληλα χρησιμοποιώντας τις εκχωρημένες RU.

4. Το AP στέλνει ένα αίτημα επιβεβαίωσης μπλοκ (block acknowledgement request, BAR) για να επιβεβαιώσει εάν κάθε πελάτης έλαβε τη μετάδοση με επιτυχία.
5. Εάν τα πλαίσια δεδομένων ελήφθησαν επιτυχώς, οι πελάτες απαντούν με μια αναγνώριση μπλοκ (Block Acknowledgment, BA) παράλληλα.



Εικόνα 12. Downlink OFDMA

Η Εικόνα 13 [1] παρουσιάζει ένα παράδειγμα μετάδοσης DL MU OFDMA σε διαφορετικές RUs και απαιτήσεις κίνησης ενός καναλιού 40 MHz.



Εικόνα 13. Παράδειγμα μετάδοσης DL MU OFDMA

1.4.2.3 Uplink OFDMA

Για να στείλουν οι STAs πακέτα uplink, πρέπει πρώτα να λάβουν ένα ειδικό πλαίσιο ενεργοποίησης (trigger frame), το οποίο πληροφορεί τους STAs για τις απαιτήσεις των δεδομένων ανοδικής ζεύξης που αναμένεται να ληφθούν. Οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν τον αριθμό των spatial streams, την κατανομή RUs, τη διάρκεια του PDU και τις πληροφορίες ελέγχου, όπως η ισχύς μετάδοσης των STAs. Πολλοί τύποι από control frames του 802.11 μπορούν να λειτουργήσουν ως trigger frames:

- Basic Trigger frame
- Beamforming Report (BFRP)
- Multi-user block ack request (MU-BAR)
- Multi-user request to send (MU-RTS)
- Buffer Status Report (BSRP)
- GCR MU-BAR
- Bandwidth Query Report (BQRP)
- NDP Feedback Report Poll (NFRP)

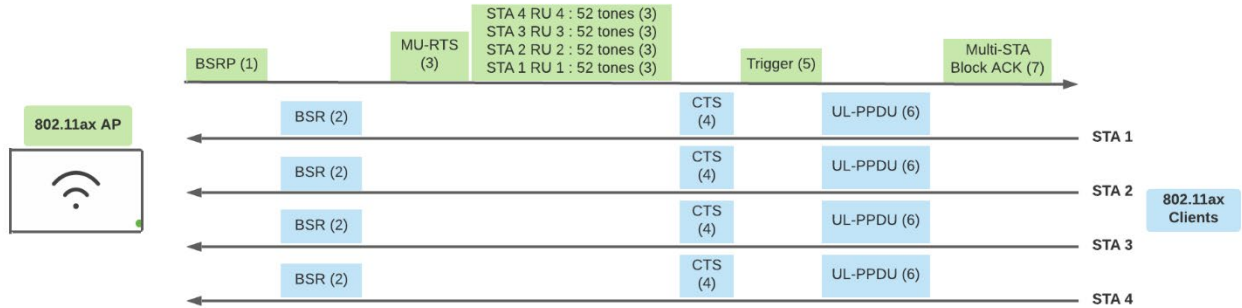
Οι πληροφορίες κατανομής RU κοινοποιούνται στους STAs και στις δύο επίπεδα PHY και MAC. Στο Φυσικό επίπεδο, οι πληροφορίες αυτές βρίσκονται στο πεδίο HE-SIG-B της κεφαλίδας PHY ενός trigger frame. Στο MAC επίπεδο βρίσκονται στο σώμα ενός trigger frame. Κάθε διαφορετικό RU ορίζεται από έναν μοναδικό συνδυασμό 7 bits (RU allocation bits) στο πεδίο user information του trigger frame.

Επίσης, το AP μπορεί να χρησιμοποιήσει trigger frames για να ενημερώσει τους STAs σχετικά με τα power settings που θα πρέπει να έχουν για συγχρονισμένες uplink μεταδόσεις.

Έτσι, κάθε STA καταλαμβάνει τις δικές του RUs, έτσι ώστε πολλοί STAs να μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικές RUs για να στείλουν παράλληλα πακέτα ανερχόμενης ζεύξης σε διαφορετικές ζώνες υποσυχνοτήτων.

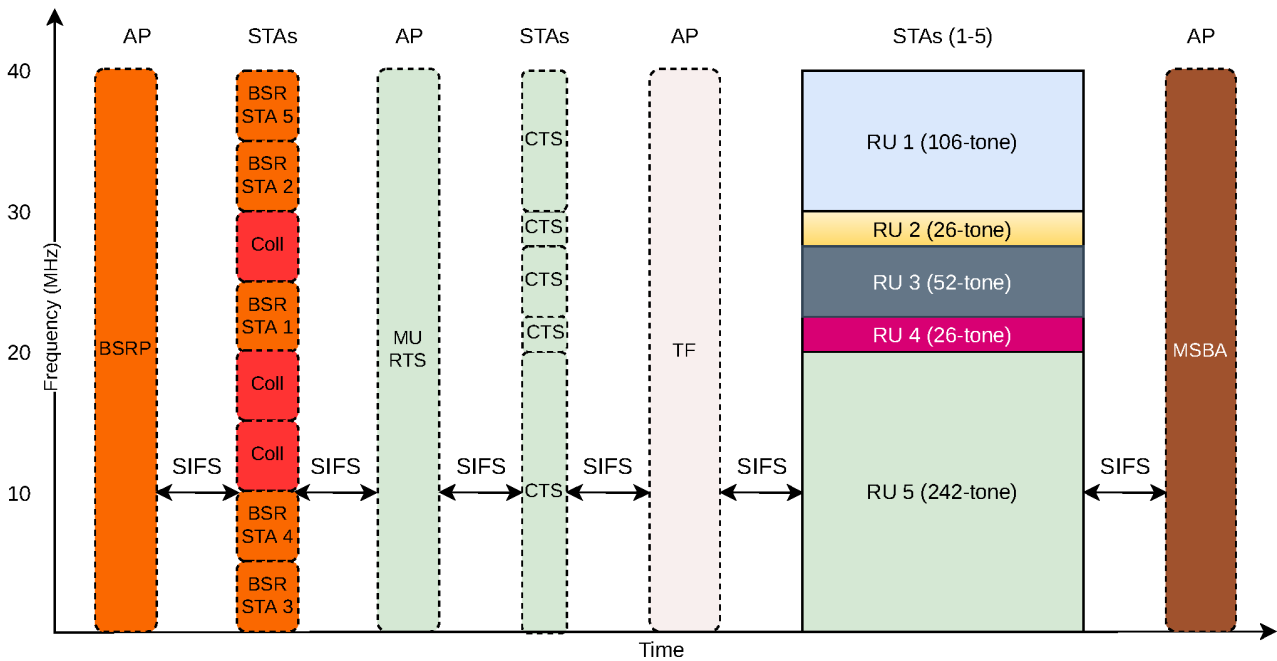
Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία UL-OFDMA (Εικόνα 14 [18]). Εδώ, το AP συντονίζει ταυτόχρονες μεταδόσεις από τους STAs προς το AP).

1. Το 802.11ax AP στέλνει μια δημοσκόπηση αναφοράς κατάστασης buffer (buffer status report poll, BSRP) για να ελέγξει πόσα δεδομένα έχουν στους buffers τους προς αποστολή οι STAs.
2. Οι STAs απαντούν με μια αναφορά κατάστασης buffer (buffer status report, BSR). Αυτό βοηθά το AP να σχεδιάσει το μέγεθος και την ποσότητα RU.
3. Το AP στέλνει ένα πλαίσιο αιτήματος για αποστολή πολλών χρηστών (multiuser request-to-send MU-RTS) σε όλους τους STAs.
 - a. Το πλαίσιο MU-RTS περιέχει μια λίστα με αναθέσεις RU για κάθε STA και βοηθά στο συντονισμό της ανταλλαγής πλαισίου πολλών χρηστών.
 - b. Το πλαίσιο MU-RTS περιέχει επίσης ένα χρονόμετρο για να ειδοποιεί τους πελάτες πόσο χρόνο θα διαρκέσει η ανταλλαγή.
 - c. Αυτό το πλαίσιο μεταδίδεται με χρήση OFDM σε ολόκληρο το κανάλι, έτσι ώστε οι πελάτες παλαιού τύπου να γνωρίζουν να παραμένουν σιωπηλοί μέσω της ανταλλαγής πλαισίων OFDMA.
4. Οι STAs αποστέλλουν απαντήσεις clear-to-send (CTS) παράλληλα χρησιμοποιώντας τις εκχωρημένες RU τους.
5. Το AP στέλνει ένα τελευταίο πλαίσιο ενεργοποίησης για να συντονίσει τη μετάδοση κάθε STA. Περιέχει την λίστα RUs και τους AIDs (Association Identifiers) που αντιστοιχίζουν RUs σε σταθμούς, καθώς και άλλες παραμέτρους μετάδοσης όπως MCS, ισχύ λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength Indication, RSSI) και τύπο κωδικοποίησης FEC (Forward Error Correction). Όταν ανακοινωθεί το χρονοδιάγραμμα, όλες οι άλλες μεταδόσεις διαχωρίζονται από τα SIFS. Έτσι, δεν μπορούν να συμβούν συγκρούσεις.
6. Οι STAs μεταδίδουν τα πλαίσια δεδομένων τους στο AP παράλληλα, στις RUs που τους έχουν εκχωρηθεί για το διάστημα TXOP.
7. Στο τέλος του TXOP, το AP εκπέμπει μια ένα Multi-Station Block Acknowledgment (MSBA) μέσω OFDM χρησιμοποιώντας ολόκληρο το κανάλι. Αποστέλλεται με τη χαμηλότερη διαμόρφωση για να είναι αποκωδικοποιήσιμο από όλους τους σταθμούς. Το μήνυμα παραθέτει όλα τα σωστά ληφθέντα frames κατά το τελευταίο TXOP.



Εικόνα 14. Uplink OFDMA

Η Εικόνα 15 [1] παρουσιάζει ένα παράδειγμα προγραμματισμένης μετάδοσης UL MU OFDMA σε διαφορετικές RUs και απαιτήσεις κίνησης ενός καναλιού 40 MHz.



Εικόνα 15. Παράδειγμα μετάδοσης UL MU OFDMA

1.4.2.4 Συμβατότητα προς τα πίσω

Οι σταθμοί που εξυπηρετεί ένα Wi-Fi 6 AP μπορεί να είναι προγενέστερης τεχνολογίας του 802.11ax και να μην υποστηρίζουν OFDMA. Για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος το 802.11ax εναλλάσσεται μεταξύ δύο λειτουργιών: (i) μεταδόσεις σε OFDMA μόνο με σταθμούς Wi-Fi 6 και (ii) μεταδόσεις σε OFDMA με παλαιού τύπου σταθμούς Wi-Fi.

Στην επικοινωνία με παλαιού τύπου σταθμούς Wi-Fi, το AP εξαιρεί αυτούς τους σταθμούς ρυθμίζονται κατάλληλα τις παραμέτρους EDCA.

Σε λειτουργία single-user εφαρμόζονται οι απλές ρυθμίσεις με το μέγεθος των AIFS που ορίζει η μέθοδος EDCA.

Σε λειτουργία multi-user εφαρμόζονται διαφορετικά AIFS και μεγαλύτεροι χρόνοι μετάδοσης, ώστε να συμπεριληφθούν οι πληροφορίες που αφορούν τα RUs. Η Εικόνα 16 [1] παρουσιάζει αυτή τη διαδικασία.



Εικόνα 16. Διαδικασία MU EDCA

1.4.3 MU-MIMO

Το MU-MIMO (multiple-input multiple-output) είναι η δεύτερη multiuser τεχνολογία που υποστηρίζει το 802.11ax. Το downlink MU-MIMO είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του IEEE 802.11ac wave 2. Ένα AP μπορεί να στείλει τα πακέτα σε πολλαπλούς σταθμούς που υποστηρίζουν MU-MIMO την ίδια στιγμή, ενώ στο παρελθόν το AP μπορούσε να επικοινωνεί με μόνο έναν σταθμό ανά στιγμή. Το IEEE 802.11ax κληρονομεί αυτήν την τεχνολογία και είναι σε θέση να στείλει πακέτα σε οκτώ σταθμούς συγχρόνως. Επιπλέον, υποστηρίζει uplink MU-MIMO και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση ζεύξης (uplink) με οκτώ σταθμούς [4].

Οι έννοιες που περιγράφουν το πόσες χωρικές ροές (spatial streams, ss) μπορεί να στείλει μια συσκευή μετάδοσης και να λάβει ένας πελάτης λήψης είναι οι παρακάτω:

SISO (single input, single output). Η συσκευή εκπομπής και ο πελάτης λήψης έχουν από μία κεραία για μία μόνο ροή.

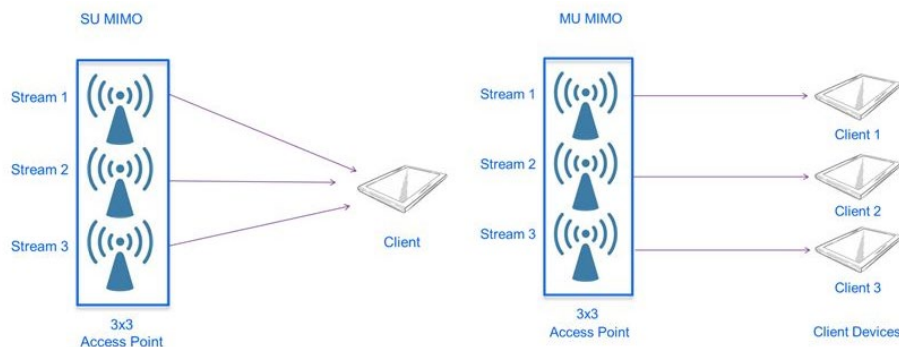
SIMO (single input, multiple output). Η συσκευή εκπομπής έχει μία κεραία, αλλά ο πελάτης λήψης έχει πολλές κεραίες για λήψη πολλαπλών ροών.

MISO (multiple input, single output). Η συσκευή εκπομπής μπορεί να στείλει πολλαπλές ροές χρησιμοποιώντας πολλές κεραίες, αλλά ο πελάτης λήψης έχει μόνο μία κεραία.

MIMO (multiple input, multiple output). Τόσο η συσκευή μετάδοσης όσο και ο πελάτης λήψης μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν πολλαπλές ροές χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες. Εναλλακτικά, η συσκευή εκπομπής έχει πολλαπλές κεραίες που χρησιμοποιεί για να εκπέμπει ταυτόχρονα σε πολλούς πελάτες, ορισμένοι ή όλοι από τους οποίους μπορεί να έχουν μόνο μία κεραία λήψης.

SU-MIMO (Single User-MIMO). Δυνατότητα μετάδοσης πολλαπλών ss μόνο σε έναν αποδέκτη τη φορά. Κάθε αποδέκτης πρέπει να περιμένει τη σειρά του.

MU-MIMO (Multi User-MIMO). Δυνατότητα μετάδοσης πολλαπλών ss σε πολλούς αποδέκτες ταυτόχρονα. Στην Εικόνα 17 απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ MU-MIMO και SU-MIMO [19].



Εικόνα 17. Διαφορά MU-MIMO και SU-MIMO

1x1, 2x2, 3x3, 4x4 κλπ. Αυτά τα στοιχεία υποδεικνύουν τον αριθμό των κεραιών σε ένα ασύρματο AP, router ή endpoint και επομένως τον αριθμό των ταυτόχρονων streams που μπορεί να υποστηρίξει. Για παράδειγμα ένα AP Wi-Fi 5 Wave 2 μπορεί να φέρει μια ετικέτα 4x4, υποδεικνύοντας ότι διαθέτει 4 κεραιές (με 4 πομπούς και 4 δέκτες) και μπορεί να υποστηρίξει 4 ταυτόχρονες χωρικές ροές. Ένα smartphone 2x2 έχει 2 κεραιές, ενώ μια συσκευή 1x1 έχει μόνο μία. Ένα Wi-Fi 6 AP διαθέτει έως και οκτώ κεραιές εκπομπής και λήψης (8x8), που του επιτρέπουν να εκπέμπει ταυτόχρονα σε οκτώ πελάτες 1x1, τέσσερις πελάτες 2x2, δύο πελάτες 4x4 κ.λπ.

Οι αριθμοί που περιγράφουν το πλήθος των υποστηριζόμενων ροών μια MU-MIMO συσκευής μπορεί να είναι μέχρι και πέντε (π.χ. 4x4:4:4:4). ο πρώτος αριθμός αναφέρεται πάντα στους πομπούς (TX) και ο δεύτερος αριθμός αναφέρεται στους δέκτες (RX). Ο τρίτος αριθμός αντιπροσωπεύει πόσες ροές ενός χρήστη (SU) μπορούν να σταλούν ή να ληφθούν. Ο τέταρτος αριθμός αναφέρεται σε πόσες ροές πολλαπλών χρηστών (MU) μπορούν να μεταδοθούν. Ο πέμπτος αριθμός χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει μια ομάδα MU-MIMO ή πόσοι πελάτες MU-MIMO λαμβάνουν εκπομπές ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, όταν ένα AP με δυνατότητα MU-MIMO λειτουργεί χρησιμοποιώντας 4x4:4:4:4, τέσσερις διαφορετικές χωρικές ροές θα προορίζονται για τέσσερις ανεξάρτητους σταθμούς με δυνατότητα MU-MIMO. Όταν ένα AP λειτουργεί ως 4x4:4:4:2, δύο μοναδικές χωρικές ροές θα προορίζονται για έναν σταθμό 2x2:2 και οι άλλες δύο για έναν διαφορετικό σταθμό 2x2:2.

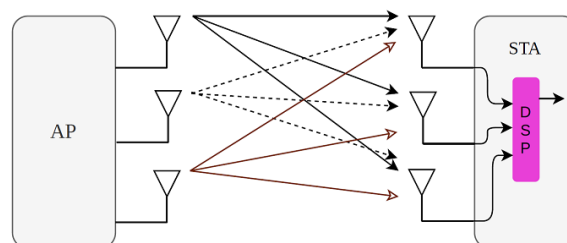
Το MIMO εισήχθη στο 802.11n με βασικότερο στόχο την αντιμετώπιση του φαινομένου του multipath propagation (όταν κατά την διάδοση τα ραδιοφωνικά σήματα φτάνουν στην κεραία λήψης από δύο ή περισσότερες διαδρομές, λόγω, π.χ., διαδρόμων, τοίχων κλπ.), που υπήρχε στα 802.11a/b/g σε πολύπλοκα ραδιοφωνικά περιβάλλοντα.

Μετατρέπεται δηλαδή φαινόμενο του multi path από μειονέκτημα σε πλεονέκτημα.

Με το MIMO, το σήμα μεταδίδεται και λαμβάνεται ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών κεραιών, αυξάνοντας τον αριθμό των ροών δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν παράλληλα. Το MIMO προσφέρει τρεις διαφορετικές μεθόδους για τη μετάδοση δεδομένων μέσα σε ένα κανάλι:

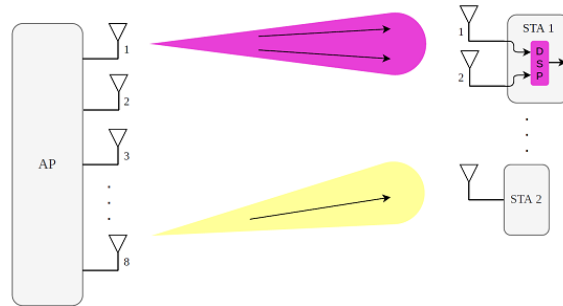
Spatial Multiplexing (Χωρική πολυπλεξία): Κάθε κεραία μπορεί να μεταδώσει ανεξάρτητα σήματα δεδομένων στον δέκτη. Αυτά τα σήματα δεδομένων ονομάζονται χωρικές ροές (spatial streams) [20]. Το MIMO αυξάνει την απόδοση γραμμικά με τον αριθμό των κεραιών. Η Εικόνα 18 [21] δείχνει αυτή τη μέθοδο μετάδοσης.

Spatial Diversity (Χωρική ποικιλομορφία): Αυτή η μέθοδος μετατρέπει το φαινόμενο multipath σε πλεονέκτημα, μεταδίδοντας τα ίδια δεδομένα σε πολλαπλές κεραιές. Δεδομένου ότι κάθε κεραία στην πλευρά του δέκτη μπορεί να λάβει αντίγραφα δεδομένων και από άλλες ροές, παρέχει πλεονασμό. Μια μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing, DSP) ανασυνθέτει τις λαμβανόμενες χωρικές ανακτώντας το αρχική μετάδοση (βλ. Εικόνα 18 [21]).



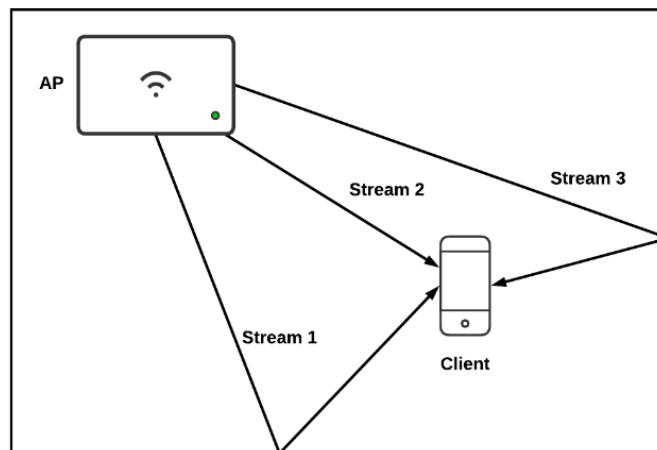
Εικόνα 18. Χωρική πολυπλεξία και ποικιλομορφία στο MIMO

Beamforming (Μορφοποίηση δέσμης): Αυτή η τεχνολογία τροποποιεί δυναμικά το μοτίβο ακτινοβολίας της ομάδας των κεραιών. Κατευθύνει το σήμα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση για την ενίσχυση του σήματος, αντί για τη διάδοση της ενέργειας προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι στενότερες δέσμες φέρνουν ισχυρότερα σήματα και μειωμένες παρεμβολές (βλ. Εικόνα 19 [21]).



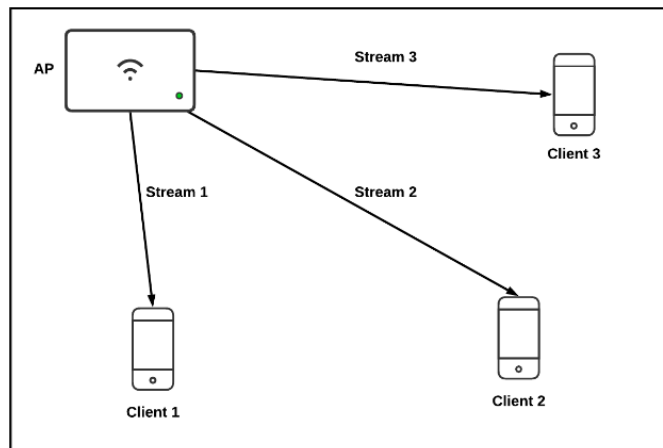
Εικόνα 19. Beamforming στο MIMO

Το 802.11n χρησιμοποιεί SU MIMO (Εικόνα 20), όπου ένα AP με πολλαπλές κεραιές επικοινωνεί με έναν μόνο σταθμό κάθε φορά. Μόνο ένα frame αποστέλλεται σε μόνο έναν σταθμό κάθε φορά. Όλα τα Spatial Streams στέλνουν το ίδιο frame. Αν υπάρχουν πολλοί σταθμοί, τότε εξυπηρετούνται διαδοχικά.



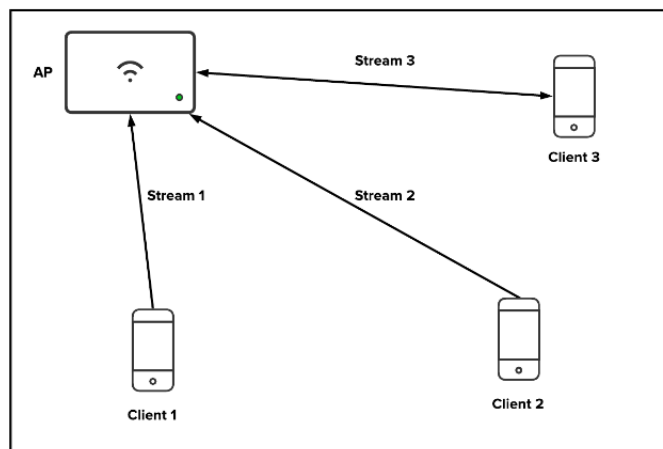
Εικόνα 20. SU MIMO

Το 802.11ac χρησιμοποιεί Downlink (DL) MU MIMO (Εικόνα 21) για την παράλληλη εξυπηρέτηση πολλών σταθμών. Υποστηρίζει έως και οκτώ παράλληλες DL χωρικές ροές σε έως και τέσσερις διαφορετικούς σταθμούς (με δύο χωρικές ροές ανά σταθμό). Χρησιμοποιεί την τεχνολογία transmit beamforming (TxBF) για τη συγκέντρωση του σήματος σε τέσσερις διαφορετικές κατευθύνσεις, δηλαδή μία κατεύθυνση ανά σταθμό.



Εικόνα 21. MU MIMO

Το 802.11ax υποστηρίζει uplink και downlink MU MIMO (Εικόνα 22). Το 11ax υποστηρίζει έως και 8x8:8 MU-MIMO τόσο σε κατερχόμενη όσο και σε ανερχόμενη ζεύξη, που του επιτρέπει να εξυπηρετεί έως οκτώ σταθμούς ταυτόχρονα.



Εικόνα 22. UL MU MIMO

Στο UL MU MIMO, το AP πρέπει να επιλέξει τους σταθμούς που μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα, για αυτό εκκινεί μια uplink OFDMA μετάδοση και καταγράφει τις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (Channel State Information, CSI) από κάθε σταθμό, βάση των οποίων δημιουργεί το βέλτιστο σύνολο σταθμών για το UL MU MIMO. Έπειτα, εκκινεί τη μετάδοση μέσω ενός trigger frame (παρόμοια με το uplink OFDMA). Στη συνέχεια, οι σταθμοί της ομάδας εκπέμπουν δεδομένα με πλαίσια HE TB PDU.

Το AP μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς σταθμούς που έχουν λιγότερες κεραιές, π.χ. ένα AP με οκτώ κεραιές μπορεί να εξυπηρετήσει έως και τέσσερις σταθμούς με δύο κεραιές. Το AP μπορεί επίσης, να κάνει channel sounding χρησιμοποιώντας sounding frames και έτσι μαθαίνει περιοδικά τις τοποθεσίες των σταθμών και στη συνέχεια μεταδίδει απευθείας (transmit beamforming, TxBF) τα δεδομένα προς τον προορισμό με πλαίσια HE MU PPDU.

Αυτό βέβαια απαιτεί spatial diversity, δηλαδή, απόσταση μεταξύ των σταθμών κάτι που δυσκολεύει την εφαρμογή του σε πυκνά περιβάλλοντα. Για αυτό, μια καλή περίπτωση χρήσης για το MU-MIMO είναι οι point-to-multipoint (PtMP) συνδέσεις γέφυρας μεταξύ κτιρίων όπου η χωρική απόσταση που απαιτείται για το MU-MIMO υπάρχει.

Επίσης, τα sounding frames προσθέτουν υπερβολικό overhead, ειδικά όταν τα περισσότερα πλαίσια είναι μικρά, γεγονός που στο 802.11ac αναιρεί την απόδοση του DL-MU-MIMO. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, το 802.11ax περιλαμβάνει βελτιώσεις MU-MIMO, όπως ομαδοποίηση των sounding frames, data frames και άλλων πλαισίων.

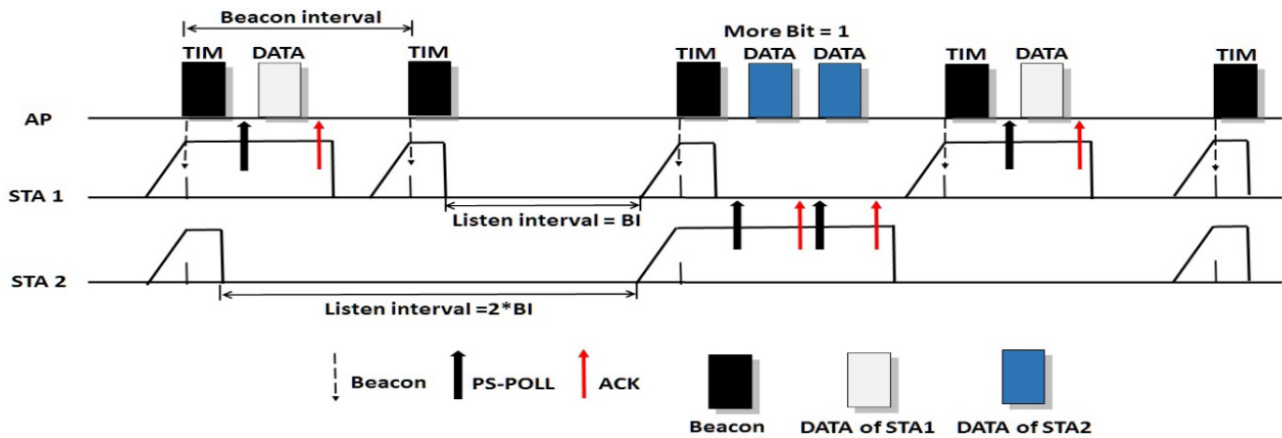
Κάθε μετάδοση MU-MIMO μπορεί να έχει το δικό της MCS. Το AP αποφασίζει αν θα χρησιμοποιήσει MU ή SU-MIMO ευνοώντας μεγαλύτερα πακέτα. Είναι επίσης δυνατός ο συνδυασμός OFDMA και MU MIMO.

1.4.4 Target Wake Time (TWT)

Ο χρόνος ενεργοποίησης προορισμού (Target Wake Time, TWT) είναι μια άλλη σημαντική λειτουργία προγραμματισμού πόρων που υποστηρίζεται από το IEEE 802.11ax. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στις συσκευές να διαπραγματεύονται το πότε και πόσο συχνά θα ξυπνούν για αποστολή ή λήψη δεδομένων, αυξάνοντας τον χρόνο ύπνου της συσκευής και βελτιώνοντας σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για κινητές συσκευές και συσκευές IoT [22]. Το AP μπορεί να ομαδοποιήσει τους σταθμούς σε διαφορετικές TWT περιόδους. Με αυτόν τον τρόπο ένας μικρότερος αριθμός συσκευών θα ανταγωνιστεί για το ασύρματο μέσο συγχρόνως μετά από την αφύπνιση [4]. Βασικός στόχος είναι να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση κατά 4 φορές, διατηρώντας ταυτόχρονα αμετάβλητες ή βελτιωμένες τις απαιτήσεις ισχύος. Το TWT εισήχθη αρχικά στο πρότυπο 802.11ah, για εφαρμογές low-power, long-range IoT [23].

Το legacy Wi-Fi (από το 802.11b), για την εξοικονόμηση ενέργειας εισήγαγε τη λειτουργία Power-Saving Mode (PSM) [27]. Οι σταθμοί με δυνατότητα PSM εναλλάσσονται μεταξύ ενεργής κατάστασης (active mode) και λειτουργίας ύπνου (doze mode) ή power save (PS) mode. Οι σταθμοί σε active mode είναι έτοιμοι για μετάδοση ή λήψη. Οι σταθμοί σε λειτουργία doze εξοικονομούν ενέργεια απενεργοποιώντας τα radio chipsets τους και επομένως δεν μπορούν να μεταδώσουν ή να λάβουν πακέτα. Οι σταθμοί ενημερώνουν το AP όταν πρόκειται να μπουν σε doze mode. Σε αυτό το διάστημα το AP αρχίζει να αποθηκεύει προσωρινά τα πακέτα που προορίζονται για αυτούς τους σταθμούς και δημιουργεί μια λίστα σταθμών με πακέτα σε εκκρεμότητα (Traffic Indication Map, TIM), την οποία κοινοποιεί στα beacons του. Οι σταθμοί ξυπνούν ανά διαστήματα και ελέγχουν αν περιλαμβάνονται σε αυτά τα beacons. Αν περιλαμβάνονται στο TIM τότε ειδοποιούν το AP ότι είναι active και μπορούν να λάβουν πακέτα. Αν έχουν πακέτα για αποστολή, ενημερώνουν το AP χρησιμοποιώντας Distributed Coordination Function (DCF) [23].

Στα beacons αναφέρονται τα διαστήματα μετάδοσης της λίστας (Delivery Traffic Indication Map, DTIM) και έτσι οι σταθμοί ξέρουν ακριβώς πώς να προγραμματίσουν τον χρόνο ύπνου και αφύπνισης για έλεγχο του DTIM, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23 [23].



Εικόνα 23. Legacy Power Save mode

Αν και ο μηχανισμός PSM εξοικονομεί ενέργεια, οι σταθμοί πρέπει να ξυπνούν κάθε διάστημα DTIM για να ελέγχουν τα beacons, ενώ αν έχουν πολλά πακέτα για μετάδοση θα πρέπει να παραμένουν active μέχρι να αδειάσουν οι buffers τους καταναλώνοντας ενέργεια [24].

Το 802.11ac εισήγαγε την προσέγγιση του microsleep. Στο 802.11ac, η κεφαλίδα PHY περιέχει πεδία που υποδεικνύουν τον πομπό και τον/τους αποδέκτη(ες) ενός πλαισίου. Έτσι, όλα τα άλλα STA μπορούν να μεταβούν στην κατάσταση doze για τη διάρκεια του frame [25].

Το 802.11ax επεκτείνει αυτήν την ιδέα επιτρέποντας σε ένα STA να κοιμάται κατά τη διάρκεια μεταδόσεων UL ή του TXOP ενός άλλου STA στο ίδιο BSS. Για αυτό, το πεδίο HE-SIG-A περιέχει πληροφορίες όπως το BSS color, την διάρκεια TXOP, την κατεύθυνση μετάδοσης (UL ή DL) κ.λπ.

Στο 802.11ax το AP λειτουργεί ως κεντρικός ελεγκτής και προγραμματίζει διαστήματα δραστηριότητας (service periods, SP) και αδράνειας (wake intervals, WI) για τους σταθμούς κατά τη διάρκεια των οποίων μπορούν να μεταδώσουν/λάβουν ή να κοιμηθούν. Τα WIs μπορεί να είναι μεγαλύτερα (ως και 5 χρόνια) από τα διαστήματα των DTIMs (που είναι συνήθως κάποια microseconds), γεγονός που λύνει το πρώτο πρόβλημα που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι σταθμοί με δεδομένα προς αποστολή μπορούν να κοιμηθούν μέχρι το επόμενο SP, το οποίο επιλύει το δεύτερο αναφερόμενο πρόβλημα. Επιπλέον, η ανάθεση των SPs στους σταθμούς μειώνει σημαντικά τα ζητήματα ανταγωνισμού μέσα σε ένα BSS. Στο διάστημα των SPs, οι σταθμοί μπορούν να ανταλλάσσουν πακέτα δεδομένων και ελέγχου. Εάν ένας σταθμός έχει

επείγοντα δεδομένα για αποστολή, μπορεί να τα μεταδώσει δεδομένα κατά τα διαστήματα αφύπνισης χρησιμοποιώντας την κανονική διαδικασία DCF [25].

Στο 802.11ax υπάρχουν δύο τύποι TWT: Ατομικό (individual TWT) και εκπομπής (broadcast TWT) [26].

Στο individual TWT, για κάθε σταθμό, μπορεί να υπάρχουν έως και οκτώ ξεχωριστές συμφωνίες προγραμματισμένης αφύπνισης για διαφορετικούς τύπους δεδομένων εφαρμογών. Οι σταθμοί και το AP συνάπτουν συμφωνία για τις παραμέτρους TWT που ονομάζεται συμφωνία TWT (TWT agreement). Κάθε σταθμός μπορεί να διαμορφώσει τη δική του συμφωνία που εξυπηρετεί τις δικές του QoS ανάγκες. Μόλις ολοκληρωθεί η διαπραγμάτευση, οι σταθμοί κοιμούνται και μετά ξυπνούν στα συμφωνημένα διαστήματα.

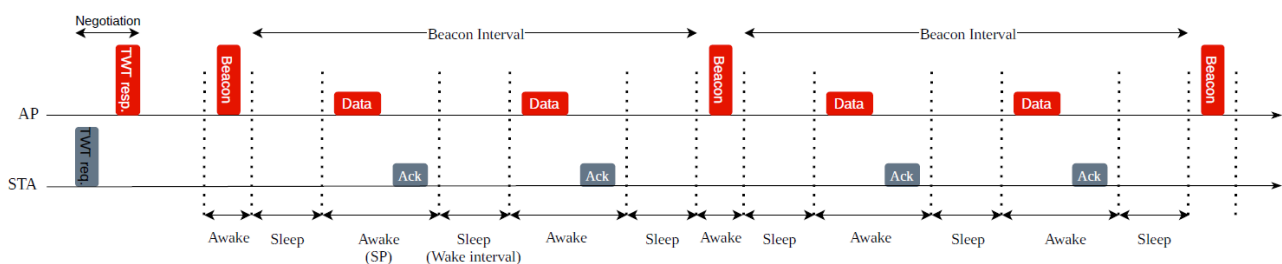
Το frame διαπραγμάτευσης μπορεί να είναι ένα management frame, π.χ. beacon frame ή ένα association request/response frame. Σε αυτά τα frames περιέχονται και οι παράμετροι TWT.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι TWT είναι η έναρξη του πρώτου TWT Service Period (SP) και το Wake Interval, δηλαδή το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών TWT SPs. Αυτές οι δύο παράμετροι καθορίζουν ολόκληρη τη σειρά TWT SP. Εκτός από αυτά, οι σταθμοί διαπραγματεύονται την ακόλουθη λίστα παραμέτρων [25]:

- Ελάχιστη διάρκεια αφύπνισης που υποδεικνύει την ελάχιστη τιμή του TWT SP, μετά την οποία ο σταθμός που ζητά TWT μπορεί να επιστρέψει στην κατάσταση doze ακόμη και αν δεν έχει λάβει frame. Εάν χρειάζεται, ένα συγκεκριμένο SP μπορεί να μειωθεί ακόμη και κάτω από αυτήν την τιμή, π.χ., μεταδίδοντας ένα frame με το flag EOSP (End of Service Period).
- Ποιοι τύποι frames πρέπει να μεταδίδονται εντός των TWT SP.
- Εάν η μετάδοση θα γίνει στο κύριο κανάλι των 20 MHz.
- Εάν το TWT SP θα προστατεύεται με μηχανισμό προστασίας NAV, π.χ., (MU-) RTS/CTS ή CTS-to-self.
- Εάν ο σταθμός που αποκρίνεται TWT μπορεί να βρίσκεται σε doze mode εκτός του TWT SP.
- Εάν ο σταθμός που ζητά TWT απαιτεί ή όχι από το σταθμό που αποκρίνεται να υποδείξει στην αρχή κάθε TWT SP ότι είναι ξύπνιος.

- Εάν τα TWT SPs είναι Trigger-enabled (TE). Τα TE TWT SP ευνοούν τη λειτουργία UL MU και είναι δυνατά μόνο εάν ο σταθμός απόκρισης είναι το AP. Εντός αυτών των TWT SP, το AP θα στείλει τουλάχιστον ένα trigger frame που εκχωρεί πόρους για το TWT που ζητά ο σταθμός. Τα TE TWT SP βελτιώνουν πολύ την εξοικονόμηση ενέργειας, πρώτον, γιατί εκμεταλλεύονται όλα τα οφέλη του UL OFDMA και δεύτερον, γιατί σύμφωνα με το πρότυπο, αφού ξυπνήσει, ένας σταθμός δεν μπορεί να ξεκινήσει αμέσως μια μετάδοση χωρίς να περιμένει είτε να λάβει ένα frame που μπορεί να ρυθμίσει το NAV του, είτε να λήξει κάποιο χρονικό όριο. Τα TE TWT SP μειώνουν αυτό τον χρόνο αναμονής. Ο σταθμός που ζητά TWT δεν θα πρέπει να εκκινεί μια μετάδοση πλαισίων προς τον σταθμό που TWT, εντός των TE TWT SP και εκτός των TWT SP για την αποφυγή συγκρούσεων με κρυφές μεταδόσεις.

Η παραπάνω διαδικασία του Individual TWT απεικονίζεται στην Εικόνα 24 [1].

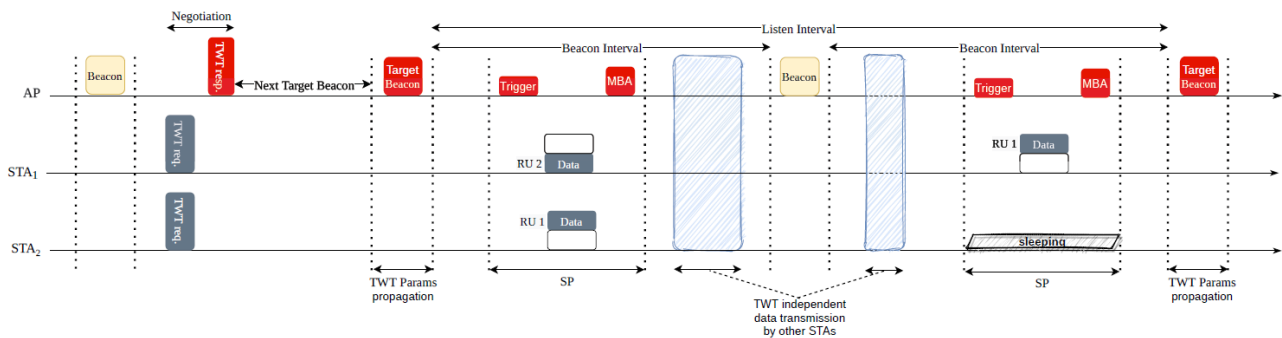


Εικόνα 24. Individual TWT στο 802.11ax

Στο broadcast TWT, τα διαστήματα αφύπνισης και εκπομπής, ορίζονται από το AP χωρίς διαπραγμάτευση. Το AP δημιουργεί δικά του προγράμματα και παραδίδει τις τιμές TWT με broadcast στους σταθμούς με beacon frames. Οι σταθμοί που λαμβάνουν αυτά τα frames και δεν έχουν δημιουργήσει individual TWT SP με το AP, μπορούν να μεταδίδουν πληροφορίες μόνο εντός του broadcasted TWT SP. Η διαδικασία είναι η εξής:

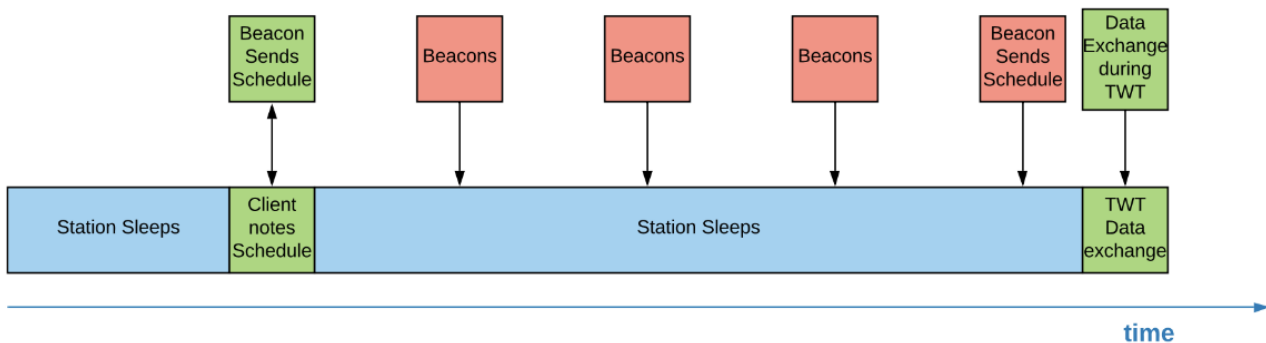
Το AP προγραμματίζει μια σειρά από trigger frames. Αρχικά, κάνει broadcast ένα TWT frame για να ενημερώσει τους σταθμούς του πρώτου trigger frame. Για να ειδοποιήσει τους σταθμούς για τα ακόλουθα trigger frames, το AP χρησιμοποιεί ένα ειδικό flag σε κάθε trigger frame εκτός από το τελευταίο. Αυτό το flag σημαίνει ότι ένα άλλο πλαίσιο Trigger για τυχαία πρόσβαση ακολουθεί την τρέχουσα μετάδοση UL και τα τυχόν επακόλουθα DL ACKs.

Η παραπάνω διαδικασία του Broadcast TWT απεικονίζεται στην Εικόνα 25 [1].



Εικόνα 25. Broadcast TWT στο 802.11ax

Το 802.11ax χρησιμοποιεί επίσης τον μηχανισμό Opportunistic Power Save (OPS) που αποτελεί συνδυασμό του legacy power save και του broadcast TWT. Εδώ, το AP χωρίζει το διάστημα beacon σε πολλά υποδιαστήματα. Αυτά τα υποδιαστήματα είναι μεταδόσεις TWT SP. Στην αρχή του υποδιαστήματος, το AP καθορίζει ποιος σταθμός θα εξυπηρετείται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου εξυπηρέτησης. Το TIM αποστέλλεται μαζί με τα frames TWT SP στα οποία αναφέρονται οι σταθμοί που θα εξυπηρετούνται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης SP. Ένας σταθμός που δεν ανήκει στο TIM μπορεί να κοιμηθεί κατά τη διάρκεια της SP [23].



Εικόνα 26. Opportunistic Power Save (OPS)

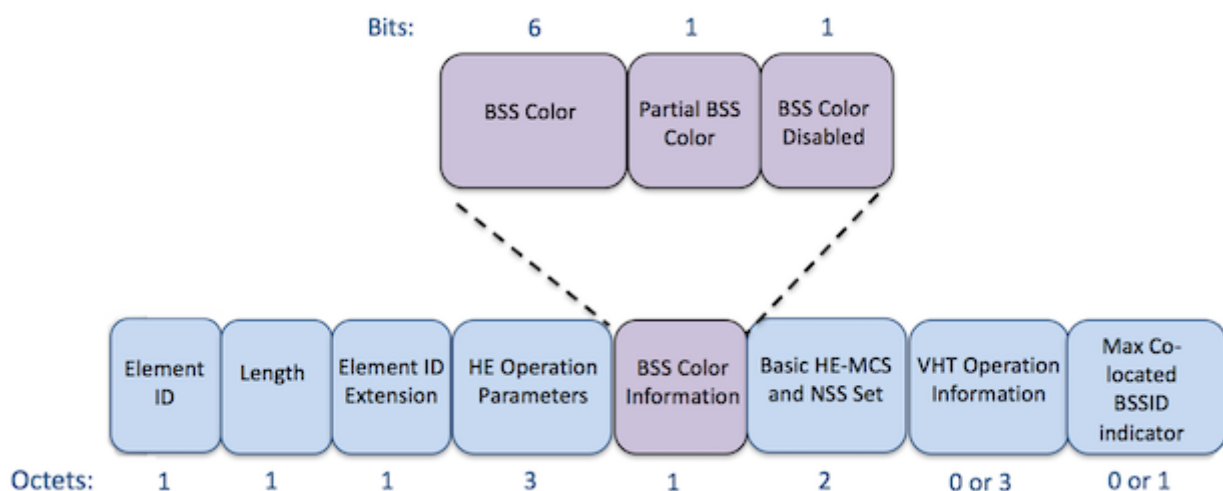
1.4.5 BSS Coloring

Όταν πολλά APs αναπτύσσονται σε μια περιοχή, μπορούν να ανιχνεύσουν τα πλαίσια γειτονικών APs και των STAs που ανήκουν στο BSS (Basic Service Set) τους στο ίδιο κανάλι. Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως overlapping basic service set (OBSS) και έχει ως συνέπεια, ένας κόμβος εκπομπής να μπλοκάρει άλλες μεταδόσεις όχι μόνο στο BSS του αλλά και σε άλλα BSS στο ίδιο κανάλι, γεγονός που καθιστά δύσκολη την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος το IEEE 802.11ax χρησιμοποιεί το BSS Coloring, μια τεχνική για χωρική επαναχρησιμοποίηση σε πυκνά περιβάλλοντα ανάπτυξης. Για να προσδιορίσει σε ποιο BSS αναφέρεται ένα πλαίσιο (ώστε να αποκωδικοποιηθεί ολόκληρο μόνο στο BSS του), το 802.11ax χρησιμοποιεί ένα αναγνωριστικό ID του BSS, που ονομάζεται BSS Color.

Οι πληροφορίες χρώματος BSS κοινοποιούνται τόσο στο επίπεδο PHY όσο και στο MAC. Στο preamble κάθε PHY 802.11ax header, το πεδίο SIG-A περιέχει ένα πεδίο 6 bit για το BSS color. Αυτό το πεδίο μπορεί να αναγνωρίσει έως και 63 BSSs. Όλα τα HE PPDU που δημιουργούνται από τα μέλη του BSS έχουν την ίδια τιμή. Ένας σταθμός που λαμβάνει ένα HE PPDU με BSS color ίσο με το BSS του, το κατατάσσει ως μέλος PPDU, διαφορετικά, το κατατάσσει ως μη μέλος PPDU.

Αρχικά, το πεδίο BSS color εμφανίστηκε στο 802.11ah με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και είχε μήκος 3 bits. Όμως, καθώς το BSS color επιλέγεται τυχαία από το AP, τα χρώματα δύο γειτονικών BSS μπορεί να συμπέσουν. Για να μειώσει την πιθανότητα σύγκρουσης χρώματος BSS, το TGax συμφώνησε να αυξήσει το μήκος του χρωματικού πεδίου BSS στα 6 bits.





Εικόνα 27. Legacy OBSS



Εικόνα 28. 802.11ax OBSS

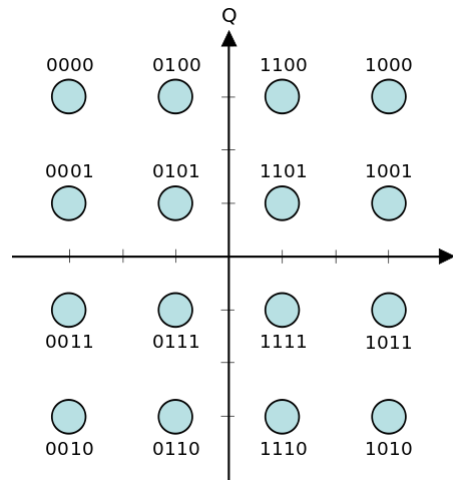
1.4.6 1024-QAM

Η διαμόρφωση Quadrature Amplitude Modulation (QAM) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση (δυναμικών) ψηφίων σε ένα αναλογικό σήμα. Χρησιμοποιεί μεταβολές στη φάση (phase) και το πλάτος (amplitude) ενός σήματος ραδιοσυχνότητας για να αναπαραστήσει bits δεδομένων. Αυτές οι μεταδόσεις σήματος ονομάζονται επίσης σύμβολα (symbols). Κάθε σύμβολο μεταδίδεται για μια ορισμένη περίοδο (symbol time) και οι μεταδόσεις διαχωρίζονται με διαστήματα προστασίας (guard intervals) [27].

Το 802.11ax ορίζει τη διαμόρφωση 1024-QAM που υποστηρίζει μετάδοση δέκα bit τη φορά, αυξάνοντας τον ρυθμό δεδομένων κατά 25% σε σύγκριση με το 802.11ac. Αυτό το σχήμα διαμόρφωσης είναι πιο ευαίσθητο στο θόρυβο, επομένως μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εάν η ποιότητα του καναλιού είναι αρκετά καλή.

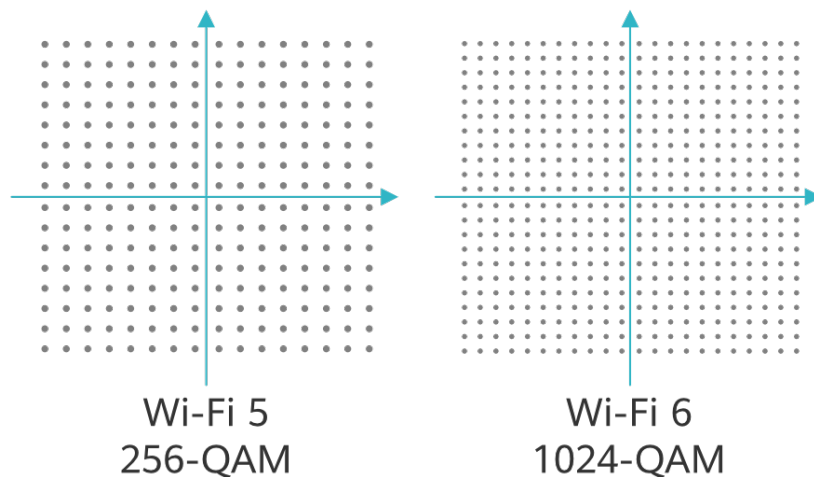
1.4.6.1 Constellation diagram

Για την αναπαράσταση της διαμόρφωσης QAM, συχνά χρησιμοποιείται ένα διάγραμμα δύο διαστάσεων, γνωστό ως constellation diagram (διάγραμμα αστερισμών) ή constellation map. Χωρίζεται σε τέσσερα τεταρτημόρια όπου διαφορετικές θέσεις αναπαριστούν bits δεδομένων. Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά τις μετατοπίσεις φάσης (phase shifts), ενώ ο κατακόρυφος τις μετατοπίσεις πλάτους (amplitude shifts). Ο αριθμός των σημείων στο διάγραμμα καθορίζει τον αριθμό των bits που μεταφέρονται με κάθε σύμβολο. Για παράδειγμα, ένα διάγραμμα με τέσσερα σημεία, αντιπροσωπεύει ένα σχήμα διαμόρφωσης που μπορεί να κωδικοποιήσει χωριστά και τους 4 συνδυασμούς δύο bits: 00, 01, 10 και 11, και έτσι μπορεί να μεταδώσει δύο bits ανά symbol. Αντίστοιχα ένα διάγραμμα με 16 σημεία (Εικόνα 29. 16-QAM), αντιπροσωπεύει μεταδόσεις με 16 διαφορετικές καταστάσεις φάσης και πλάτους του σήματος (symbols), οι οποίες μεταφράζονται στον παραλήπτη σε σειρές των 4 bits.



Εικόνα 29. 16-QAM (4 bits/symbol)

Η Εικόνα 30 δείχνει μια σύγκριση διαγραμμάτων μεταξύ διαμόρφωσης 256-QAM και 1024-QAM. Όπως φαίνεται, στη διαμόρφωση 1024-QAM υπάρχει πολύ μεγαλύτερο πλήθος συμβόλων. Σε ιδανικές συνθήκες όπου ένας μεμονωμένος σταθμός βρίσκεται κοντά στο AP, μπορεί επιφέρει μέχρι και 25% αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης.



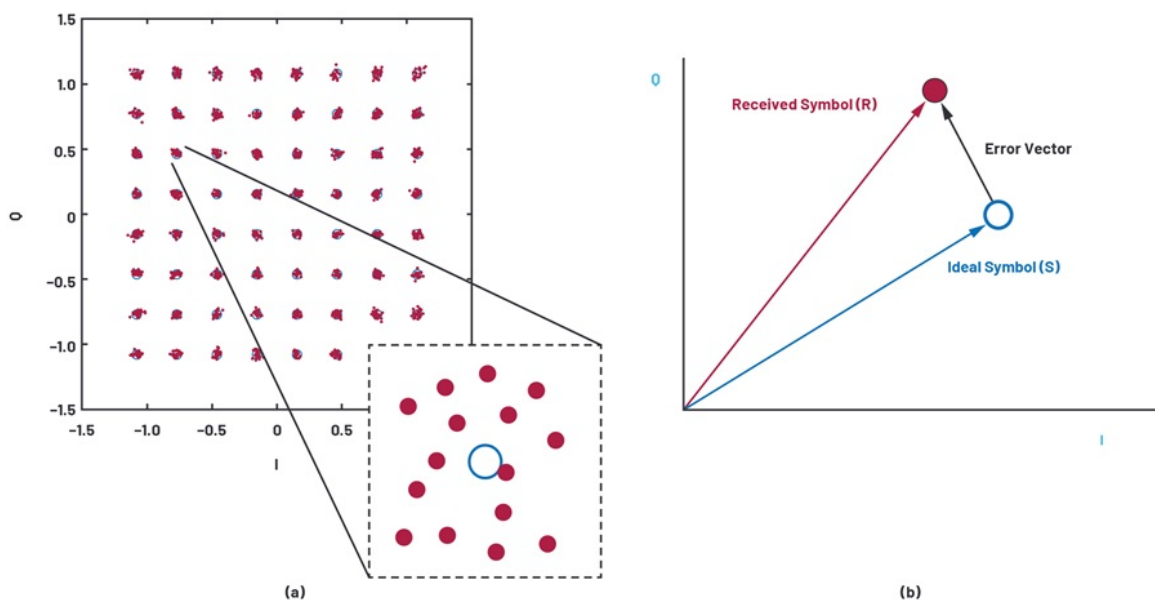
Εικόνα 30. 256-QAM και 1024-QAM

1.4.6.2 Error Vector Magnitude (EVM)

Το όφελος από ένα σχήμα διαμόρφωσης που έχει περισσότερες καταστάσεις είναι ότι κάθε κατάσταση μπορεί να αντιπροσωπεύει περισσότερα bits. Επίσης, το φέρων σήμα (carrier) πρέπει να διαμορφώνεται λιγότερο συχνά για να μεταδίδει τα ίδια bits. Το πρόβλημά με τη χρήση ενός

πιο περίπλοκου σχήματος διαμόρφωσης είναι ότι το σήμα είναι πιο επιρρεπές σε σφάλματα από διάφορες ατέλειες στην μετάδοση του σήματος (όπως διαρροή φορέα, θόρυβος φάσης κ.λπ.).

Το μέγεθος του διανύσματος σφάλματος ή EVM, χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης ενός ψηφιακού ραδιοπομπού ή δέκτη. Ένα ιδανικό σήμα, χωρίς ατέλειες, θα έχει όλα τα σύμβολά του στο constellation diagram ακριβώς στις αναμενόμενες θέσεις. Ωστόσο, πλήθος από ατέλειες προκαλούν τα παρέκκλιση των συμβόλων από τις ιδανικές τοποθεσίες (Εικόνα 31).



Εικόνα 31. Constellation diagram και EVM

Η μέτρηση της απόδοσης ραδιοσυχνοτήτων απαιτεί επιμέρους μετρήσεις όπως ο αριθμός θορύβου, το σημείο αναχαίτισης τρίτης τάξης και η αναλογία σήματος προς θόρυβο. Το EVM είναι μια μέτρηση για την ποσοτικοποίηση του συνδυασμού όλων των βλαβών σήματος σε ένα σύστημα και προσφέρει μια συνολική εικόνα της απόδοσης [30].

Το EVM είναι η διαφορά μεταξύ των πραγματικών ληφθέντων συμβόλων και των ιδανικών συμβόλων. Υπολογίζεται ως η ρίζα του μέσου τετραγώνου του διανύσματος σφάλματος, κανονικοποιημένο σε ιδανική αναφορά πλάτους σήματος. Το EVM συχνά εκφράζεται σε dB. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα αποδεκτά όρια EVM για QAM 16, 64, 256 και 1024 συμβόλων [15].

Πίνακας 6. Όρια EVM ανά διαμόρφωση σήματος

Modulation Scheme	EVM Specifications
16-QAM	-19 dB
64-QAM	-27 dB
256-QAM	-32 dB
1024-QAM	-35 dB

Το EVM σχετίζεται στενά με το ποσοστό σφάλματος bit (Bit Error Rate, BER). Όταν τα λαμβανόμενα σύμβολα ξεπερνούν το όριο του αποδεκτού EVM τότε συνήθως αυξάνεται και το BER. Μια σημαντική διάκριση μεταξύ BER και EVM είναι ότι το BER υπολογίζεται με βάση τα εκπεμπόμενα και τα ληφθέντα bit, ενώ το EVM υπολογίζεται με βάση την απόσταση του πλησιέστερου σημείου αστερισμού του συμβόλου και τη θέση του συμβόλου. Αυτές οι δύο μετρήσεις μπορεί να μη βρίσκονται πάντα σε απόλυτη αναλογία.

1.4.6.3 Modulation στο 802.11ax

Η τροποποίηση 802.11ax εισάγει νέες τεχνικές διαμόρφωσης πέραν των παλαιού τύπου BPSK, 16-QAM, 64-QAM και 256-QAM [10].

Το πρώτο είναι το 1024-QAM [27] όπου κάθε σύμβολο μεταδίδει δεδομένα 10 bits ($2^{10} = 1024$), επεκτείνοντας το 802.11ac (Wi-Fi 5) που χρησιμοποιεί 256-QAM, όπου κάθε σύμβολο μεταδίδει δεδομένα 8 bits ($2^8 = 256$). Μπορεί να αξιοποιηθεί σε σενάρια εσωτερικού χώρου με πολύ καλές συνθήκες καναλιού (δηλαδή υψηλό SNR) και να επιτύχει μέγιστο ρυθμών δεδομένων 9.6 Gbps. Ένας τέτοιος υψηλός ρυθμός επιτυγχάνεται όταν τα δεδομένα μεταδίδονται στο υψηλότερο coding rate 5/6, σε κανάλι 160 MHz ή 80+80 MHz με 8 χωρικές ροές και GI 0.8 μs, αποδίδοντας αύξηση του throughput κατά 25% σε σχέση με το 802.11ac. Στο IEEE 802.11ax, εισάγονται μεγαλύτεροι χρόνοι συμβόλων 12.8 μs και διαστήματα προστασίας (3.2μs, 1.6μs ή 0,8 μs) [28]. Όταν χρησιμοποιείται OFDM ο χρόνος συμβόλου είναι 3.2 μs, ενώ όταν χρησιμοποιείται OFDMA διαρκούν τέσσερις φορές περισσότερο, 12.8 μs. Τα μεγαλύτερα σύμβολα παρέχουν τον

χρόνο που απαιτείται για να γίνουν δυνατές άλλες ευεργετικές λειτουργίες όπως το MU-OFDMA. Όταν συνδυάζεται με OFDMA, το 1024 QAM βελτιώνει σημαντικά το όριο θορύβου, επιτρέποντας μια αύξηση 25% στην φασματική απόδοση [28].

Επιπλέον, η τροποποίηση 802.11ax περιγράφει μια προαιρετική διαμόρφωση διπλού φορέα (Dual Carrier Modulation, DCM) [29]. Το DCM ενισχύει την ευρωστία της μετάδοσης εκχωρώντας το ίδιο σήμα σε ένα ζεύγος τόνων, οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους στον τομέα της συχνότητας. Αυτή η τεχνική βοηθά στην αντιμετώπιση παρεμβολών υποζώνης (sub-band interference) και παρέχει περισσότερο από 2dB κέρδος στην απόδοση του PER [29]. Λόγω διπλών μεταδόσεων, η χρήση του DCM μειώνει τον ρυθμό δεδομένων δύο φορές, περιορίζοντας τη χρήση του σε εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλής αξιοπιστίας και όχι υψηλού ρυθμού δεδομένων (MCS0, MCS1, MCS3 και MCS4) [10].

1.4.6.4 Διόρθωση σφαλμάτων

Το Forward Error Correction (FEC) βοηθά έναν δέκτη να ανιχνεύσει και ενδεχομένως να διορθώσει τα σφάλματα μετάδοσης. Η πηγή εισάγει πλεονασμό (redundancy) στη μετάδοσή της έτσι ώστε ο δέκτης να μπορεί να εντοπίσει τα λανθασμένα σύμβολα και, ιδανικά, να τα διορθώσει. Πιο συγκεκριμένα, οι κώδικες συνέλιξης κωδικοποιούν m bit πληροφοριών σε ένα σύμβολο n bit. Όσο μεγαλύτερο είναι το n από το m τόσο βελτιώνεται η εκσφαλμάτωση. Κάθε μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου MAC επεξεργάζεται ανεξάρτητα και μια αποτυχία μετάδοσης σημαίνει ότι το αντίστοιχο πλαίσιο πρέπει να αναμεταδοθεί εξ ολοκλήρου [1].

Οι δυαδικοί κωδικοί συνέλιξης (Binary Convolution Codes, BCC) και ο έλεγχος ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Parity Check, LDPC) είναι δύο κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων FEC που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της πιθανότητας απώλειας δεδομένων σε θορυβώδη κανάλια. Οι BCC χρησιμοποιούνται για RUs το πολύ 242 τόνων, δηλαδή για κανάλια 20 MHz. Το LDPC χρησιμοποιείται από το 802.11ax στα MCS 10 και 11 και γενικώς για RUs μεγαλύτερες των 242 τόνων και κανάλια μεγαλύτερα των 20 MHz [32].

1.4.7 Πίνακας MCS

Ο δείκτης Modulation and Coding Scheme (MCS) είναι μια μέτρηση που βασίζεται σε διάφορες παραμέτρους μιας σύνδεσης Wi-Fi μεταξύ δύο σταθμών. Απεικονίζει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (σε Mbps) σε σχέση με τις παραμέτρους της μετάδοσης (MCS rates). Οι παράμετροι είναι ο τύπος διαμόρφωσης (modulation type), ο ρυθμός κωδικοποίησης (coding rate), ο αριθμός χωρικών ροών (spatial streams), το πλάτος του καναλιού (channel width), το διάστημα προστασίας (guard interval) και τον αν χρησιμοποιηθεί OFDM ή OFDMA. Για κάθε πιθανό συνδυασμό αυτών των παραμέτρων, υπάρχει ένας μοναδικός δείκτης MCS. Μόλις γίνουν γνωστές όλες οι παράμετροι σύνδεσης, κάθε συσκευή εκπομπής, είτε είναι AP είτε STA, θα λάβει μια εσωτερική απόφαση για το ποιο MCS θα χρησιμοποιήσει. Επιλογή χαμηλού MCS (κάτω από 4) υποδηλώνει ότι ένας σταθμός αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις με το περιβάλλον RF του. Το 802.11ax έχει εισαγάγει σχεδόν 3000 νέους πιθανούς ρυθμούς δεδομένων. Ένας πλήρης πίνακας MCS για το πρωτόκολλο 802.11ax υπάρχει στη διεύθυνση <https://mcsindex.com/>.

Παράμετροι MCS

Τύπος διαμόρφωσης (Modulation type): η διαμόρφωση φάσης και πλάτους για κωδικοποίηση bit. Οι πιο προηγμένες διαμορφώσεις (π.χ. 256 QAM) μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες, αλλά είναι επίσης πιο επιρρεπείς στον θόρυβο.

Ρυθμός κωδικοποίησης (Coding rate): πόσα bit μεταφέρουν πληροφορίες και πόσα χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση σφαλμάτων. Κωδικοποίηση 1/2 σημαίνει ότι δύο bit μεταφέρονται και ένα λαμβάνεται. Οι υψηλότερες τιμές (π.χ. 5/6) μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες, αλλά υπάρχει λιγότερος χώρος για διόρθωση σφαλμάτων.

Χωρικές ροές (Spatial streams): πόσες ανεξάρτητες ροές δεδομένων χρησιμοποιούνται. Οι υψηλότερες τιμές (π.χ. 4 ροές) αυξάνουν τους ρυθμούς δεδομένων, αλλά είναι επιρρεπείς σε θόρυβο και παρεμβολές.

Πλάτος καναλιού (Channel width): το εύρος του καναλιού που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία, π.χ. 20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz. Τα ευρύτερα κανάλια μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, αλλά ο διπλασιασμός του πλάτους του καναλιού αυξάνει το επίπεδο θορύβου κατά 3 dB, γεγονός που μειώνει το SNR.

Διάστημα φύλαξης (Guard interval): η παύση μεταξύ κάθε μετάδοσης πακέτου. Το 802.11n έχει 400 ns ενώ το 802.11ac έχει 800 ns. Οι μικρές παύσεις επιτρέπουν τη μετάδοση περισσότερων πακέτων, αλλά αυξάνουν τις πιθανότητες παρεμβολών.

Ελάχιστο SNR και RSSI: Καθορίζει το ελάχιστο SNR (Signal-to-Noise Ratio) και RSSI (Received Signal Strength Indicator, ένδειξη ισχύος λαμβανόμενου σήματος) που απαιτούνται για έναν συγκεκριμένο δείκτη MCS.

Το RSSI είναι μια σχετική μέτρηση που προσδιορίζει εάν το λαμβανόμενο σήμα είναι αρκετά ισχυρό για μια καλή ασύρματη σύνδεση από τον πομπό. Το RSSI μετριέται σε dBm και η τιμή του είναι αρνητική. Όσο πιο κοντά είναι η τιμή RSSI στο μηδέν, το λαμβανόμενο σήμα είναι ισχυρότερο. Εκτός από την ισχύ εξόδου του πομπού, οι ακόλουθοι παράγοντες επηρεάζουν κυρίως το RSSI: Απώλεια διαδρομής (Path loss), Κέρδος κεραίας (Antenna gain), Απώλεια καλωδίου/βύσματος (Cable/connector loss).

Το SNR, που συχνά γράφεται ως S/N, είναι ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς το επίπεδο θορύβου (noise floor). Το SNR μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο και συχνά εκφράζεται σε decibels (dB):

$$\text{SNR (dB)} = P_{\text{signal}} \text{ (dBm)} / P_{\text{noise}} \text{ (dBm)}$$

όπου P είναι η μέση ισχύς. Τόσο η ισχύς σήματος όσο και η ισχύς θορύβου πρέπει να μετρώνται στα ίδια ή ισοδύναμα σημεία ενός συστήματος.

Αν το RSSI είναι πάνω από το noise floor, ο δέκτης μπορεί εύκολα να αποδιαμορφώσει το σήμα.

Modulation Scheme: Καθορίζει τη φάση (phase) και το amplitude που απαιτούνται για τον υπολογισμό bit, από BPSK σε QPSK έως 16-QAM, 64-QAM και 256-QAM.

Η προσθήκη της διαμόρφωσης 1024-QAM (10 bits per symbol) στο 802.11ax, εισήγαγε 2 νέα ευρετήρια (indices) στον πίνακα MCS:

- Index 10: όταν χρησιμοποιείται η διαμόρφωση 1024-QAM με κωδικοποίηση 3/4
- Index 11: όταν χρησιμοποιείται η διαμόρφωση 1024-QAM με κωδικοποίηση 5/6

Ο Πίνακας 7 [33] παρουσιάζει τους ρυθμούς δεδομένων (data rates) σε Mbps για επικοινωνίες 802.11ax όταν χρησιμοποιείται OFDM με 1, 2 ή 3 Spatial Streams:

Υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων

Καθώς κάθε πρότυπο 802.11 εισάγει τις δικές του καινοτομίες, οι τυπικοί παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό data rate ποικίλουν. Για τα 802.11n (HT) και 802.11ac (VHT) ο τύπος είναι κοινός [48]:

$$\text{Data Rate} = \frac{N_{SD} * N_{BPSCS} * R * N_{SS}}{T_{DFT} + T_{GI}}$$

Number of Data Subcarriers *Number of Coded Bits per Subcarrier per Stream* *Coding* *Number of Spatial Streams*
OFDM Symbol Duration *Guard Interval Duration*

Οι τιμές που μπορούν να πάρουν οι παραπάνω στα δύο πρότυπα είναι [48]:

Πίνακας 9. Παράμετροι HT και VHT OFDM

PHY	Modulation		R	N _{SS}	N _{SD}				T _{DFT}	T _{GI}	
	Name	N _{BPSCS}			20MHz	40MHz	80MHz	160MHz		Long	Short
802.11n (HT)	BPSK	1	1/2	1 to 4	52	108	234	468	3.2 μs	0.8 μs	0.4 μs
	QPSK	2	1/2 & 3/4								
	16-QAM	4	1/2 & 3/4								
802.11ac (VHT)	64-QAM	6	1/2 & 2/3 & 3/4	1 to 8	52	108	234	468	3.2 μs	0.8 μs	0.4 μs
	BPSK	1	1/2								
	QPSK	2	1/2 & 3/4								
	16-QAM	4	1/2 & 3/4								
	256-QAM	8	1/2 & 2/3 & 5/6								

Ο παραπάνω τύπος αλλάζει στο 802.11ax (HE), καθώς οι νέες δυνατότητες που εισάγει επηρεάζουν τον τρόπο υπολογισμού του. Οι δυνατότητες αυτές είναι:

- Νέα διάρκεια συμβόλου: 12.8μs
- Χρησιμοποιούνται διαφορετικά GI: 0.8μs, 1.6μs και 3.2μs
- Διαφορετικό μέγεθος και αριθμός των subcarriers, σε συνδυασμό με τα διαφορετικά μεγέθη RU που εισήγαγε το OFDMA.

Το IEEE ορίζει 2 διαφορετικούς τύπους ανάλογα με το εάν χρησιμοποιείται ή όχι το OFDMA. Όταν το OFDMA δεν χρησιμοποιείται, ο τύπος αυτός που παρουσιάστηκε προηγουμένως και οι τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές στο HE (802.11ax) είναι [48]:

Πίνακας 10. Παράμετροι HE OFDM

PHY	Modulation		R	N _{SS}	N _{SD}				T _{DFT}	T _{GI}		
	Name	N _{BPSCS}			20MHz	40MHz	80MHz	160MHz		Long	Medium	Long
802.11ax (HE)	BPSK	1	1/2	1 to 8	234	468	980	1960	12.8 μs	0.8 μs	1.2 μs	3.2 μs
	QPSK	2	1/2 & 3/4									
	16-QAM	4	1/2 & 3/4									
	64-QAM	6	1/2 & 2/3 & 3/4									
	256-QAM	8	2/3 & 5/6									
1024-QAM	10	3/4 & 5/6										

Όταν χρησιμοποιείται το OFDMA ο τύπος αλλάζει καθώς ορίζεται πλέον ο αριθμός Subcarriers ανά RU και όχι ανά κανάλι [48]:

$$\text{Data Rate} = \frac{N_{SD,U} * N_{BPSCS,U} * R * N_{SS}}{T_{DFT} + T_{GI}}$$

Number of Data Subcarriers per Resource Unit
 Number of Coded Bits per Subcarrier per Stream for the Resource Unit
 Coding
 Number of Spatial Streams

OFDM Symbol Duration
 Guard Interval Duration

Ο παρακάτω πίνακας [48] περιγράφει τις τιμές των μεταβλητών χρησιμοποιείται το OFDMA.

Πίνακας 11. Παράμετροι HE OFDMA

PHY	Modulation		R	N _{SS}	N _{SD}						T _{DFT}	T _{GI}		
	Name	N _{BPSCS}			26-tone	52-tone	106-tone	242-tone	484-tone	996-tone		Long	Medium	Long
802.11ax (HE)	BPSK	1	1/2	1 to 8	24	48	102	234	468	980	12.8 μs	0.8 μs	1.2 μs	3.2 μs
	QPSK	2	1/2 & 3/4											
	16-QAM	4	1/2 & 3/4											
	64-QAM	6	1/2 & 2/3 & 3/4											
	256-QAM	8	2/3 & 5/6											
1024-QAM	10	3/4 & 5/6												

2. Χρήση του 802.11ax στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελείται από έναν ήδη τεράστιο και διαρκώς αυξανόμενο αριθμό κόμβων, με εφαρμογές που καλύπτουν σταδιακά όλο και μεγαλύτερο φάσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Τον όρο Internet of Things (IoT) χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το 1999, το MIT Auto-ID center, όπου τα «πράγματα» μπορεί να είναι οποιοδήποτε φυσικό αντικείμενο που στέλνει δεδομένα και επικοινωνεί με ένα δίκτυο [49]. Οι πρώτες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν ήταν συστήματα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency identification, RFID) που επέτρεπαν στα αντικείμενα να επικοινωνούν με άλλα αντικείμενα ή έναν διακομιστή χωρίς ανθρώπινη αλληλεπίδραση [50]. Από τότε οι λύσεις IoT επεκτάθηκαν σε εφαρμογές όπως:

- Σε οικιακές εφαρμογές για έλεγχο έξυπνου σπιτιού σε τομείς όπως ο φωτισμός, η ασφάλεια, η άνεση, η βελτιστοποιημένη χρήση ενέργειας κ.ά.
- Στη βιομηχανία για smartmeters, Wear-out sensors, Manufacturing control, Climate control
- Σε αυτοκινητοβιομηχανίες για στάθμευση, έλεγχο ροής κυκλοφορίας, αντικλεπτικές συσκευές, εντοπισμό τοποθεσίας κ.λπ.
- Στο περιβάλλον για παρακολούθηση ειδών, πρόβλεψη καιρού και διαχείριση πόρων .
- Στη γεωργία για διαχείριση καλλιεργειών και ανάλυση εδάφους.
- Στο στρατό για κατανομή πόρων, ανάλυση απειλών, παρακολούθηση στρατευμάτων κ.λπ.
- Στην ιατρική βιομηχανία για φορητές συσκευές, εμφυτευμένες συσκευές και υπηρεσίες τηλε-υγείας.
- Στη λιανική για παρακολούθηση προϊόντων, έλεγχο αποθέματος, εστιασμένο μάρκετινγκ κ.λπ.

Βασικά στοιχεία αυτών των χαρακτηριστικών συσκευών IoT είναι η δυνατότητα των αισθητήρων, των ελεγκτών, των ενεργοποιητών και των οθονών να επικοινωνούν μέσω της κοινής πλατφόρμας του Διαδικτύου. Καθώς η ενσύρματη σύνδεση, όπως μέσω Ethernet ή οπτικών ινών, δεν είναι βιώσιμη για πολλές εφαρμογές και περιβάλλοντα, η πιο ευέλικτη εναλλακτική λύση είναι η χρήση μεθόδων ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ μιας συσκευής IoT και ενός ασύρματου διανομέα. Η δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας είναι επιβεβλημένη για

πολλές εφαρμογές όπως η ιατρική παρακολούθηση ασθενών, η παρακολούθηση της θέσης και της κατάστασης κινητών και ακίνητων περιουσιακών στοιχείων στους χώρους του εμπορίου, της βιομηχανίας, της γεωργίας, του αστικού περιβάλλοντος κλπ.

2.1 Κριτήρια επιλογής ασύρματης τεχνολογίας για IoT

Για την βέλτιστη αξιοποίηση του IoT απαιτούνται διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες ανά περίπτωση χρήσης, ενώ πολλές φορές εφαρμόζεται συνδυασμός τους. Για παράδειγμα, ένα έξυπνο σύστημα αυτοκινήτου που συνδέεται στο internet ή χρησιμοποιεί πλοήγηση GPS μπορεί να χρειάζεται 4G LTE για να επικοινωνεί με τον έξω κόσμο και Wi-Fi και Bluetooth για να επικοινωνεί με συσκευές όπως τηλέφωνα και συστήματα ψυχαγωγίας πίσω καθισμάτων (rear seat entertainment, RSE) που χρησιμοποιούν οι επιβάτες [58].

Δεν υπάρχει ασύρματη τεχνολογία που να ικανοποιεί όλες τις εφαρμογές IoT. Για παράδειγμα, το Bluetooth Low Energy και το IEEE 802.15.4 είναι καλές επιλογές για αισθητήρες που τροφοδοτούνται από μπαταρία, αλλά όχι για συσκευές που κινούνται συνεχώς ή δεν βρίσκονται κοντά σε LAN (τοπικό δίκτυο) ή σε Wi-Fi (AP). Τέτοιες ασύρματες τεχνολογίες σχετικά μικρής εμβέλειας δεν είναι κατάλληλες για σύνδεση στο Διαδίκτυο.

Ακόμα κι αν υπάρχει δίκτυο Wi-Fi, οι κατασκευαστές μπορεί να προτιμούν ασύρματη τεχνολογία μεγαλύτερης εμβέλειας για την ευκολία και την αυτονομία της. Για παράδειγμα, ένας κατασκευαστής οικιακών συσκευών θα μπορούσε να επιλέξει Cellular, LPWAN ή Narrowband IoT σύνδεση αντί για Wi-Fi, επειδή επιτρέπει σε ένα ψυγείο ή ένα πλυντήριο ρούχων να συνδεθεί αυτόματα στο Cloud, εξαλείφοντας την ανάγκη για τον καταναλωτή να εισάγει έναν κωδικό πρόσβασης για να προσθέσει τη συσκευή στο Wi-Fi του σπιτιού.

Το ποια τεχνολογία συνδεσιμότητας είναι καταλληλότερη για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις κάθε περίπτωσης. Οι απαιτήσεις μπορεί να είναι [52]:

- Τεχνικές απαιτήσεις: κάλυψη, ενεργειακή απόδοση, ρυθμός δεδομένων, mobility, latency, πυκνότητα.
- Εμπορικές απαιτήσεις: κόστος, αξιοπιστία, ασφάλεια, επεκτασιμότητα.

- Απαιτήσεις οικοσυστήματος: future-proofness, παγκόσμια εμβέλεια και διαλειτουργικότητα.

Ειδικότερα μερικά από τα βασικά κριτήρια κατά την επιλογή αυτών των διαφορετικών λύσεων είναι τα παρακάτω:

Το φάσμα (spectrum)

Το ασύρματο φάσμα συχνοτήτων μπορεί να χαρακτηριστεί είτε ως αδειοδοτημένο (licensed) είτε ως μη αδειοδοτημένο (unlicensed). Η πρόσβαση σε αδειοδοτημένο φάσμα αγοράζεται συνήθως από μια τοπική κυβέρνηση για να παρέχει σε έναν οργανισμό αποκλειστική πρόσβαση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η λειτουργία σε αυτό το κανάλι θα πρέπει να είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένη από παρεμβολές από άλλες μεταδόσεις. Το μειονέκτημα είναι ότι το επιθυμητό φάσμα μπορεί να είναι σπάνιο ή ακριβό. Επιπλέον, οι ζώνες φάσματος που επιτρέπονται σε μια χώρα ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες σε άλλη γεωγραφική περιοχή για την ίδια χρήση. Για παράδειγμα, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στην Ινδία χρησιμοποιούν τις ζώνες συχνοτήτων 900 MHz και 1800 MHz, ενώ οι φορείς κινητής τηλεφωνίας GSM (Global System for Mobile Communications) στις Ηνωμένες Πολιτείες λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων 850 MHz και 1900 MHz. Αυτό κάνει την ανάπτυξη IoT συσκευών για παγκόσμια χρήση δαπανηρή και χρονοβόρα καθώς θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε πολλές διαφορετικές συχνότητες και επιπλέον να λάβει έγκριση λειτουργίας.

Το μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι ανοιχτό και διαθέσιμο σε οποιονδήποτε για οποιαδήποτε χρήση. Το μειονέκτημα είναι ότι ανταγωνιστικά συστήματα μπορεί να καταλαμβάνουν το ίδιο κανάλι με διαφορετικά επίπεδα ισχύος που οδηγούν σε παρεμβολές. Οι κατασκευαστές συστημάτων που λειτουργούν σε ζώνες χωρίς άδεια αναγκάζονται να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους με τεχνικές όπως προσαρμοστική διαμόρφωση (adaptive modulation), αυτόματο έλεγχο ισχύος μετάδοσης κ.ά.

Εμβέλεια και χωρητικότητα

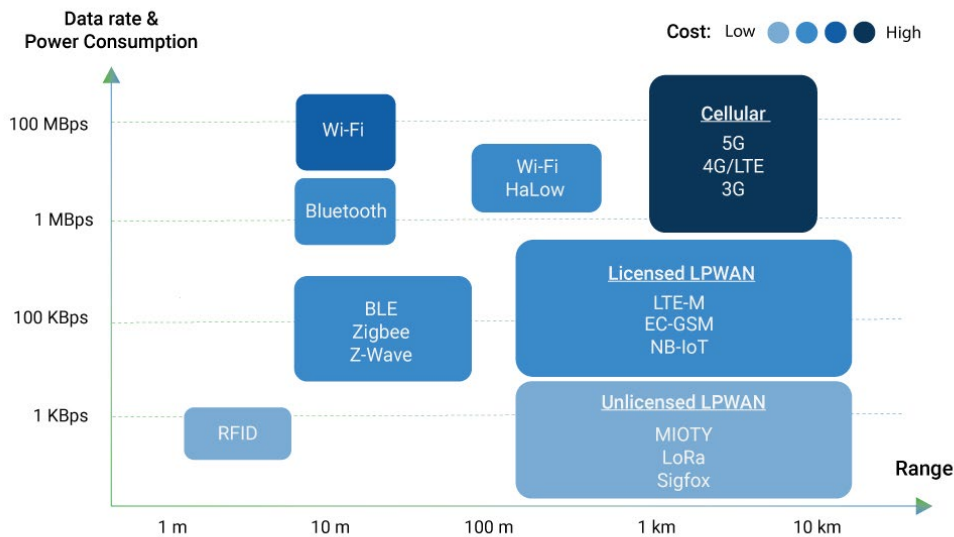
Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τον όγκο δεδομένων που μπορεί να παραδοθεί σε μια συγκεκριμένη απόσταση. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν το φάσμα, το εύρος ζώνης καναλιού, την ισχύ του πομπού, το έδαφος και τα φυσικά εμπόδια, την οπτική επαφή, τον θόρυβο και το μέγεθος της κεραίας. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση, τόσο μικρότερη

είναι η χωρητικότητα δεδομένων. Για βέλτιστη απόδοση για κάθε εφαρμογή, θα πρέπει να επιλεχθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των παραπάνω.

Η μεγαλύτερη απόσταση μετάδοσης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα κανάλι στενής ζώνης χαμηλής συχνότητας με hi-gain κεραία, ενώ υψηλότερες χωρητικότητες θα μπορούσαν να επιτευχθούν με την επιλογή ευρύτερων καναλιών, με περιορισμένη εμβέλεια. Οι υψηλές συχνότητες πολλών gigahertz απαιτούν συνήθως οπτική επαφή (line-of-sight) ή σχεδόν οπτική επαφή (near line-of-sight). Το εύρος 1 GHz έως 6 GHz μπορεί να εγγυηθεί μεγάλη χωρητικότητα σε περιορισμένη έκταση (τοπικά δίκτυα) ενώ επηρεάζεται από πολλούς άλλους παράγοντες (παρεμβολές, εμπόδια κλπ). Κάτω από το 1 GHz η διάδοση γίνεται πολύ καλύτερη, καθιστώντας αυτές τις συχνότητες κατάλληλες για μεγαλύτερη εμβέλεια.

Οι τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας, όπως το 3G ή το 4G, αποτελούν τυπικό παράδειγμα λύσης ευρείας περιοχής με εξαιρετική εμβέλεια. Οι τεχνολογίες LPWA όπως το NB-IoT, βελτιώνουν περαιτέρω το εύρος συνδεσιμότητας χρησιμοποιώντας πιο ισχυρά σχήματα κωδικοποίησης, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για την πρόσβαση σε απομακρυσμένες περιοχές και τη διείσδυση σε βαθιά εσωτερικούς χώρους, αλλά έχουν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ως μειονέκτημα. Οι τεχνολογίες μικρής προς μεσαίας εμβέλειας, όπως το Wi-Fi, είναι κατάλληλες για τη σύνδεση πολλών συσκευών που αναπτύσσονται σε κοντινή απόσταση. Οι τεχνολογίες μικρής εμβέλειας όπως το Bluetooth Low Energy (BLE) και το ZigBee επικεντρώνονται στον ρυθμό δεδομένων και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε βάρος του εύρους σύνδεσης. Οι Sigfox και LoRa υποστηρίζουν εφαρμογές χαμηλών ρυθμών δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, εξασφαλίζοντας σε αισθητήρες με μπαταρία μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 10 χρόνια) [58].

Η Εικόνα 32 [57] περιγράφει την αντιστοιχία του ρυθμού δεδομένων και των απαιτήσεων σε ισχύ, σε σχέση με την απόσταση και τη θέση των κοινών ασύρματων τεχνολογιών σε αυτό το τοπίο.



Εικόνα 32. Σύγκριση απόστασης και ταχύτητας δεδομένων ασύρματων τεχνολογιών

Τοπολογία δικτύου

Η επιθυμητή διάταξη των στοιχείων σε ένα δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων των κόμβων του και των συνδέσεων μεταξύ τους, διαφέρει σε κάθε λύση. Οι κοινές τοπολογίες δικτύου που χρησιμοποιούνται για ασύρματη συνδεσιμότητα είναι οι παρακάτω:

Point-to-point: Οι τοπολογίες point-to-point καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις που είναι λιγότερο επιρρεπείς σε παρεμβολές, με μικρότερες κεραιές, ώστε η ενέργεια να μπορεί να εστιαστεί προς την κατεύθυνση της επιθυμητής μετάδοσης. Χρησιμοποιούνται επίσης για συνδέσεις μικρής εμβέλειας με το backbone της ενσύρματης γραμμής.

Mesh networks: Είναι δίκτυα πλέγματος που κατασκευάζοντας χρησιμοποιώντας πολλαπλές point-to-point συνδέσεις παρέχοντας τη δυνατότητα για πολλαπλές διαδρομές από το σημείο A στο σημείο B με αντίτιμο την καθυστέρηση μετάδοσης λόγω των πολλαπλών μεταπηδήσεων (hops) από κόμβο σε κόμβο για τη μετάδοση ενός πακέτου. Τα δίκτυα πλέγματος είναι πιο ανθεκτικά, καθώς η αστοχία μιας συσκευής δεν προκαλεί διακοπή στο δίκτυο ή τη μετάδοση των δεδομένων. Επίσης, διευκολύνεται η προσθήκη νέων κόμβων χωρίς να απαιτείται επαναρρύθμιση του υπόλοιπου δικτύου.

Ring: Οι τοπολογίες δακτυλίου είναι συνδέσεις υψηλής χωρητικότητας που καλύπτουν μεγάλες περιοχές. Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται συνήθως backhaul δίκτυα.

Point-to-multipoint (ή star): Ένας κεντρικός κόμβος ή διανομέας (hub) επικοινωνεί με πολλούς, έως και εκατοντάδες σε ορισμένες περιπτώσεις τερματικούς κόμβους. Συχνά κλιμακώνονται στον αριθμό των κόμβων, δημιουργώντας κυψέλες (cells) που γειτνιάζουν χωρίς παρεμβολές.

Quality of Service (QoS)

Σε πολλές περιπτώσεις, ένα δίκτυο καλείται να υποστηρίξει πολλαπλά επίπεδα προτεραιότητας στα διακινούμενα πακέτα.

Κεντρική Διαχείριση Δικτύου

Η δυνατότητα διαχείρισης ενός δικτύου έχει άμεσο αντίκτυπο στο συνολικό κόστος ενός συστήματος IoT. Τα δίκτυα που επιτρέπουν κεντρική διαχείριση για τον εντοπισμό σφαλμάτων, τον συντονισμό απόδοσης και τη συνεχή παρακολούθηση και την επικύρωση ασφαλείας, ελαχιστοποιούν το κόστος και μειώνουν τις απρογραμματίστες διακοπές λειτουργίας, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

Ασφάλεια

Η ασφάλεια των ασύρματων επικοινωνιών γίνεται όλο και πιο επιβεβλημένη. Η δυνατότητα κρυπτογράφησης της επικοινωνίας και των over-the-air (OTA) ενημερώσεων είναι επιτακτική όχι μόνο για την ευρωστία του συστήματος αλλά και για την διευκόλυνση της αποδοχής και της υιοθέτησης των συνήθως καινοτόμων και πρωτότυπων IoT λύσεων από τους τελικούς χρήστες.

Ενεργειακή επάρκεια

Οι τεχνολογίες μικρής εμβέλειας όπως το ZigBee βασίζονται στην τοπολογία πλέγματος για την προώθηση μηνυμάτων από τη μια συσκευή στην άλλη με πολλαπλές αναπηδήσεις. Με αυτόν τον τρόπο το ZigBee μπορεί να επεκτείνει την κάλυψή του, αλλά μπορεί να εξαντλήσει τις μπαταρίες πιο γρήγορα, καθώς μια μεμονωμένη συσκευή πρέπει συνεχώς να ακούει και να είναι έτοιμη να αναμεταδίδει μηνύματα. Οι τεχνολογίες ευρείας περιοχής, όπως το 2G, βασίζονται στην τοπολογία αστεριών και διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος της ευφυΐας και της πολυπλοκότητας στον σταθμό βάσης όπου η παροχή ρεύματος δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Οι τεχνολογίες LPWA, όπως το NB-IoT, μειώνουν περαιτέρω την κατανάλωση

ενέργειας μειώνοντας το overhead στο ελάχιστο, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

2.2 Πρότυπα ασύρματης σύνδεσης που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT

Καθώς ο αριθμός των πραγμάτων ή των συσκευών που πρέπει να συνδεθούν αυξάνεται, η συνδεσιμότητα τους γίνεται σημαντικό ζήτημα. Ένα μεγάλο πλήθος από ενσύρματα αλλά κυρίως ασύρματα πρότυπα/πρωτόκολλα έχει υιοθετηθεί ή αναπτυχθεί ή αναπτύσσεται για να καλύψει τις ανάγκες του IoT. Για παράδειγμα, για συνδέσεις μικρής εμβέλειας χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi HaLow [51], ενώ για συνδέσεις μεγάλης εμβέλειας χρησιμοποιούνται τεχνολογίες όπως LTE και 5G και αδειοδοτημένα και μη αδειοδοτημένα LPWAN (Low-Power Wide Area Networks) [58].

Στην κατηγορία των WLAN το πρότυπο IEEE 802.11ah (WiFi HaLow) εισήχθη το 2017 αποκλειστικά για να υποστηρίξει το IoT, με εκτεταμένη κάλυψη και απαιτήσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Λειτουργεί στις μη αδειοδοτημένες ζώνες κάτω του 1 GHz (εξαιρουμένων των ζωνών του τηλεοπτικού λευκού χώρου) και το εύρος ζώνης του είναι συνήθως 1 MHz ή 2 MHz, ενώ σε ορισμένες χώρες επιτρέπονται και μεγαλύτερα εύρη ζώνης έως 16 MHz. Σε σύγκριση με τις γενιές Wi-Fi υψηλής ταχύτητας, το IEEE 802.11ah στοχεύει να παρέχει συνδεσιμότητα σε χιλιάδες συσκευές με κάλυψη έως και 1 km, αλλά ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων του είναι περίπου 300 Mbps όταν χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 16 MHz.

Άλλες ανάγκες όπως η κατανάλωση ενέργειας, ο ρυθμός δεδομένων, η ασφάλεια και το κόστος οδηγούν σε ακόμα περισσότερες επιλογές.

Ο Πίνακας 12 [52] παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά κάποιων από τα συνηθέστερα πρότυπα ασύρματης σύνδεσης που χρησιμοποιούνται στο IoT, ομαδοποιημένα σύμφωνα με τα τρία βασικά κριτήρια επιλογής τους, τις τεχνικές απαιτήσεις, τις εμπορικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις του οικοσυστήματος:

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά ασύρματων πρότυπων IoT

Technical considerations	Traditional cellular				Cellular LPWA		Proprietary LPWA		Short Range			
	2G	3G	4G	5G	LTE-M	NB-IoT	Sigfox	LoRa	Wi-SUN	Wi-Fi	ZigBee	Bluetooth LE
Outdoor device radio range	>10km	>10km	>10km	500m – 10km	>10km	>15km	>15km	>10km	2-3km	<=250m	<300m	<100m
Indoor coverage	Medium	Low	Medium	Low	Medium	High	High	High	High	High	High	High
Energy efficiency	2-5 years	<10 days	<10 days	<10 days	~10 years	~10 years	10-20 years	10-20 years	~10 years	<10 days	6-12 months	~10 years
Typical uplink data rate	50 kbps	1 Mbps	10 Mbps	25-500 Mbps	1 Mbps	20 kbps	100 bps	25 kbps	300 kbps	<600 Mbps	250 kbps	1 Mbps
Typical downlink data rate	Low	High	Very high	Very high	Medium	Low	Limited downlink	Low in Class A	Low	Very high	Low	Low
Mobility	Very high	Very high	Very high	Very high	High	Medium	Very low	Low	Low	Low	Low	Very low
Positioning	High	Very high	Very high	Very high	Very high	High	Very low	Low	Low	Medium	Medium	Medium
Latency	500-1000 ms	200 ms	100 ms	1 ms	10-15 ms	1.6-10 s	>10 s	>10 s	20 ms	8-36 ms	<30 ms	3 ms
Device density	Medium	Medium	Medium	High	High	High	High	High	High	Low	Medium	High
Commercial considerations	Traditional cellular				Cellular LPWA		Proprietary LPWA		Short Range			
	2G	3G	4G	5G	LTE-M	NB-IoT	Sigfox	LoRa	Wi-SUN	Wi-Fi	ZigBee	Bluetooth LE
Module cost	Medium	High	High	Very High	Low	Low	Very Low	Low	Medium	Medium	Low	Very low
Subscription cost	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes/No	No	No	No	No
Deployment & maintenance cost	Very low	Very low	Very low*	Very low*	Very low	Very low	Very Low	Low	Medium	High	Medium	Very low
Reliability	High	High	High	Very High	High	Medium	Low	Low	Medium	Medium	Medium	Medium
Security	Medium	High	Very high	Very high	High	High	Low	Low	Medium	Medium	Medium	Low
Scalability	High	High	High	Very high	High	Very high	Medium	Medium	Very High	Low	Medium	Low
Ecosystem-related considerations	Traditional cellular				Cellular LPWA		Proprietary LPWA		Short Range			
	2G	3G	4G	5G	LTE-M	NB-IoT	Sigfox	LoRa	Wi-SUN	Wi-Fi	ZigBee	Bluetooth LE
Future-proofness	Medium	Low	Very high	Very high	High	High	Low	High	Medium	Very high	Medium	Very high
Global reach & interoperability	Very high	Very high	Very high	High	High	High	Medium	Low	Medium	Very high	Medium	Very high

Η πλειοψηφία των σημερινών κοινών ασύρματων προτύπων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT είναι στα 2.4 GHz, όπου η ζώνη ISM διευκολύνει τη χρήση των Bluetooth, Zigbee, Thread, WLAN και άλλα πρότυπα. Σχεδόν όλες οι εφαρμογές ασύρματου IoT χρησιμοποιούν συχνότητες κάτω των 6 GHz, με μερικές από τις υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας για το IoT να είναι το WiFi 5 GHz και το κυψελοειδές δίκτυο υψηλής ζώνης. Ωστόσο, η ανάπτυξη των IEEE 802.11ah και 802.11af και η χρήση συχνοτήτων TV White Space (TVWS) ενδέχεται να επιτρέψει ασύρματες εφαρμογές IoT σε μη κυψελοειδείς ζώνες μεταξύ 400 MHz και άνω των 700 MHz (Ηνωμένες Πολιτείες). Οι χαμηλές συχνότητες του TVWS ανοίγουν πόρτες για επικοινωνία χαμηλής ισχύος και συγκριτικά μεγάλης εμβέλειας.

Τα κριτήρια για την επιλογή ενός συγκεκριμένου προτύπου έναντι ενός άλλου είναι πολλά. Κάθε πρότυπο διαφέρει ως προς την υποδομή, τους πόρους σχεδιασμού, τους προμηθευτές, το μέγεθος της υλοποίησης, τη δυσκολία πιστοποίησης και το κόστος αδειοδότησης.

Επίσης, κάθε χώρα ή περιοχή ρυθμίζει τις ραδιοσυχνότητες με διαφορετικούς τρόπους, αν και υπάρχουν ορισμένα κοινά πρότυπα ασύρματης σύνδεσης μεταξύ ορισμένων χωρών και περιοχών. Ως εκ τούτου, ορισμένες ασύρματες συσκευές IoT λειτουργούν σε ζώνες χωρίς άδεια, ενώ άλλες σε αδειοδοτημένες και απαιτούν πρόσθετο κόστος για να λειτουργήσουν σε αυτές τις ζώνες και ενδέχεται να περιοριστούν περαιτέρω ως προς την τοποθεσία και τη λειτουργία τους από συμφωνίες αδειοδότησης. Ορισμένα πρότυπα/πρωτόκολλα ασύρματης σύνδεσης είναι από μόνα τους ιδιόκτητα και το υλικό για τις συσκευές πρέπει να αγοραστεί από έναν εξουσιοδοτημένο διανομέα, διαφορετικά μπορεί να απαιτείται άδεια χρήσης IP. Υπάρχουν επίσης ασύρματα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για το IoT που είναι ανοιχτά πρότυπα, όπως το LoRa και το Thread, και αναπτύχθηκαν ως προσπάθεια από πολλούς συνεργάτες του κλάδου, ειδικούς, κοινότητες και ενώσεις.

Αφού επιλεγεί ένα ασύρματο πρότυπο, ένας OEM IoT πρέπει στη συνέχεια να επιλέξει συσκευές που είναι πιστοποιημένες σε αυτό το πρότυπο ή να κατασκευάσει τις δικές τους συμβατές συσκευές. Αυτές οι συσκευές είναι συχνά τσιπ επικοινωνίας ή μικροελεγκτές/μικροεπεξεργαστές (MCUs/MPU) με ενσωματωμένα χαρακτηριστικά επικοινωνίας. Για να εφαρμόσει ένα ασύρματο πρότυπο, ένας OEM πρέπει στη συνέχεια να σχεδιάσει μια τέτοια συσκευή σε ένα κύκλωμα μαζί με τα σχετικά εξαρτήματα RF, την κεραία και τη διασύνδεση που είναι συμβατά με το πρότυπο. Συχνά απαιτείται πρόσθετη πιστοποίηση και συμμόρφωση για την αντιμετώπιση των εκπομπών χωρών και της ευαισθησίας ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI), γνωστή ως ηλεκτρομαγνητική συμμόρφωση (EMC).

Στην πράξη, τα κριτήρια του κόστους, της ευελιξίας και της διαλειτουργικότητας, οδηγούν τους κατασκευαστές στην παραγωγή λύσεων IoT που χρησιμοποιούν πολλαπλές τεχνολογίες επικοινωνίας. Για παράδειγμα ένας θερμοστάτης μπορεί να ενσωματώνει Wi-Fi και ZigBee, ένας έξυπνος μετρητής κατανάλωσης RF mesh, ZigBee και Wi-Fi και ένα έξυπνο τηλέφωνο Wi-Fi, Bluetooth, NFC και 4G/5G.

Πίνακας 13. Περιπτώσεις χρήσης και τεχνολογίες συνδεσιμότητας για εφαρμογές IoT

Requirement	App. category	Use-cases (e.g.,)	Connectivity technologies
End-user-type	Human-oriented	Smart phone	Legacy cellular technologies, LTE/LTE-A, 5G, WiFi/WiFi HaLow, OWC
	Machine-oriented	Monitoring sensors	Bluetooth/BLE, ZigBee, LPWAN, WiFi/WiFi HaLow, OWC
Data rate	High data-rate	Streaming video cameras	LTE/LTE-A, 5G, OWC, WiFi
	Medium data-rate	Connected cooking systems	Bluetooth/BLE, ZigBee, LTE-M, WiFi HaLow
	Low data-rate	Energy & water meters	NB-IoT, Sigfox, LoRa, ZigBee
Latency	Delay-sensitive	Autonomous vehicles, health-care sensors	LTE/LTE-A, 5G, OWC, WiFi/WiFi HaLow, Bluetooth/BLE, LTE-M
	Delay-tolerant	Waste management sensors	ZigBee, Sigfox, NB-IoT, LoRa
Coverage	Long-range	UAVs, smart farming sensors	LTE/LTE-A, 5G, LoRa, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, WiFi HaLow
	Short-range	Smart home appliances	Bluetooth/BLE, ZigBee, OWC, WiFi
Power	Low power	Tracking sensors, smart retail sensors	Bluetooth, ZigBee, LTE/LTE-A, 5G, WiFi
	Ultra low power	Pollution monitoring sensor	BLE, WiFi HaLow, LPWAN: LoRa, Sigfox, LTE-M, NB-IoT
Reliability	Mission critical	Real-time patient surveillance, autonomous vehicles	LTE/LTE-A, 5G, WiFi/WiFi HaLow, OWC
	Mission non-critical	Smart farming sensors	LPWAN: LoRa, Sigfox, LTE-M, NB-IoT
Mobility	High mobility	Autonomous vehicles	LTE/LTE-A, 5G
	Low mobility	Smart traffic lights	LPWAN, Bluetooth/BLE, ZigBee

2.3 Σύνδεση συσκευών IoT σε WLAN

Ο τρόπος σύνδεσης των συσκευών IoT σε έναν Wi-Fi δίκτυο αποτελεί πρόκληση καθώς τις περισσότερες φορές οι συσκευές αυτές είναι headless (δεν έχουν οθόνη, πληκτρολόγιο ή ποντίκι για τον χειρισμό τους), όπως για παράδειγμα, διακόπτες, λαμπτήρες και θερμοστάτες σε έξυπνα σπίτια (Smart Home), αισθητήρες στην έξυπνη γεωργία (Smart Agriculture) και βιντεοκάμερες σε έξυπνες πόλεις (Smart City). Για όλες αυτές τις περιπτώσεις, ο τρόπος σύνδεσης θα πρέπει να είναι εύκολος, ασφαλής και γρήγορος. Οι μέθοδοι που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι:

2.3.1 Wi-Fi Protected Setup (WPS)

Το (WPS) αναπτύχθηκε από τη Wi-Fi Alliance το 2006. Ορίζει δύο μεθόδους για την σύνδεση: Μέθοδος PIN WPS. Στο εξωτερικό του AP υπάρχει τυπωμένο έναν PIN που εισάγεται στη συσκευή IoT μέσω πληκτρολογίου. Το 2011 αποκαλύφθηκε η μέθοδος PIN ήταν επιρρεπής σε

επιθέσεις brute force. Εξαιτίας αυτού του ελαττώματος, η μέθοδος PIN WPS δεν υποστηρίζεται πλέον. Επίσης, ελάχιστες IoT συσκευές διαθέτουν δυνατότητα πληκτρολογίου πλέον.

Μέθοδος Push button WPS. Ένα κουμπί WPS υπάρχει στο AP και στον σταθμό. Όταν τα κουμπιά πατηθούν ταυτόχρονα, η συσκευή IoT έχει 2 λεπτά για να συνδεθεί στο AP.

Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι το η συσκευή μπορεί να βρίσκεται σε δυσπρόσιτο σημείο και ότι το παράθυρο των 2 λεπτών δίνει την δυνατότητα σε οποιαδήποτε τρίτη συσκευή να συνδεθεί

2.3.2 Access Point Mode

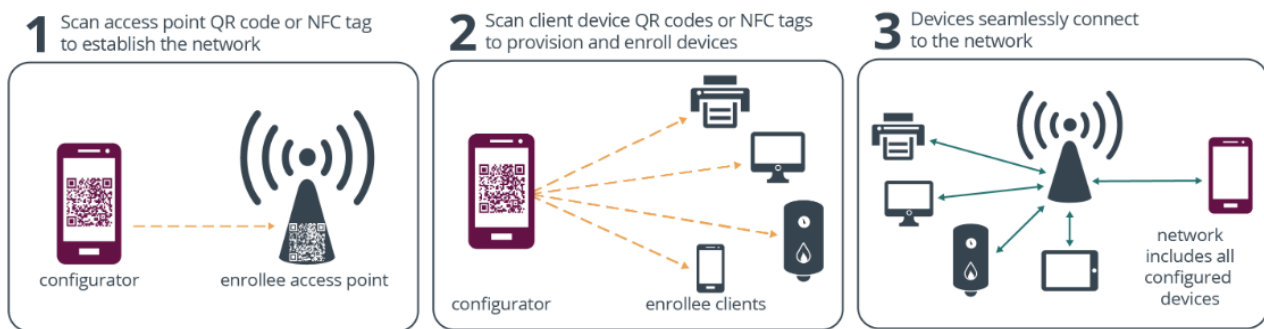
Σε αυτήν τη μέθοδο, η συσκευή IoT διαμορφώνεται αρχικά ως AP (επιαναφορά της συσκευής ενδέχεται να απαιτεί το πάτημα ενός κουμπιού φυσικής επιαναφοράς reset). Το όνομα SSID του IoT AP και ο αντίστοιχος κωδικός πρόσβασης μπορεί να βρίσκονται στην εγχειρίδιό του ή να αναγράφονται στη συσκευασία. Ο χρήστης πρέπει να συνδεθεί ασύρματα με άλλη υπολογιστική συσκευή (συνήθως tablet, smartphone ή laptop) και μέσω ενός web interface να αλλάξει τη λειτουργία της IoT συσκευής ώστε να συνδεθεί στο τελικό δίκτυο. Η μέθοδος αυτή παρέχει ασφάλεια, είναι όμως χρονοβόρα και απαιτεί φυσική παρουσία για επαναρρύθμιση όλων των σταθμών σε περίπτωση αλλαγής του AP.

2.3.3 Wi-Fi Easy Connect

Η Wi-Fi Alliance κυκλοφόρησε το Easy Connect το 2020 ως αντικατάσταση του WPS. Αναπτύχθηκε για σύνδεση headless IoT συσκευών. Για την σύνδεση, ένας ιδιοκτήτης δικτύου επιλέγει μία συσκευή ως κεντρικό σημείο διαμόρφωσης. Συνήθως αυτή η συσκευή είναι μια συσκευή με πλούσια διεπαφή χρήστη, όπως smartphone ή tablet, αλλά θα μπορούσε να είναι οποιαδήποτε συσκευή που μπορεί να σαρώσει έναν κωδικό QR, μια ετικέτα NFC ή να κατεβάσει πληροφορίες συσκευής από το cloud και να εκτελέσει το πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε από τη Wi-Fi Alliance (WFA). Η επιλεγμένη συσκευή θεωρείται διαμορφωτής (configurator) και όλες οι άλλες συσκευές θεωρούνται εγγεγραμμένοι (enrollees). Ο χρήστης δημιουργεί μια ασφαλή σύνδεση με μια enrollee συσκευή σαρώνοντας τον κωδικό QR για τη συγκεκριμένη συσκευή ή την ετικέτα NFC ή κατεβάζοντας πληροφορίες από το cloud που σχετίζεται με αυτήν τη συσκευή.

Αυτό εκτελεί αυτόματα το πρωτόκολλο συνδέει τον enrollee με τα διαπιστευτήρια που απαιτούνται για πρόσβαση στο δίκτυο. Η Εικόνα 33 [59] παρουσιάζει αυτή τη μέθοδο.

Η μέθοδος αυτή παρέχει ασφάλεια, και δεν απαιτεί φυσική παρουσία για επαναρρύθμιση όλων των σταθμών σε περίπτωση αλλαγής του AP.



Εικόνα 33. Wi-Fi Easy Connect

2.3.1 Wi-Fi Direct

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα δίκτυο Wi-Fi απαιτεί Access Point για να συνδεθούν οι σταθμοί. Το AP συνδέεται με τον πάροχο υπηρεσιών Διαδικτύου μέσω backhaul. Για παράδειγμα, το backhaul μπορεί να γίνει μέσω καλωδιακού μόντεμ, δορυφορικής σύνδεσης ή κυψελοειδούς μόντεμ.

Το Wi-Fi Direct επιτρέπει σε κινητά τηλέφωνα, κάμερες, εκτυπωτές, υπολογιστές και συσκευές παιχνιδιών να δημιουργούν τα δικά τους δίκτυα Wi-Fi χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο. Οι συσκευές Wi-Fi Direct μπορούν να κάνουν συνδέσεις ένας-προς-έναν ή μια ομάδα πολλών συσκευών μπορούν να δημιουργήσουν τα δικά τους ad-hoc δίκτυα. Η σύνδεση απαιτεί συνήθως χρήση ενός push button ή εισαγωγή pin. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, μοιάζει με το Bluetooth, με τη διαφορά, ότι όλα γίνονται πολύ ταχύτερα. Το Wi-Fi Direct υποστηρίζει ταχύτητες Wi-Fi έως και 250 Mbps και λειτουργεί στα 2.4 GHz και 5 GHz. Οι συνδέσεις Wi-Fi Direct μεταξύ συσκευών είναι η βασική τεχνολογία για πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου του Miracast, μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε από την WFA για την απευθείας μετάδοση περιεχομένου (streaming) από μια συσκευή σε μια άλλη. Εφαρμογές IoT του Miracast περιλαμβάνουν περιπτώσεις όπως ροή βίντεο σε ψηφιακές πινακίδες (digital signage) σε καταστήματα και μετάδοση περιεχομένου από το σύστημα Invehicle Infotainment (IVI) αυτοκινήτου σε επιβάτες με tablet ή smartphones [60].

2.3.2 Proprietary

Κάποιοι κατασκευαστές αναπτύσσουν οι ίδιοι λύσεις για τα προϊόντα τους. Για παράδειγμα, η Texas Instruments προσφέρει την ιδιόκτητη τεχνολογία SmartConfig που χρησιμοποιείται σε συσκευές IoT της εταιρείας. Μια εφαρμογή στο έξυπνο τηλέφωνο του χρήστη, στέλνει τις πληροφορίες SSID του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένο το τηλέφωνο, σε μια ή περισσότερες συσκευές IoT, οι οποίες συνδέονται αυτόματα σε αυτό το δίκτυο. Μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτητα και η δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης πολλών και δυσπρόσιτων συσκευών. Μειονέκτημα αποτελεί η λειτουργία της αποκλειστικά σε συσκευές της εταιρείας.

2.4 Το 802.11ax ως πρότυπο IoT

Η παγκόσμια επισκεψιμότητα στο διαδίκτυο εκτιμάται ότι θα πολλαπλασιαστεί τα επόμενα χρόνια, κυρίως ως αποτέλεσμα των επικοινωνιών τύπου Machine-Type Communications (MTC). Κάθε χρήστης αναμένεται το 2023 να έχει κατά μέσο όρο 3.6 συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο [6]. Οι συσκευές IoT εφαρμόζονται ευρέως σε οικιακούς αυτοματισμούς, βιομηχανικούς αυτοματισμούς, αυτόνομα οχήματα, υγειονομική περίθαλψη κ.λπ. Σε πολλές περιπτώσεις λειτουργούν με μπαταρία και χρειάζονται λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας. Σε άλλες περιπτώσεις συνυπάρχουν με άλλες ασύρματες τεχνολογίες και έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε απόδοση (π.χ. video streaming).

Η λύση του WLAN εφαρμόζεται σε IoT εφαρμογές μικρής (<100m) εμβέλειας. Ένα AP μοιράζεται μια σύνδεση μεταξύ συσκευών που έχουν συνδεθεί χρησιμοποιώντας αναγνωριστικό και κωδικό πρόσβασης σε μια τοπολογία αστέρα. Το AP είναι συνήθως συνδεδεμένο μέσω Ethernet στο backend του δικτύου ή συνδέεται με άλλα APs σε mesh networks.

Ο προκάτοχος του IEEE 802.11ax, το 802.11ac, δεν ικανοποιεί ούτε τις απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο και υψηλής αξιοπιστίας των εφαρμογών πολυμέσων υψηλής ποιότητας, ούτε την ενεργειακή απόδοση των δικτύων Internet of Things (IoT). Δεν μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα μεγάλο αριθμό χρηστών με υψηλή ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και πάσχει από αναποτελεσματική διαχείριση ενέργειας [1].

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται τρόποι που οι τεχνολογίες που εισάγει το 802.11ax ευνοούν την χρήση του σε εφαρμογές IoT.

2.4.1 Το 802.11ax έναντι των άλλων προτύπων IOT

Υπολογίζεται ότι, μέχρι το 2025, ο αριθμός των συσκευών IoT θα φτάσει τα 21,5 δισεκατομμύρια και η παγκόσμια αξία της αγοράς IoT θα φτάσει τα 7,1 τρισεκατομμύρια δολάρια [34]. Αυτός ο τεράστιος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών θα χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς και τομείς, όπως έξυπνες πόλεις [35], έξυπνα σπίτια [36], συσκευές υγειονομικής περίθαλψης [37], βιομηχανίες [38] και συστήματα μεταφορών [39]. Καθώς οι περισσότερες συσκευές IoT τροφοδοτούνται από μπαταρίες και περιορίζονται από τη θέση και το φυσικό τους μέγεθος, η ενεργειακά αποδοτική ασύρματη επικοινωνία τους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την βιωσιμότητα και την υιοθέτησή τους σε λύσεις αυτοματισμού. Για την υποστήριξη ενεργειακά αποδοτικής επικοινωνίας IoT, έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός ασύρματων τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης, όπως ZigBee [40], LoWPAN [41], Bluetooth χαμηλής ενέργειας (BLE) [42] και Z-Wave [43].

Ένα βασικό μειονέκτημα των παραπάνω τεχνολογιών είναι ότι περιορίζονται κατά την επικοινωνία σε δύο συσκευές IoT ανά χρονικό διάστημα λόγω της έλλειψης χωρικής πολυπλεξίας, και επομένως δεν είναι κατάλληλες για μαζικές συσκευές IoT.

Αναγνωρίζοντας αυτό το πρόβλημα, η 3GPP έχει αναπτύξει διάφορες τεχνολογίες για να προσφέρει υπηρεσίες επικοινωνίας IoT σε κυψελωτά δίκτυα, όπως το NB-IoT [44], το EC-GSM-IoT [45] και το eMTC [46]. Ανάμεσά τους περισσότερο υποσχόμενη και ήδη εφαρμοσμένη τεχνολογία είναι το IoT στενής ζώνης (NarrowBand IoT, NB-IoT). Σε αντίθεση με τα παλαιού τύπου πρότυπα LTE που χρησιμοποιούν ευρυζωνικό φάσμα (π.χ. 20 MHz) για την παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας για κινητές συσκευές, το NB-IoT περιορίζει το εύρος ζώνης επικοινωνίας στα 200 KHz, και επιτρέπει την παράλληλη και προγραμματισμένη επικοινωνία, προκειμένου να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για τις συσκευές IoT. Αν και το NB-IoT έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής (χρήση αισθητήρων σε αγροτικές καλλιέργειες και σε αποθήκες, εφαρμογές έξυπνης στάθμευσης κ.α.), υπάρχουν δύο ανησυχίες σχετικά με τις εμπορικές εφαρμογές του. Πρώτον, παρόμοια με τις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας για κινητά τηλέφωνα, οι υπηρεσίες NB-IoT δεν παρέχονται

δωρεάν. Οι χρήστες πρέπει να πληρώνουν ένα επαναλαμβανόμενο τέλος για να απολαμβάνουν τις υπηρεσίες NB-IoT (π.χ. ένα δολάριο το μήνα ανά συσκευή). Αν και αυτή η χρέωση δεν είναι μεγάλη σε σύγκριση με τον τηλεφωνικό λογαριασμό, γίνεται εύκολα σημαντική εάν κάποιος έχει πολλές συσκευές IoT σε χρήση. Η επαναλαμβανόμενη χρέωση των υπηρεσιών NB-IoT επιβάλλει μεγάλη οικονομική επιβάρυνση στους τελικούς χρήστες και για αυτό υιοθετείται κυρίως από Δημόσιους φορείς. Δεύτερον, τα κυψελωτά δίκτυα είναι ήδη πολύ συνωστισμένα. Η εξυπηρέτηση επιπλέον δισεκατομμυρίων συσκευών IoT μπορεί να οδηγήσει σε κυκλοφοριακή συμφόρηση για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ειδικά αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος που είναι κατάλληλες για ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία IoT (κάτω από 6 GHz) εξαντλούνται [47].

2.4.2 Υπέρ και κατά της χρήσης του 802.11ax σε IoT εφαρμογές

Υπάρχει ένα πλήθος από τεχνικούς και πρακτικούς λόγους επιλογής του 802.11ax για εφαρμογές IoT:

- Το WLAN γενικώς, είναι μια καλά εδραιωμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για περισσότερο από 20 χρόνια.
- Το Wi-Fi 6 Αποτελεί βιομηχανικό πρότυπο από την IEEE και την Wi-Fi Alliance (WFA). Η WFA έχει 858 μέλη παγκοσμίως από το 2019. Η WFA πιστοποιεί τη συμμόρφωση των συσκευών με το πρότυπο με τις εγγυήσεις καλής λειτουργίας που αυτό συνεπάγεται, ειδικά σε θέματα διαλειτουργικότητας (MAC/PHY επίπεδο) και ασφάλειας (WPA).
- Υπάρχουν ήδη πολλοί προμηθευτές που παρέχουν στοιχεία για το οικοσύστημα Wi-Fi, IoT και αντίστοιχα πολλοί χρήστες, γεγονός που ευνοεί τη μείωση του κόστους λόγω μαζικής παραγωγής και την επάρκεια υποστήριξης από προμηθευτές και κοινότητες λόγω ευρείας χρήσης.
- Η ζώνη ISM 2.4GHz είναι τυποποιημένη παγκοσμίως. Αυτό σημαίνει ότι ένα προϊόν Wi-Fi 6 θα λειτουργήσει σε πολλές χώρες (υποθέτοντας ότι περνάει τις κανονιστικές απαιτήσεις για τις χώρες αυτές).
- Η ζώνη των 5GHz είναι επίσης διαθέσιμη παγκοσμίως με μερικές εξαιρέσεις.

- Η ζώνη των 6GHz (5.92 -7.125 GHz) είναι ήδη διαθέσιμη για Wi-Fi σε περίπου 30 χώρες (συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ) και σταδιακά προστίθενται και άλλες
- Οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων (έως 2 G.4bits/s) του 802.11ax σε λειτουργία 2x2 MIMO είναι επαρκείς για τις περισσότερες περιπτώσεις χρήσης.
- Παρέχει πρόσθετες δυνατότητες πέρα από τη βασική συνδεσιμότητα δεδομένων, όπως Voice Personal, Voice Enterprise, Miracast, Mesh κ.λπ
- Δεν υπάρχουν επιπλέον μηνιαίες χρεώσεις υπηρεσιών για ασύρματη πρόσβαση (έναντι μηνιαίων χρεώσεων για δημόσιες cellular υπηρεσίες).
- Η χωρική και χρονική πολυπλεξία και το TWT ευνοούν τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το 802.11ax αποτελεί λύση σε περιπτώσεις εφαρμογών IoT όπου:

- Απαιτείται υψηλό throughput μεγέθους δεκάδων megabits ανά δευτερόλεπτο.
- Η απόσταση μεταξύ των σταθμών είναι μικρότερη από 100 μέτρα.
- Δεν απαιτούν εξαιρετικά χαμηλό latency και ντετερμινισμό.
- Υπάρχει χαμηλή κινητικότητα (πλατφόρμες που είναι σταθερές ή κινούνται το πολύ λίγα μέτρα ανά δευτερόλεπτο).

Ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών IoT διακρίνεται από τα παραπάνω χαρακτηριστικά όπως: Digital signage, Digital surveillance, Voice over IP, Thin clients, συστήματα Point-of-Sale, Industrial PCs, Kiosks που βρίσκονται σε εμπορικά και συγκοινωνιακά κέντρα, συστήματα in-vehicle infotainment, έξυπνος φωτισμό, έξυπνο parking, augmented/virtual reality κ.ά.

Το Wi-Fi 6 υστερεί σε σχέση με άλλες τεχνολογίες δικτύωσης στα παρακάτω:

- Τα High-end Wi-Fi 6/6E 2x2 MIMO APs έχουν υψηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια έναντι εναλλακτικών συσκευών προτύπων χαμηλής ισχύος όπως Lora και Zigbee και είναι πιο ακριβά έναντι υλοποιήσεων όπως το Bluetooth.
- Αν και η εισαγωγή του πρωτόκολλου ασφάλειας WPA3 αύξησε την ευρωστία του WLAN, τα 5G και 4G (LTE) θεωρούνται ασφαλέστερα.

- Περιορισμένη κάλυψη (~ 30m) μεταξύ APs και σταθμών συσκευών πελατών σε σύγκριση με άλλα ασύρματα πρότυπα όπως Cellular και LoRa.
- Υπάρχει μεγαλύτερο overhead που περιορίζει την απόδοση σε σχέση με πρότυπα όπως το 802.11ah.
- Η παρεμβολές στη ζώνη ISM 2.4GHz, από άλλες συσκευές όπως από τηλέφωνα DECT, φούρνους μικροκυμάτων, Bluetooth κλπ., μπορεί να μειώσει τις επιδόσεις σε σύγκριση με τεχνολογίες που λειτουργούν σε άλλες ζώνες συχνοτήτων όπως οι cellular (σημείωση: Αυτό ισχύει και για το Bluetooth και το 802.15.4 που λειτουργούν σε αυτή τη ζώνη).
- Έχει μεγαλύτερο latency και μικρότερη ασφάλεια και προστασία από παρεμβολές σε σύγκριση με τα 5G, και 5G URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication).
- Ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεν συμβαδίζει πάντα με περιπτώσεις IoT εφαρμογών χαμηλής ισχύος και χαμηλής χρήσης δεδομένων, όπως τα wireless sensor networks (WSN).
- Παρόλο που το Wi-Fi λειτουργεί σε ζώνες χωρίς άδεια, ελέγχεται αυστηρά από χώρες με τοπικούς κανονισμούς που ορίζουν τα μέγιστα επίπεδα ισχύος των APs για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των χρηστών.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι Wi-Fi 6 δεν αποτελεί ιδανική λύση για εφαρμογές IoT, οι οποίες χαρακτηρίζονται από:

- Υψηλή κινητικότητα, όπως από αυτοκίνητα σε οδικές υποδομές.
- Πολύ μεγάλη εμβέλεια (>100 μέτρα μεταξύ σταθμών) όπως αισθητήρες σε εφαρμογές έξυπνης γεωργίας.
- Εξαιρετικά χαμηλή ισχύ (low power) και πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.
- Χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων.

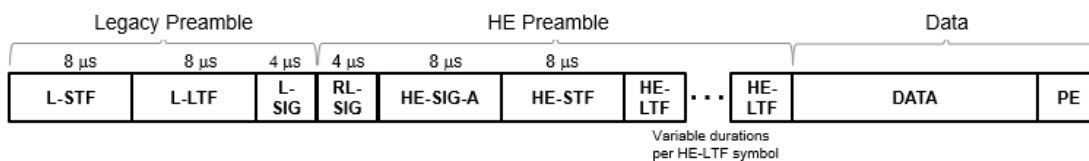
3. Προσομοίωση υλοποιήσεων IoT με χρήση του 802.11ax (IoT)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τριών σεναρίων υλοποιήσεων IoT με χρήση του 802.11ax. Οι προσομοιώσεις έγιναν με χρήση του λογισμικού MATLAB (έκδοση R2022b) και ειδικότερα της εργαλειοθήκης WLAN Toolbox.

Το WLAN Toolbox επιλέχθηκε γιατί παρέχει λειτουργίες για την μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση συστημάτων επικοινωνιών WLAN. Διαθέτει δυνατότητες όπως η δημιουργία κυματομορφής, η προσομοίωση σε επίπεδο σύνδεσης και σε επίπεδο συστήματος και η προσομοίωση από άκρο σε άκρο end-to-end simulation. Τέλος, υποστηρίζει όλες τις νέες δυνατότητες του IEEE 802.11ax που ευνοούν τη χρήση του σε εφαρμογές IoT (OFDMA, UL MU MIMO, TWT, long symbol κλπ).

3.1 Μελέτη απόδοσης σε Trigger-Based Uplink πακέτα

Στην προσομοίωση αυτή υπολογίζεται το Packet Error Rate (PER) σε διαφορετικά επίπεδα SNR, και διαφορετικά MCS, όταν χρησιμοποιείται πλαίσιο HE Trigger-Based (TB) PPDU (περιγραφή του οποίου υπάρχει στην ενότητα 1.4.1 αυτής της εργασίας).

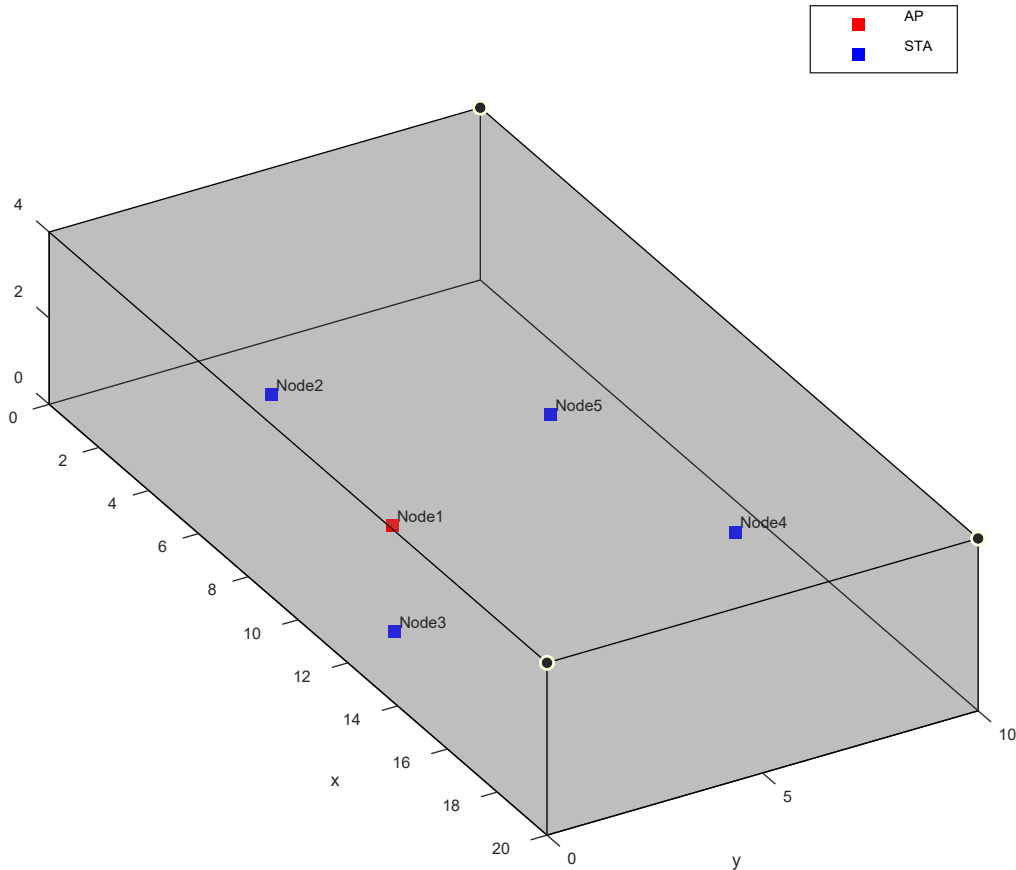


Το frame HE TB PPDU που χρησιμοποιείται επιτρέπει τη μετάδοση OFDMA ή MU-MIMO στην ανερχόμενη ζεύξη, η οποία συντονίζεται εξ ολοκλήρου από το AP. Κάνει δηλαδή χρήση του broadcast TWT (που περιγράφεται στην ενότητα 1.4.4 αυτής της εργασίας), που ευνοεί σε μεγάλο βαθμό την εξοικονόμηση ενέργειας σε IoT συσκευές.

Όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τη μετάδοση, αποστέλλονται σε όλους τους σταθμούς (IoT συσκευές) με ένα trigger frame. Όλοι οι σταθμοί (STAs) εκπέμπουν ένα πακέτο HE TB ταυτόχρονα.

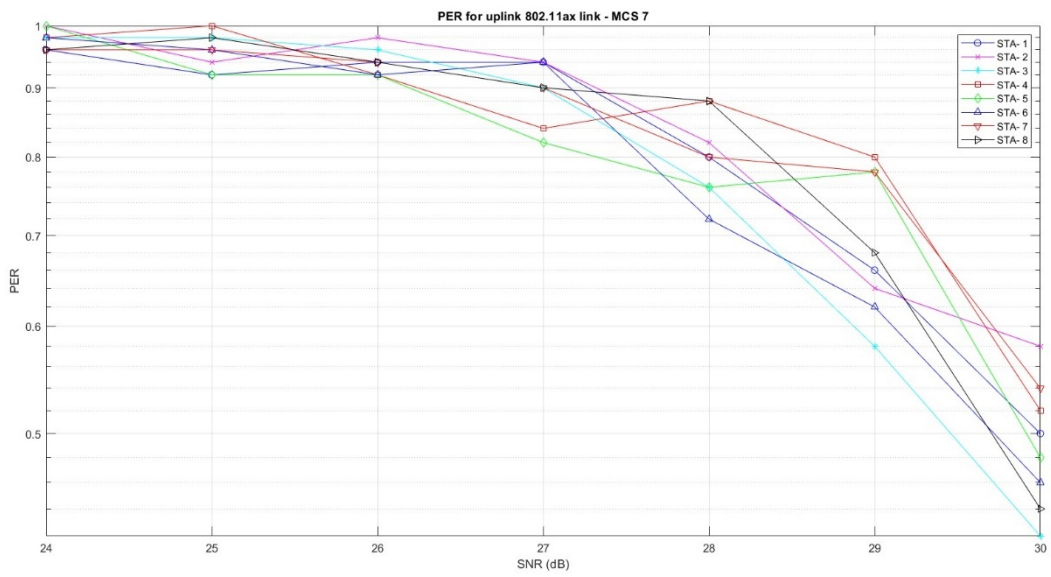
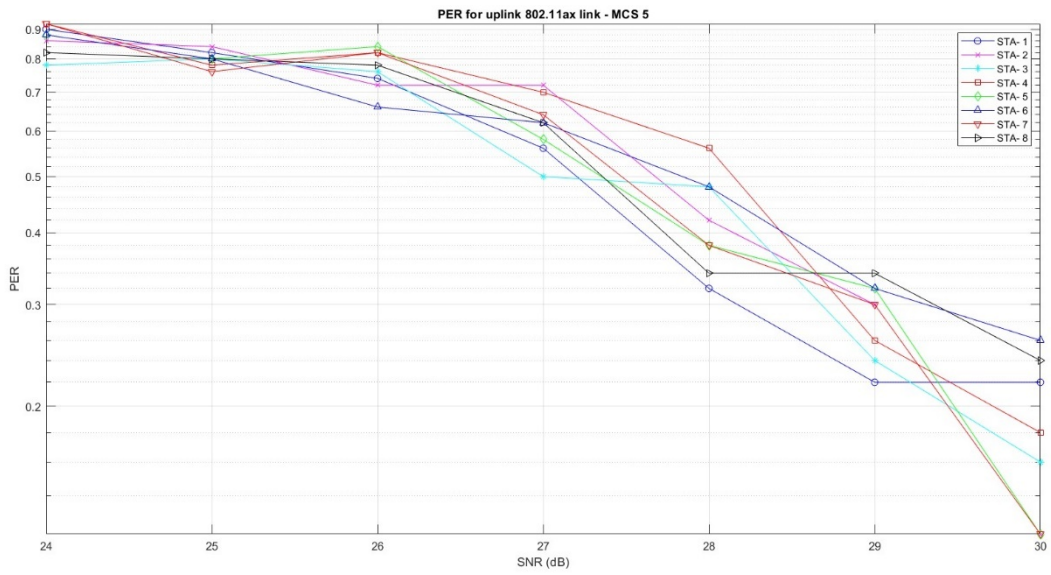
Παράμετροι εξομοίωσης	
Πλήθος 802.11ax AP: 1	Πλήθος IoT STAs: 8
Κεραίες AP: 8	Κεραίες σταθμών: 1
Guard Interval: 3.2μs	MCS: 5, 7, 9, 10, 11
Επίπεδα SNR: Για κάθε MCS έγινε προσομοίωση με 6 διαφορετικά επίπεδα SNR: Για MCS 5, SNR από 24 ως 30 Για MCS 7, SNR από 24 ως 30 Για MCS 9, SNR από 28 ως 34 Για MCS 10, SNR από 34 ως 40 Για MCS 11, SNR από 34 ως 40	Συνθήκες καναλιού: Όλοι οι σταθμοί απέχουν 10 μέτρα από το AP, χωρίς οπτική επαφή (NLOS).
Πλήθος πακέτων (Uplink): 1000 (των 1000 bytes)	Εύρος καναλιού: 20MHz

Ο χώρος είναι εσωτερικός και αποτελείται από μια αίθουσα διαστάσεων 20x10x4. Οι STAs είναι διάσπαρτοι με ελάχιστη απόσταση από το AP τα 10 μέτρα.

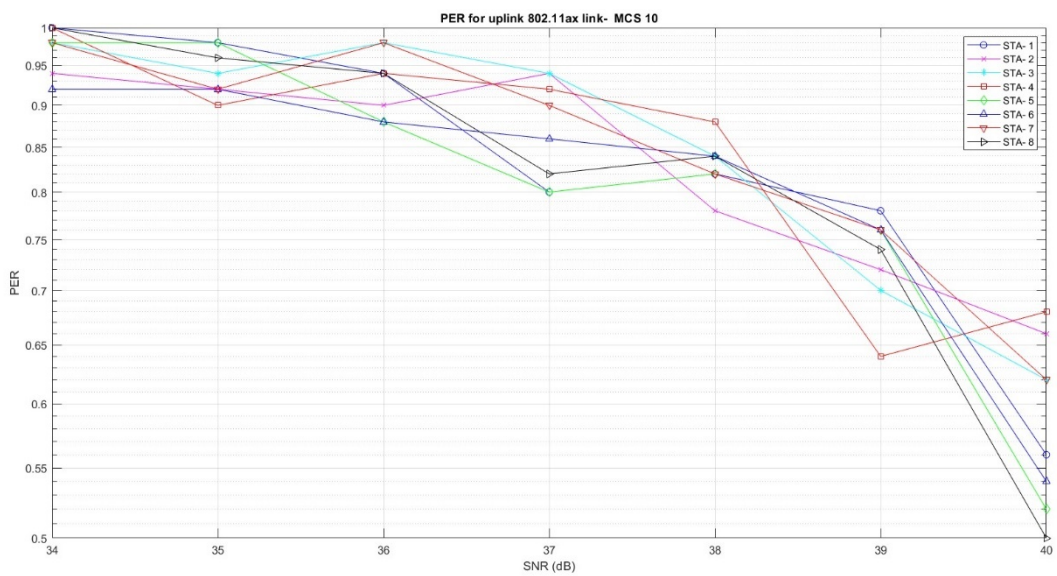
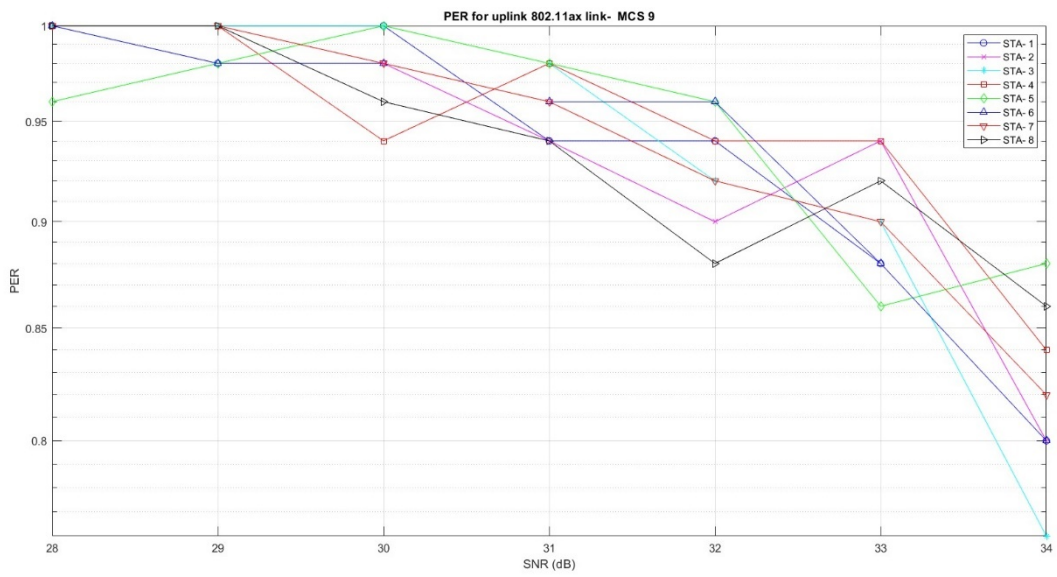


Αποτελέσματα:

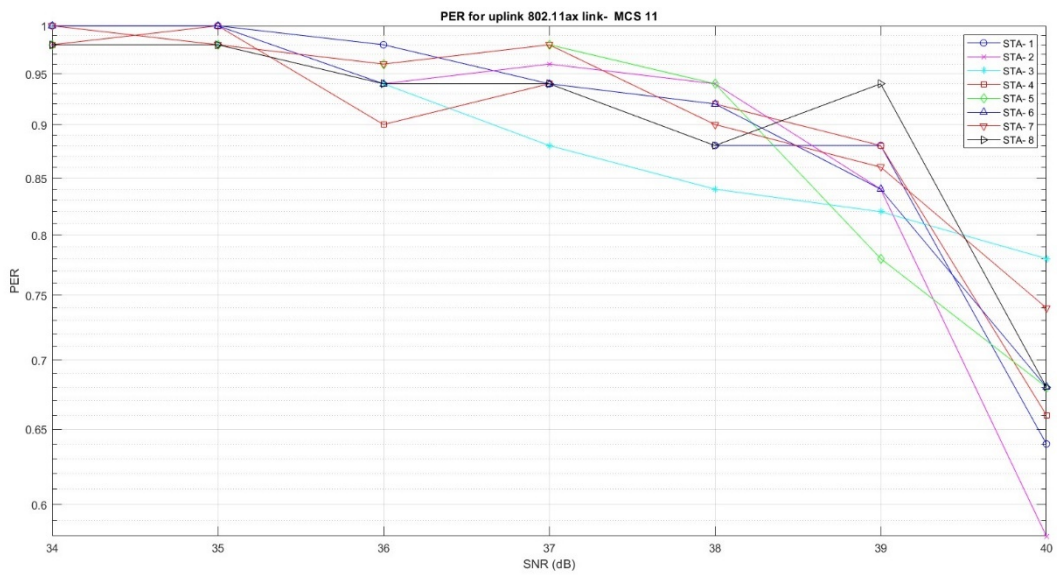
Στα παρακάτω διαγράμματα εμφανίζεται το PER σε διαφορετικές συνθήκες όπου οι σταθμοί αποστέλλουν πακέτα στο AP με πέντε διαφορετικά MCS με σταδιακή μείωση του SNR. Απεικονίζεται η αναμενόμενη διακύμανση του PER το οποία αυξάνεται καθώς μειώνεται το SNR, ενώ η διακύμανση αυξάνεται ακόμα περισσότερο με την αύξηση του MCS. Η διαμόρφωση 1024-QAM (MCS 10 και 11) που εισήγαγε το 802.11ax απαιτεί SNR πάνω από 40 dB, που σημαίνει ότι σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλό throughput (π.χ. μετάδοση video υψηλής ανάλυσης) θα πρέπει η απόσταση και οι υπόλοιπες αλλοιώσεις της ζεύξης να είναι σε πολύ καλό επίπεδο (απόσταση $\leq 10\text{m}$, SNR πάνω από 40dB).



Χρήση του πρότυπου ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11ax στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Μπουρνότος Βασίλειος

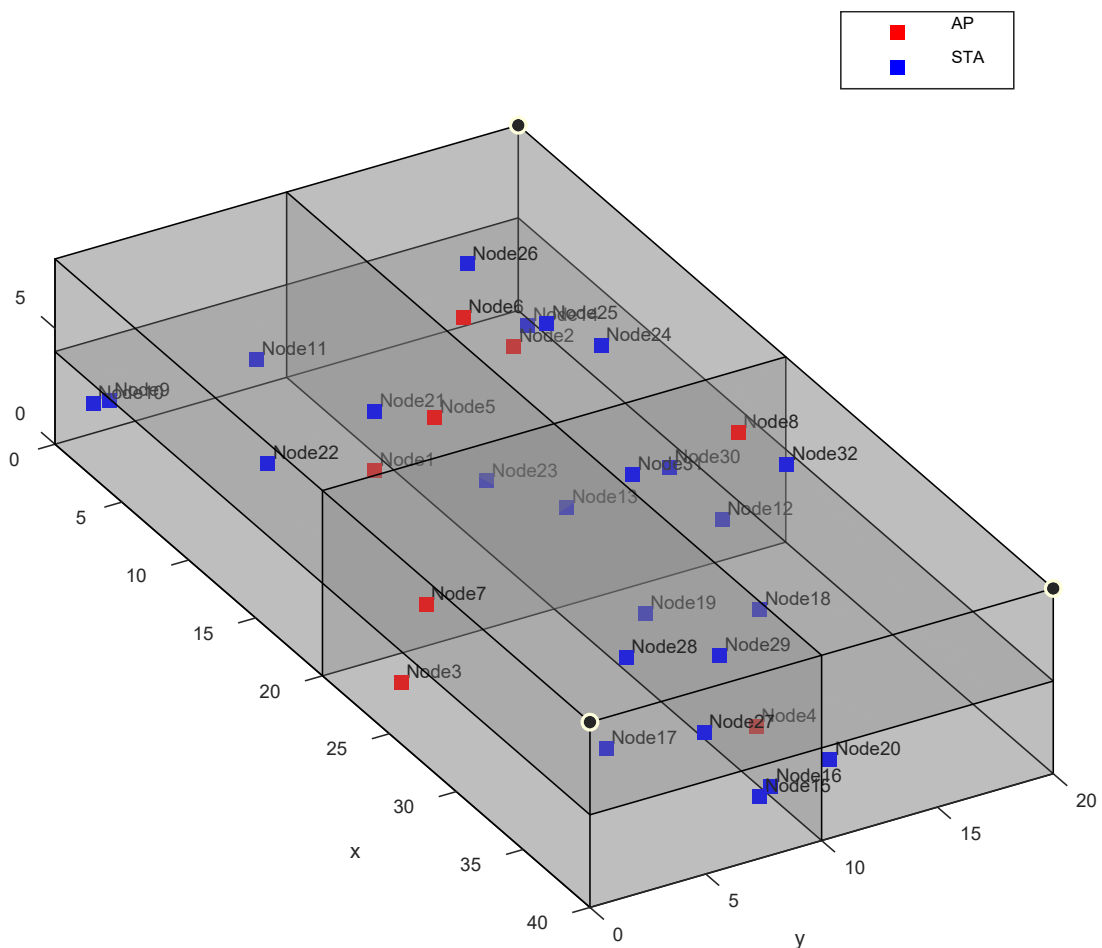


Χρήση του πρότυπου ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11ax στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Μπουρνούτος Βασίλειος



3.2 Σενάριο βιομηχανικής εφαρμογής multinode IoT

Αυτή προσομοίωση παρουσιάζει μια υλοποίηση σε επίπεδο συστήματος για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός δικτύου 802.11ax σε ένα βιομηχανικό σενάριο. Ο χώρος είναι εσωτερικός και αποτελείται από 2 ορόφους με 4 αίθουσες ο καθένας (χωρίζονται από τοίχο). Σε κάθε αίθουσα διαστάσεων 20x10x4, υπάρχει από ένα AP 802.11ax και 3 STAs. Το σενάριο προσομοίωσης καθορίζει ένα μοντέλο απώλειας διαδρομής (path loss) με βάση την απόσταση μεταξύ των κόμβων και τον αριθμό των τοίχων και των ορόφων που διανύονται από το σήμα WLAN.



Αυτή η εφαρμογή μοντελοποιεί το επίπεδο MAC και το PHY όλων των κόμβων (APs και STAs). Το επίπεδο MAC υλοποιεί τη λειτουργία βελτιωμένης πρόσβασης κατακευματισμένου καναλιού (Enhanced Distributed Channel Access, EDCA).

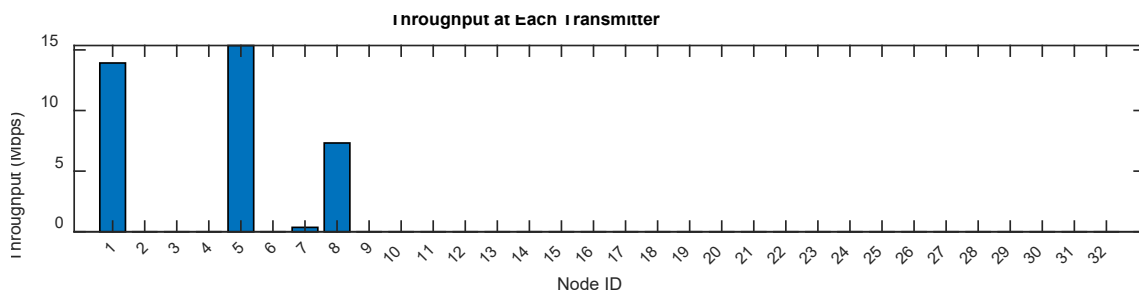
Τα APs και οι STAs τοποθετούνται σε τυχαίες θέσεις στην κάθε αίθουσα. Όλα τα APs έχουν το ίδιο configuration. Το ίδιο και όλοι οι STAs. Οι ρυθμίσεις λειτουργίας των APs και των STAs είναι οι παρακάτω:

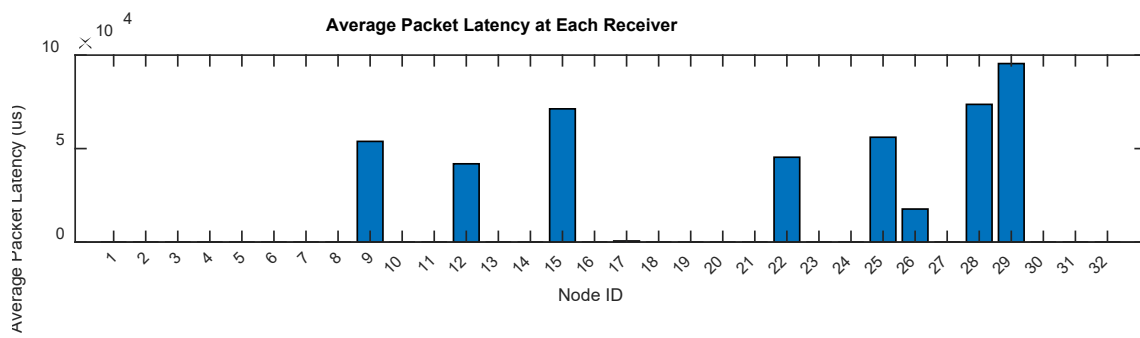
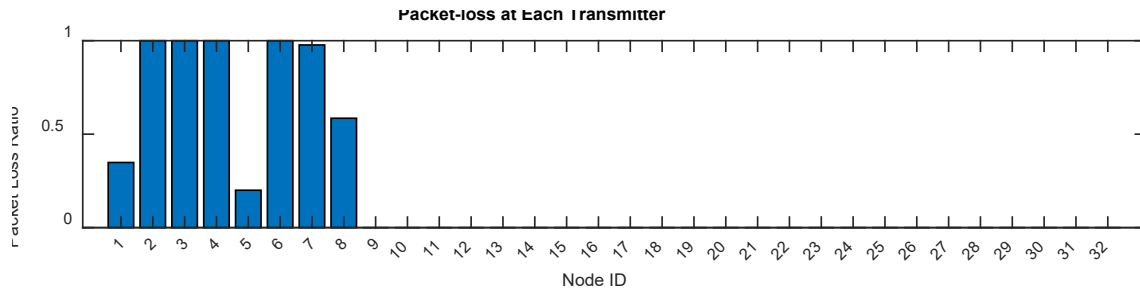
Access Point (AP)	Station (STA)
NodePosition: [9.9139 8.0769 1.5000]	NodePosition: [4.4861 17.2176 1.5000]
TxFormat: "HE_MU"	TxFormat: "HE_SU"
Bandwidth: 20	Bandwidth: 20
TxMCS: 6	TxMCS: 7
TxNumSTS: 1	TxNumSTS: 1
NumTxChains: 1	NumTxChains: 1
MPDUAggregation: 1	MPDUAggregation: 1
DisableAck: 0	DisableAck: 0
MaxSubframes: 64	MaxSubframes: 64
RTSThreshold: 65536	RTSThreshold: 65536
DisableRTS: 0	DisableRTS: 0
MaxShortRetries: 7	MaxShortRetries: 7
MaxLongRetries: 7	MaxLongRetries: 7
DLOFDMAFrameSequence: 1	DLOFDMAFrameSequence: 1
MaxDLStations: 1	MaxDLStations: 1
BasicRates: [6 12 24]	BasicRates: [6 12 24]
Use6MbpsForControlFrames: 0	Use6MbpsForControlFrames: 0
BandAndChannel: {[2.4000 6]}	BandAndChannel: {[2.4000 6]}
CWMin: [15 15 7 3]	CWMin: [15 15 7 3]
CWMax: [1023 1023 15 7]	CWMax: [1023 1023 15 7]
AIFSSlots: [3 7 2 2]	AIFSSlots: [3 7 2 2]
RateControl: 'FixedRate'	RateControl: 'FixedRate'
PowerControl: 'FixedPower'	PowerControl: 'FixedPower'
TxPower: 15	TxPower: 15
TxGain: 1	TxGain: 1

RxGain: 0	RxGain: 0
EDThreshold: -82	EDThreshold: -82
RxNoiseFigure: 7	RxNoiseFigure: 7
ReceiverRange: 1000	ReceiverRange: 1000
FreeSpacePathloss: 1	FreeSpacePathloss: 1
IsMeshNode: 0	IsMeshNode: 0
MeshTTL: 31	MeshTTL: 31
IsAP: 0	IsAP: 0

Αποτελέσματα:

Οι τρεις παρακάτω γραφικές παραστάσεις εμφανίζουν την απόδοση, τον λόγο απώλειας πακέτων και την μέση καθυστέρηση λήψης πακέτων σε κάθε STA. Η πρώτη γραφική παράσταση δείχνει την απόδοση και η δεύτερη την αναλογία απώλειας πακέτων σε κάθε πομπό (AP). Η τρίτη γραφική παράσταση δείχνει την μέση καθυστέρηση πακέτων που παρατηρείται σε κάθε κόμβο δέκτη (STA). Η απόδοση δείχνει τον ρυθμό δεδομένων σε κάθε AP σε μονάδες megabits ανά δευτερόλεπτο (Mbps). Ο λόγος απώλειας πακέτων δείχνει την αναλογία των ανεπιτυχών μεταδόσεων δεδομένων προς τις συνολικές μεταδόσεις δεδομένων. Ο μέσος λανθάνων χρόνος πακέτων δείχνει τη μέση καθυστέρηση που παρουσιάζεται σε κάθε STA για τη λήψη της κίνησης κατερχόμενης ζεύξης από το AP.





3.3 Μελέτη απόδοσης OFDMA και MU MIMO

Σε αυτό το σενάριο ένα AP εκπέμπει πακέτα MU-HE σε 4 IoT STAs ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης, σε κατερχόμενη ζεύξη πολλών χρηστών, σε εσωτερικό χώρο:

1. OFDMA: Σε κάθε έναν από τους τέσσερις χρήστες εκχωρείται ένα ξεχωριστό RU και η μετάδοση διαμορφώνεται με beamforming. Οι σταθμοί μοιράζονται το εύρος καναλιού και κάθε σταθμός χρησιμοποιεί ένα RU 52 τόνων.
2. MU-MIMO: Και στους τέσσερις χρήστες αποδίδεται η πλήρης ζώνη. κάθε σταθμός χρησιμοποιεί ένα RU 242 τόνων.
3. Μίξη MU-MIMO και OFDMA: Δύο χρήστες μοιράζονται μια ενιαία RU 106 τόνων σε μια διαμόρφωση MU-MIMO και στους υπόλοιπους δύο χρήστες εκχωρείται από ένα RU στον καθένα 52 τόνων. Οι MU-MIMO σταθμοί έχουν ένα space-time stream ο καθένας. Οι OFDMA έχουν δύο space-time streams ο καθένας

Και στους τρεις τρόπους μετάδοσης, το AP μεταδίδει 1000 πακέτα ανά 20μs. Η απόδοση throughput υπολογίζεται μετρώντας τον αριθμό των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς σε όλους τους STA. Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται για διαφορετικά επίπεδα path loss (απώλειες διαδρομής).

Όλες οι μεταδόσεις γίνονται με beamforming επομένως, πριν από την προσομοίωση της μετάδοσης δεδομένων, γίνεται channel sounding από το AP σε κάθε STA ώστε να εκτιμηθεί η κατάσταση του καναλιού (channel state information, CSI). Για το CSI το AP αποστέλλει ένα πακέτο HE NDP (Null Data Packet) σε κάθε STA, όπως ακριβώς γίνεται και στο 802.11ac με αντίστοιχα VHT πακέτα. Η απάντηση των σταθμών σε αυτό το πακέτο θεωρούμε ότι είναι ίδια για όλους και δηλώνει -89.9 dBm noise floor.

Το κανάλι που χρησιμοποιείται σε όλες τις μεταδόσεις έχει εύρος 20 MHz.

Το AP διαθέτει 6 κεραίες. Οι σταθμοί διαθέτουν 2 κεραίες ο καθένας. Το Guard interval είναι 0.8 μs. Οι σταθμοί μεταδίδουν με παραμέτρους MCS 4. Η απόσταση κάθε STA από το AP ξεκινά

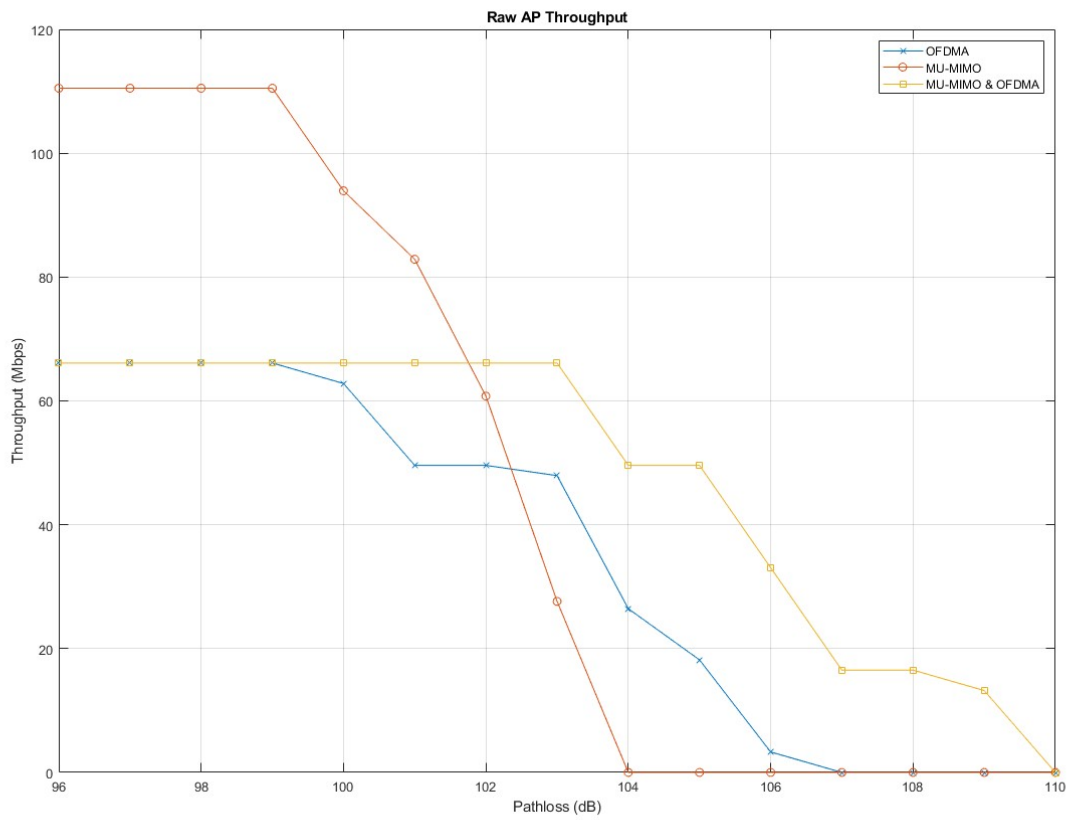
από τα 10 μέτρα και αυξάνεται σταδιακά από μέτρηση σε μέτρηση, αυξάνοντας το Pathloss από 96dB μέχρι 110dB με βήμα 1. Οι STA και το AP βρίσκονται στον ίδιο όροφο και δεν υπάρχει τοίχος ανάμεσά τους.

Αποτελέσματα:

Πίνακας 14. Σύγκριση απόδοσης OFDMA και MU-MIMO

Pathloss	Simulation Throughput (Mbps)		
	OFDMA	MU-MIMO	Mixed MU-MIMO and OFDMA
96.0 dB	66.1	110.5	66.1
97.0 dB	66.1	110.5	66.1
98.0 dB	66.1	110.5	66.1
99.0 dB	66.1	110.5	66.1
100.0 dB	62.8	93.9	66.1
101.0 dB	49.6	82.9	66.1
102.0 dB	49.6	60.8	66.1
103.0 dB	47.9	27.6	66.1
104.0 dB	26.4	0.0	49.6
105.0 dB	18.2	0.0	49.6
106.0 dB	3.3	0.0	33.1
107.0 dB	0.0	0.0	16.5
108.0 dB	0.0	0.0	16.5
109.0 dB	0.0	0.0	13.2
110.0 dB	0.0	0.0	0.0

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε υψηλά SNR (μικρό Pathloss), η απόδοση της διαμόρφωση MU-MIMO υπερβαίνει τη διαμόρφωση OFDMA. Το throughput του MU-MIMO είναι σχεδόν διπλάσιο του OFDMA. Καθώς το SNR μειώνεται, ο θόρυβος κυριαρχεί και το OFDMA γίνεται πιο αποτελεσματικό. Η απόδοση της συνδυασμένης διαμόρφωσης MU-MIMO και OFDMA ακολουθεί παρόμοια τάση με τη διαμόρφωση OFDMA καθώς η διάρκεια του πακέτου είναι η ίδια. Η απόδοση διαφέρει λόγω των διαφορετικών μεγεθών RU και του αριθμού των spatial streams.



Εικόνα 34. Σύγκριση απόδοσης OFDMA και MU-MIMO

Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάστηκαν οι βασικές τεχνολογίες του πρότυπου IEEE 802.11ax, οι μηχανισμοί που εισάγει για την αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης σε πυκνά περιβάλλοντα και οι άμεσοι (TWT) και έμμεσοι (OFDMA, UL MU-MIMO, BSS Coloring, Beamforming, long symbol, επέκταση στα 5 και 6 GHz) τρόποι με τους οποίους υποστηρίζει και βελτιώνει την απόδοση δικτύων IoT.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν προοπτικές χρήσης του IEEE 802.11ax σε εφαρμογές IoT. Αναπτύχθηκαν διεξοδικά οι λόγοι που υπερτερεί έναντι άλλων short range ασύρματων τεχνολογιών (ZigBee, LoWPAN, BLE, Z-Wave, legacy Wi-Fi), οι οποίοι περιλαμβάνουν την βελτιωμένη χωρική και χρονική πολυπλεξία (OFDMA, UL/DL MU MIMO), την αντιμετώπιση αλλοιώσεων ζεύξης (BSS Coloring, Beamforming, long symbol), την βελτίωση ενέργειας (TWT), την αυξημένη απόδοση σε συνωστισμένα περιβάλλοντα (8x8:8 MU-MIMO), το QoS (MU EDCA) και την ευκολία εγκατάστασης και υποστήριξης. Επίσης, εξετάστηκαν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του IEEE 802.11ax έναντι τεχνολογιών μεγάλης εμβέλειας που λειτουργούν σε αδειοδοτημένες (Lora WAN, Sigfox, Weightless) και μη αδειοδοτημένες (LTE, GSM, NB-IoT, 5G) ζώνες. Έναντι αυτών, αδυναμίες όπως η περιορισμένη κάλυψη (<100m), ο συνωστισμός στα 2.4 GHz και το αυξημένο overhead αποκλείει την αποκλειστική χρήση του 802.11ax σε long range εφαρμογές κυρίως εξωτερικών χώρων και υψηλής κινητικότητας όπως έξυπνη γεωργία, αυτόνομη οδήγηση, παρακολούθηση στόλου οχημάτων κλπ. Αντίθετα, ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών του 802.11ax το καθιστούν ιδανικό για IoT εφαρμογές όπως Digital signage, Digital surveillance, Voice over IP, Smart home, Kiosks που βρίσκονται σε εμπορικά και συγκοινωνιακά κέντρα, συστήματα in-vehicle infotainment, έξυπνο φωτισμό, έξυπνο parking, augmented/virtual reality κ.ά.

Τέλος, αναλύθηκε η απόδοση του IEEE 802.11ax σε διαφορετικά περιπτώσεις χρήσης εφαρμογών IoT, μέσω προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν ότι το IEEE 802.11ax ικανοποιεί τις απαιτήσεις εφαρμογών IoT σε σενάρια εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, χαμηλής και υψηλής πυκνότητας, η επίτευξη όμως των επιδόσεων που

περιγράφονται στα MCS10 και MCS11 επιτυγχάνονται μόνο σε σχεδόν άριστες συνθήκες ζεύξης, με πολύ μικρή απόσταση των σταθμών από το AP (κάτω από 10μ) και SNR πάνω από 40dB.

Προτάσεις μελλοντικής επέκτασης

- Σύγκριση των τεχνολογιών και της προοπτικής εφαρμογής σε λύσεις IoT, του IEEE 802.11ax με το επερχόμενο IEEE 802.11be.
- Τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά την αφύπνιση συσκευών από μακρές TWT περιόδους από φαινόμενα όπως ασυμφωνίες ρολογιού (clock drifts) και αλλοιώσεις ζεύξης, ειδικά όταν δεν προηγείται Carrier Sensing.

Αναφορές

- [1] Mozaffariahrar, E., Theoleyre, F., Menth, M. A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet* 2022, 14, 293. <https://doi.org/10.3390/fi14100293>.
- [2] Wilhelmi, Francesc & Barrachina-Muñoz, Sergio & Cano, Cristina & Selinis, Ioannis & Bellalta, Boris. (2019). Spatial Reuse in IEEE 802.11ax WLANs.
- [3] Dolińska, Iwona & Jakubowski, Mariusz & Masiukiewicz, Antoni. (2019). New IEEE 802.11 HEW Standard Throughput per User Analysis. 118-123. 10.1109/DT.2019.8813700.
- [4] Bellalta, Boris. (2015). IEEE 802.11ax: High-Efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 10.1109/MWC.2016.7422404.
- [5] Masiukiewicz A., "Throughput comparison between the new HEW 802.11ax standard and 802.11n/ac standards in selected distance windows", *International Journal of Electronics and Telecommunication*, 1/2019.
- [6] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Available online: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (ανακτήθηκε στις 02/10/2022).
- [7] Dolińska, I., Jakubowski, M., Masiukiewicz, A. New IEEE 802.11 HEW Standard Throughput Per User Analysis. In *Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, Zilina, Slovakia, 25–27 June 2019.
- [8] IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020). "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 1: Enhancements for High Efficiency WLAN." IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks - Specific requirements.

- [9] R. Karmakar, S. Chattopadhyay, and S. Chakraborty, “Impact of IEEE 802.11n/ac PHY/MAC high throughput enhancements on transport and application protocols—A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2050–2091, 4th Quart., 2017.
- [10] Khorov, E. & Kiryanov, A. & Lyakhov, A. & Bianchi, G. (2018). A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. PP. 1-1. 10.1109/COMST.2018.2871099.
- [11] Kumar, A., Hussain, J., Chun, A. (2023). *Connecting the Internet of Things*. Apress, Berkeley, CA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8897-9>.
- [12] Garcia-Rodriguez, A., Lopez-Perez, D., Galati-Giordano, L., Geraci, G. IEEE 802.11 be: Wi-Fi 7 Strikes Back. *IEEE Commun. Mag. (COMMAG)* 2021, 59, 102–108.
- [13] www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-certified-6-release-2-adds-new-features-for-advanced-wi-fi-applications. (ανακτήθηκε στις 24/02/2023).
- [14] 11AX Project Authorizations (PARs). Available online: <https://www.ieee802.org/11/PARs/P802.11ax.pdf> (ανακτήθηκε στις 11/10/2022).
- [15] IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016); IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021.
- [16] Aruba. “Wi-Fi 6E in Europe: Frequently Asked Questions”. <https://blogs.arubanetworks.com/solutions/wi-fi-6e-in-europe-frequently-asked-questions/>. (ανακτήθηκε στις 04/02/2023).
- [17] 6 GHz Unlicensed R&O/FNPRM, <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-51A1.pdf>
- [18] Cisco Meraki. “Wi-Fi 6 (802.11ax) Technical Guide”. [https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_6_\(802.11ax\)_Technical_Guide](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Wi-Fi_6_(802.11ax)_Technical_Guide).

- [19] den Hartog, F. & Popescu, A. & Djurica, M. & Kempker, P. & Raschellà, A. & Seyedebrahimi, M. & Arsal, A. (2016). D2.1 Wi-Fi Optimisation Solutions Roadmap.
- [20] Tarokh, V., Jafarkhani, H., Calderbank, A.R. Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs. *IEEE Trans. Inf. Theory* 1999, 45, 1456–1467.
- [21] Theoleyre, F., Menth, M. A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet* 2022, 14, 293. <https://doi.org/10.3390/fi14100293>.
- [22] Yang, D.X., Guo, Y., Aboul-Magd, O. 802.11 ax: The Coming New WLAN System with More Than 4x MAC Throughput Enhancement. In *Proceedings of the IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC)*, Sydney, Australia, 4–7 June 2017
- [23] Yang, H., Deng, D., and Chen, K. "On Energy Saving in IEEE 802.11ax," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47546-47556, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2865763.
- [24] Anastasi, G., Conti, M., Gregori, E., Passarella, A. 802.11 Power-Saving Mode for Mobile Computing in Wi-Fi Hotspots: Limitations, Enhancements and Open Issues. *Wireless Networks* 14(6):745-768.
- [25] Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A. and Bianchi, G. "A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 197-216, Firstquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2871099
- [26] Nurchis, M., & Bellalta, B. (2018). Target Wake Time: Scheduled Access in IEEE 802.11ax WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 26, 142-150.
- [27] IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016); IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021.

- [28] Venkateswaran, S. et al., Payload Symbol Size for 11ax, 2015, [online] Available:
<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0099-03-00ax-payload-symbol-size-for-11ax.pptx>.
- [29] Liu, J. et al., Reliable Dual Sub-Carrier Modulations (DCM) for HE-SIG-B and Data, 2015, [online] Available:
<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1068-01-00ax-reliable-transmission-schemes-for-he-sig-b-and-data.pptx>.
- [30] Shafik, R. et al., On the error vector magnitude as a performance metric and comparative analysis, Jan. 2006.
- [31] KEYSIGHT. "Wi-Fi 7 Signal Analysis and Testing Software". Available online:
https://blogs.keysight.com/blogs/tech/rfmw.entry.html/2022/07/27/wi-fi_7_signal_analysisandtestingsoftware-pURF.html. (ανακτήθηκε στις 01/02/2022).
- [32] Hoefel, R.P.F. IEEE 802.11 ax: On Performance of Multi-Antenna Technologies with LDPC Codes. In Proceedings of the International Conference on Communications and Electronics (ICCE), Hue City, Vietnam, 18–20 July 2018.
- [33] MCS Index Table, Modulation and Coding Scheme Index 11n, 11ac, and 11ax. <https://mcsindex.com/>
- [34] Hsu, C. and Lin, J. "An empirical examination of consumer adoption of Internet of Things services: Network externalities and concern for information privacy perspectives", Computers in Human Behavior, vol. 62, pp. 516-527, Sep. 2016.
- [35] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. and Zorzi, M. "Internet of Things for smart cities", IEEE Internet Things J., vol. 1, no. 1, pp. 22-32, Feb. 2014.
- [36] Stojkoska, B. and Trivodaliev, K. "A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions", J. Cleaner Prod., vol. 140, pp. 1454-1464, Jan. 2017.
- [37] Rodrigues, J. et al. "Enabling technologies for the Internet of health things", IEEE Access, vol. 6, pp. 13129-13141, 2018.

- [38] L. Da Xu, W. He and S. Li, "Internet of Things in industries: A survey", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 4, pp. 2233-2243, Nov. 2014.
- [39] Guerrero-Ibanez, J., Zeadally, S. and Contreras-Castillo, J. "Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle cloud computing and Internet of Things technologies", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 6, pp. 122-128, Dec. 2015.
- [40] Farahani, S. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Amsterdam, The Netherlands:Newnes, 2011.
- [41] Bouaziz, M. and Rachedi, A. "A survey on mobility management protocols in wireless sensor networks based on 6LoWPAN technology", *Comput. Commun.*, vol. 74, pp. 3-15, Jan. 2016.
- [42] Harris, A. et al. "Bluetooth low energy in dense IoT environments", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 30-36, Dec. 2016.
- [43] Yassein, M., Mardini, W. and Khalil, A. "Smart homes automation using Z-Wave protocol", *Proc. IEEE Int. Conf. Eng. MIS (ICEMIS)*, pp. 1-6, 2016.
- [44] Migabo, M. et al. "A comparative survey study on LPWA networks: LoRa and NB-IoT," in *Proc. FutureTechnol. Conf. (FTC)*, Vancouver, BC, Canada, 2017, pp. 1–7.
- [45] "Cellular system support for ultra low complexity and low throughput Internet of Things V2.1.0", Aug. 2015.
- [46] Further LTE Physical Layer Enhancements for MTC, Stockholm, Sweden, Sep. 2014.
- [47] H. Pirayesh, P. K. Sangdeh and H. Zeng, "Coexistence of Wi-Fi and IoT Communications in WLANs," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 8, pp. 7495-7505, Aug. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2986110.

- [48] SemFio Networks. "Mcs Table (Updated With 802.11ax Data Rates)".
<https://semfionetworks.com/blog/mcs-table-updated-with-80211ax-data-rates/>. (ανακτήθηκε στις 14/12/2022)
- [49] Liu, T. and Lu, D. "The application and development of IoT", Proc. Int. Symp. Inf. Technol. Med. Educ., vol. 2, pp. 991-994, Aug. 2012.
- [50] Ashton, K. "That 'Internet of Things' thing", RFID J., vol. 22, pp. 97-114, 2009.
- [51] Qadir, Q. et al. "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies applications and interoperability needs", IEEE Access, vol. 6, pp. 77454-77473, 2018
- [52] Northstream. (2018). "Connectivity Technologies for IoT – Full Report".
https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-164/Northstream-part-of-Accenture-Connectivity-Technologies-for-IoT-Full-Report-2018.pdf. (ανακτήθηκε στις 02/11/2022).
- [53] Inoue, Y. et al., Number of BSS Color Bits, 2015, [online] Available:
<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1075-01-00ax-number-of-bss-color-bits.pptx>
- [54] "IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs". www.ieee802.org.
- [55] Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines. Available online:
https://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm (ανακτήθηκε στις 15/01/2023).
- [56] "IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN," in IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020) , vol., no., pp.1-767, 19 May 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.
- [57] Behrtech (n.d.) 6 Leading Types of IoT Wireless Tech and Their Best Use Cases.
<https://behrtech.com/blog/6-leading-types-of-iot-wireless-tech-and-their-best-use-cases/>

[58] Ding, J., Nemati, M., Ranaweera, C. and Choi, J. "IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey," in IEEE Access, vol. 8, pp. 67646-67673, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932.

[59] Wi-Fi Alliance. "Wi-Fi Easy Connect". <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-easy-connect>. (ανακτήθηκε στις 27/1/2023).

[60] Wi-Fi Alliance. "Wi-Fi Direct". <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct>. (ανακτήθηκε στις 27/1/2023).

[61] Oliveira, L. et al. "MAC layer protocols for Internet of Things: A survey", Future Internet, vol. 11, pp. 16, Jan. 2019

[62] "DCF (Distributed Coordination Function)". https://www.sharetechnote.com/html/WLAN_DCF.html

[63] Mukherjee, S., Peng, X. and Gao, Q. "QoS Performances of IEEE 802.11 EDCA and DCF: A Testbed Approach," 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/WICOM.2009.5300840.

[64] Wu, H., Wang, X., Zhang, Q. and Shen, X. "IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) Throughput Analysis," 2006 IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey, 2006, pp. 223-228, doi: 10.1109/ICC.2006.254731.

[65] The MathWorks Inc. (2022). <https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ax-packet-error-rate-simulation-for-uplink-trigger-based-format.html>. (ανακτήθηκε στις 16/12/2022).

[66] The MathWorks Inc. (2022). <https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ax-multinode-system-level-simulation-of-residential-scenario-using-matlab.html>. (ανακτήθηκε στις 26/12/2022).

[67] The MathWorks Inc. (2022). <https://www.mathworks.com/help/wlan/ug/802-11ax-downlink-ofdma-and-multi-user-mimo-throughput-simulation.html>. (ανακτήθηκε στις 14/1/2023).

Παράρτημα Κώδικα

Σενάριο 1 (Ενότητα 3.1 Μελέτη απόδοσης σε Trigger-Based Uplink πακέτα)

Τα αρχεία κώδικα για αυτό το σενάριο βρίσκονται στο αποθετήριο της εργασίας, στον φάκελο **SENARIA/senario1/**. Για την εκκίνηση της προσομοίωσης πρέπει εκτελεσθεί ο κώδικας που βρίσκεται στο αρχείο **senario1.m**, όπως φαίνεται στο παρακάτω στιγμιότυπο οθόνης (screenshot).

Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται για 5 διαφορετικές συνθήκες (MCS 5, 7, 9, 10 και 11), με 6 διαφορετικά επίπεδα SNR για κάθε περίπτωση. Για κάθε διαφορετικό MCS, η προσομοίωση επαναλαμβάνεται προσαρμόζοντας τις εντολές:

Για MCS 5:

```
cfgSys.User{userIdx}.MCS = 5;  
snr = 24:1:30
```

Για MCS 7:

```
cfgSys.User{userIdx}.MCS = 7;  
snr = 24:1:30
```

Για MCS 9:

```
cfgSys.User{userIdx}.MCS = 9;  
snr = 28:1:34
```

Για MCS 10:

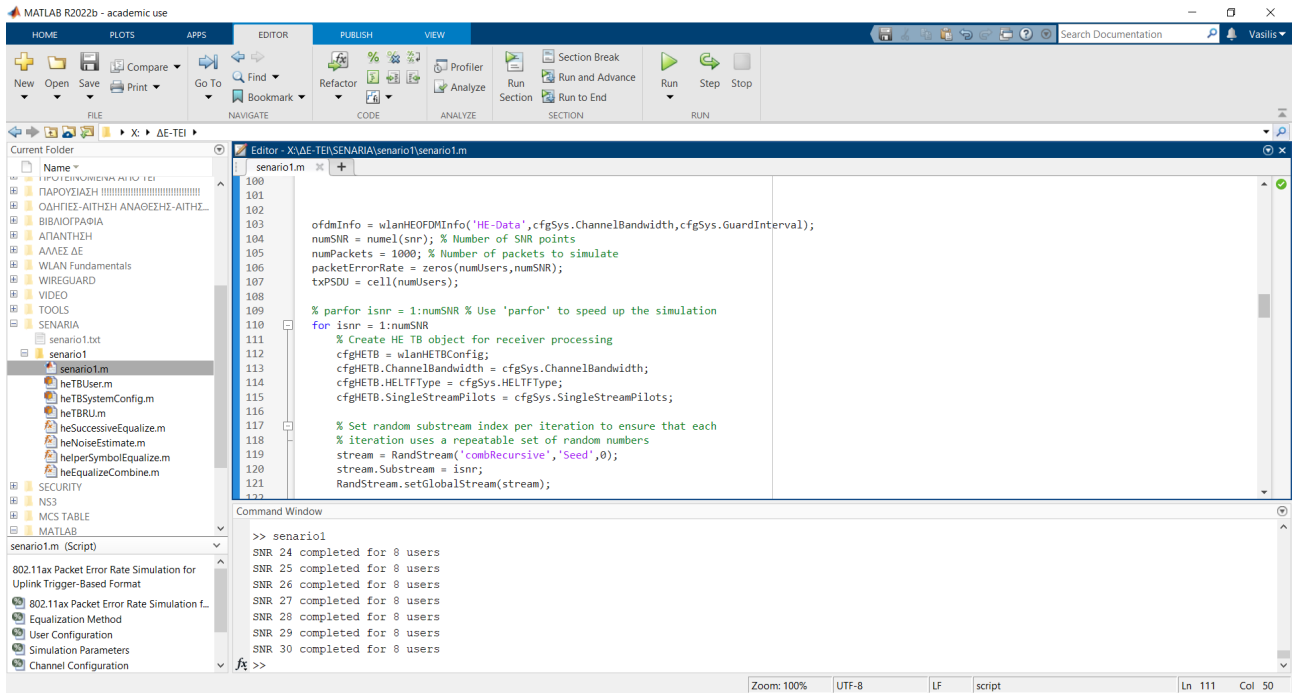
```
cfgSys.User{userIdx}.MCS = 10;  
snr = 34:1:40
```

Για MCS 11:

```
cfgSys.User{userIdx}.MCS = 11;  
snr = 34:1:40
```

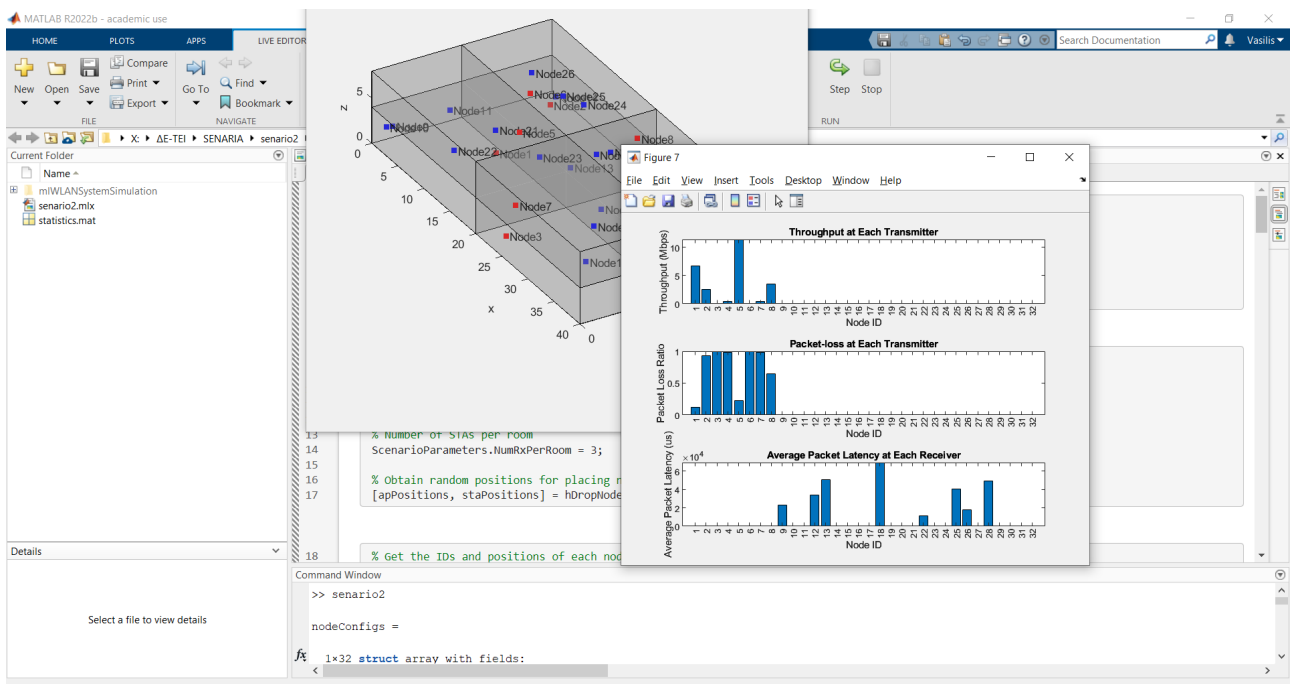
Ο χρόνος ολοκλήρωσης της προσομοίωσης για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις ήταν περίπου 2 ώρες σε σύστημα i5-8250U CPU, 6 GB RAM, Win 10 64b, MATLAB R2022b.

Χρήση του πρότυπου ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11ax στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Μπουρνότος Βασίλειος



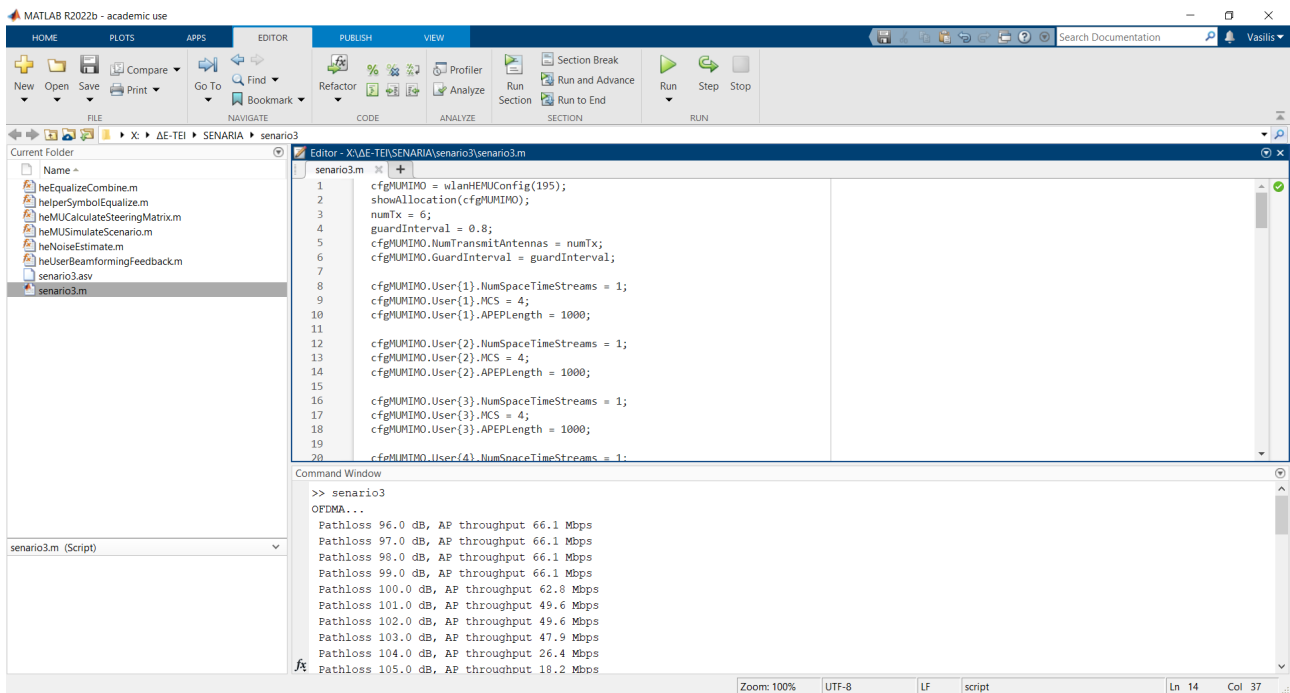
Σενάριο 2 (Ενότητα 3.2 Σενάριο βιομηχανικής εφαρμογής multinode IoT)

Τα αρχεία κώδικα για αυτό το σενάριο βρίσκονται στο αποθετήριο της εργασίας, στον φάκελο **SENARIA/senario2/**. Για την εκκίνηση της προσομοίωσης πρέπει εκτελεσθεί ο κώδικας που βρίσκεται στο αρχείο **senario2.mlx**, όπως φαίνεται στο παρακάτω στιγμιότυπο οθόνης (screenshot).



Σενάριο 3 (Ενότητα 3.3 Μελέτη απόδοσης OFDMA και MU MIMO)

Τα αρχεία κώδικα για αυτό το σενάριο βρίσκονται στο αποθετήριο της εργασίας, στον φάκελο **SENARIA/senario3/**. Για την εκκίνηση της προσομοίωσης πρέπει εκτελεσθεί ο κώδικας που βρίσκεται στο αρχείο **senario3.m**, όπως φαίνεται στο παρακάτω στιγμιότυπο οθόνης (screenshot).



The screenshot displays the MATLAB R2022b environment. The Editor window shows the code for `senario3.m`, which configures a wireless MIMO system and simulates it for different pathloss values. The Command Window shows the execution of `senario3`, resulting in a table of pathloss and AP throughput values.

```
1 cfgMUMIMO = wlanHEMUCConfig(195);
2 showAllocation(cfgMUMIMO);
3 numTx = 6;
4 guardInterval = 0.8;
5 cfgMUMIMO.NumTransmitAntennas = numTx;
6 cfgMUMIMO.GuardInterval = guardInterval;
7
8 cfgMUMIMO.User(1).NumSpaceTimeStreams = 1;
9 cfgMUMIMO.User(1).MCS = 4;
10 cfgMUMIMO.User(1).APELength = 1000;
11
12 cfgMUMIMO.User(2).NumSpaceTimeStreams = 1;
13 cfgMUMIMO.User(2).MCS = 4;
14 cfgMUMIMO.User(2).APELength = 1000;
15
16 cfgMUMIMO.User(3).NumSpaceTimeStreams = 1;
17 cfgMUMIMO.User(3).MCS = 4;
18 cfgMUMIMO.User(3).APELength = 1000;
19
20 cfgMUMIMO.User(4).NumSpaceTimeStreams = 1;
```

```
>> senario3
OFDMA...
Pathloss 96.0 dB, AP throughput 66.1 Mbps
Pathloss 97.0 dB, AP throughput 66.1 Mbps
Pathloss 98.0 dB, AP throughput 66.1 Mbps
Pathloss 99.0 dB, AP throughput 66.1 Mbps
Pathloss 100.0 dB, AP throughput 62.8 Mbps
Pathloss 101.0 dB, AP throughput 49.6 Mbps
Pathloss 102.0 dB, AP throughput 49.6 Mbps
Pathloss 103.0 dB, AP throughput 47.9 Mbps
Pathloss 104.0 dB, AP throughput 26.4 Mbps
Pathloss 105.0 dB, AP throughput 18.2 Mbps
```