



**Πανεπιστήμιο Πειραιώς**

---

**University of Piraeus**

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

## **WIFI EVOLUTION**

**ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

Επιβλέπων: ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΑΛΕΞΙΟΥ

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς

Πειραιώς, 2022

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κ. Αγγελική Αλεξίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς επίσης και την καθοδήγηση τα στην κατανόηση και οργάνωση της διπλωματικής μου εργασίας. Μου δόθηκε η ευκαιρία να μελετήσω σε ένα αρκετά υψηλό επίπεδο το Wi-Fi 7 που αποτελεί το μέλλον της τεχνολογίας. Παρόλο του ότι ακόμα βρίσκεται σε στάδιο περάτωσης των βασικών αρχών που θα το πλαισιώσουν όλα δείχνουν ότι θα αλλάξει δραστικά τον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

## Περίληψη

Το Wi-Fi μεταφέρει παγκόσμια τον μεγαλύτερο όγκο δεδομένων μεταξύ πολλών εφαρμογών. Οι περισσότεροι άνθρωποι, χρησιμοποιούν το Wi-Fi και τις υπηρεσίες που προσφέρει για ανάγκες ενημέρωσης, εκπαίδευσης, ψυχαγωγίας και τον τελευταίο καιρό παρατηρείται μια έντονη δραστηριοποίηση στον τομέα της εργασίας, ειδικά έπειτα από τις πρόσφατες ανάγκες για τηλεργασία. Επίσης μεγάλη αύξηση έχει παρατηρηθεί και στον αριθμό των ηλεκτρονικών συσκευών, όπως smartphone, φορητοί υπολογιστές και αισθητήρες τις τελευταίες δεκαετίες. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν το Wi-Fi ως κύρια ασύρματη συνδεσιμότητα. Βάση των προηγούμενων εύκολα συμπεραίνουμε ότι αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας, για την πλειοψηφία των ανθρώπων. Οι σύγχρονες συσκευές (router), που έχουμε στα σπίτια μας, έχουν αρχίσει να εξελίσσονται δραματικά. Πλέον μπορούμε να τις ρυθμίσουμε ανάλογα με τις ανάγκες μας. Μια από τις βασικές επιλογές που υπάρχει στις συσκευές του παρόντος και θα υπάρχει για τις συσκευές του μέλλοντος είναι η δυνατότητα σύνδεσης σε διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων (2.4Ghz ή στο 5Ghz). Η επόμενη γενιά των router, βάση των αναμενόμενων, θα περιέχει και την δυνατότητα επιλογής ακόμα μιας μπάντας, αυτή των 6Ghz. Η μπάντα των 6Ghz αναμένεται έως το τέλος του 2023 να υπάρχει διαθέσιμη για τις συσκευές των Wi-Fi. Οι συσκευές αυτές θα λειτουργούν βάση του πρωτόκολλου του 6Ghz, το 802.11.ax. Όμως, πρέπει να τονιστεί ότι οι έρευνες δεν έχουν σταματήσει εκεί. Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει η διαδικασία της προτυποποίησης του Wifi-7 το οποίο θα βασίζεται στο 802.11be με κύρια band αυτή των 6Ghz. (Extremely High Throughput). Έρευνες για τεχνικές πάνω στην συχνοτική περιοχή των 6Ghz έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για το πρωτόκολλο 802.11.ax και οι ερευνητές έχουν απομονώσει τις καλύτερες ώστε να τις προσθέσουν στο μοντέλο του wifi-7. Ειδικότερα σε αυτή την εργασία θα γίνει ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του πρωτοκόλλου βάση αυτών που έχει παρουσιάσει η IEEE. Έπειτα θα γίνει ανάδειξη των στόχων της IEEE για το wifi evolution. Τέλος θα αναφερθούμε σε τεχνικές, άλλες υπό χρήση, υπό σχεδιασμό, που έχουν σαν στόχο να συμπεριληφθούν στο 802.11.be.

## Περιεχόμενα

1	WIFI 7 introduction.....	7
2	PHYSICAL LAYER .....	9
2.1	Expanded bandwidth (320Mhz band width).....	9
2.2	Support multi RU .....	10
2.3	4K QAM .....	10
2.4	Preambles.....	10
3	MAC LAYER.....	12
3.1	Multi-Link .....	12
3.2	Αύξηση των spatial streams and MIMO.....	12
3.3	Distributed operations among neighboring APs .....	12
3.4	Link adaptation .....	13
4	ADVANCED FEATURES .....	14
4.1	EXTREMELY HIGH THROUGHPUT PHYSICAL.....	14
4.2	High modulation .....	16
5	Multi-link.....	18
5.1	Multi-link general.....	18
5.2	Multi-link devices.....	18
5.3	Asynchronous vs. Synchronous Transmissions on Multi-Link .....	21
5.4	Design of Synchronous Multi-Link Distributed Coordination Functions .....	23
5.5	Multi-link operation.....	25
5.5.1	Περιγραφή μοντέλου .....	26
5.5.2	Έναρξη πειράματος .....	27
5.5.3	Delay performance.....	28
5.6	Multi-AP Network Architecture.....	30
6	HARQ .....	32
6.1	Hybrid Automatic Repeat Request Protocol (HARQ) .....	32
6.1.1	LDPC Puncturing.....	32
6.1.2	Επίδραση της διάτρησης στο κέρδος κωδικοποίησης.....	33
6.1.3	Πρωτόκολλο ARQ vs HARQ.....	33
6.1.4	Προβλήματα στην υλοποίηση του HARQ.....	34
7	Υλοποίηση του μοντέλου EHT transceiver.....	36
7.1	Υλοποίηση μοντέλου .....	36
7.1.1	High-Power Amplifier Modeling.....	37

7.1.2	Θερμικός θόρυβος .....	37
7.1.3	Modulation Accuracy (EVM) και Spectral Flatness Measurements .....	37
	Downsampling και Filtering .....	37
7.1.4	Receiver Processing .....	38
7.1.5	Μετρήσεις EVM .....	38
7.1.6	Setup EVM measurements .....	38
7.1.7	Spectral Mask Measurement.....	41
7.1.8	Results.....	41
7.2	Δεύτερη εφαρμογή.....	44
7.2.1	PACKET ERROR RATE .....	44
7.2.2	Waveform Configuration.....	44
7.2.3	Channel Configuration.....	44
7.2.4	Simulation Parameters .....	44
7.2.5	PLOTS ERROR RATE VS SNR .....	47
7.2.6	Επιπλέον εξήγηση .....	48
8	Συμπεράσματα .....	50
9	Λεξικό .....	51
10	Βιβλιογραφία .....	53

## Πίνακας εικόνων

<b>Εικόνα 1:</b> Tone Planing.....	10
<b>Εικόνα 2:</b> Frequency per band.....	14
<b>Εικόνα 3:</b> Allowed combination of RU52+RU26 for 80 MHz PPDU .....	15
<b>Εικόνα 4:</b> Allowed combination of RU106+RU26 for each 80 MHz segment in 80, 160, 240, and 320 MHz bandwidth. ....	16
<b>Εικόνα 5:</b> Infrastructure models for conventional IEEE 802.11 and 802.11be. (a) Conventional IEEE 802.11 infrastructure. Article: “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs” .....	19
<b>Εικόνα 6:</b> Considerations on designing multi-link distributed coordination function (DCF) for non-simultaneously transmit. Article: “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs” .....	20
<b>Εικόνα 7:</b> Multi-link transmission. Article: “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs” .....	21
<b>Εικόνα 8:</b> Illustrations of synchronous multi-link DCFs for supporting non-STR multi-link devices (MLDs).(a) Single-link access (SLA), (b) multi-link access with the shortest backoff (MLA-S), (c) multi-link access with the longest backoff (MLA-L),(d) multi-link access with end-time alignment (MLA-A) Article: “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs” .....	25
<b>Εικόνα 9:</b> Dual band link aggregation .....	25
<b>Εικόνα 10:</b> Example values Article: “An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation” .....	26
<b>Εικόνα 11:</b> SLO - MLO(STR) - MLO (NSTR) Article: “An Experimental Study of Latency for .....	27
<b>Εικόνα 12:</b> Symmetrical results Article: “An Experimental Study of Latency for <i>IEEE 802.11be Multi-link Operation</i> ” .....	28
<b>Εικόνα 13:</b> Asymmetrical results Article: “An Experimental Study of Latency for .....	29
<b>Εικόνα 14:</b> Opportunistic MLO-STR Article: “An Experimental Study of Latency for .....	30
<b>Εικόνα 15:</b> Multi-AP Architecture .....	31
<b>Εικόνα 16:</b> PERFORMANCE COMPARISON Article: “Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems” .....	33
<b>Εικόνα 17:</b> HARQ IR STEPS Article: “Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems” .....	34
<b>Εικόνα 18:</b> Equalized data symbols.....	42
<b>Εικόνα 19:</b> Array Plot .....	42
<b>Εικόνα 20:</b> Spectral Flatness.....	43
<b>Εικόνα 21:</b> PER(EHT MU) για τιμή MCS 13.....	48
<b>Εικόνα 22:</b> Per(EHT) διάφορες τιμές MCS.....	49

# 1 WIFI 7 introduction

Το Wi-Fi σχεδιάστηκε, όπως το Ethernet από το οποίο εμπνεύστηκε, για να υλοποιεί τοπικά δίκτυα χρησιμοποιώντας ανάγνωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα προϊόντα Wi-Fi βασίζονται στα πρωτόκολλα WLAN που δημοσιεύθηκαν από το 1997 από την IEEE με την ονομασία 802.11. Η IEEE είναι ένα από τα κύρια Αμερικανικά ινστιτούτα για την τυποποίηση των τεχνολογιών επικοινωνίας. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές Wi-Fi, χαρακτηριστικά πάνω από 9 δισεκατομμύρια συσκευές λειτουργούν μέσα από το Wi-Fi (τηλεοράσεις, αισθητήρες, υπολογιστές, κινητά, tablets) και έχουν κατά κύριο λόγο παρόμοιες ανάγκες λειτουργίας. Αυτές οι ανάγκες συνοψίζονται από την πλευρά του χρήστη με τις απλές λέξεις ταχύτητα και αξιοπιστία. Όπως αναφέραμε το 802.11be ονομάζεται και extremely high throughput “EHT”. Ο όρος αυτός έρχεται να καλύψει τις ανάγκες των χρηστών σε όλο τον κόσμο μέσα από μεγάλα data rates και ακρίβεια. Οι μελέτες δείχνουν τις ανάγκες του μέσου χρήστη να ανεβαίνουν. Οι απαιτήσεις για video 4 ή 8k ανάλωση αυξάνει το data rate στα 20Gbps. Το Wi-Fi 7 έρχεται να υπερνικήσει αυτούς αριθμούς διότι πλέον το data rate θα φτάνει στα έως και τα 30Gbps per AP. Ωστόσο λόγω των παραπάνω γίνεται γνωστή η ανάγκη καινούργιων ultra-high throughput και αυστηρότερων ως προς το latency application. Φυσικό επόμενο είναι να υπάρχει δυσκολία με την δημιουργία backward compatibility για τα καινούργια applications. Πράγμα που δημιουργεί ανάγκες για λογισμικό ικανό να καλύψει αυτό το τεχνολογικό χάσμα. Επίσης, πρέπει να επισημάνουμε την ανάγκη για συσκευές που να μπορούν να αξιοποιήσουν την καινούργια αυτή τεχνολογία. Ένα καθημερινό παράδειγμα είναι η χρήση των 5Ghz. Πολλές συσκευές δεν μπορούν ακόμα και σήμερα να αξιοποιήσουν την επιλογή του 5G στα routers. Πρέπει να τονιστεί ότι το wifi-7, όντας 4 φορές πιο γρήγορο από το wifi-6, θα δώσει στις εφαρμογές του μέλλοντος έναν άλλο τρόπο λειτουργίας. Αυτές οι εφαρμογές που θα βασιστούν σε high throughputs θα υπολειτουργούν με μικρότερα data rates ή και ακόμα δεν θα λειτουργούν. Άρα χρειάζεται να οριστικοποιηθούν οι τεχνικές που θα βοηθήσουν να αυξηθεί η αξιοπιστία της τεχνολογίας και να γίνεται σωστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η TG (task group) έχει αναγνωρίσει την ανάγκη για low latencies, για να υπάρχει reliability. Έτσι λοιπόν από 2021 έως το 2022 έχει αποφασιστεί να οριστικοποιηθεί το release 1 για το 802.11.be με τους ακόλουθους τομείς:

- Multy-link operation
- 320Mhz bw
- Low complexity AP coordination
- 4k QAM
- Multiple resources units per STA

Για να βελτιώσετε την απόδοση σε σενάρια εξωτερικού χώρου και να προσθέσετε μεγαλύτερη ευελιξία στο OFDMA, το 802.11be κατεβάζει την αριθμολογία OFDM κατά τέσσερις φορές, τετραπλασιάζοντας έτσι τον αριθμό των τόνων. Συνεπώς, η διάρκεια του OFDMA συμβόλου γίνεται 12,8 (συν) το διάστημα προστασίας(guard) των 0,8, 1,6 ή 3,2 μs. Με το μικρότερο διάστημα φρουράς, να δίνει 10% μειωμένη επιβάρυνση σε σύγκριση με το Wi-Fi 5. Για να αυξηθεί η απόδοση, το Wi-Fi 6 ενεργοποιεί το 1024-QAM που μεταφέρει 25% περισσότερα “ακατέργαστα” δεδομένα από το 256-QAM του Wi-Fi 5. Παρατηρείται

επίσης ότι το Wi-Fi 7 θα έχει πάρα πολύ καλύτερη απόδοση σε πυκνές αναπτύξεις. Η βελτίωση της εμπειρίας χρήστη απαιτεί αναγκαία συνθήκη για το Wi-Fi 7. Οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων δεν αρκούν για υποστήριξη RTT, επειδή τα πακέτα μπορούν να περιμένουν πολύ χρόνο για να μείνει το κανάλι σε αδράνεια. Έτσι, εκτός από την παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων, το 802.11be ασχολείται με την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) του RTT. Στα δίκτυα Wi-Fi, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για παροχή το QoS. Ωστόσο, μόνο ένα από αυτά, συγκεκριμένα η Βελτιωμένη Πρόσβαση Κατανεμημένου Καναλιού (EDCA), χρησιμοποιείται. Η EDCA διακρίνει τους τύπους επισκεψιμότητας φωνής, βίντεο, βέλτιστης προσπάθειας και παρασκηνίου αναθέτοντάς τους διαφορετικούς Κατηγορίες πρόσβασης (AC). Καθώς η EDCA επεκτείνει την πρόσβαση στο βασικό παραμετρικό κανάλι, δεν μπορεί να εγγυηθεί την ποιότητα εξυπηρέτησης. Ως μέρος αυτής της μεταπτυχιακής θα ασχοληθούμε με την ανάλυση του μοντέλου του Wi-Fi 7 με πιο συγκεκριμένες αναφορές στο θεωρητικό υπόβαθρο που βρίσκεται υπό ανάπτυξη καθώς επίσης και τις βασικές αλλαγές ανά layer (Physical και Mac) μαζί με τις αντίστοιχες τεχνικές που θα προσαρμοστούν στο Wi-Fi ώστε να επιτευχθούν τα παραπάνω .



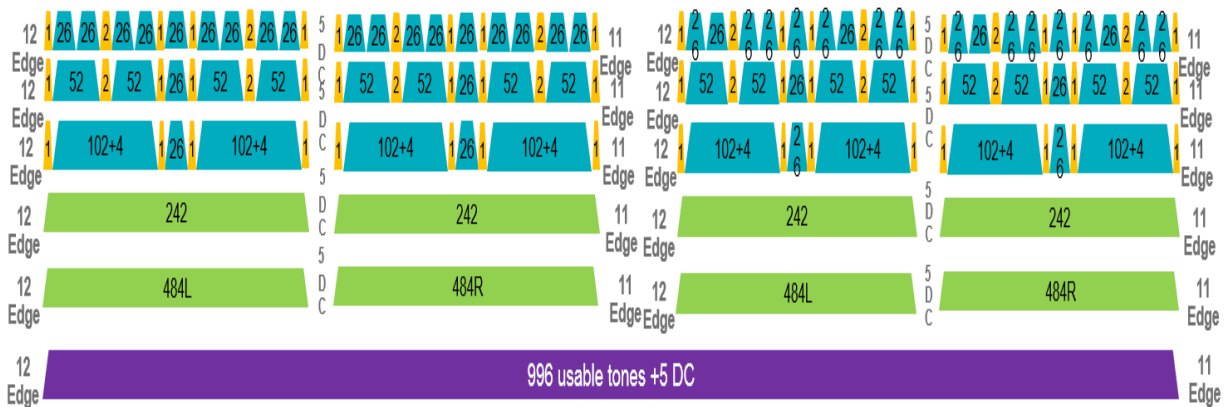
## 2 PHYSICAL LAYER

### 2.1 Expanded bandwidth (320Mhz band width)

Γνωρίζουμε ότι στα 2.4Ghz και 5Ghz band υπάρχει ένα μεγάλο κομμάτι που είναι unlicensed. Συνδυαστικά με την ταχύρρυθμη αύξηση των εφαρμογών οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα που έχουμε δημιουργήσει θα μεταβούν σε μια οριακή κατάσταση. Αυτή η οριακή κατάσταση θα καταστήσει αδύνατη την λειτουργία application διότι θα υποφέρουν από low quality of service. Για να καταφέρουμε να έχουμε 30Gbps θα πρέπει να κάνουμε expand το bandwidth που είναι υπό χρήση. Χαρακτηριστικά υπάρχουν οι αναφορές για contiguous bw της τάξεως των 240Mhz, μη συνεχές bandwidth 160+80Mhz και 320Mhz, μη συνεχές bandwidth 160+160Mhz. Όμως, τα καινούργια δεδομένα των καναλιών απαιτούν και καινούργιο σχεδιασμό για τα tones. Χαρακτηριστικά βάση των μέχρι σήμερα δεδομένων έχουμε τον ακόλουθο πίνακα για το OFDMA.

RU Type	CBW20	CBW40	CBW80	CBW80+80 and CMW160	Data nSubcarriers	Pilot Subcarriers
26-Tone RU	9	18	37	74	24	2
52-Tone RU	4	8	16	32	48	4
106-Tone RU	2	4	8	16	102	4
242-Tone RU	1	2	4	8	234	8
484-Tone RU	N/A	1	2	4	468	16
996-Tone RU	N/A	N/A	1	2	980	16
2x996 Tone RU	N/A	N/A	N/A	1	1960	0

Στον πάνω πίνακα έρχονται να προστεθούν τα 320 Mhz για το πρωτόκολλο του 802.11.be. Χαρακτηριστικά για το OFDMA οι κύριες συζητήσεις γίνονται για τις συχνότητες των 240Mhz και 320Mhz. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν 2 υποπεριπτώσεις λόγω του διαχωρισμού των συχνοτήτων. Η πρώτη είναι να δημιουργηθούν 3 κανάλια των 80Mhz το καθένα και η άλλη είναι να υπάρχουν δύο κανάλια, ένα των 160MHz και ένα των 80Mhz. Βασικό ρόλο στην επιλογή των συχνοτήτων είναι η τεχνική του puncturing που θα μιλήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Ακολουθως βλέπουμε το toneplan για 80MHz.



Εικόνα 1: Tone Planning

## 2.2 Support multi RU

Σύμφωνα με τα δεδομένα που είχαμε μέχρι σήμερα (802.11ax) σε κάθε χρήστη εκχωρείται ένα RU με σκοπό την αποστολή ή λήψη. Το 802.11be αλλάζει τα δεδομένα και πλέον θα επιτρέπεται multiple RU assignment. Με αυτόν τον σχεδιασμό θα δώσει μεγαλύτερη ευελιξία στο κομμάτι του resource scheduling. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να δημιουργηθούν τεχνικές RU-management και RU-assignment. Όμως, πρέπει να επισημανθεί ότι οι τεχνικές λεπτομέρειες δεν έχουν ακόμα οριστεί για το multiple RU.

## 2.3 4K QAM

Βάση της προτυποποίησης που υπάρχει για το Wi-Fi 7 θα γίνει χρήση της διαμόρφωσης των 4096-QAM με σκοπό την βελτίωση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων. Το μέχρι τώρα διαθέσιμο modulation rate είναι τα 1024-QAM όπου και χρησιμοποιείται στο μοντέλο 802.11.ax(1 σύμβολο διαμορφωμένο ανά 10bit). Η πρόταση λόγω των μεγαλύτερων δυνατοτήτων του 4096-QAM είναι για το EHT είναι το 1 modulated symbol να κουβαλάει 12 bits. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει 20% μεγαλύτερο data rate σε σχέση με την 1024-QAM διαμόρφωση. Όμως, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι για αυτή την υλοποίηση πρέπει να υπάρχουν τεχνικές όπως coding strategies, the number of streams, error vector magnitude (EVM) και multiple receiving antennas κατάλληλες για την συγκεκριμένη διαμόρφωση.

## 2.4 Preambles

Μέχρι το EHT, κάθε πρωτόκολλο παρουσίαζε διαφορετικές μορφές preamble που εισάγονται σε κάθε γενιά προτύπων WLAN. Τα preambles μπορούν να ενεργοποιήσουν την δυνατότητα λειτουργιών όπως του συγχρονισμού, του αυτόματου ελέγχου πρόσβασης, διόρθωση χρόνου/συχνότητας, του channel estimation, την αυτόματη ανίχνευση για να διαφοροποιήσετε την έκδοση δεδομένων ενός φυσικού πρωτοκόλλου μονάδα (PPDU) και απαραίτητη σηματοδότηση (π.χ. κατανομή πόρων πληροφορίες) κ.λπ. Σύμφωνα με την PAR ο σχεδιασμός θα πρέπει να διασφαλίζει τη συμβατότητα και τη συνύπαρξη των παλαιότερων PPDU που μεταδίδονται στα 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Στο EHT λόγω των πολλών νέων τεχνικών που αναπτύσσονται όπως το multi-RU και το MU-MIMO δεν έχει υπάρξει ακόμα κάποιο standard ώστε να μπορέσει να γίνει η προτυποποίηση των

preambles. Πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικό παράγοντα θα αποτελέσει η μέθοδος του puncturing

## 3 MAC LAYER

### 3.1 Multi-Link

Όπως προαναφέραμε για να εκπληρώσει την υπόσχεση με μέγιστη απόδοση τουλάχιστον 30 Gbps το EHT πρέπει να αλλάξει το χαμηλό QoS εφαρμογών, όπως VR/AR. Για να εκπληρώσει αυτή την υπόσχεση με μέγιστη απόδοση τουλάχιστον 30 Gbps, το EHT επεκτείνει το εύρος ζώνης. Πλέον θα γίνεται χρήση πολλαπλών ζωνών στα 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz, κερδίζοντας έτσι μέσα από την συνάθροιση εύρος ζώνης έως και 320 MHz. Ωστόσο, προκλήσεις όπως η επιλεκτικότητα συχνότητας καναλιού σε ένα πολύ ευρύτερο και μη συνεχόμενο εύρος ζώνης, μπορεί να διαφέρει ανά περίπτωση και να μην είναι πάντα δυνατή η συχνοτική συνάθροιση. Για αυτό και θεωρείται δεδομένη η ανάγκη για Backwards compatibility. Στις legacy λειτουργίες multi-band(π.χ. γρήγορη συνεδρία μεταφορά (FST)), υπάρχει περιορισμός ότι η "MAC service data units" (MSDU) που ανήκουν σε μια ενιαία Traffic identification(TID) μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο μία ζώνη, με αποτέλεσμα σημαντικό MAC overhead για ένα session transfer. Έτσι, για να βελτιωθεί το transmission και ελαχιστοποιηθεί το MACoverhead, των υπάρχοντα μοντέλα MAC πρέπει να διαμορφωθούν κατάλληλα για το EHT, αυτό δηλαδή, ένα STA μπορεί να μεταδώσει πλαίσια του ίδιου TID ή διαφορετικών TID σε πολλαπλές ζώνες ταυτόχρονα ή μη. Για τέτοια βελτίωση MAC, η ορολογία "multi-link" που χρησιμοποιείται στο EHT προτιμάται έναντι του "multi-band". Ωστόσο, για την τυποποίηση της υποστήριξης πολλαπλών συνδέσμων σε EHT, συζητήσεις και προσπάθειες για την αρχιτεκτονική πολλαπλών συνδέσμων, τη λειτουργία και τις λειτουργίες ακόμα πρέπει να συνεχιστεί.

### 3.2 Αύξηση των spatial streams and MIMO

Για να καταφέρουμε να καλύψουμε τις ανάγκες που δημιουργούνται λόγω του αυξημένου αριθμού Wi-Fi AP, γινόταν συνεχής αύξηση του αριθμού των κεραιών που είχαν τα AP σε συνδυασμό με καλύτερες τεχνικές χωρικής πολυπλεξίας. Στο 802.11ax ένας εξοπλισμός με 8 κεραιές δύναται να εξυπηρετήσει έως και 8 χρήστες που κάνουν είτε uplink είτε downlink μέσα από MU-MIMO. Συνεχίζοντας με αυτή την λογική η αρχική πρόταση που υπάρχει για το 80211.be είναι τα maximum spatial streams να είναι 16 με σκοπό να υπάρξει καλύτερο capacity. Όμως, η αύξηση αυτή έρχεται με ένα κόστος. Αυτό το κόστος είναι το overhead. Βάση του 802.11ax οι ειδικοί αναφέρουν εάν υπάρχουν 16 διαφορετικές ροές δεδομένων θα υπάρχει τεράστιο feedback overhead. Οπότε με γνώμονα τα παραπάνω εύκολα μπορούμε να συμπεράνουμε την ανάγκη δημιουργίας καινούργιων τεχνικών για την υποστήριξη μεγαλύτερων ροών.

### 3.3 Distributed operations among neighboring APs

Το πρωτόκολλο 802.11ax που έχει ορίσει η IEEE υποστηρίζει μόνο μετάδοση προς/από ένα μόνο σημείο πρόσβασης . Δεν χρησιμοποιείται η μέθοδος της χωρικής επαναχρησιμοποίηση(special reuse) μεταξύ AP και STA. Με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συντονισμός μεταξύ γειτονικών AP. Το μειονέκτημα που απορρέει λόγω των παραπάνω είναι ότι δεν υπάρχουν αναπτυχθεί σημαντικά features όπως ο χρονοπρογραμματισμός και η διαχείριση των πόρων βάση μιας χωρικής προσέγγισης. Για να το βελτιώσει αυτό, το EHT επεκτείνει τις δυνατότητές του υποστηρίζοντας την κοινή χρήση δεδομένων και

πληροφοριών μεταξύ των AP βελτιώνοντας έτσι το φάσμα αποδοτικότητα και αυξάνοντας τη μέγιστη απόδοση μειώνοντας το latency. Αυτό το κύριο χαρακτηριστικό διαφοροποιεί το EHT με το IEEE To 802.11ax. Αυτές οι καινούργιες δυνατότητες θα πραγματοποιηθούν μέσα από coordinated spatial reuse (CSR), coordinated orthogonal frequency-division multiple access(C-OFDM), coordinated beamforming(CBF) και joint transmission(JXT). Βασική ανάγκη θα αποτελέσει η σωστή αρχιτεκτονική του δικτύου. Πλέον η επικοινωνία δεν θα πραγματοποιείται πάντα μέσα από κάποιο κεντρικό σταθμό που θα διεκπεραιώνει την διαχείριση ως central node. Θα υπάρχει επικοινωνία των AP με τα γειτονικά AP με σκοπό την αναγνώριση του δικτύου και θα γίνεται αξιολόγηση βάση των αναγκών/απαιτήσεων ανά περίπτωση. Επομένως, μια αποτελεσματική διαδικασία συντονισμού (multi-AP και μετάδοση πολλαπλών AP) με χαμηλό κόστος και πολυπλοκότητα επεξεργασίας απαιτείται για την υποστήριξη όλων των τύπων συντονισμού πολλαπλών AP. Σε όλα αυτά πρέπει να σημειωθεί η σημαντικότητα της ύπαρξης τεχνικών για resource allocation. Από την στιγμή όπου τα AP πλέον θα λαμβάνουν την πληροφορία μεταξύ τους πρέπει να υπάρχει ακριβής συγχρονισμός μεταξύ των γειτονικών AP.

### **3.4 Link adaptation**

Η αξιοπιστία κατά την μετάδοση είναι μια ακόμα σημαντική ανησυχία για EHT. Τα τρέχοντα συστήματα IEEE 802.11 βασίζονται στην αναμετάδοση του MAC protocol data unit (MPDU) για διασφάλιση αξιοπιστίας κατά την μετάδοση σε τυχαία μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Η λειτουργία αυτή γίνεται μέσα από το πρωτόκολλο(ARQ)automatic repeat request, όπου ο δέκτης απλώς απορρίπτει τα λανθασμένα MPDU. Με την απαίτηση για υψηλότερη αξιοπιστία και χαμηλότερη καθυστέρηση, το 802.11be θα κάνει χρήση του HARQ. Αναμένεται να εφαρμοστεί στο EHT, το οποίο επιτρέπει τον συνδυασμό των λανθασμένων πακέτων, αντί για την απόρριψή τους, με σκοπό για τη βελτίωση της πιθανότητας σωστής αποκωδικοποίησης. Σε αντίθεση με το ARQ, στο HARQ, ο δέκτης θα αποθηκεύει τα πακέτα που έχουν αποκωδικοποιηθεί λάθος και θα τα συνδυάζει τα με τις αναμεταδόσεις των επόμενων retransmitted πακέτων. Παρόλα αυτά, τα θετικά του συνδυασμού υπάρχουν αρκετά ζητήματα σχετικά με την εφαρμογή του HARQ. Κάποια από αυτά αναφορικά είναι το κέρδος, το overhead, η ενίσχυση των AP για την αποθήκευση των χαμένων πακέτων αντί γιατί για την απόρριψή τους και άλλα. Άμεσα από τα προηγούμενα προκύπτουν και τα ερωτήματα. Πώς και σε ποιο layer το HARQ μπορεί να υποστηριχθεί καλύτερα; Ποιο είναι το trade off της χρήσης του HARQ; Όλα αυτά θα εξηγηθούν αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο μαζί με την λειτουργία του πρωτοκόλλου HARQ για το 802.11be

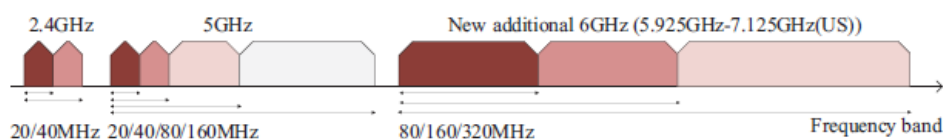
## 4 ADVANCED FEATURES

### Περιγραφή 802.11be από την IEEE (320MHz bandwidth)

Τα πλεονεκτήματα λόγω της αύξησης του εύρους ζώνης σε περισσότερα από 160Mghz είναι πολλά και εντοπίζονται κυρίως στον τομέα του Qos

#### 4.1 EXTREMELY HIGH THROUGHPUT PHYSICAL

Το 802.11.be AP θα πρέπει να περιέχει απαραίτητα τα παρακάτω:



*Εικόνα 2: Frequency per band*

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το μέγιστο δυνατό bw που μπορεί να εκχωρηθεί ανά περίπτωση. Χαρακτηριστικά τα 40MHz δημιουργούνται από 2 συνεχόμενα 20MHz και τα 160MHz αντίστοιχα από 2 συνεχόμενα 80MHz. Τα κανάλια αυτά δεν μπορούν να υποστηρίξουν με επάρκεια τις ανάγκες για video των 8k σε συνδυασμό με τις ανάγκες για high throughput και low latency. Επί του παρόντος, η νέα πρόσθετη ζώνη των 6 GHz (5.925 GHz-7.125 GHz, στις Η.Π.Α.) , με συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης 1,2 GHz είναι τώρα υπό συζήτηση με σκοπό το άνοιγμα σε WLAN. Το βασικό νέο χαρακτηριστικό της ζώνης 6GHz, θα είναι το εύρος ζώνης έως 320 MHz, ακολουθώντας τον υπάρχοντα κανόνα επέκτασης εύρους ζώνης που θα δημιουργείται από δύο ασυνεχή εύρη ζώνης 160 MHz

- 160Mhz κανάλια με εύρος τα 6Ghz
- 80Mhz κανάλια με εύρος τα 5Ghz
- 20Mhz κανάλια με εύρος τα 2.4Ghz

Το 802.11.be για τα NON-AP stations θα πρέπει να περιέχει απαραίτητα τα παρακάτω:

Θα υπάρχει το support για τα 80Mhz στις μπάντες του 5Ghz και 6Ghz. Για την χρήση 20Mhz καναλιού θα ακολουθηθεί ότι έχει δομηθεί για τα 2.4/5Ghz.

Βασικό ρόλο για τα παραπάνω θα συντελέσει το multi-channel aggregation. Ο όρος αυτός αναφέρεται στον χωρισμό των ζωνών ανά περίπτωση. Όπως προείπαμε για τα 4 GHz, 5 GHz και 6 GHz, ο χωρισμός θα είναι όπως ακολούθως. 20/40 MHz (2,4 GHz) + 20/40/80/160 MHz (5 GHz)+80/160/320 MHz (6 GHz). Στην πρώιμη συζήτηση, έχει συμφωνηθεί ότι :

- Συνεχόμενα θα είναι 240 MHz
- Μη συνεχόμενα 160+80 MHz
- Συνεχόμενα 320 MHz
- Μη συνεχόμενα 160+160 MHz

Με αυτό τον τρόπο θα υποστηρίζονται ως νέες λειτουργίες εύρους ζώνης για EHT. Άλλες μη συνεχόμενες λειτουργίες εύρους ζώνης (π.χ. 20+40+80 MHz) δεν ενδείκνυται από την άποψη του σχεδιασμού υλικού διότι απαιτούν πολύ περίπλοκο σχεδιασμό. Η νέα λειτουργία 240 MHz/160+80 MHz είναι κατασκευασμένο από τρία κανάλια 80 MHz ενώ το tone plan για κάθε τμήμα 80 MHz είναι το ίδιο με 80 MHz στο IEEE 802.11ax. Ωστόσο, χρειάζονται ακόμη περισσότερες συζητήσεις, για την μέθοδο του Puncturing που θα ακολουθηθεί. Δεδομένου ότι το εκκρεμεί η σχεδίαση των preambles για το EHT, το tone plan για non-OFDMA 320 MHz/160+160 MHz είναι ακόμα υπό συζήτηση. Για τη μετάδοση OFDMA στα 320 MHz/160+160 MHz, συνδυασμοί RU μεγάλου μεγέθους (π.χ. 2 × 996 τόννοι RU+484- τόννος RU) (δεν έχουν καθοριστεί μέχρι τώρα). Η φύση των non-OFDMA PPDU είναι η υλοποίηση του preamble puncturing για SU υπό τη μορφή OFDMA, ενώ έχουν εκχωρηθεί όλες οι RU στον ίδιο χρήστη. Για τα υπάρχοντα 20/40/80/160/80+80 MHz εύρος ζώνης, το EHT μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει σχέδια τόνου IEEE 802.11ax.

### A. Large BandWidth

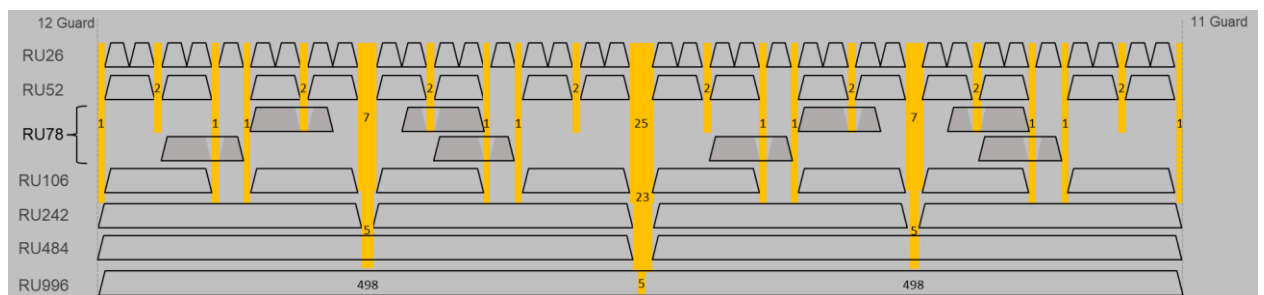
Ο σχεδιασμός του 802.11be υποστηρίζει ότι στα 80 και 160MHz με την χρήση του OFDMA στο uplink και downlink θα υπάρχει πολύ μεγαλύτερο Bw. Πλέον θα μπορούν να γίνονται decode τα preamble καθώς και τα αντίστοιχα RU.

### B. Multiple RU

Με την χρήση του 802.11be ορίζεται ένας καινούργιος τρόπος χρήσης των resource units. Αυτός που θα επιτρέπει πολλαπλά assignments από resource units σε ένα station. Εδώ υπάρχουν οι ακόλουθοι διαχωρισμοί. Όταν το έχουμε από 242 tones και περισσότερο το RU θεωρείται large size. Αντίθετα small size θεωρούνται αυτοί με μικρότερους από 242 tones. Η κωδικοποίηση για την χρήση πολλαπλών resource units ακόμα δεν έχει σχεδιαστεί.

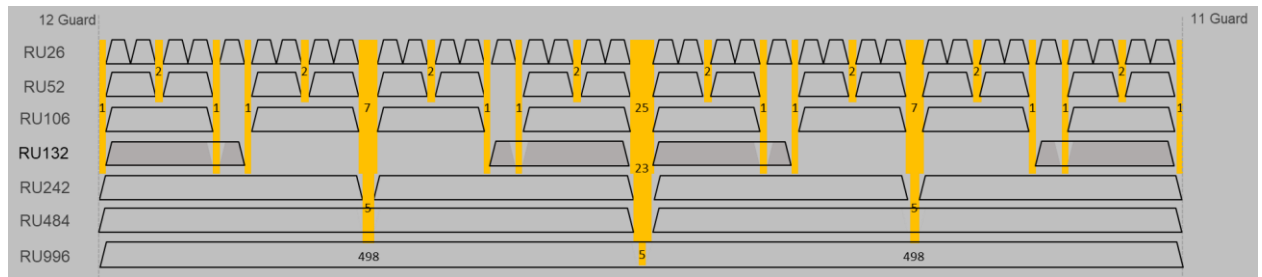
### C. Small size RU

Για μικρά RU έχουν οριστεί κάποιοι συνδυασμοί για τα tones και παραδειγματικά προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα, αναλυτικότερα.



Εικόνα 3: Allowed combination of RU52+RU26 for 80 MHz PPDU

Θα υπάρχει ένας συνδυασμός από το RU26 και RU52. Το αποτέλεσμα που δημιουργείται είναι το RU78 όπως δείχνει το σχήμα.



*Εικόνα 4: Allowed combination of RU106+RU26 for each 80 MHz segment in 80, 160, 240, and 320 MHz bandwidth.*

Για 80MHz segments θα υπάρχει επίσης συνδυασμός από το RU106 και RU26. Το αποτέλεσμα που δημιουργείται είναι το RU132 όπως δείχνει το σχήμα.

#### D. Large size RU

Για τα large size RU που κάνουν transmit σε 320/160+160MHz το aggregation επιτρέπεται αποκλειστικά ή στο πρώτο μισό ή στο δεύτερο μισό.

Για τα large size RU που κάνουν transmit σε 240 Mhz/160 + 80 Mhz το aggregation επιτρέπεται αποκλειστικά στα 10MHz.

Ο δεύτερος διαχωρισμός είναι βάση του non-OFDMA. Ακολούθως παρουσιάζονται οι δυο πίνακες για το πώς θα χωριστούν ανάλογα τις περιπτώσεις τα resources units.

Bandwidth	RU	Mandatory in OFDMA for:
80 MHz	484+242	Non-AP STA only
160 MHz	996+484	Non-AP STA only
240 MHz	2×996+484	Non-AP STA only
320 MHz	3×996+484, 3×996 (any 3)	Non-AP STA only

Bandwidth	RU	Mandatory in non-OFDMA for:
80 MHz	484+242	AP, STA
160 MHz	996+484	AP, STA
	996+(484+242)	AP, STA
240 MHz	3×996, 2×996+484, 2×996 (any 2)	AP, STA
320 MHz	4×996, 3×996+484, 3×996 (any 3)	AP, STA

## 4.2 High modulation

Για περαιτέρω ενίσχυση του peak rate, σε σύγκριση με το IEEE 802.11ax του οποίου το σχήμα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης είναι 1024-QAM, προτείνεται ένα σχήμα διαμόρφωσης της τάξης των 4096-QAM. Έχει προταθεί για EHT, ένα σύμβολο διαμόρφωσης να μπορεί να μεταφέρει 12 bit. Θεωρητικά, δεδομένου του ίδιου ρυθμού κωδικοποίησης,



το EHT μπορεί να επιτύχει 20% υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης το 802.11ax, επιτρέποντας έτσι στους χρήστες του να αποκτήσουν υψηλότερη απόδοση. Τα μέχρι σήμερα δεδομένα έχουν δείξει ότι μέσα από τον συνδυασμό beamforming, μικρό αριθμό από streams και Multiple antennas μπορεί να υποστηριχθεί το 4KQAM. Βέβαια υπάρχουν ακόμα και ανεξερεύνητα κομμάτια όπως είναι αυτό του coding strategy. Εκεί πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στις μελέτες για να υπάρξει κάποια απάντηση για τις στρατηγικές που θα ακολουθηθούν. Επιπλέον, τα EHT-MCS θα πρέπει να οριστούν αντίστοιχα για τόσο μετάδοση SU όσο και μετάδοση MU. Για τη βελτίωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή του θορύβου σήματος αναλογία (SNR), καθώς και το transmission robustness, το EHT μπορεί εξακολουθεί να υποστηρίζει dual-carrier modulation(DCM), η οποία επιτρέπει την οι ίδιες πληροφορίες πρέπει να διαμορφωθούν σε ένα ζεύγος subcarriers. Στο IEEE 802.11ax, το DCM ισχύει μόνο για το MCS 0/1/3/4 και 1/2 spacial stream για την ικανοποίηση της υψηλής αξιοπιστίας απαιτήσεις. Με την υποστήριξη άλλων υποψηφίων χαρακτηριστικών στο EHT έχουμε, την υποστήριξη πολλαπλών AP για μετάδοση του ίδιου πλαισίου σε χρήση ή υποστήριξη HARQ. Ανάλογα με την περίπτωση το DCM μπορεί να ισχύει σε σχήματα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης (π.χ. MCS 5/6) ή special streams (π.χ. χωρικές ροές 3/4) για την εγγύηση του υψηλού αξιοπιστία μετάδοσης.

## 5 Multi-link

### 5.1 Multi-link general

Το IEEE 802.11 υποστηρίζει ένα πρωτόκολλο πρόσβασης που ονομάζεται distributed coordination function (κατανεμημένη λειτουργία συντονισμού) (DCF), για πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Συγκεκριμένα, η συσκευή με DCF προσπαθεί να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο εκτός εάν το μέσο είναι απασχολημένο κατά τη διάρκεια του προκαθορισμένου διαστήματος που ονομάζεται DCFinter-frame space (DIFS). Επομένως, όταν οι σταθμοί “αισθάνονται” το μέσο idle, προσπαθούν να έχουν πρόσβαση στο μέσο ταυτόχρονα και μπορεί να προκληθεί σύγκρουση (collision). Για την αποφυγή τέτοιων συγκρούσεων, το DCF καθορίζει μέσα από έναν μηχανισμό τυχαίας ανατροπής (random back off mechanism) , που αναγκάζει κάθε σταθμό να αναβάλει την πρόσβασή του στο μέσο εντός κάποιου τυχαίου χρονικού διαστήματος. Δεδομένου ότι το DCF είναι μια θεμελιώδης προσέγγιση για την πρόσβαση μέσων του IEEE 802.11, έχει δημοσιευθεί ένας μεγάλος όγκος αποτελεσμάτων για αυτό. Η απόδοση του στο 802.11 DCF έχει αναλυθεί με ένα απλό μοντέλο αλυσίδας Markov.

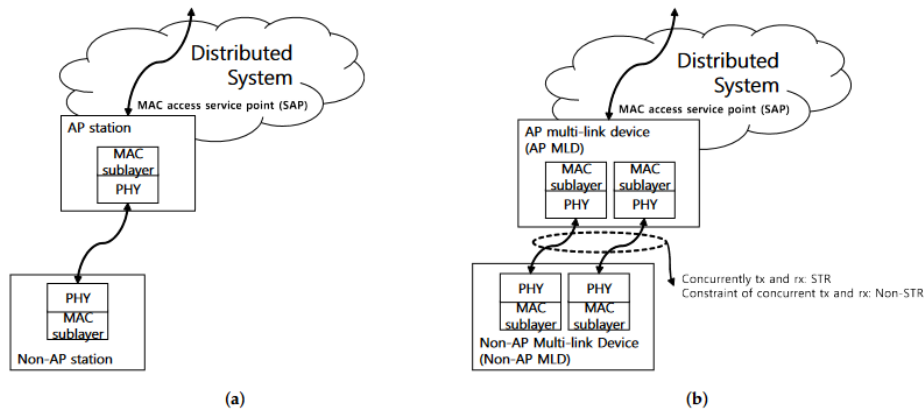
Όπως είδαμε νωρίτερα η ομάδα του (EHT) εργάζεται σε μια τοπολογία για το IEEE 802.11be, η οποία ορίζει τα επίπεδα EHT PHY και MAC. Ένα νέο κεφάλαιο στο 802.11 αποτελεί η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων. Το MLD είναι μια φυσική συσκευή με περισσότερους από έναν συνδεδεμένους σταθμούς και έχει μία διεπαφή προς το ανώτερο layer. Κατά συνέπεια, τα MLD μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές ζώνες ή συνδέσεις, όπως 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz, και έτσι μπορούν να αυξήσουν τη μέγιστη απόδοση επιτρέποντας ταυτόχρονες λειτουργίες. Όμως, δεν είναι πάντα δυνατή η ελεύθερη χρήση αυτών των πολλαπλών συνδέσμων. Για παράδειγμα, μια μετάδοση από έναν από τους συνδέσμους MLD μπορεί να επηρεάσει τις λήψεις έναντι άλλων συνδέσμων εντός του ίδιο MLD, και επομένως η λήψη μπορεί να αποτύχει λόγω παρεμβολών που θα δέχεται εξαιτίας της διαρροής ρεύματος μέσα στο MLD. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί εάν οι κεντρικές συχνότητες των συνδέσμων MLD είναι πολύ κοντά. Συνεπώς, μια τροποποιημένη λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων απαιτείται για την αντιμετώπιση των παρεμβολών που αναφέρθηκαν. Οι έρευνες συγκλίνουν στην απόδοση χρονικών πλαισίων με χρόνους εκκίνησης και λήξης από το ίδιο MLD με σκοπό να ευθυγραμμιστούν οι μεταδώσεις και λήψεις του ίδιου MLD.

Παρόλο που δεν έχει τυποποιηθεί μια λεπτομερής διαδικασία DCF για πολλαπλούς συνδέσμους ακόμα στο 802.11be, αρκετές τροποποιημένες μέθοδοι DCF για την υποστήριξη της σύγχρονης λειτουργίας πολλαπλών συνδέσμων έχουν προταθεί κατά τη διάρκεια του TGbe και γίνονται αξιολογήσεις της απόδοσής τους. Ωστόσο, από όσο γνωρίζουμε, καμία από τις έρευνες δεν έχει εισαγάγει ένα αναλυτικό μοντέλο για τα σύγχρονα DCF πολλαπλών συνδέσμων.

### 5.2 Multi-link devices

Το πεδίο του EHT απασχόλησε την ομάδα του TIG/SG όπου μεταγενέστερα ανατέθηκε στην IEEE. Ένα από τα σημαντικότερα features που υπάρχουν σε αυτό το μοντέλο είναι το multi-link operation. Σήμερα, πολλά AP ήδη λειτουργούν με περισσότερα του ενός radios. Αυτή η

λειτουργία πολλαπλών συνδέσεων ήταν ένα σημαντικό ζήτημα που βελτιώστε τη μέγιστη απόδοση των Wi-Fi με ελάχιστη τροποποίηση του υπάρχοντος συστήματος αυτών.



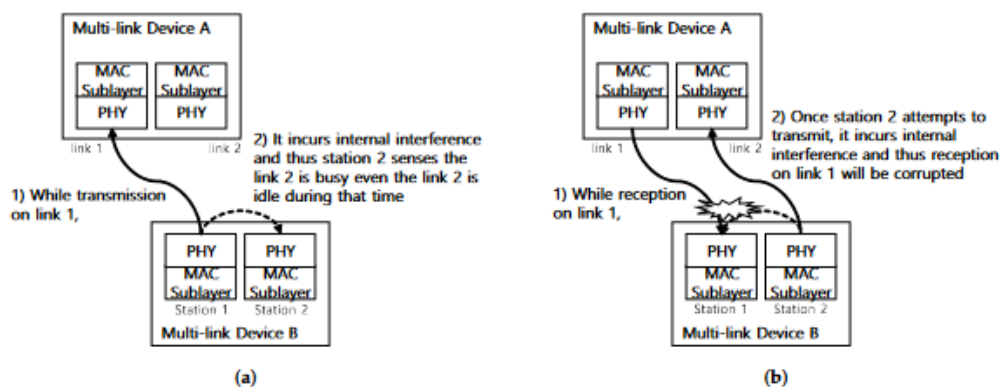
*Εικόνα 5: Infrastructure models for conventional IEEE 802.11 and 802.11be. (a) Conventional IEEE 802.11 infrastructure. Article: “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs”*

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την δομή επικοινωνίας με Multi-link έτσι όπως παρουσιάζεται για το 802.11 και έχει όπως έχει προταθεί για το 802.11be. Στο συμβατικό μοντέλο, κάθε σταθμός είναι μια διευθυνσιοδοτούμενη μονάδα και μπορεί τυπικά να θεωρηθεί ως φυσική συσκευή. Ο σταθμός μπορεί να εκπέμπει και να λαμβάνει data frames αφού συσχετιστεί με κάποιο AP. Σε σύγκριση με το συμβατικό μοντέλο υποδομής της IEEE 802.11, μια νέα οντότητα, που ονομάζεται MLD, μπορεί να συγκεντρώσει πολλούς σταθμούς σε μία φυσική συσκευή για μια υποδομή πολλαπλών συνδέσεων που αποτελεί μοντέλο στο IEEE 802.11be. Ένα MLD αποτελείται από πολλούς σταθμούς που μπορούν να λειτουργούν στην ίδια ή διαφορετική μπάντα συχνοτήτων. Ένα πραγματικό παράδειγμα αποτελεί ένας φορητός υπολογιστής με δύο radios που υποστηρίζουν μετάδοση στα 2,4 GHz και 5 GHz αντίστοιχα. Τα δύο αυτά radios θεωρούνται ως δύο ξεχωριστοί σταθμοί στο συμβατικό IEEE 802.11, ενώ ένας φορητός υπολογιστής με δύο radios που υποστηρίζει πολλαπλές συνδέσεις μπορεί να θεωρηθεί ως ένα MLD με διπλά ραδιόφωνα στο IEEE 802.11be. Στην τελευταία περίπτωση, κάθε ραδιόφωνο εντός του φορητού υπολογιστή λειτουργεί ως ανεξάρτητος σταθμός και ο φορητός υπολογιστής συγκεντρώνεται και ενορχηστρώνει εκπομπές και λήψεις μέσω αυτών των ραδιοφώνων.

Η λειτουργία μετάδοσης και λήψης μέσω πολλαπλών συνδέσεων σε ένα πρώτο επίπεδο μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο λειτουργίες: ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη (STR) και μη ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη non-STR. Αν δύο σταθμοί βρίσκονται υπό το ίδιο MLD και δεν είναι AP και έχουν την δυνατότητα να επικοινωνήσουν με STR τότε, όπως φαίνεται στο (5.β), ο ένας σταθμός που είναι non-AP μπορεί να εκπέμπει frames στο AP MLD και ο άλλος non-AP σταθμός μπορεί να λαμβάνει frames από ένα AP MLD ταυτόχρονα χωρίς καμία διακοπή. Δηλαδή, μπορούν να θεωρηθούν ως δύο ανεξάρτητοι σταθμοί. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να υπάρχει και η περίπτωση όπου είναι αδύνατη η λήψη σε έναν σταθμό ενώ υπάρχει η εκπομπή από κάποιον άλλο σταθμό μέσα στο ίδιο MLD, αυτή η περίπτωση ονομάζεται non-STR. Ένας λόγος που μπορεί να δημιουργήσει μια non-STR κατάσταση μπορεί να είναι όταν η απόσταση μεταξύ των κεντρικών συχνοτήτων των

σταθμών εντός του ίδιου MLD είναι πολύ κοντά. Συγκεκριμένα, αυτή η δυνατότητα εκπομπής STR ή non-STR μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την απόσταση μεταξύ δύο συνδέσμων και του εσωτερικού σχεδιασμού των chip των συσκευών. Εάν οι πομποδέκτες στο εσωτερικό της συσκευής είναι αρκετά καλά σχεδιασμένοι ώστε να αποτρέπουν τη διαρροή σήματος από άλλους συνδέσμους, η συσκευή θα μπορεί λειτουργήσει βάση των εκάστοτε αναγκών. Όμως, στην αντίθετη περίπτωση, η συσκευή δεν θα μπορέσει να ξεπεράσει τη διαρροή σήματος(signal leakage)όπου συνεπάγεται ότι η συσκευή δεν θα καταφέρει να μπορέσει να αξιοποιήσει μια STR μετάδοση και τα υποβαθμιστεί η μετάδοση σε non-STR. Επιπροσθέτως, αυτοί οι δύο τρόποι μετάδοσης θα ρυθμιστούν κατά τη διαδικασία σύνδεσης στους σταθμούς ή κατά την κρίση του AP. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, ένα εκτιμώμενο throughput με dual radio και με την δυνατότητα χρήσης STR μπορεί είναι σχεδόν διπλάσιο σε σύγκριση με throughput από μια συσκευή απλής σύνδεσης σε συνθήκες κορεσμένου buffer. Εάν ορισμένοι σταθμοί σε ένα MLD βρίσκονται σε κατάσταση non-STR, θα πρέπει να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις του DCF για να καταφέρουμε να αξιοποιήσουμε πλήρως τους σταθμούς που είναι συνδεδεμένοι στο MLD.

Συγκεκριμένα, κατά το σχεδιασμό DCF πολλαπλών συνδέσμων για non-STR, δύο πράγματα πρέπει να ληφθούν υπόψη, τα οποία απεικονίζονται στην από κάτω εικόνα.



*Εικόνα 6: Considerations on designing multi-link distributed coordination function (DCF) for non-simultaneously transmit. Article: "Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs"*

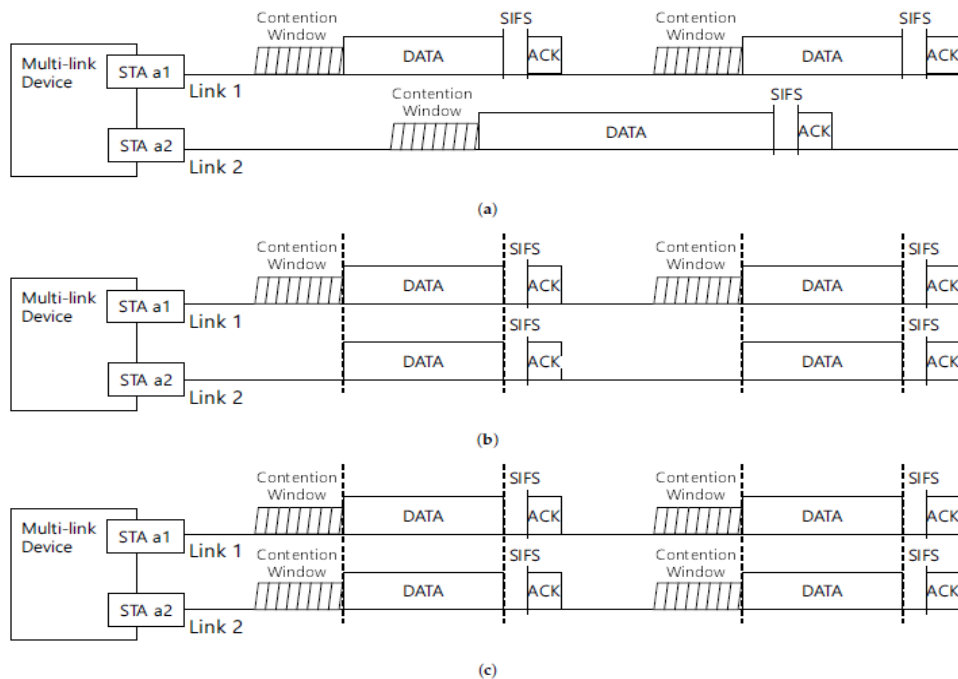
Το πρώτο πρόβλημα που μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε είναι η παρεμπόδιση σήματος, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6(α). Στο συμβατικό μοντέλο του 802.11, ένας σταθμός ανιχνεύει ένα radio signal και ανάλογα του εάν η ισχύς του σήματος υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο threshold, συμπεραίνει εάν είναι ο σύνδεσμος σε κατάσταση αδράνειας ή σε κατειλημμένη κατάσταση. Λόγω μιας εσωτερικής παρεμβολής στη συσκευή στην περίπτωση της non-STR, ένας σταθμός που συνδέεται με ένα MLD δεν μπορεί να εκτελέσει ανίχνευση του μέσου (medium detection) ενώ ο άλλος σταθμός εντός του ίδιου MLD εκπέμπει. Το δεύτερο πρόβλημα είναι τα εμπόδια λήψης, όπως φαίνεται στο (β). Στο συμβατικό 802.11, ένας σταθμός χρειάζεται απλώς να αναβάλει τη μετάδοσή του (δηλαδή, να παγώσει τον μετρητή του backoff) μέχρι το τέλος της εκπομπής του άλλου σταθμού. Από την άλλη πλευρά, εάν ένας σταθμός στο ίδιο MLD υπό συνθήκες non-STR λαμβάνει, οι άλλοι σταθμοί εντός του ίδιου MLD πρέπει να σταματήσουν τη μετάδοση τους ακόμη και

αν το μέσο γίνεται αντιληπτό ως αδρανές. Αυτό συμβαίνει επειδή η προσπάθεια μετάδοσης δημιουργεί εσωτερικές παρεμβολές στη συσκευή, και ως εκ τούτου η τρέχουσα λειτουργία λήψης μπορεί να είναι κατεστραμμένη. Συνοψίζοντας, μπορεί να υπάρχουν σοβαρές περιπτώσεις που επιδεινώνουν τις πιθανότητες μετάδοσης στην περίπτωση non-STR. Άρα το DCF πολλαπλών συνδέσμων πρέπει λάβετε υπόψη αυτήν την περίπτωση που είναι non-STR.

Μια λύση που υπάρχει για να καταφέρουν να αποφύγουν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι να προστεθούν end times στα data που γίνονται transmit μεταξύ των σταθμών που υπάρχουν υπό ένα MLD. Μέσα από ευθυγράμμιση στις μεταδόσεις και σωστό σχεδιασμό θα μπορούσαν να υπάρχουν ταυτόχρονες μεταδόσεις και λήψεις εντός του ίδιου MLD.

### 5.3 Asynchronous vs. Synchronous Transmissions on Multi-Link

Για να αποφύγουμε προβλήματα εμπόδισης της μετάδοσης ευθυγραμμισμένων δεδομένων στην περίπτωση non-STR, χρησιμοποιούμε δύο είδη σχημάτων: την ασύγχρονη μετάδοση και την σύγχρονη μετάδοση. Εν συνεχεία η σύγχρονη μετάδοση μπορεί να χωριστεί με την σειρά της σε δύο κατηγορίες: μετάδοση με μονό σύνδεσμο πρόσβασης και με πολλαπλές συνδέσμους. Η ασύγχρονη μετάδοση κληρονομεί το συνηθισμένο μηχανισμό πρόσβασης σε κανάλι (IEEE 802.11) και είναι και ο τροποποιημένος τρόπος μετάδοσης δεδομένων για να υποστηρίξει την περίπτωση non-STR σε μία μετάδοση με πολλαπλούς συνδέσμους. Παρακάτω ακολουθούν τρία παραδείγματα της μεθόδου μετάδοσης με πολλαπλούς συνδέσμους.



*Εικόνα 7: Multi-link transmission. Article: "Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs"*

Στα παραπάνω παραδείγματα μετάδοσης με πολλαπλούς συνδέσμους, το (a) πρόκειται για ασύγχρονη μετάδοση με πολλαπλούς συνδέσμους, το (b) είναι παράδειγμα σύγχρονης μετάδοσης με πολλαπλούς συνδέσμους και έναν σύνδεσμο πρόσβασης και το (c) απεικονίζει σύγχρονη μετάδοση πολλαπλών συνδέσμων με πολλαπλούς συνδέσμους πρόσβασης.

Η ασύγχρονη μετάδοση έχει εγκριθεί να είναι υποχρεωτικά υποστηριζόμενη στο IEEE 802.11be. Όταν το MLD βρίσκεται υπό κατάσταση STR, σημαίνει πως οι σταθμοί που βρίσκονται στο ίδιο MLD μπορούν να υποδεχτούν frames ταυτόχρονα με καταναμημένο τρόπο. Ως αποτέλεσμα, κάθε σταθμός πάνω στο ίδιο MLD μπορεί να αποδώσει μια διεργασία στο μέσο πρόσβασης μέσω συνδέσμων ανεξάρτητα και αυτόνομα. Επομένως, η ασύγχρονη μετάδοση με πολλαπλούς συνδέσμους μπορεί να θεωρηθεί ως δυο ανεξάρτητα συνηθισμένα κανάλια πρόσβασης εκτός αν το MLD έχει υπερβολική κίνηση, παρόμοια με τις dual/tri-band AP διαδικασίες.

Αν το MLD βρίσκεται υπό κατάσταση non-STR, σημαίνει πως η μετάδοση και η υποδοχή δεν μπορούν να υλοποιηθούν ταυτόχρονα σε καμία χρονική στιγμή. Με την ευθυγράμμιση των χρόνων τέλους της μετάδοσης μέσα στο ίδιο MLD, όπως φαίνεται παραπάνω στο (b) και (c), η περίπτωση στην οποία η μετάδοση και η υποδοχή υλοποιούνται ταυτόχρονα μπορεί να αποφευχθεί. Όμως, η οργάνωση του χρόνου πρόσβασης για τα σύγχρονα κανάλια είναι ένα ανοιχτό πρόβλημα. Πρώτον, διότι όπως φαίνεται στο (b), θα μπορούσε να υπάρξει ένας μονός σύνδεσμος πρόσβασης όπου λειτουργεί και ως κανάλι πρόσβασης. Με αυτή την μέθοδο, μόνο ένας σύνδεσμος μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνδεσμος καναλιού πρόσβασης, με αποτέλεσμα το παράθυρο διαμάχης(CW) να υπάρχει μόνο στο σύνδεσμο του καναλιού πρόσβασης. Συνεπώς, τα MLD και οι σταθμοί με μονούς συνδέσμους θα έχουν την ίδια ευκαιρία σε πρόσβαση σε κανάλι και με αυτόν τον τρόπο ένα κανάλι θα διοριστεί και σε MLD και σε σταθμούς με μονό σύνδεσμο. Φυσικά, ένα τέτοιο δίκτυο θα υπολειτουργεί τους πολλαπλούς συνδέσμους πρόσβασης.

Όπως φαίνεται και παραπάνω στο (c), η πρόσβαση σε κανάλι μπορεί να υλοποιηθεί σε πολλαπλούς συνδέσμους. Σε αντίθεση με την σύγχρονη μετάδοση με πολλαπλούς συνδέσμους και με μονό σύνδεσμο πρόσβασης, όλοι οι σταθμοί στο ίδιο MLD μπορούν να συμμετάσχουν σε κανάλι πρόσβασης μέσω των αντίστοιχων παραθύρων διαμάχης. Αυτό σημαίνει ότι τα MLD θα έχουν σχεδόν διπλή πιθανότητα στην πρόσβαση του ασύρματου μέσου.

Τα αποτελέσματα αρκετών προσομοιώσεων έχουν παρουσιαστεί να συγκρίνουν την επίδοση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων καναλιού πρόσβασης. Παρ' όλα αυτά, μαθηματικά μοντέλα χρειάζονται για να εκτιμήσουν και να βελτιστοποιήσουν την επίδοση για τις μεθόδους των σύγχρονων και ασύγχρονων καναλιών πρόσβασης σε διαφορετικές περιπτώσεις. Το μοντέλο Bianchi είναι μια ευρέως γνωστή προσέγγιση για την μοντελοποίηση του DFC, όπου είναι η βασική τεχνική ελέγχου πρόσβασης σε μέσο. Εφόσον δεν είναι εφικτό να γίνει η χρήση αυτού του μοντέλου κατευθείαν στην περίπτωση των πολλαπλών συνδέσμων, ορισμένες τροποποιήσεις χρειάζονται για να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο σε περίπτωση πολλαπλών συνδέσμων.

## 5.4 Design of Synchronous Multi-Link Distributed Coordination Functions

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, εάν πρέπει να υποστηρίζονται MLD που είναι non-STR, πρέπει να το κάνουμε μεταδώσεις όπου οι χρόνοι λήξης της μετάδοσης είναι ευθυγραμμισμένοι. Έτσι, θα δούμε σύγχρονα DCF πολλαπλών συνδέσμων και μοντελοποιούμε βάση των αλυσίδων Markov. Υποθέτουμε ότι ένα MLD έχει dual radios, καθένα από τα οποία είναι εξοπλισμένο με PHY και MAC layer. Τα radios των MLD είναι non-STR, που σημαίνει ότι είναι έχουν περιορισμούς ταυτόχρονης μετάδοσης και λήξης όπως φαίνεται στην Εικόνα 8 (a,b).

Σε αυτήν την ενότητα, θα αναλύσουμε το design των multilink DCF's που αναφέραμε παραπάνω. Απλές λειτουργίες των DCF απεικονίζονται στην Εικόνα 8. Από εδώ και πέρα, όταν ένας σύνδεσμος στον οποίο η μετάδοση ξεκινά μετά από νίκη σε μια διαμάχη με κάποιον άλλο σύνδεσμο, αυτός ο σύνδεσμος λαμβάνει τον τίτλο του πρωτεύων. Οι μεταδόσεις σε άλλα links που βασίζονται πάνω στην μετάδοση του primary link μπορούν να ξεκινήσουν. Οι σύνδεσμοι που βασίζονται στη μετάδοση του κύριου link αναφέρονται ως auxiliary (βοηθητικά) link. Συγκεκριμένα, κατατάσσουμε τα αναφερόμενα DCF πολλαπλών συνδέσμων σύμφωνα με τη μεθοδολογία πρόσβασης καναλιού σε τέσσερις κατηγορίες όπου και τις συγκρίνουμε:

- (1) πρόσβαση μονής ζεύξης (SLA)
- (2) πρόσβαση πολλαπλών συνδέσμων με τη συντομότερη backoff (MLA-S)
- (3) πρόσβαση πολλαπλών συνδέσμων με το μεγαλύτερο backoff (MLA-L)
- (4) πρόσβαση πολλαπλών συνδέσμων με ευθυγράμμιση χρόνου λήξης (MLA-A)

Στην περίπτωση του SLA, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8(a), μόνο ένας προκαθορισμένος σύνδεσμος είναι κατάλληλος για πρόσβαση το κανάλι, και επομένως, ο σύνδεσμος θα είναι μόνιμα πρωτεύων σύνδεσμος. Μόλις το primary link επιτρέπεται να προσπελάσει το κανάλι λόγω ενός μετρητή backoff που έληξε, το άλλο link, που είναι ο βοηθητικός σύνδεσμος, μπορεί να συμμετέχει στη μετάδοση μόνο εάν το κανάλι ήταν idle κατά τη διάρκεια ενός σταθερού διαστήματος (fixed interval), το οποίο θα καλείται από τον Tth, αμέσως πριν την έναρξη της ευκαιρίας μετάδοσης (TXOP). Διαφορετικά, το TXOP θα ρυθμιστεί μόνο στο πρωταρχικό σύνδεσμο. Συμπερασματικά, η λειτουργία backoff προχωρά μόνο στον κύριο σύνδεσμο και δεν υπάρχουν λειτουργίες backoff στον βοηθητικό σύνδεσμο.

Από την άλλη πλευρά, η πρόσβαση στο κανάλι σε όλους τους ενεργούς συνδέσμους μπορεί να επιτρέπεται, σε αντίθεση με SLA. Δηλαδή, όλοι οι σύνδεσμοι μπορούν να λειτουργήσουν ως κύριοι σύνδεσμοι, τους οποίους ονομάζουμε πολλαπλά μηχανισμός πρόσβασης σύνδεσης (MLA). Στη συνέχεια ταξινομούμε το MLA σε τρεις περιπτώσεις, MLA-S, MLA-L, και MLA-A.

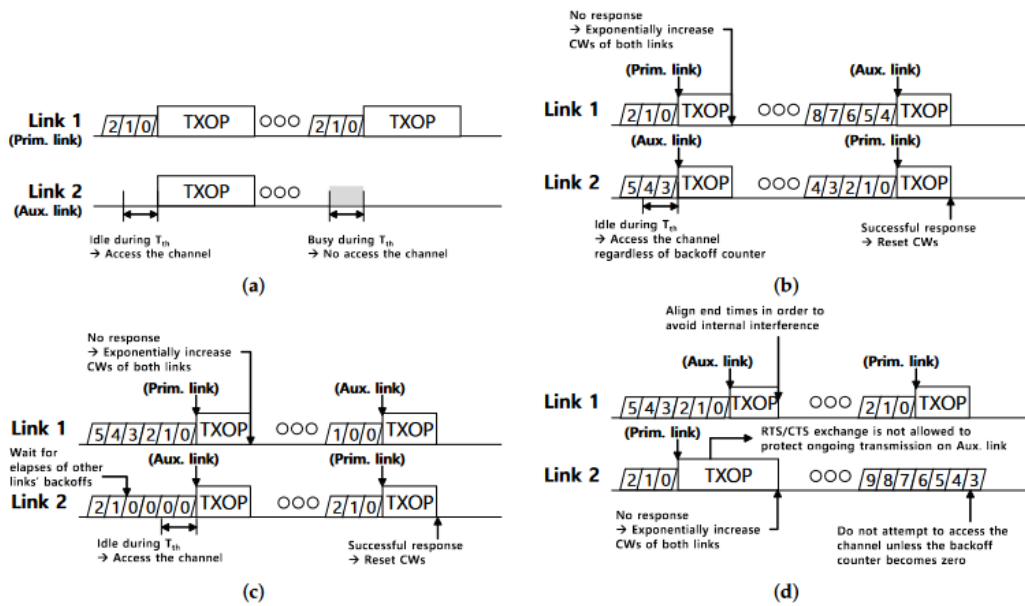
Για το MLA-S, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8(b), το TXOP λαμβάνεται από ένα MLD όταν το ο μετρητής backoff οποιουδήποτε από τους συνδέσμους του MLD έχει λήξει. Αυτή τη στιγμή, ο σύνδεσμος όπου ξεκάνει η μετάδοση ορίζεται στον πρωτεύοντα σύνδεσμο και ο άλλος σύνδεσμος ορίζεται σαν βοηθητικός σύνδεσμος (auxiliary). Επιπλέον, εάν ο βοηθητικός

σύνδεσμος ήταν αδρανής κατά τη διάρκεια του Tth, πριν ξεκινήσει το TXOP, το κανάλι είναι προσπελάσιμο. Ακόμα και αν ο μετρητής backoff του άλλου συνδέσμου παραμένει. Ο σύνδεσμος αυτός θα γίνει ο βοηθητικός σύνδεσμος. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι το backoff των συνδέσμων 1 και 2 στο αρχικό στάδιο ορίζονται σε 2 και 5, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο την αρχή στην Εικόνα 8(b), τότε ο μετρητής backoff του συνδέσμου 1 θα λήξει νωρίτερα και θα συνδεθεί ο 1 πρώτος οπότε και θα είναι ο κύριος σύνδεσμος. Εάν το κανάλι στη σύνδεση 2 είναι αδρανές κατά τη διάρκεια του Tth ακριβώς πριν από το TXOP στον σύνδεσμο 1, ο σύνδεσμος 2 θα έχει την ευκαιρία να μεταδώσει το data frame. Μετά τη μετάδοση, αυτοί οι μετρητές backoff επαναφέρονται στο αρχικό στάδιο για μια επιτυχή μετάδοση. Σε αυτό το παράδειγμα, οι τιμές έχουν οριστεί σε 8 και 4, αντίστοιχα. Οι τιμές CW διπλασιάζονται εάν η μετάδοση απέτυχε και ο μετρητής backoff για την επόμενη πρόσβαση στο κανάλι θα επιλεγεί με το αναθεωρημένο CW.

Το MLA-L, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 8(c), είναι ελαφρώς διαφορετικό με το MLA-S. Στο MLA-L, ένα κανάλι μπορεί να προσπελαστεί όταν έχουν λήξει όλοι οι μετρητές backoff για όλους τους συνδέσμους. Οι μετρητές backoff των σταθμών που συνδέονται με το ίδιο MLD είναι κοινόχρηστοι και η πρόσβαση στα κανάλια εκκινείται όταν ο μετρητής backoff του τελευταίου σταθμού μηδενιστεί. Για παράδειγμα, αν οι μετρητές backoff των συνδέσμων 1 και 2 είναι 5 και 2, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8(c), το TXOP είναι διαθέσιμο αφού λήξουν όλοι οι μετρητές backoff. Σε αυτήν την κατάσταση, μια σύνδεση με το μεγαλύτερο μετρητή γίνεται ο πρωταρχικός σύνδεσμος (primary). Στον βοηθητικό σύνδεσμο, ο σταθμός ελέγχει εάν ο σύνδεσμος ήταν αδρανής(idle) κατά τη διάρκεια του Tth πριν ξεκινήσει το TXOP και καθορίζει τη συμμετοχή του ώστε να γίνει multilink transmission.

Στην περίπτωση του MLA-A, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8(d), είναι παρόμοιο με το συμβατικό DCF, κάθε σταθμός προσπαθεί να ξεκινήσει το TXOP όταν παρέλθει ο μετρητής backoff. Ένας σύνδεσμος όπου ο μετρητής backoff παρέλθει ρυθμίζεται ως ο κύριος σύνδεσμος. Ενώ ο μετρητής backoff μειώνεται στην άλλη ζεύξη, ο σταθμός μπορεί να εκκινήσει μια μετάδοση εάν γίνει ο μετρητής του backoff μηδέν κατά τη μετάδοση στο primary link, τότε θα οριστεί ως βοηθητικός σύνδεσμος. Για παράδειγμα, οι μετρητές backoff των συνδέσμων 1 και 2 είναι 5 και 2, αντίστοιχα. Ο μετρητής backoff του συνδέσμου 2 θα λήξει νωρίτερα και ο σύνδεσμος 2 γίνεται ο κύριος σύνδεσμος. Παρατηρούμε ότι υπάρχει ένας εναπομένον μετρητής στο πρώτο link. Αν υπάρχει συνεχιζόμενη μετάδοση εντός του ίδιου MLD εκείνη τη στιγμή, θα γίνει πρόσθετη μετάδοση. Στο MLA-A, πρέπει να επικεντρωθούμε σε τρία πράγματα. Πρώτον, λόγω της συνεχιζόμενης μετάδοσης στον σύνδεσμο 2 αποκλείεται ο έλεγχος του καναλιού που εμφανίζεται από τον σύνδεσμο 1 Εικόνα 8(α). Ο έλεγχος του καναλιού κατά τη διάρκεια του Tth δεν λειτουργεί. Δεύτερον, για την αποφυγή παρεμβολών στη συσκευή μεταξύ συνδέσμων για περιπτώσεις που δεν είναι STR, οι τελικές στιγμές των TXOP πρέπει να ευθυγραμμιστούν. Αν όχι, τα ακόλουθα frames, όπως και τα ACK, ενδέχεται να δεχτούν παρεμβολές στη συσκευή που λαμβάνονται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8(d). Τέλος, το MLA-A δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με RTS/CTS .

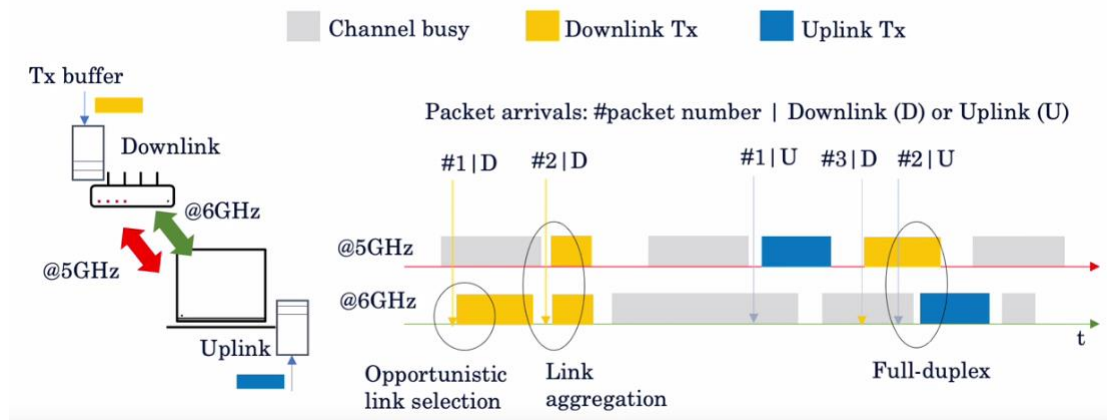




**Εικόνα 8:** Illustrations of synchronous multi-link DCFs for supporting non-STR multi-link devices (MLDs). (a) Single-link access (SLA), (b) multi-link access with the shortest backoff (MLA-S), (c) multi-link access with the longest backoff (MLA-L), (d) multi-link access with end-time alignment (MLA-A) Article: “Performance Analysis of Synchronous Multi-Radio Multi-Link MAC Protocols in IEEE 802.11be Extremely High Throughput WLANs”

## 5.5 Multi-link operation

Η χρήση multilink operation (MLO) αποτελεί μια καινούργια λειτουργία του πρωτοκόλλου 802.11.be με σκοπό High data rates με low latency. Θα μπορούσαμε να χωρίσουμε τον παραπάνω όρο στα multichannel και multiband operations. Για να καταφέρει να ενταχθεί το MLO πρέπει να δημιουργηθούν διεργασίες που θα μπορούν να γίνουν μεταξύ 2 διαφορετικών συχνοτήτων. Αρχικά πρέπει να τονίσουμε ότι πολλά AP ήδη κάνουν χρήση multiple band. Πολλοί σταθμοί είναι ήδη επηρεασμένοι και κάνουν χρήση dual band. Πως το κάνουμε πιο efficient. Ένα παράδειγμα μεταξύ του 5Ghz και 6Ghz band είναι το ακόλουθο



**Εικόνα 9:** Dual band link aggregation

Στο συγκεκριμένο σχεδιάγραμμα έχουμε απεικονίσει στον οριζόντιο άξονα τον χρόνο. Στον κατακόρυφο άξονα υπάρχει η ροή των πακέτων. Εδώ παρατηρούμε τρεις περιπτώσεις.

1. Εάν μια τυχαία χρονική στιγμή έρθει ένα πακέτο (Το #1Downlink) θα ελέγξει ότι το channel των 5Ghz είναι απασχολημένο και θα πάει σε αυτό των 6Ghz, που είναι ελεύθερο.
2. Εδώ παρατηρούμε ότι και οι δύο δίαυλοι είναι ελεύθεροι οπότε θα γίνει ένα Link aggregation ώστε το πακέτο να γίνει transmitted γρηγορότερα.
3. Έπειτα βλέπουμε στην εικόνα ότι τα πακέτα #1Uκαι #3D θα χρησιμοποιήσουν τα 5Ghz διότι το κανάλι των 6Ghz είναι απασχολημένο.
4. Τέλος βλέπουμε την περίπτωση της fullduplex επικοινωνίας καθώς για τον ίδιο user έχουμε την δυνατότητα του να λαμβάνουμε και να στέλνουμε με την διαφορά ότι οι δυο εργασίες εκτελούνται σε διαφορετικές συχνότητες

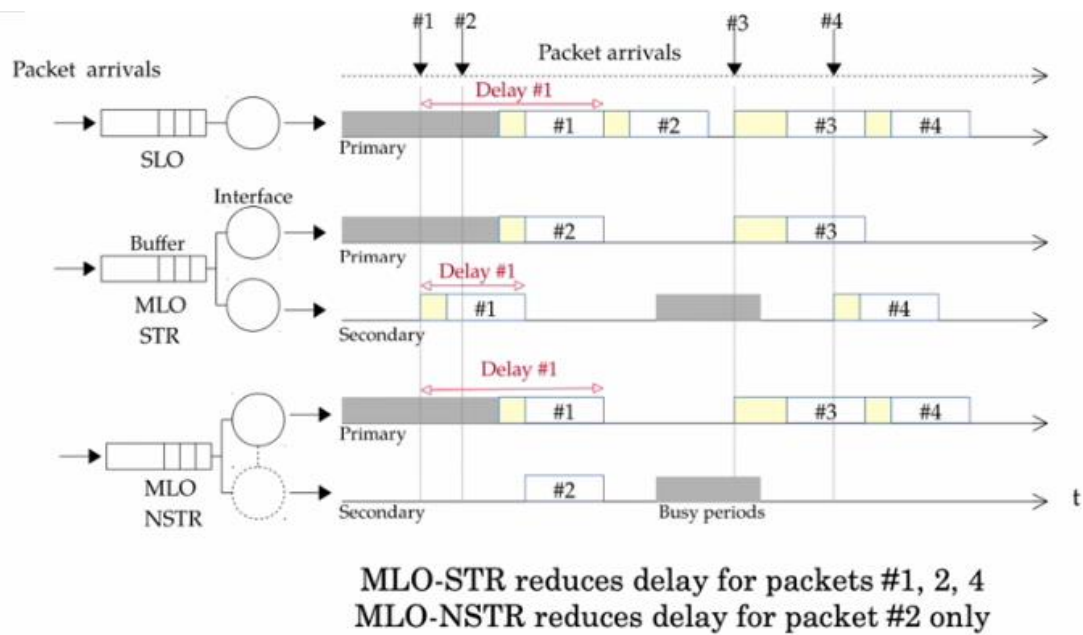
Από τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε ότι για να μπορέσει να ενταχθεί ένα load balancing μοντέλο με αυτές τις προδιαγραφές, θα πρέπει να υπάρχει και η ανάλογη πολιτική για την κίνηση των πακέτων. Την εργασία αυτή θα την κάνει ένας traffic-manager. Χάρης αυτού θα αυξηθεί το efficiency κατά το allocation της κίνησης. Επίσης θα γίνει χρήση στο έπακρο των δυνατοτήτων που θα αποκτήσουν στο μέλλον τα multi link devices. Προτάσεις για τον τρόπο διαχείρισης των πακέτων είναι οι ακόλουθες. Θα μελετήσουμε τις προτάσεις σαν λειτουργικότητα, σαν αποδοτικότητα, θα παρουσιάσουμε την λύση του STR+ όπου προτείνουν οι συντάκτες καθώς επίσης και θα πούμε ιδέες βελτιστοποίησης. Παρακάτω θα παρατηρήσουμε το σχεδιάγραμμα που δείχνει τον τρόπο λειτουργίας των τριών πρώτων μοντέλων.

### 5.5.1 Περιγραφή μοντέλου

Η κίνηση αφορά το downlink και ειδικότερα από το AP προς STA. Τα πακέτα ακολουθούν την κατανομή Poisson ως προς τον τρόπο που έρχονται. Τα πακέτα έχουν σταθερό μέγεθος 12000bits. Ως προς τις τεχνικές λεπτομέρειες, τα 2 κανάλια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το 36° και 100° όπου είχαν τεθεί ως primary και secondary αντίστοιχα. Αναλυτικότερα:

Name	Variable	Value
Legacy preamble	$T_{PHY-legacy}$	20 $\mu s$
HE single-user preamble	$T_{PHY-HE-SU}$	52 $\mu s$
OFDM symbol duration	$\sigma$	16 $\mu s$
OFDM legacy symbol dur.	$\sigma_{Legacy}$	4 $\mu s$
Short InterFrame Space	SIFS	16 $\mu s$
DCF InterFrame Space	DIFS	30 $\mu s$
Slot time	$T_0$	10 $\mu s$
Service field	$L_{SF}$	32 bits
MAC header	$L_{MH}$	272 bits
Tail bits	$L_{TB}$	6 bits
ACK bits	$L_{ACK}$	112 bits
Frame size	$L$	12000 bits

Εικόνα 10: Example values Article: “An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation”



**Εικόνα 11:** SLO - MLO(STR) - MLO (NSTR) Article: “An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation”

(i) SLO μόνο ένα (Single Link ) (το primary channel) κανάλι να είναι διαθέσιμο

(ii) MLO-STR (Simultaneous Transmit) υπάρχουν δύο ανεξάρτητα κανάλια.

Τα δύο Interface λειτουργούν ανεξάρτητα και ασύγχρονα μεταξύ τους. Ένα πακέτο σε αναμονή εκχωρείται σε κάποιο interface με το που το δει διαθέσιμο. Εάν και οι δύο είναι ταυτόχρονα διαθέσιμες, το πακέτο κατανέμεται τυχαία σε οποιοδήποτε από τα δύο. Μόλις σε μια διεπαφή εκχωρηθεί ένα πακέτο, ξεκινάει η αρχικοποίηση του backoff counter.

(iii) MLO-NSTR (Non-simultaneous Transmit) υπάρχουν δύο κανάλια στα οποία γίνεται δυναμικό allocation.

Σε αυτή την προσέγγιση το ένα κανάλι επιλέγεται ως primary και το άλλο ως secondary, μέσω μιας τυχαίας διαλογής. Τα δύο κανάλια είναι εξαρτημένα μεταξύ τους. Για να καταφέρει να γίνει εκπομπή ενός πακέτου από το δεύτερο κανάλι, πρέπει να είναι και το πρώτο ελεύθερο. Οπότε υπάρχει μια κύρια εκπομπή πακέτων από το πρώτο κανάλι και μια υπό συνθήκη εκπομπή από το δεύτερο.

### 5.5.2 Έναρξη πειράματος

Κάνοντας χρήση της WACA database τέθηκε υπό αξιολόγηση το MLO μοντέλο για το πώς μπορεί να ανταπεξέλθει στα νέα δεδομένα του 802.11be. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αποτελούνται από την ζώνη των 5 GHz. Αυτό το σύνολο των δεδομένων λήφθηκε με τη διεξαγωγή εκτεταμένων μετρήσεων σε διαφορετικές ημέρες και σε πολλές τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων ένα sold-out παιχνιδιού ποδοσφαίρου στο γήπεδο F. C. Barcelona's Camp Nou (χωρητικότητα περίπου 99.300 θέσεις). Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, έγινε

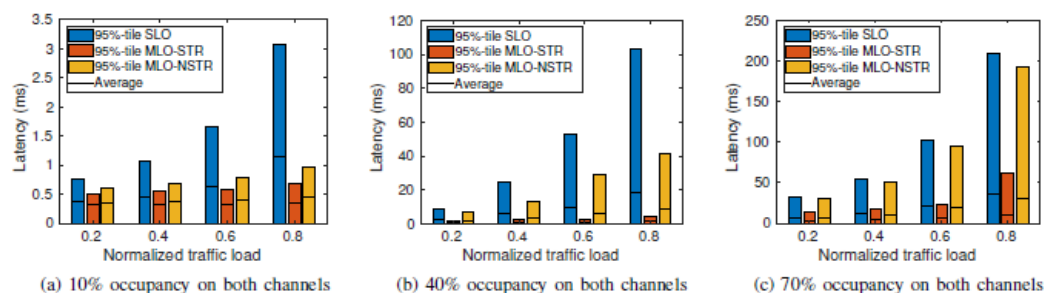
χρήση μόνο των μετρήσεων που αφορούσαν το γήπεδο ποδοσφαίρου αφού κυμαίνονται από εντελώς αδρανείς έως πλήρως κατειλημμένες και καλύπτουν όλες τις δυνατές περιπτώσεις για μια περιοχή. Προκειμένου να μελετηθεί η κατάληψη των καναλιών σε διάφορες συνθήκες, χωρίζουμε τα διαθέσιμα ίχνη βάση του συνόλου των δεδομένων μας. Ο χωρισμός αυτός γίνεται τόσο για το κύριο όσο και για το δευτερεύων κανάλι. (καθεστώς πληρότητας: f10%, 20%, . . . , 90%).

### 5.5.3 Delay performance

#### A. Symmetrically Occupied Channels

Εδώ μελετάμε την περίπτωση των συμμετρικών καναλιών. Συγκεκριμένα, μελετάμε την απόδοση καθυστέρησης με ζεύγη καναλιών στο εύρος των 10%, 40% και 70% πληρότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μέση απόδοση πλήρους buffer κάτω από το SLO είναι 37, 22 και 6,8 Mbps, αντίστοιχα. Η τροφοδοσία της κίνησης για αυτά τρία σενάρια ακολουθεί την κατανομή Poisson. Το Σχήμα φαίνεται η μέση (με μια παύλα) και η 95% καθυστέρηση (δηλαδή η χειρότερη δυνατή περίπτωση) για όλους τους τρόπους πρόσβασης καναλιού και για τις διαφορετικές καταλήψεις των καναλιών.

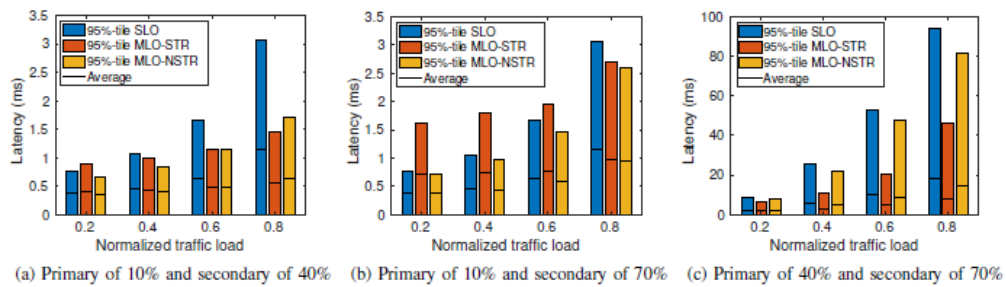
Αρχικά, παρατηρούμε ότι η μπλε γραμμή, όπου είναι και η SLO, μεγαλώνει όσο αυξάνεται η κίνηση για όλα σχήματα. Έπειτα παρατηρούμε ότι όταν και τα δύο κανάλια έχουν 10% πληρότητα (Εικόνα 3α), τα τρία σχήματα έχουν διαφορετική κλιμάκωση. Όσο το traffic load γίνεται υψηλότερο παρατηρούμε μικρές διαφορές μεταξύ των 2 τεχνικών MLO σε σχέση με την SLO. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η 95% πιθανότητα που φαίνεται μείωση της καθυστέρησης, σε 80% traffic load, της τάξεως του 70%. Στη συνέχεια θα δούμε ότι με 40% occupancy, η αύξηση της SLO σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο τεχνικές είναι απότομη και φτάνει μέχρι και να ξεπερνάει τα 110Mms, πράγμα λογικό λόγω του τρόπου διαχείρισης των πακέτων. Στην περίπτωση της MLO βλέπουμε εξαιρετικά αποτελέσματα γιατί όταν έχουμε 40% occupancy η ταυτόχρονη χρήση των καναλιών θα μικρύνει δραματικά το delay, σε σχέση με την SLO. Στην περίπτωση της NSTR δεν βλέπουμε κάποιο κέρδος. Ο λόγος είναι στην δομή της. Για να μπορέσει να γίνει χρήση του δεύτερου καναλιού πρέπει να είναι ελεύθερο και το πρώτο. Αυτή η δέσμευση αφήνει τον δίαυλο να έχει περιόδους όπου δεν θα γίνεται σωστό utilization των δύο καναλιών με αποτέλεσμα η λύση αυτή να είναι καλύτερη από την SLO αλλά χειρότερη από την MLO-STR. Τέλος, όταν και τα δύο κανάλια έχουν πληρότητα (70%) το STR είναι και πάλι καλύτερο διότι παρέχει ουσιαστική μειώσεις σε σύγκριση με το SLO και το NSTR.



Εικόνα 12: Symmetrical results Article: “An Experimental Study of Latency for *IEEE 802.11be* Multi-link Operation”

## B. Asymmetrically Occupied Channels

Για την δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια στοιχεία για το πείραμα, με μόνη διαφορά να αποτελεί η πληρότητα των δύο καναλιών. Στο πρώτο σχήμα βλέπουμε το πρώτο κανάλι να είναι απασχολημένο σε ποσοστό 10% και το δεύτερο σε ποσοστό 40%. Αναμενόμενο συμπέρασμα, όπως και με τα συμμετρικά κανάλια, είναι ότι η NSTR προσφέρει ντετερμινιστικά χαμηλότερες καθυστερήσεις από την SLO. Μια ακόμα παρατήρηση είναι ότι η STR, λόγω της δομής της προχωράει σε αρχικοποίηση του backoff counter με το που ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι αδρανές(idle). Δυστυχώς το κανάλι δύναται να δεσμευτεί πριν την λήξη του χρόνου. Το αποτέλεσμα είναι η διακοπή του counter. Εάν αυτό γίνεται συχνά ή για μεγάλα χρονικά διαστήματα θα παρατηρηθούν μεγαλύτερες καθυστερήσεις από ότι εάν το κανάλι ήταν κατειλημμένο. Στην δεύτερη περίπτωση λόγω της κατάληψης και Τρίτη περίπτωση το φαινόμενο του να υπάρχει collision αυξάνεται. Η αιτία αυτής της αύξησης είναι λόγω της μεγαλύτερης πληρότητας του διαύλου. Το δευτερεύον κανάλι βρίσκεται συχνά καταλυμένο, πριν λήξη το backoff counter με αποτέλεσμα να αυξάνεται το delay. Όμως παρατηρούμε ότι παρότι υπάρχουν μεγάλοι χρόνοι καθυστέρησης υπάρχει ελάττωση των χρόνων καθυστέρησης άρα και μείωση της συμφόρησης.

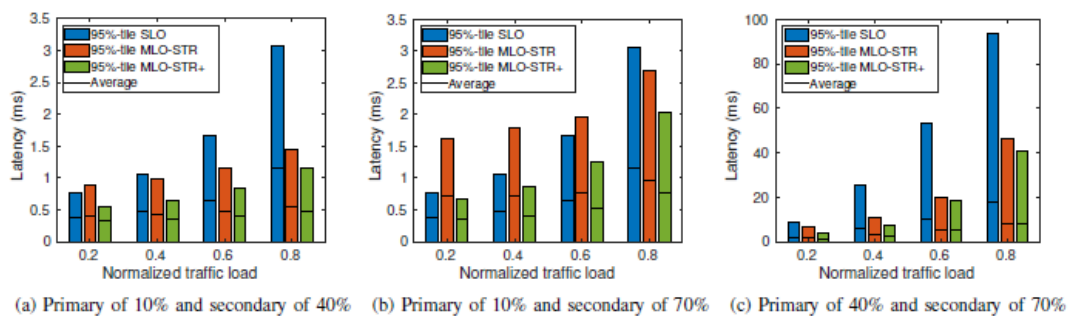


Εικόνα 13: Asymmetrical results Article: “An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation”

## C. Opportunistic MLO-STR

Για να καταφέρουν να μειώσουν/βελτιώσουν την κατάσταση όπου η MLO γίνεται χειρότερη από SLO, προτείνεται ως εναλλακτική η MLO-STR+. Ο τρόπος λειτουργίας της είναι απλός. Όταν και οι δύο διεπαφές είναι αδρανείς, αρχικοποιείται ένα backoff counter για κάθε ένα κανάλι. Όταν κάποιο εκ των δύο τελειώσει το πακέτο θα ανατεθεί στην πρώτη διαθέσιμη. Μέσο αυτού του τρόπου εισάγεται μια τυχαιότητα μεταξύ του χρόνου και αποφεύγεται το συνεχόμενο collision. Δηλαδή το πλεονέκτημα του προτεινόμενου STR+ έγκειται στο γεγονός ότι, εάν ένα κανάλι καταληφθεί κατά τη διάρκεια του backoff, θα υπάρξει νωρίτερη ευκαιρία μετάδοσης από το άλλο κανάλι αποφεύγοντας επιπλέον collisions. Στην πράξη, υλοποίηση Το MLO-STR+ απαιτεί μόνο μια μικρή ενημέρωση υλικολογισμικού στο τρέχον μηχάνημα κατάστασης Wi-Fi. Στο Σχήμα παρουσιάζεται η μέση και καθυστέρηση για οι ίδιες περιπτώσεις που μελετήθηκαν στα προηγούμενα παραδείγματα. Εξακολουθούμε να παίρνουμε το SLO ως τη γραμμή βάσης ώστε να συγκρίνουμε την καινούργια τεχνική. Παρατηρείται ότι το STR+ ξεπερνά σταθερά το STR και το SLO τόσο στη μέση όσο και στην

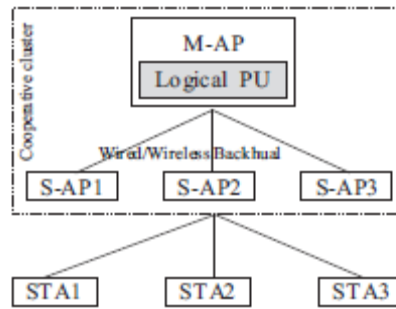
95% καθυστέρηση, αφού τα μεταδίδονται είτε ταυτόχρονα με το SLO, είτε ταχύτερα μέσω τη δευτερεύουσα διεπαφής. Στο β, όταν το δευτερεύον κανάλι έχει 70% πληρότητα, συναντάμε το χειρότερο σενάριο για το STR. Σε αυτήν την περίπτωση, το STR επιλέγει το δευτερεύον κανάλι όταν υποβάλλεται μικρές περιόδους αδράνειας. Σε τέτοιες περιπτώσεις δεν υπάρχει μεγάλο κέρδος από αυτή την τεχνική διότι ο αλγόριθμος θα ξεκινήσει το backoff counter σε ελάχιστες περιπτώσεις. Τέλος, το γ απεικονίζει την περίπτωση πληρότητας 40% και 70% στα κύρια και δευτερεύοντα κανάλια, αντίστοιχα. Όπως στο πρώτο η καθυστέρηση στην SLO αυξάνεται γρήγορα. Η STR είναι σαφώς καλύτερη της SLO τόσο στην μέση και όσο και στην 95% καθυστέρηση. Η STR+ μειώνει ελαφρώς αυτές τις τιμές περαιτέρω.



Εικόνα 14: Opportunistic MLO-STR Article: “An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11be Multi-link Operation”

## 5.6 Multi-AP Network Architecture

Όπως έχουμε αναφέρει βασικό feature για το μοντέλο 802.11be θα αποτελέσει η επικοινωνία των γειτονικών AP. Η επικοινωνία αυτή χαρακτηρίζεται από μια πολυπλοκότητα πολλών επιπέδων. Ένα από αυτά είναι η διαφοροποίηση μεταξύ των διαφορετικών περιβαλλόντων. Ένα εργασιακό περιβάλλον αποτελεί εντελώς διαφορετική μελέτη και σχεδιασμό σε σχέση με ένα οικιακό περιβάλλον. Οπότε πρέπει να αναλογιστούμε την επιβάρυνση που θα έχουμε στο σήμα ανά περίπτωση. Κάποιες προτάσεις για την διαχείριση τέτοιων δομών είναι τεχνικές που θα περιλαμβάνουν αρχιτεκτονικές όπως αυτή του cloud ή των software-defined networks (SDN). Μέσα από αυτές τις αρχιτεκτονικές θα μειωθεί η πολυπλοκότητα διαχείρισης και θα υπάρξει συγχρονισμός μεταξύ των AP. Τα multi-AP συστήματα έχουν την λογική του master/slave. Κάποιο AP χαρακτηρίζεται ως master M-AP και του δίνεται ο ρόλος του συντονιστή για όλα τα AP. Μέσα από αυτόν γίνεται ο προγραμματισμός και η διαχείριση των πόρων. Τα S-AP συμμετέχουν στις εκπομπές των πολλαπλών AP. Για μπορέσει να πραγματοποιηθεί με αποτελεσματικότητα η διαδικασία της μετάδοσης μεταξύ πολλαπλών AP απαιτείται το processing unit (PU). Η λειτουργία αυτής της μονάδας θα μπορούσε να προστεθεί στο multi AP για τον συντονισμό των σχετικών λειτουργιών των multi AP των πολλαπλών καταναμημένων AP. Ένα παράδειγμα θα ήταν η διαχείριση πόρων όλων των AP, η διαχείριση του Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) κ.λπ..



Εικόνα 15: Multi-AP Architecture

Ένα ακόμα στοιχείο της αρχιτεκτονικής που πρέπει να αναλύσουμε είναι ο ταλαντωτής. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό AP όπου όλες οι κεραίες πομπών μοιράζονται τον ίδιο ταλαντωτή, πολλά καταναλωμένα AP έχουν το δικό τους ταλαντωτή με ανεξάρτητο carrier frequency offset(CFO).Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική υποβάθμιση της μέγιστης απόδοσης. Αυτό συμβαίνει ακόμα και στα 20Hz.Για να μειωθεί το CFO έχει προταθεί τα AP/STA να κάνουν χρήση Mid-ambles αντί για PPDU με σκοπό να υπάρχει συνεχόμενο update της κατάστασης των καναλιών. Όπως έχει εφαρμοστεί και στο 802.11be το M-AP θα μπορούσε να αξιοποιεί κάποιο συγκεκριμένο ερέθισμα για να ενεργοποιεί την δυνατότητα συγχρονισμού μεταξύ των S-AP. Αυτή η δυνατότητα βάση των αλλαγών που θα γίνουν στο WIFI θα καταστεί πιο εύκολη. Αυτές όλες οι δυνατότητες θα χρειαστούν καινούργιο σχεδιασμό και στο κομμάτι του hardware για τα AP.

## 6 HARQ

### 6.1 Hybrid Automatic Repeat Request Protocol (HARQ)

Η προσαρμογή συνδέσμων και το ARQ είναι τομείς βελτίωσης της απόδοσης στα τρέχοντα συστήματα Wi-Fi. Επί του παρόντος, οι βελτιώσεις επιτυγχάνονται με την προσαρμογή του Modulation Coding Scheme (MCS) με βάση τις συνθήκες του καναλιού μέσω Channel Quality Information (CQI). Το πρωτόκολλο Hybrid ARQ, αποτελεί μια δοκιμασμένη τεχνική βελτίωσης με ακόλουθα οφέλη.

- 1) Βελτίωση απόδοσης
- 2) Γρηγορότερη απόκριση σε περιόδους κακού σήματος
- 3) Βελτίωση στην κάλυψη λόγω χαμηλού SNR

Το HARQ ήδη χρησιμοποιείται στο LTE ως μέρος του Wi-Fi στο 802.11ax. Τα πειράματα για το πρωτόκολλο HARQ έχουν γίνει πάνω στο LTE. Μέσα από τις έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι η πιθανότητα σφάλματος εξασθενεί δραματικά σε σχέση με την χρήση του AQR μοντέλου όπου το “λάθος” πακέτο που το φτάνει στον χρήστη γίνεται drop. Γενικά, ένα μεμονωμένο σχήμα HARQ μπορεί να μην είναι το βέλτιστο για όλες τις συνθήκες καναλιού, διότι η αποτελεσματικότητα του HARQ εξαρτάται από την ποιότητα του καναλιού. Ως εκ τούτου, η πρότασή μελετά τις μεθόδους προσαρμογής των σχημάτων HARQ μέσω ανατροφοδότησης σχετικά με τις συνθήκες του καναλιού. Επίσης θα συζητήσουμε το LDPC (low density parity check)(πολύ λίγες μονάδες στον κώδικα) που έχει χρησιμοποιείται για όλες τις προσομοιώσεις και αποτελεί βασική μέθοδος για το 5G.

#### 6.1.1 LDPC Puncturing

Ο κώδικας πίσω από το LDPC αποτελείται από matrix όπου υπάρχουν λίγες μονάδες επί των διαγώνιων. Αυτή η δομή διασφαλίζει ότι οι πληροφορίες μοιράζονται μεταξύ των γειτονικών κόμβων, δηλαδή κάθε κόμβος παρέχει πληροφορίες στον διπλανό του μετά από κάθε επανάληψη. Εύκολη εξήγηση για αυτό μπορεί να γίνει μέσα από ένα διάγραμμα Tanner που απεικονίζει την δομή μέσα από σχήμα.

Το puncturing είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στη θεωρία κωδικοποίησης. Στην ουσία αποτελεί το μοντέλο όπου ένας κωδικός  $r_1$  rate πηγαίνει σε έναν κωδικό  $r_2$  υψηλότερου ρυθμού. Στο IR (Incremental redundancy) HARQ, “τρυπάμε” τον κωδικό για να αποκτήσουμε υψηλότερο ποσοστό και κέρδος σε αναμεταδόσεις λόγω του εξαιρούμενου πλεονασμού.

Ως εκ τούτου, το puncturing, είναι μια σημαντική τεχνική. Λόγω περιορισμένης ευελιξίας, ένας μητρικός κωδικός μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμος με το απαιτούμενο coding rate. Για αυτό και χρησιμοποιούμε έναν κωδικό χαμηλότερου ρυθμού ως μητρικό κωδικό και εφαρμόζουμε την τεχνική του puncturing για να αποκτήσουμε το επιθυμητό coding rate. Ωστόσο, αυτό το “τρύπημα” έρχεται με κόστος από άποψη απόδοσης. Υπάρχουν 3 μεθοδολογίες για τον τρόπο εφαρμόζεται το puncturing.



- **Consecutive Puncturing:** Η τεχνική εφαρμόζεται σε συνεχόμενα Bits στην κωδική λέξη με στόχο να επιτευχθεί το επιθυμητό code rate
- **Random Puncturing:** Η τεχνική θα εφαρμοστεί σε “x” τυχαία Bits
- **k-Step Recoverable Puncturing:** Τα μπλοκ στον LDPC κώδικα χωρίζεται σε κόμβους βάση των επαναλήψεων. Έτσι έχουμε κόμβους με 1-SR, κόμβους 2-SR κλπ. Δηλαδή ο κόμβος 1 θα μεταδώσει δεδομένα σε 1 επανάληψη, ομοίως, το 2-SR απαιτεί 2 επαναλήψεις και ούτω καθεξής. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην τεχνική k-SR, ένα διάτρητο Ο κόμβος λέγεται ότι ανακτάται όταν λαμβάνει a μήνυμα από έναν κόμβο ελέγχου και τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των βημάτων που απαιτούνται για την ανάκτηση ενός μηνύματος, στατιστικά λιγότερο αξιόπιστο αυτό το μήνυμα.

### 6.1.2 Επίδραση της διάτρησης στο κέρδος κωδικοποίησης

Το κέρδος κωδικοποίησης μέσω της τεχνικής του “puncturing” σε σύγκριση με έναν “μητρικό” κωδικό είναι μεγάλο. Εύκολα μπορεί να συμπεράνει κάποιος την ανάγκη για την σωστή επιλογή “puncturing”. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η απόδοση του mother code είναι καλύτερη ως προς το SNR και από τις 3 “puncturing” προσεγγίσεις. Το coding rate του μητρικού είναι 1/2 για όλα τα plots. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική k-SR αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τις άλλες τεχνικές puncturing.

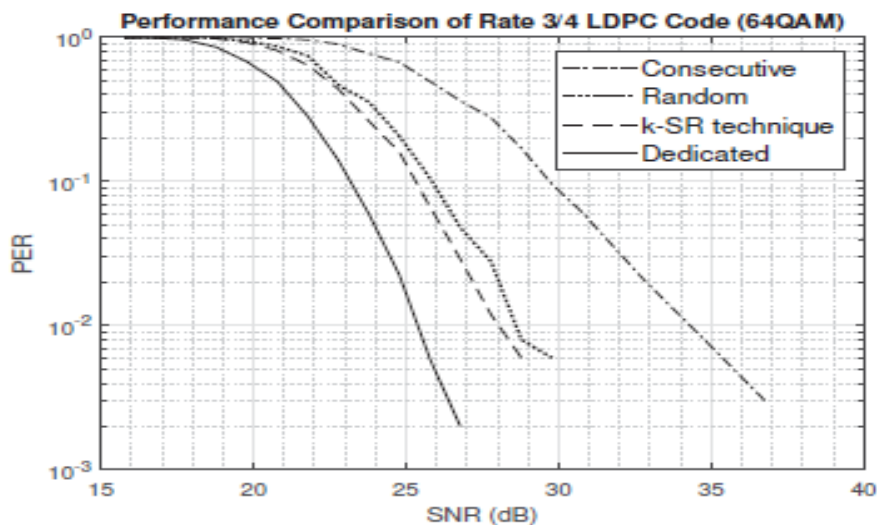


Figure 1: Rate =  $\frac{3}{4}$

Εικόνα 16: PERFORMANCE COMPARISON Article: “Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems”

### 6.1.3 Πρωτόκολλο ARQ vs HARQ

Οι διαφορετικοί τύποι πρωτοκόλλων HARQ έχουν εξηγηθεί και συγκρίνονται όχι μόνο

μεταξύ τους αλλά και με βάση το πρωτόκολλο ARQ το οποίο είναι εν χρήση στο 802.11ακ. Στο πρωτόκολλο ARQ, όταν ένα πακέτο δεν αποκωδικοποιείται με επιτυχία, ο δέκτης πετάει το πακέτο και ζητά αναμετάδοση ολόκληρου του πακέτου. Αυτή η διαδικασία της αναμετάδοσης προσθέτει μεγάλη αναστάτωση στο σύστημα και προσθέτει delay. Όταν έχουμε μεγάλο όγκο πληροφορίας και η ζεύξη επικοινωνίας δεν είναι καλή παρατηρούνται μεγάλες καθυστερήσεις. Έτσι, οποιαδήποτε χρήσιμη πληροφορία υπάρχει στο 1ο πακέτο, δεν πρόκειται να αποκωδικοποιηθεί διότι το πακέτο θα γίνει drop. Το πλεονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι δεν υπάρχει καμία απαίτηση σε buffer. Το πακέτο απορρίπτεται και η πολυπλοκότητα αυτού του πρωτοκόλλου είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με το HARQ.

Το πρωτόκολλο HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Wozencraft και Horstein το 1960. Έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πρότυπα κινητής τηλεφωνίας όπως το 4G. Μεταγενέστερα διερευνήθηκε από τους Beh, Doufexi και Armour η πιθανή εφαρμογή του HARQ σε OFDMA συστήματα με ισχυρότερη απόδοση σε σύγκριση με το πρωτόκολλο ARQ. Στο πρωτόκολλο IR HARQ, αρχικά εφαρμόζεται η τεχνική του puncturing που είναι βασική και την αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εάν το πακέτο δεν φτάσει στον προορισμό του και ζητηθεί αναμετάδοση, τότε ένα μέρος των δυαδικών ψηφίων πλεονασμού (redundancy) ή parity που είχαν αλλάξει μέσα από το Puncturing νωρίτερα μεταδίδονται. Τώρα, αυτά τα parity bits συνδυάζονται με την προηγούμενη μετάδοση για να αποκατασταθεί η κωδική λέξη με ρυθμό,  $r_2$  (αν υποθέσουμε ότι ο πρώτος ρυθμός μετάδοσης ήταν  $r_1$ ). Τώρα αν ζητηθεί εκ νέου αναμετάδοση, τότε στέλνουμε περισσότερα από τα εναπομείναντα bit πλεονασμού (redundancy)  $r_3$  και ούτω καθεξής. Αν εξαντληθούν όλες τα bits πλεονασμού και ακόμα ζητείται αναμετάδοση, θα γίνει επανάληψη της διαδικασίας. Για παράδειγμα: Ακολουθώς βλέπουμε ένα παράδειγμα με mother code  $\frac{1}{2}$  και word size 1944bits.

Table 1: IR transmission steps

Transmission No.	No. of bits transmitted	code rate	total bits transmitted
1	1167	0.8333	1167
2	129	0.7500	1296
3	648	0.5000	1944
4	389	0.4167	2333

Εικόνα 17: HARQ IR STEPS Article: “Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems”

#### 6.1.4 Προβλήματα στην υλοποίηση του HARQ

- 1) Ο λόγος της αστοχίας μετάδοσης

Δεδομένου ότι το WLAN λειτουργεί σε μάντα χωρίς άδεια, μια αποτυχημένη μετάδοση μπορεί να έχει πολλές αιτίες, όπως το deep fading ή ακόμα και κάποια τυχαία παρεμβολή.

Οπότε επειδή δεν μπορεί να υπάρξει κοινή μέθοδος αντιμετώπισης των προβλημάτων. Αν η απώλεια των πακέτων προέρχεται από channel deep fading, δεν συνιστάται η χρήση μόνο του πρωτοκόλλου HARQ. Ιδανικά προτείνεται ο συνδυασμός του με LA. Αν η απώλεια προέρχεται από κάποιο interference, η τεχνική του HARQ είναι η αποτελεσματικότερη και μπορεί να μειώσει το MCS. Συνεπώς πρέπει να αναγνωρίσουμε την ανάγκη του εντοπισμού της αιτίας της αποτυχίας μετάδοσης με ακρίβεια για κάθε περιβάλλον WLAN.

## 2) Chase combining (CC) ή incremental redundancy (IR)

Το HARQ έχει δύο βασικές προσεγγίσεις υλοποίησης: CC και IR, το καθένα με τα δικά του πλεονεκτήματα. Το πλεονέκτημα του CC έγκειται στην απλή εφαρμογή του, αλλά το μειονέκτημά του έγκειται στο περιορισμένο κέρδος απόδοσης. Το πλεονέκτημα του IR είναι ότι έχει καλύτερο κέρδος απόδοσης, αλλά το μειονέκτημα είναι ότι η εφαρμογή είναι πιο σύνθετη. Επομένως, χρειάζεται το IEEE 802.11be να μελετήσει περαιτέρω την πολυπλοκότητα υλοποίησης και κέρδος απόδοσης αυτών των δύο προσεγγίσεων και αναζητήσει α αντάλλαγμα.

## 3) Πρωτόκολλο και σχεδιασμός πλαισίου PHY και MAC

Δεδομένου ότι θα είναι η πρώτη φορά για το 802.11 που θα εφαρμοστεί το HARQ πρωτόκολλο, το MAC πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά. Για παράδειγμα, για αναγνώριση, ο παλαιός σχεδιασμός, έχει μόνο θετικό ACK, δηλαδή αν απαντήσει με ACK σημαίνει ότι ο παραλήπτης λαμβάνει με επιτυχία το πλαίσιο δεδομένων. Αν το πλαίσιο δεν πάει με επιτυχία στον προορισμό του, τότε δεν θα υπάρξει και απάντηση. Ωστόσο, το HARQ απαιτεί από τον δέκτη να απαντήσει ACK μετά τη λήψη του πλαισίου δεδομένων εάν αυτό έχει ληφθεί σωστά και NAK αν δεν έχει ληφθεί σωστά το πακέτο δεδομένων. Επομένως, IEEE το 802.11be πρέπει να υποστηρίζει λειτουργίες ACK και NAK. Επιπλέον, το PHY frame πρέπει να σχεδιαστεί ειδικά η ένδειξη πληροφοριών HARQ στο πεδίο σήματος στα EHT preambles.

## 4) HARQ και αλγόριθμος προσαρμογής συνδέσμων

Το HARQ και το link adaptation είναι συσχετιζόμενα. Ο αποστολέας θα πρέπει να προσαρμόσει τη λειτουργία HARQ και το MCS, δυναμικά, ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού, την απώλεια πακέτων κατάσταση και απαιτήσεις QoS. Αλλά είναι αρκετά δύσκολο να συνοψιστούν οι παγκόσμιες απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο λόγω του μεγάλου όγκου πληροφορίας και των πολλών διαφορετικών περιπτώσεων. Η λειτουργία σε μάλιστα χωρίς άδεια επιδεινώνει αυτό το πρόβλημα. Επομένως, σχεδιάζοντας ένα αποτελεσματικό HARQ πρωτόκολλο Link adaptation αλγορίθμους είναι πολύ σημαντικό για την υλοποίηση.

## 7 Υλοποίηση του μοντέλου EHT transceiver

### 7.1 Υλοποίηση μοντέλου

Τέλος θα δούμε ένα παράδειγμα ενός παραμετροποιημένου 802.11be single user waveform draft, όπως αυτό παρουσιάζεται από το MATLAB. Το παράδειγμα κάνει generate 20 πακέτων μορφής EHT. Το channel bandwidth είναι 320Mhz και το κενό μεταξύ των μεταδόσεων των πακέτων είναι 10 microsecond. Κάθε πακέτο έχει τυχαία δεδομένα και η κωδικοποίηση είναι 4096-QAM. Στο παράδειγμα κάνουμε χρήση ενός μεγαλύτερου IFFT και κάνουμε χρήση high-power amplifier. Το παράδειγμα εκτελεί φασματική εκπομπή στο upsampled waveform μετά το high-power amplifier. Στο κομμάτι του πομπού γίνεται αποκωδικοποίηση των EHT δεδομένων και μέσα από τα EVM θα γίνει απόφαση για την αποδοτικότητα του modulation.

```
numPackets = 20; %number of packets
idleTime    = 10; % In microseconds
```

```
chanBW      = 'CBW320'; % Channel bandwidth of 320
mcs         = 12; % Modulation and coding scheme
numTx       = 2; % Number of transmit antennas
apepLength  = 8000; % A-MPDU length pre-EOF padding in bytes
```

```
cfgEHT = ehtMUConfig(chanBW); % EHT MU configuration object
cfgEHT.NumTransmitAntennas = numTx;
cfgEHT.User{1}.MCS = mcs;
cfgEHT.User{1}.NumSpaceTimeStreams = numTx;
cfgEHT.User{1}.APEPLength = apepLength;
cfgEHT.RU{1}.SpatialMapping = 'Direct';
```

Για να καταφέρουμε να δούμε την επίδραση του highpower amplifier πάνω στο waveform, πρέπει να εφαρμόσουμε oversampling.

```
osf = 4; % Oversamplingfactor
```

Ακολούθως δημιουργούμε τυχαία bits για τα πακέτα μας.

```
psduLength = cfgEHT.getPSDULength*8; % PSDU length in bits per packet
data = randi([0 1],psduLength*numPackets,1);
```

Κάνουμε generate το waveform βάση των configurations που βάλαμε από πάνω κάνοντας χρήση της συνάρτησης ehtWaveformGenerator

```
txWaveform =
ehtWaveformGenerator(data, cfgEHT, 'NumPackets', numPackets, 'IdleTime', i
dleTime*1e-6, 'OversamplingFactor', osf);
```

baseband sampling rate

```
fs = ehtSampleRate(cfgEHT);
disp(['Baseband sampling rate: ' num2str(fs/1e6) ' Msps']);
```

Προσθέτουμε μηδενικά στην κυματομορφή για να γίνει συγχρονισμός

```
txWaveform = [zeros(round(idleTime*1e-6*fs), numTx); txWaveform];
```

### 7.1.1 High-Power Amplifier Modeling

Ένας high-power amplifier παρουσιάζει μια μη γραμμική. Το παράδειγμα που υπάρχει κάνει χρήση του Rapp model που περιέχει AM/AM παραμόρφωση.

Το μοντέλο του amplifier χρησιμοποιεί το “objectcomm.MemorylessNonlinearity”. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται την παρεμβολή ειδικότερα αρχικοποιούμε τα back-off, hpaBackoff.

```
pSaturation = 25; % Saturation power of a power amplifier in dBm
hpaBackoff = 16; % Power amplifier backoff in dB
nonLinearity = comm.MemorylessNonlinearity;
nonLinearity.Method = 'Rapp model';
nonLinearity.Smoothness = 3; % p parameter
nonLinearity.LinearGain = -hpaBackoff;
nonLinearity.OutputSaturationLevel = db2mag(pSaturation-30);
```

```
%Add the model to each transmit antenna
for i=1:cfgEHT.NumTransmitAntennas
txWaveform(:,i) = nonLinearity(txWaveform(:,i));
end
```

### 7.1.2 Θερμικός θόρυβος

```
NF = 6; % Noise figure (dB)
BW = fs*osf; % Bandwidth (Hz)
k = 1.3806e-23; % Boltzman constant (J/K)
T = 290; % Ambient temperature (K)
noisePower = 10*log10(k*T*BW)+NF;
awgnChannel =
comm.AWGNChannel('NoiseMethod','Variance','Variance',10^(noisePower/10));
txWaveform = awgnChannel(txWaveform);
```

### 7.1.3 Modulation Accuracy (EVM) και Spectral Flatness Measurements

#### Downsampling και Filtering

Κάνουμε resample στο oversampled waveform (στο baseband) για το physical layer, εφαρμόζουμε low-pass filter πριν το downsampling. Η σημαντικότητα του low-passfilter είναι εμφανές στην μέτρηση φασματικής επίδοσης. Το φίλτρο έχει σχεδιαστεί ώστε όλα τα active subcarriers να είναι passband.

```
aStop = 40; % Stopband attenuation
ofdmInfo = ehtOFDMInfo('EHT-Data',cfgEHT); % OFDM parameters
SCS = fs/ofdmInfo.FFTLength; % Subcarrier spacing
```

```

txbw = max(abs(ofdmInfo.ActiveFrequencyIndices))*2*SCS; % Occupied
bandwidth
[L,M] = rat(osf);
maxLM = max([L M]);
R = (fs-txbw)/fs;
TW = 2*R/maxLM; % Transition width
b = designMultirateFIR(L,M,TW,aStop);

%Resample the waveform to baseband
firinterp = dsp.FIRRateConverter(M,L,b);
rxWaveform = firinterp(txWaveform);

```

## 7.1.4 Receiver Processing

Σε αυτό το στάδιο κάνουμε ανίχνευση, συγχρονισμό και εξαγωγή κάθε πακέτου σε rxWaveform. Μετά μετράμε το EVM και την φασματική αποδοτικότητα. Για κάθε πακέτο ακολουθούμε τα ακόλουθα βήματα.

- Ανίχνευση της αρχής του πακέτου
- Extract των παλαιών(legacy) fields
- Εκτίμηση διόρθωση(CFO)
- Κάνουμε συγχρονισμό με την χρήση των legacy fields
- Extract των πακέτων από το waveform χρησιμοποιώντας το timing offset
- Διόρθωση του πακέτου
- Extract το L-LTF, μετά κάνουμε εκτίμηση και διόρθωση CFO
- Extract το EHT-LTF και κάνουμε channel estimation για κάθε stream που εκπέμπεται.
- Μετράμε την φασματική αποδοτικότητά.
- Κάνουμε extract και OFDM αποδιαμόρφωση στο EHT Data field
- Κάνουμε εκτίμηση θορύβου κάνοντας χρήση των αποδιαμορφωμένων πεδίων.
- Κάνουμε διόρθωση φάσης στα EHT Data με τις εκτιμήσεις θορύβου για το κανάλι.
- Για κάθε data-carrying subcarrier σε κάθε spatial stream, βρίσκουμε το κοντινότερο constellation point και μετράμε τα EVM
- Επανακτάμε τα PSDU κάνοντας decoding των συμβόλων.

## 7.1.5 Μετρήσεις EVM

1. RMS EVM per packet, περιλαμβάνει το average EVM για κάθε ένα από τα subcarriers, OFDM symbols, and spatial streams.
2. RMS EVM per subcarrier per spatial stream για ένα πακέτο.

## 7.1.6 Setup EVM measurements

```

[EVMPerPkt,EVMPerSC] = evmSetup(cfgEHT);
ind = ehtFieldIndices(cfgEHT);
minPktLen = double(ind.LSTF(2)-ind.LSTF(1))+1;

```

Ακολουθως γίνεται ανίχνευση των πακέτων με το received waveform μέσα από μια while loop

1. Ανίχνευση των πακέτων
2. Επεξεργασία του πρώτου πακέτου
3. Ανίχνευση και επεξεργασία των πακέτων μέσα από το sample index offset
4. Repeat της διαδικασίας

```

rxWaveformLength = size(rxWaveform,1);
pktLength = double(ind.EHTData(2));
rmsEVM = zeros(numPackets,1);
pktOffsetStore = zeros(numPackets,1);
rng(savedState); % Restore random state
pktNum = 0;
searchOffset = 0; % Start at first sample (no offset)
while (searchOffset+minPktLen)<=rxWaveformLength

    % Detect packet and determine coarse packet offset
    pktOffset =
    ehtPacketDetect(rxWaveform, cfgEHT.ChannelBandwidth, searchOffset);
    % Packet offset from start of the waveform
    pktOffset = searchOffset+pktOffset;
    % Skip packet if L-STF is empty
    if isempty(pktOffset) || (pktOffset<0) || ...
        ((pktOffset+ind.LSIG(2))>rxWaveformLength)
        break;
    end

    % Extract L-STF and perform coarse frequency offset correction
    nonht = rxWaveform(pktOffset+(ind.LSTF(1):ind.LSIG(2)),:);
    coarseFreqOff = ehtCoarseCFOEstimate(nonht, cfgEHT.ChannelBandwidth);
    nonht = helperFrequencyOffset(nonht, fs, -coarseFreqOff);

    % Extract the legacy fields and determine fine packet offset
    lltfOffset = ehtSymbolTimingEstimate(nonht, cfgEHT.ChannelBandwidth);
    pktOffset = pktOffset+lltfOffset; % Determine packet offset

    % If offset is outwith bounds of the waveform, then skip samples
    and
    % continue searching within remainder of the waveform
    if (pktOffset<0) || ((pktOffset+pktLength)>rxWaveformLength)
    searchOffset = pktOffset+double(ind.LSTF(2))+1;
        continue;
    end
    % Timing synchronization complete; extract the detected packet
    rxPacket = rxWaveform(pktOffset+(1:pktLength),:);
    pktNum = pktNum+1;
    disp([' Packet ' num2str(pktNum) ' at index: '
    num2str(pktOffset+1)]);

    % Apply coarse frequency correction to the extracted packet
    rxPacket = helperFrequencyOffset(rxPacket, fs, -coarseFreqOff);

    % Perform fine frequency offset correction on the extracted
    packet
    lltf = rxPacket(ind.LLTF(1):ind.LLTF(2),:); % Extract L-LTF
    fineFreqOff = ehtFineCFOEstimate(lltf, cfgEHT.ChannelBandwidth);
    rxPacket = helperFrequencyOffset(rxPacket, fs, -fineFreqOff);

    % Extract EHT-LTF samples, demodulate, and perform channel
    estimation
    ehtLTF = rxPacket(ind.EHTLTF(1):ind.EHTLTF(2),:);

```

```

ehtLTFDemod = ehtDemodulate(ehtLTF,'EHT-LTF',cfgEHT);

% Channel estimate
[chanEst,pilotEst] = ehtLTFChannelEstimate(ehtLTFDemod, cfgEHT);

% Spectral flatness measurement
ehtTxSpectralFlatnessMeasurement(chanEst, cfgEHT, pktNum);

% Data demodulate
rxData = rxPacket(ind.EHTData(1):ind.EHTData(2),:);
demodSym = ehtDemodulate(rxData,'EHT-Data',cfgEHT);

% Pilot phase tracking
demodSym = ehtCommonPhaseErrorTracking(demodSym, chanEst, cfgEHT);

% Estimate noise power in EHT fields
nVarEst =
ehtNoiseEstimate(demodSym(ofdmInfo.PilotIndices, :, :), pilotEst, cfgEHT)
;

% Extract data subcarriers from demodulated symbols and channel
% estimate
demodDataSym = demodSym(ofdmInfo.DataIndices, :, :);
chanEstData = chanEst(ofdmInfo.DataIndices, :, :);

% Equalization and STBC combining
[eqSym, csi] =
ehtEqualizeCombine(demodDataSym, chanEstData, nVarEst, cfgEHT);

% Compute RMS EVM over all spatial streams for a packet
rmsEVM(pktNum) = EVMPerPkt(eqSym);
fprintf('    RMS EVM: %2.2f%%,
%2.2fdB\n', rmsEVM(pktNum), 20*log10(rmsEVM(pktNum)/100));

% Compute RMS EVM per subcarrier and spatial stream for the
packet
evmPerSC = EVMPerSC(eqSym); % Nst-by-1-by-Nss

% Plot RMS EVM per subcarrier and equalized constellation
ehtTxEVMConstellationPlots(eqSym, evmPerSC, cfgEHT, pktNum);

% Recover data field bits
rxPSDU = ehtDataBitRecover(eqSym, nVarEst, csi, cfgEHT);

if isequal(rxPSDU, data((1:psduLength)+(pktNum-1)*psduLength))
fprintf('    Decode success\n');
else
fprintf('    Decode failure\n');
end

% Store the offset of each packet within the waveform
pktOffsetStore(pktNum) = pktOffset;

% Increment waveform offset and search remaining waveform for a
packet
searchOffset = pktOffset+pktLength+minPktLen;
end

if pktNum>0
fprintf('Average EVM for %d packets: %2.2f%%, %2.2fdB\n', ...

```



```

pktNum, mean(rmsEVM(1:pktNum)), 20*log10(mean(rmsEVM(1:pktNum))/100));
else
disp('No complete packet detected');
end

```

## 7.1.7 Spectral Mask Measurement

Σε αυτό το κεφάλαιο μετράμε το spectral mask του εξασθενημένου και φιλτραρισμένου waveform (μετά από το high-power amplifier modeling). Το εκπεμπόμενο spectralmask κάνει χρήση μιας time-gated spectral μέτρησης για το EHTDatafield.

```

startIdx = osf*(ind.EHTData(1)-1)+1; % Upsampled start of EHT Data
endIdx = osf*ind.EHTData(2); % Upsampled end of EHT Data
delay = grpdelay(firinterp,1); % Group delay of downsampling filter
idx = zeros(endIdx-startIdx+1,pktNum);
for i = 1:pktNum
% Start of packet in txWaveform
pktOffset = round(osf*pktOffsetStore(i))-delay;
% Indices of EHT-Data in txWaveform
idx(:,i) = (pktOffset+(startIdx:endIdx));
end
gatedEHTTData = txWaveform(idx(:),:);

```

Το 802.11be standard προσδιορίζει το spectral mask σχετικά με το peak power spectral density.

```

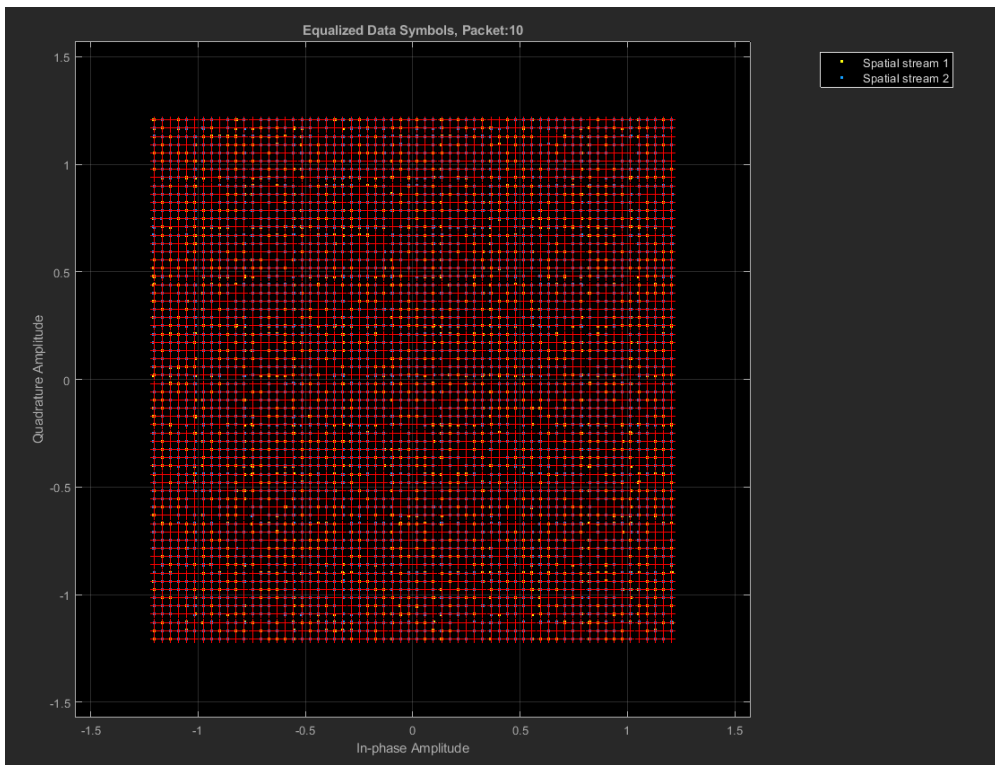
if pktNum>0
ehtSpectralMaskTest(gatedEHTTData,fs,osf);
end

```

## 7.1.8 Results

### 1) DATA SYMBOLS

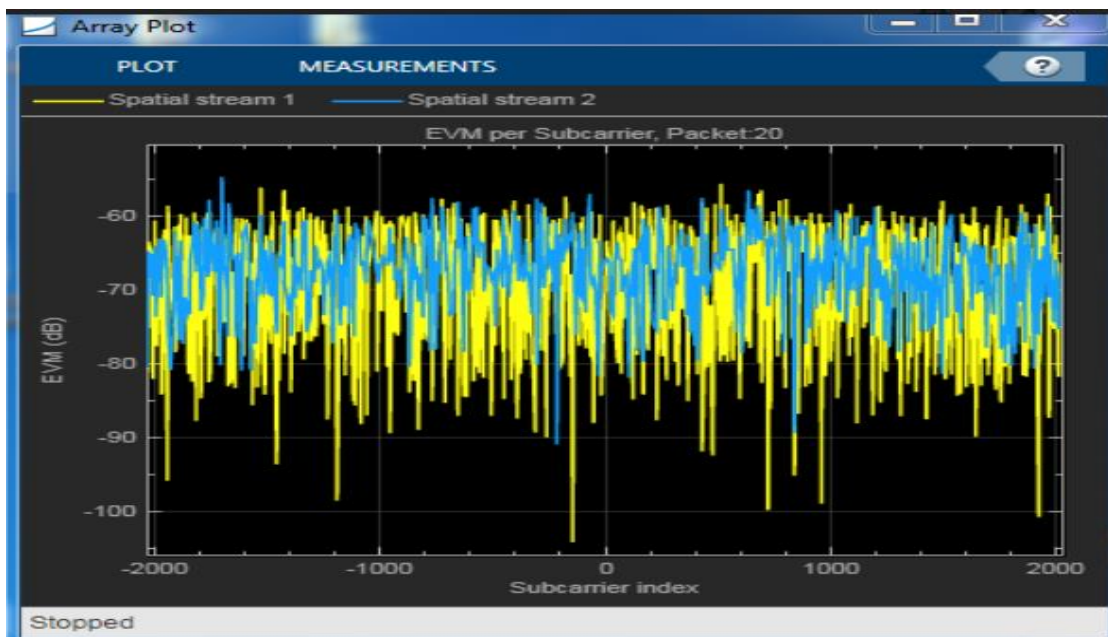
Έπειτα από την εκτέλεση του κώδικα έχουμε 3 plots που μας δείχνουν την αποδοτικότητα που έχει το wifi 7. Αρχικά παρατηρούμε το αποτέλεσμα στην εικόνα 18. Το γράφημα απεικονίζει το modulation order 4096-QAM για το MIMO σύστημα που έχουμε μοντελοποιήσει. Όπως γνωρίζουμε από την θεωρία όσο μεγαλύτερο αριθμό συμβόλων έχουμε, τα σύμβολα έρχονται όλα και πιο κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα να γίνει λάθος εκτίμηση κάποιου συμβόλου και κατ' επέκταση να υπάρχει σφάλμα. Όμως, στο εν λόγω παράδειγμα η πιθανότητα σφάλματος είναι μικρή. Σε μια τυχαία λήψη 20 πακέτων υπολογίστηκε ότι το Average EVM για τα 20 packets ήταν 0.06%, -64,09dB. Από το παράδειγμα μπορούμε να αντιληφθούμε την σπουδαιότητα των αποτελεσμάτων



Εικόνα 18: Equalized data symbols

## 2) ARRAY PLOT

Στην εικόνα 19 και 20 παρατηρούμε την συμπεριφορά του κάθε πακέτου ανά subcarrier για τις 2 κεραίες.

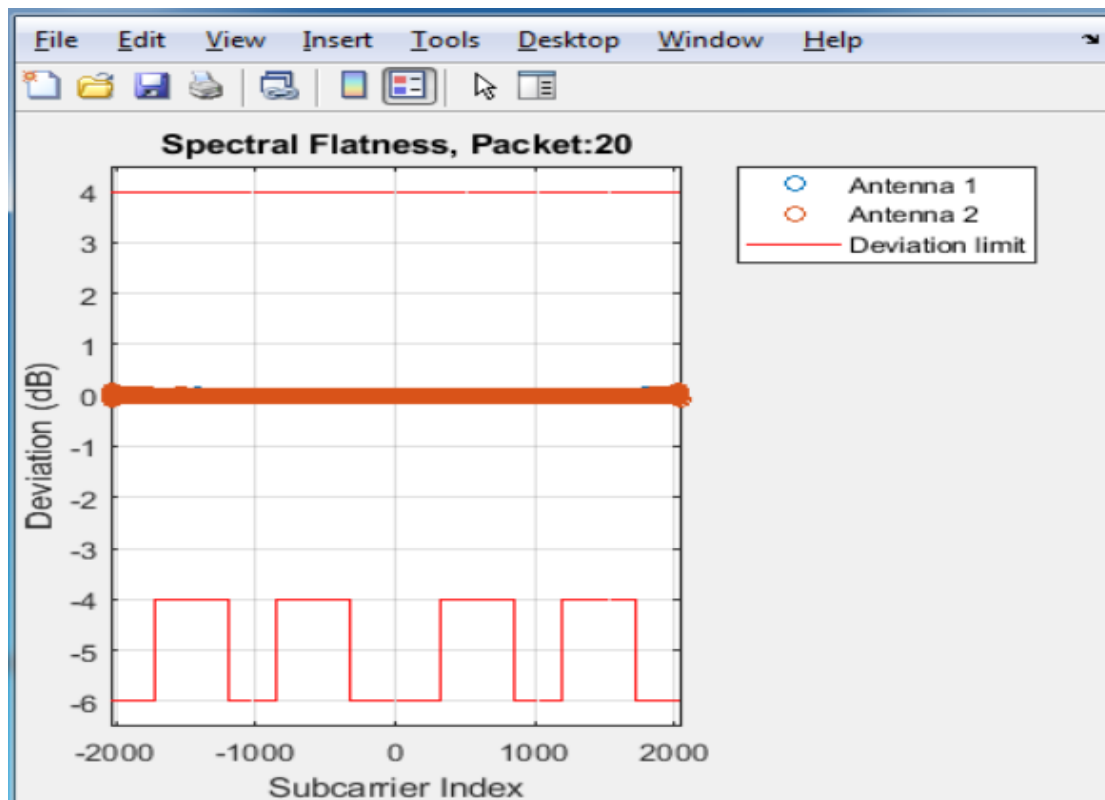


Εικόνα 19: Array Plot

Κατά την αποδιαμόρφωση OFDM, η απόκριση του equalizer που υπολογίζεται από το preamble χρησιμοποιείται για τη διόρθωση πολλών ατελειών στο σήμα OFDM. Επειδή η απόκριση του equalizer δεν είναι τέλεια, το pilot tracking χρησιμοποιείται για τη διόρθωση ατελειών στην απόκριση του equalizer και για ατέλειες που αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ριπής.

Σε κάθε σύμβολο OFDM, τέσσερα από τα subcarriers είναι αφιερωμένα στα πιλοτικά σήματα προκειμένου να κάνουν τη ανίχνευση έναντι των μετατοπίσεων συχνότητας και του θορύβου φάσης που θα δεχτεί κατά την διάρκεια της μετάδοσης.

Οι πιλοτικοί υποφορείς εκπέμπουν με γνωστή ακολουθία δεδομένων. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της διαφοράς ή του σφάλματος μεταξύ ενός ιδανικού σήματος και του πραγματικού ληφθέντος σήματος. Επειδή τα δεδομένα είναι πολύπλοκα, το VSA υπολογίζει δεδομένα σφάλματος φάσης, πλάτους και χρονισμού. Τα δεδομένα σφάλματος μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση ατελειών τόσο του πιλότου όσο και του δευτερεύοντος φορέα δεδομένων, δημιουργώντας μια πιο ακριβή αποδιαμόρφωση.



Εικόνα 20: Spectral Flatness

## 7.2 Δεύτερη εφαρμογή

### 7.2.1 PACKET ERROR RATE

Το παράδειγμα καθορίζει το packet error rate για το 802.11be σε ένα SUIlinkend to end σε SNRpoints. Για κάθε SNRpoint στο παράδειγμα γίνεται χρήση ενός TGax indoor channel. Στο παράδειγμα τα πακέτα γίνονται transmit σε ένα noisy TGax κανάλι. Στον receiver γίνεται demodulation των πακέτων και ανάκτηση των PSDU.Το κανάλι αυτό χρησιμοποιεί την MIMO προσέγγιση για την μοντελοποίηση. Στο τέλος γίνεται σύγκριση και καθορίζεται το pckt/error rate.

### 7.2.2 Waveform Configuration

Το EHTMUSU packet είναι μια full band transmission σε single user. Το object που φτιάχνουμε για να μπορέσουμε έχει τις ιδιότητες του PHYlayer. Συγκεκριμένα το channelbw είναι 20MHz, APEP length της τάξεως των 1000bytes, 2 antenas που γίνεται το transmission,coding scheme (MCS) 13<sup>ο</sup>, 4096-QAM, Coding rate 5/6

```
chanBW = 'CBW20'; % Channel bandwidth
cfgEHT = ehtMUConfig(chanBW);
cfgEHT.User{1}.APEPLength = 1e3; % APEP length (bytes)
numTx = 2; % Number of transmit antennas
numRx = 2; % Number of receive antennas
cfgEHT.NumTransmitAntennas = numTx;
cfgEHT.User{1}.NumSpaceTimeStreams = numTx; % Number of space-time
streams
mcs = 13; % MCS index
```

### 7.2.3 Channel Configuration

Το παράδειγμα κάνει χρήση του TGaxnon-line-of-sight(NLOS). Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται όταν η απόσταση μεταξύ transmitterκαι receiverείναι μεγαλύτερη από 5m.

```
% Create and configure a 2x2 MIMO channel.
tgaxChannel = wlanTGaxChannel;
tgaxChannel.DelayProfile = 'Model-B';
tgaxChannel.NumTransmitAntennas = cfgEHT.NumTransmitAntennas;
tgaxChannel.NumReceiveAntennas = numRx;
tgaxChannel.TransmitReceiveDistance = 5; % Distance in meters for
NLOS
tgaxChannel.ChannelBandwidth = chanBW;
tgaxChannel.LargeScaleFadingEffect = 'None';
fs = wlanSampleRate(chanBW);
tgaxChannel.SampleRate = fs;
```

### 7.2.4 Simulation Parameters

Το SNR Range είναι το ακόλουθο.

```
snrRange = 37:5:57; % Set the range of SNR values
```

Επίσης υπάρχουν οι ακόλουθες 2 μεταβλητές

```
maxNumErrors = 10;  
maxNumPackets = 100;
```

Η μεταβλητή `maxNumErrors` υποδηλώνει το μέγιστο αριθμό πακέτων για κάθε SNR point. Όταν φτάσει το όριο που υπάρχει τότε έχει ολοκληρωθεί το simulation.

Η μεταβλητή `maxNumPackets` υποδηλώνει τον μέγιστο αριθμό των πακέτων που θα σταματήσει το πείραμα εάν δεν φτάσει ποτέ τον μέγιστο αριθμό πακέτων.

### Processing SNR Points

1. Φτιάχνουμε ένα PSDU (physical layer service data unit) και κάνουμε ένα single-packet waveform.
2. Περνάμε το waveform μέσα από ένα TGax channel model.
3. Κάνουμε προσθήκη AWGN στο received waveform για να κάνουμε το ανάλογο SNR για κάθε subcarrier μετά το OFDM modulation.
4. Κάνουμε αναγνώριση πακέτου
5. Κάνουμε εκτίμηση και διόρθωση
6. Κάνουμε extract το EHT-LFT
7. ODF αποδιαμορφωση στο EHT-L

Μέσα από την συνάρτηση `parfor` κάνουμε επιτάχυνση του simulation. Η συνάρτηση αυτή κάνει για κάθε SNR παράλληλα την διαδικασία για να μειωθεί το χρόνος.

```
numSNR = size(snrRange,2); % Number of SNR points  
numMCS = numel(mcs); % Number of MCS  
packetErrorRate = zeros(numMCS,numSNR);  
forimcs = 1:numel(mcs)  
cfgEHT.User{1}.MCS = mcs(imcs);  
ofdmInfo = ehtOFDMInfo('EHT-Data',cfgEHT);  
% SNR points to simulate from MCS  
    snr = snrRange(imcs,:);  
ind = ehtFieldIndices(cfgEHT);
```

```
%parfor isnr = 1:numSNR % Use parfor to speed up the simulation  
for isnr = 1:numSNR % Use for to debug the simulation  
% Set random substream index per iteration to ensure that each  
% iteration uses a repeatable set of random numbers  
    stream = RandStream('combRecursive','Seed',99);  
stream.Substream = isnr;  
RandStream.setGlobalStream(stream);
```

```
% Define the SNR per active subcarrier to account for noise energy  
% in nulls  
snrValue = snr(isnr)-10*log10(ofdmInfo.FFTLength/ofdmInfo.NumTones);  
  
% Loop to simulate multiple packets  
numPacketErrors = 0;  
numPkt = 1; % Index of packet transmitted  
while numPacketErrors<=maxNumErrors && numPkt<=maxNumPackets  
% Generate waveform  
txPSDU = randi([0 1],getPSDULength(cfgEHT)*8,1); % PSDULength (bytes)  
tx = ehtWaveformGenerator(txPSDU,cfgEHT);  
  
% Add trailing zeros to allow for channel delay  
txPad = [tx; zeros(50,cfgEHT.NumTransmitAntennas)];
```

```

% Pass through fading indoor TGax channel
    reset(tgaxChannel); % Reset channel for different
realization
rx = tgaxChannel(txPad);

% Pass waveform through an AWGN channel
rx = awgn(rx,snrValue);

% Detect packet and determine coarse packet offset
coarsePktOffset = wlanPacketDetect(rx,chanBW);
if isempty(coarsePktOffset) % If empty no L-STF detected, packet error
numPacketErrors = numPacketErrors+1;
numPkt = numPkt+1;
continue; % Go to next loop iteration
end

% Extract L-STF and perform coarse frequency offset correction
lstf = rx(coarsePktOffset+(ind.LSTF(1):ind.LSTF(2)),:);
coarseFreqOff = wlanCoarseCFOEstimate(lstf,chanBW);
rx = frequencyOffset(rx,fs,-coarseFreqOff);

% Extract the non-HT fields and determine fine packet offset
nonhtfields = rx(coarsePktOffset+(ind.LSTF(1):ind.LSIG(2)),:);
finePktOffset = wlanSymbolTimingEstimate(nonhtfields,chanBW);

% Determine final packet offset
pktOffset = coarsePktOffset+finePktOffset;

% If packet detected outwith range of expected delays from
% the channel modeling, packet error
if pktOffset>50
numPacketErrors = numPacketErrors+1;
numPkt = numPkt+1;
continue; % Go to next loop iteration
end

% Extract L-LTF and perform fine frequency offset correction
rxLLTF = rx(pktOffset+(ind.LLTF(1):ind.LLTF(2)),:);
fineFreqOff = wlanFineCFOEstimate(rxLLTF,chanBW);
rx = frequencyOffset(rx,fs,-fineFreqOff);

% EHT-LTF demodulation and channel estimation
rxHELTF = rx(pktOffset+(ind.EHTLTF(1):ind.EHTLTF(2)),:);
heltfDemod = ehtDemodulate(rxHELTF,'EHT-LTF',cfgEHT);
[chanEst,pilotEst] =
ehtLTFChannelEstimate(heltfDemod, cfgEHT);

% Demodulate the Data field
rxData = rx(pktOffset+(ind.EHTData(1):ind.EHTData(2)),:);
demodSym = ehtDemodulate(rxData,'EHT-Data',cfgEHT);

% Perform pilot phase tracking
demodSym = ehtCommonPhaseErrorTracking(demodSym,chanEst, cfgEHT);

% Estimate noise power in EHT fields
nVarEst =
ehtNoiseEstimate(demodSym(ofdmInfo.PilotIndices,:),pilotEst, cfgEHT)
;

% Extract data subcarriers from demodulated symbols and channel
% estimate

```

```

demodDataSym = demodSym(ofdmInfo.DataIndices, :, :);
chanEstData = chanEst(ofdmInfo.DataIndices, :, :);

% Equalization
[eqSym, csi] =
ehtEqualizeCombine(demodDataSym, chanEstData, nVarEst, cfgEHT);

% Recover data field bits
rxPSDU =
ehtDataBitRecover(eqSym, nVarEst, csi, cfgEHT, 1, 'LDPCDecodingMethod', 'no
rm-min-sum');

% Determine if any bits are in error
packetError = any(biterr(txPSDU, rxPSDU));
numPacketErrors = numPacketErrors + packetError;
numPkt = numPkt + 1;
end

% Calculate PER at SNR point
packetErrorRate(imcs, isnr) = numPacketErrors / (numPkt - 1);
disp(['MCS ' num2str(mcs(imcs)) ', ' ...
' SNR ' num2str(snr(isnr)) ' ...
' completed after ' num2str(numPkt - 1) ' packets, ' ...
' PER: ' num2str(packetErrorRate(imcs, isnr))]);
end
end

```

Συμπεραίνουμε ότι οι χρόνοι είναι

MCS 13, SNR 37 completed after 11 packets, PER:1  
MCS 13, SNR 42 completed after 11 packets, PER:1  
MCS 13, SNR 47 completed after 20 packets, PER:0.55  
MCS 13, SNR 52 completed after 63 packets, PER:0.1746  
MCS 13, SNR 57 completed after 100 packets, PER:0.01

## 7.2.5 PLOTS ERROR RATE VS SNR

```

markers = 'ox*sd^v><ph+ox*sd^v><ph+';
color = 'bmcrgbrkymcrbmcrgrbrkymcr';
figure;
for imcs = 1:numMCS
semilogy(snrRange(imcs, :), packetErrorRate(imcs, :).', ['- '
markers(imcs) color(imcs)]);
hold on;
end
grid on;
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('PER');
dataStr = arrayfun(@(x) sprintf('MCS
%d', x), mcs, 'UniformOutput', false);
legend(dataStr, 'Location', 'NorthEastOutside');
title(['PER (EHT MU), ' num2str(cfgEHT.ChannelBandwidth) ', Model-B,
' num2str(numTx) '-by-' num2str(numRx)']);

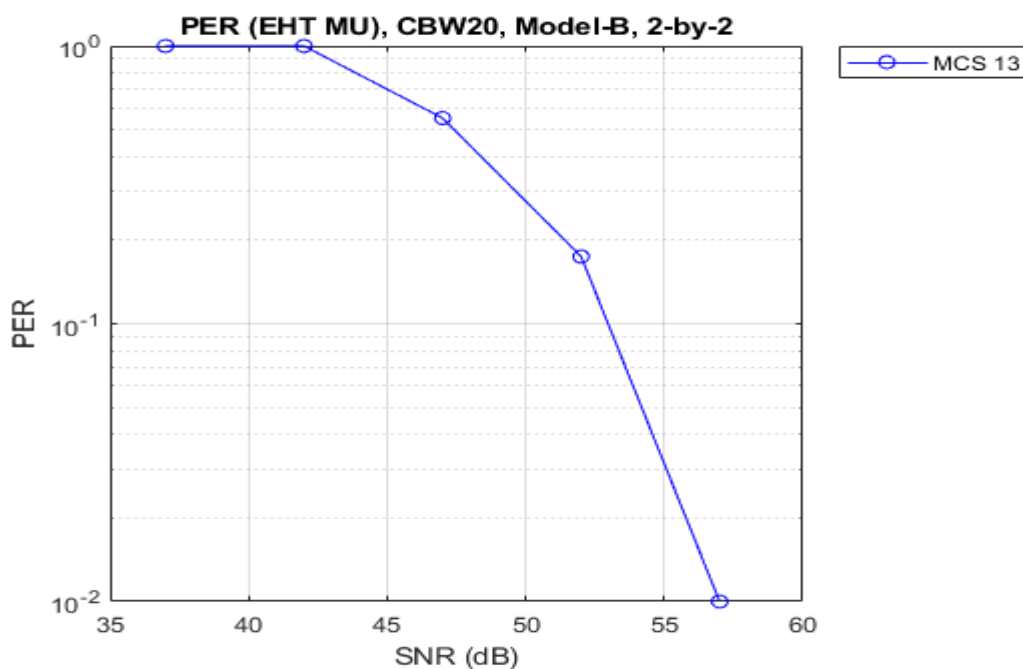
```

Αυτό το παράδειγμα καθορίζει το ποσοστό σφάλματος πακέτου για μια σύνδεση 802.11be ενός χρήστη (SU) χρησιμοποιώντας μια end-to-end για μια επιλογή σημείων αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR). Σε κάθε σημείο SNR, το παράδειγμα προσομοιώνει τη

μετάδοση πολλαπλών πακέτων μέσω ενός θορυβώδους καναλιού TGax, στη συνέχεια αποδιαμορφώνει τα ληφθέντα πακέτα και ανακτά τα PSDU. Στη συνέχεια, το παράδειγμα συγκρίνει τα μεταδιδόμενα και τα ληφθέντα πακέτα για να προσδιορίσει το ποσοστό σφάλματος του πακέτου.

Ένα πακέτο EHT MU SU είναι μια μετάδοση πλήρους ζώνης σε έναν μόνο χρήστη. Διαμορφώσαμε τις παραμέτρους μετάδοσης για μια μορφή πακέτου SU χρησιμοποιώντας το αντικείμενο wlanEHTMUConfig. Οι ιδιότητες του αντικειμένου περιέχουν τη διαμόρφωση φυσικού επιπέδου (PHY).

Δημιουργήσαμε ένα αντικείμενο διαμόρφωσης για μια μετάδοση EHT MU. Ορίσαμε εύρος ζώνης καναλιού 20 MHz. Μήκος APEP 1000 byte, δύο κεραίες εκπομπής, δύο space-time streams και μια τιμή σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) 13, η οποία καθορίζει διαμόρφωση 4096-QAM και ρυθμός κωδικοποίησης 5/6.



Εικόνα 21: PER(EHT MU) για τιμή MCS 13

## 7.2.6 Επιπλέον εξήγηση

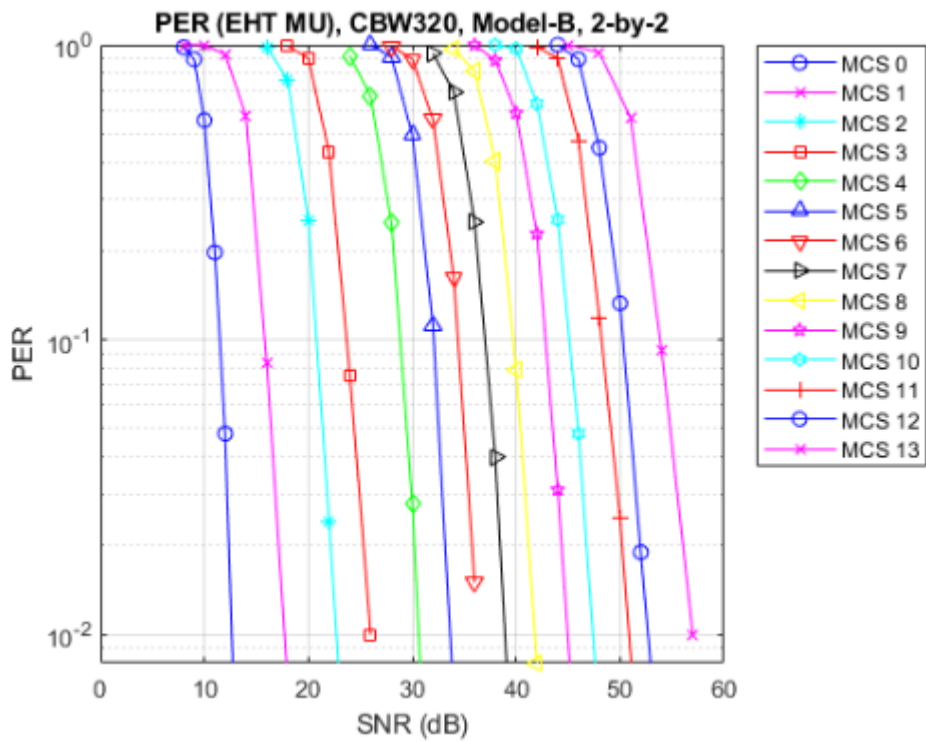
Αν καθορίσουμε το mcs ως διάνυσμα, το παράδειγμα εκτελείται στην προσομοίωση για κάθε τιμή ευρετηρίου MCS.

Το maxNumErrors και το maxNumPackets για παράδειγμα υπάρχει bw320 MHz, APEP length 16000 bytes, MCS 0-13, a maxNumErrors 100, και maxNumPackets 1000. Το διάγραμμα SNR είναι το ακόλουθο για τιμές από 0 έως 13:

```
snrRange = [...  
    8:1:13; ... % MCS 0  
    8:2:18; ... % MCS 1  
    16:2:26; ... % MCS 2
```



18:2:28; ... % MCS 3  
 24:2:34; ... % MCS 4  
 26:2:36; ... % MCS 5  
 28:2:38; ... % MCS 6  
 32:2:42; ... % MCS 7  
 34:2:44; ... % MCS 8  
 36:2:46; ... % MCS 9  
 38:2:48; ... % MCS 10  
 42:2:52; ... % MCS 11  
 44:2:54; ... % MCS 12  
 45:3:60]; ...% MCS 13



Εικόνα 22: Per(EHT) διάφορες τιμές MCS

## **8 Συμπεράσματα**

Συμπερασματικά το Wi-Fi 7 θα αποτελέσει μια βασική γραμμή εξέλιξης των σύγχρονων δικτύων για το μέλλον. Όπως αναλύσαμε πλέον θα περάσουμε σε μεγαλύτερη κωδικοποίηση που θα μας επιτρέψει να έχουμε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια αποστολής. Το βασικό είναι να θεμελιωθούν όλες οι εφαρμογές και οι τεχνικές που θα το πλαισιώνουν έτσι ώστε να μπορέσει να αναδειχθεί στο έπακρο. Αρχικά σημαντικό είναι να δομηθεί σωστά το MAC και PHY layer ως προς τις λειτουργίες που θα περιέχονται στο καθένα. Εν συνεχεία τα advanced features όπως το μεγάλο BW , που αποτελεί ίσως και τον κυριότερο παράγοντα σε αυτά, θα μπορέσει να μας επιτρέψει να αυξήσουμε και να καλυτερέψουμε παράγοντες όπως είναι το throughput ή το bit rate. Βασική βοήθεια στο όλο εγχείρημα θα προσφέρουν τα πρωτόκολλα multilink operation (MLO) μαζί με όλες τις παραλλαγές του με σκοπό να υπάρξουν High data rates με low latency και τα HARQ όπου έρχεται να εξελίξει το ήδη υπάρχων ARQ. Για την επίτευξη όμως όλων των παραπάνω θα χρειαστούν καινούργιες μελέτες δικτύων και καινούργια υλικά που να μπορέσουν υποστηρίξουν όλες αυτές τις δυνατότητες. Τέλος βάση των ερευνών προκύπτει ότι μια τέτοια αναβάθμιση είναι εφικτή και τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά καθώς μπορούμε πλέον να αυξήσουμε δραματικά την ποιότητα εκπομπής λόγω του μεγάλου Bw που προσφέρετε. Επέκταση αυτής της αύξησης της ακρίβειας είναι η ανάπτυξη εφαρμογών και υπηρεσιών με κέντρο την αξιοπιστία.

## 9 Λεξικό

AP access point

BIGTK beacon integrity group temporal key

BPSK binary phase shift keying

BU bufferable unit

BSS basic service set

BW bandwidth

CCA clear channel assessment

DL downlink

DS distribution system

EHT extremely high throughput

EP emergency preparedness

GTK group temporal key

HARQ Hybrid Automatic Repeat Request

HE high efficiency

IGTK integrity group temporal key

LLC logical link control

L-LTF Non-HT Long Training field

L-SIG Non-HT SIGNAL field

L-STF Non-HT Short Training field

LTF long training field

MAC medium access protocol

MCS modulation and coding scheme

MLD multi-link device

MU multi-user

MU-MIMO multi-user multiple input, multiple output

NDP null data PPDU

NS	national security
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing
PCC	Punctured Chase Combining
PHY	physical layer
PN	packet number
PPDU	PHY protocol data unit
PSDU	PHY service data unit
RA	receiver address
RL-SIG	Repeated Non-HT SIGNAL field
RU	resource unit
RX	receive or receiver
SAP	service access point
STA	station
SU	single user
SU-MIMO	single user multiple input, multiple output
TA	transmitter address
TID	traffic identifier
TX	transmit or transmitter
TXOP	transmission opportunity
UL	Uplink
U-SIG	Universal SIGNAL field
WM	wireless medium

## 10 Βιβλιογραφία

1. <https://www.wi-fi.org/news-events>
2. "IEEE Draft Standard for Information Technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-- Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Very High Throughput to Support Chinese Millimeter Wave Frequency Bands (60 GHz and 45 GHz)," in IEEE P802.11ajD9.0, November 2017 , vol., no., pp.1-316, 8 Dec. 2017.
3. "IEEE Draft Standard for Information Technology -- Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks -- Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment Enhancements for High Efficiency WLAN," in IEEE P802.11ax/D4.0, February 2019 , vol., no., pp.1-746, 12 March 2019.
4. [https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1262&is\\_group=00be](https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1262&is_group=00be).
5. [https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=1231&is\\_group=0eht](https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1231&is_group=0eht).
6. G. Shishir, R. Sonigra, N. Seshadri and R. D. Koilpillai, "Hybrid-ARQ Protocol for Next Generation Wi-Fi Systems," 2021 International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS), 2021, pp. 342-350, doi: 10.1109/COMSNETS51098.2021.9352833.
7. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136212/14.02.00\\_60/ts\\_136212v140200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/14.02.00_60/ts_136212v140200p.pdf)
8. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2021/02/building-better-video-conference-uplink-mu-mimo>
9. <https://www.ieee802.org/11/Reports/>
10. <https://www.ieee802.org/11/Liaisons/Liaisons-and-External-Communications.html>
11. <https://www.upf.edu/web/boris-bellalta>
12. J. G. Andrews, X. Zhang, G. D. Durgin and A. K. Gupta, "Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification?," in IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 10, pp. 184-190, October 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7588290.
13. [https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbe\\_update.htm](https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbe_update.htm)
14. <https://wlanprofessionals.com/802-11be-in-an-802-11ax-era-with-mark-raats-a-video-from-wlpc-phoenix-2020/>
15. <https://www.ieee802.org/11/Liaisons/Liaisons-and-External-Communications.html>
16. <https://www.ieee802.org/11/>
17. Deng, Cailian& Fang, Xuming& Han, Xiao & Wang, Xianbin& Yan, Li & He, Rong& Long, Yan &Guo, Yuchen. (2020). IEEE 802.11be – Extremely High Throughput WLAN: New Challenges and Opportunities. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 22. 1-1. 10.1109/COMST.2020.3012715.
18. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/10548/>
19. [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11be](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11be)
20. <https://mrnciew.com/2014/10/14/cwap-802-11-phy-ppdu/>

21. <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>
22. [https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is\\_dcn=0117&is\\_group=00be](https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0117&is_group=00be).
23. [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj8nZPm89D4AhXRIMUKHZIYDWwQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fmentor.ieee.org%2F802.11%2Fdcn%2F15%2F11-15-1321-02-00ax-reducing-explicit-mimo-compressed-beamforming-feedback-overhead-for-802-11ax.pptx&usg=AOvVaw2twpjCQ3we9bbs0w\\_d3tY7](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj8nZPm89D4AhXRIMUKHZIYDWwQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fmentor.ieee.org%2F802.11%2Fdcn%2F15%2F11-15-1321-02-00ax-reducing-explicit-mimo-compressed-beamforming-feedback-overhead-for-802-11ax.pptx&usg=AOvVaw2twpjCQ3we9bbs0w_d3tY7)
24. M. Ishtiaq, A. U. Rehman, F. Khan, A. Salam and Shahzad, "Performance Investigation of SR-HARQ transmission scheme in realistic Cognitive Radio System," 2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 2019, pp. 0258-0263, doi: 10.1109/CCWC.2019.8666610.
25. B. Bellalta, "IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANS," in IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 1, pp. 38-46, February 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7422404.
26. <https://arxiv.org/abs/2105.04842>
27. <https://arxiv.org/abs/2111.09281>
28. R. P. FabrisHoefel, "IEEE 802.11be: Throughput and Reliability Enhancements for Next Generation WI-FI Networks," 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/PIMRC48278.2020.9217206.
29. M. Yang, B. Li, Z. Yan and Y. Yan, "AP Coordination and Full-duplex enabled Multi-band Operation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT)," 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCSP.2019.8928021.
30. <https://arxiv.org/abs/2202.12614>
31. A. Garcia-Rodriguez, D. López-Pérez, L. Galati-Giordano and G. Geraci, "IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 Strikes Back," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 4, pp. 102-108, April 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000711.
32. Marc Carrascosa, Giovanni Geraci, Edward Knightly, and Boris Bellalta. An Experimental Study of Latency for IEEE 802.11 be Multi-link Operation. arXiv preprint arXiv:2111.09281, 2021
33. IEEE P802.11be/D1.0 Draft 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 8: Enhancements for extremelyhigh throughput (EHT), May 2021
34. SharanNaribole, Srinivas Kandala, Wook Bong Lee, and Ashok Ranganath. Simultaneous Multi-Channel Downlink Operation in Next Generation WLANs. In GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference, pages 1–7. IEEE, 2020.
35. Alvaro López-Raventós, and Boris Bellalta. Multi-link Operation in IEEE 802.11be WLANs.arXiv:2201.07499v1.

36. B. Bellalta, "IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANS," in IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 1, pp. 38-46, February 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7422404.
37. Yang, Mao & Li, Bo. (2020). Survey and Perspective on Extremely High Throughput (EHT) WLAN — IEEE 802.11be. Mobile Networks and Applications. 25. 10.1007/s11036-020-01567-7.
38. Avdotin E, Bankov D, Khorov E, Lyakhov A (2019). Enabling massive real-time applications in ieee 802.11be networks. In:2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp 1–6
39. Avdotin E, Bankov D, Khorov E, Lyakhov A (2019) Ofdma resource allocation for real-time applications in ieee 802.11ax networks. In: 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), pp 1–3
40. Ahn J, Kim YY, Kim RY (2017) Delay oriented vr mode wlan for efficient wireless multi-user virtual reality device. In: 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp 122–123
41. Li M, Tan PH, Sun S, Chew YH (2016) Qoe-aware scheduling for video streaming in 802.11n/ac-based high user density networks. In: 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp 1–5