

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

BSc Ana Jeknić

**ANALIZA PERFORMANSI TEHNIČKIH RJEŠENJA
PREDLOŽENIH ZA SEDMU GENERACIJU WI-FI
BEŽIČNIH MREŽA**

MASTER RAD

Podgorica, 2024. godine

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

BSc Ana Jeknić

**ANALIZA PERFORMANSI TEHNIČKIH RJEŠENJA
PREDLOŽENIH ZA SEDMU GENERACIJU WI-FI
BEŽIČNIH MREŽA**

MASTER RAD

Podgorica, 2024. godine

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime: **Ana Jeknić**

Datum i mjesto rođenja: 27.06.1998, Podgorica, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija: Elektronika, telekomunikacije i računari, 2020. godina

INFORMACIJE O MASTER RADU

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Postdiplomske master akademske studije

Studijski program: Telekomunikacije

Naslov rada: **Analiza performansi tehničkih rješenja predloženih za sedmu generaciju Wi-Fi bežičnih mreža**

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave teme master rada: 03.07.2023. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 22.09.2023. godine

Mentor: **Prof. dr Enis Kočan,**
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Prof. dr Enis Kočan,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Prof. dr Zoran Veljović,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Lektor:

Datum odbrane:

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Ana Jeknić, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Analiza performansi tehničkih rješenja predloženih za sedmu generaciju Wi-Fi bežičnih mreža"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Ana Jeknić, BSc



U Podgorici, dana 17.01.2024. godine

Apstrakt

Wi-Fi mreže su ključna tehnologija za pristup Internetu u zatvorenim prostorima i igraju glavnu ulogu u digitalnoj ekonomiji. Njihova vrijednost i uticaj na savremeno društvo su se posebno istakli tokom pandemije koronavirusa, kada su Wi-Fi mreže bile sredstvo za nesmetan proces obrazovanja i poslovanja u mnogim granama ekonomije, ali pri povezivanju članova porodice i prijatelja širom svijeta. Wi-Fi alijansa i IEEE konstantno nadograđuju i unapređuju standard u cilju zadovoljenja potreba sve većeg broja korisnika i obezbjeđivanja nesmetane usluge. Od usvajanja prvog Wi-Fi standarda 1997. godine, razvoj je doveo do rada na standardizaciji sedme generacije (Wi-Fi 7) ovih mreža. Predmet istraživanja ovog rada je da se sagledaju koraci koji su doveli do razvoja sedme generacije Wi-Fi mreža i izvrši analiza performansi predloženih tehničkih rješenja.

Prvo su opisane su osnovne tehničke karakteristike prethodnih generacija, a zatim rješenja predložena za primjenu u sedmoj generaciji Wi-Fi mreža. U radu se dalje korišćenjem Matlab simulacionog alata razmatra primjenljivost 4096-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) modulacije u realnim komunikacionim scenarijima, jer je 4096-QAM modulacija predložena za primjenu u Wi-Fi 7 mrežama. Osim toga, korišćenjem ns3 simulacionog alata ispitana je i efikasnost multi-link operacija (MLO). Ovo je nova tehnika predložena standardom koja bi trebala da omogući istovremeni prenos podataka preko više linkova.

U radu su identifikovana predložena tehnička rješenja i poboljšanja koja se očekuju primjenom Wi-Fi mreža sedme generacije. Kao doprinos, pokazano je da se 4096-QAM modulacija može primijeniti u rezidencijalnom korisničkom scenariju za odgovarajući red MIMO (*multiple input multiple output*) više-antenskih sistema. Osim toga, prikazana su i poboljšanja performansi korišćenjem tehnike multi-link operacija. U tom smislu, prikazana su povećanja ukupne propusnosti i smanjenja kašnjenja u odnosu na prethodne standarde u rezidencijalnom korisničkom scenariju.

Ključne riječi: Wi-Fi 7, multi-link operacije, multi-link uređaji, 4096-QAM

Abstract

Wi-Fi networks are the key technology for indoor Internet access globally and play a crucial role in the digital economy. Their value and impact on modern society came to the fore during the coronavirus pandemic, when they provided a tool for a smooth process of education, business in many branches of the economy, and connection with friends, family members, and other people worldwide. The Wi-Fi Alliance and IEEE consistently enhance and upgrade the standard to accommodate the demands of the surging number of users and seamless connection. Since the adoption of the first Wi-Fi standard in 1997, the Wi-Fi development path has come to work on standardization of the seventh generation (Wi-Fi 7) of these networks. The objective of the thesis is to review the steps that led to the development of the seventh generation and to analyze the performance of the proposed technical solutions.

First, the previous generations' basic technical characteristics were discussed, followed by the proposed techniques expected in the seventh generation of Wi-Fi networks. Furthermore, using Matlab simulator, the thesis investigates the feasibility of the 4096-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) in real communication scenarios, because 4096-QAM is proposed for use in Wi-Fi 7 networks. Moreover, the efficiency of multi-link operation (MLO) is also examined using the ns-3 simulators. This is a new proposed technique that should enable simultaneous data transmission over multiple links.

The thesis identifies proposed technical solutions and improvements that are expected through the use of seventh generation Wi-Fi networks. As a contribution, it is shown that 4096-QAM modulation can be applied in a residential user scenario using a suitable order of MIMO (multiple input multiple output) multi-antenna systems. Furthermore, this study showcases performance enhancements using multi-link operations technique. It is demonstrated that there are increases in overall throughput and decreases in latency when compared to previous standards in a residential user scenario.

Keywords: Wi-Fi 7, multi-link operations, multi-link devices, 4096-QAM

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Razvoj Wi-Fi standarda	4
2.1. Wi-Fi 1, 2 i 3	5
2.2. Wi-Fi 4	6
2.3 Wi-Fi 5	7
2.4 Wi-Fi 6	8
3. Pregled tehničkih rješenja predloženih za Wi-Fi 7 mreže	11
3.1 Fizički komunikacioni nivo	12
3.1.1 4096-QAM	12
3.1.2 Širina kanala do 320 MHz	14
3.1.3 Multi-RU za jednog korisnika.....	15
3.1.4 Poboljšani dizajn preambule	16
3.2 MAC komunikacioni nivo	17
3.2.1 MIMO poboljšanja	18
3.2.2 HARQ u Wi-Fi mrežama	20
3.2.3 Multi-AP koordinacija	20
3.2.4 Multi-link operacije (MLO)	24
4. Analiza primjene 4096-QAM modulacije u rezidencijalnom korisničkom scenariju	31
4.1 Postavke simulacije.....	31
4.2 Rezultati simulacije.....	36
5. Analiza performansi multi-link operacija u rezidencijalnom korisničkom scenariju	41
5.1 Opšte postavke simulacije.....	42
5.2 Poboljšanja u pogledu ukupne propusnosti.....	46
5.3 Poboljšanja u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu.....	52
6. Zaključak.....	59
Literatura.....	61
Lista skraćenica.....	66

Glava 1

Uvod

Prema godišnjem Internet izvještaju kompanije Cisco za period 2018.-2023. god. [1], očekivalo se da će broj korisnika Interneta do kraja 2023. godine dostići 5.3 milijarde, što predstavlja oko 66% globalne populacije. Ova prognoza se pokazala kao tačna, uzevši u obzir da je prema Statisti - njemačkoj platformi za prikupljanje podataka, broj korisnika od 5.3 milijarde dostignut u oktobru 2023. godini [2]. Kada su u pitanju tehnologije koje se koriste za pristup Internetu, za zatvoreni prostor dominantna tehnologija su Wi-Fi mreže. Rade na nelicenciranom dijelu frekvencijskog spektra, a Wi-Fi kartice se nalaze u svakom pametnom telefonu, tabletu, lap topu i sličnim uređajima. Wi-Fi mreže se imlementiraju u kućama, zgradama, kancelarijama i poslovnim prostorima ali i na javnim površinama poput aerodroma, šoping molova i brojnih drugih prostora i predstavljaju značajan dio infrastrukture u gradskim i prigradskim sredinama. Trenutno više od polovine korisničkog saobraćaja se prenosi preko Wi-Fi mreža [3].

Wi-Fi standardi definišu pravila koja trebaju biti zadovoljena prilikom realizacije bežičnih lokalnih mreža radeći definišući rješenja na fizičkom (PHY - *physical*) i MAC (*medium access control*) nivou. Doživjeli su veliki broj poboljšanja od prvog objavljenog standarda prije više od 25 godina. Sa povećanjem broja korisnika i diverzifikacijom aplikacija i usluga, koje sada obuhvataju i brojne IoT (*Internet of Things*) aplikacije, javlja se potreba za tehničkim rješenjima koja mogu podržati različite zahtjeve koji su vrlo često dijametralni i zavisni od tipa aplikacije. Zbog toga Wi-Fi radna grupa stalno radi na novim verzijama standarda koje bi mogle da zadovolje sve korisničke zahtjeve. Od prvog usvojenog standarda 1997. godine, rad na Wi-Fi mrežama proizveo je šest glavnih generacija standardizovanih

mreža, sa mnogim sporednim standardima koji se fokusiraju na specifična tehnička rješenja i nisu tretirani kao generacije.

Sa sve većim porastom broja korisničkih uređaja koji se na Internet ili privatne mreže povezuju preko Wi-Fi-ja dolazi do velikog rasta saobraćaja koji je potrebno prenijeti, a diverzifikacija aplikacija i servisa povlači za sobom potrebu da tehnička rješenja podržavaju veoma različite servisne zahtjeve. Sve je veći broj aplikacija koje zahtijevaju visoku propusnost, pouzdanu konekciju i malo kašnjenje, što predstavlja izazov za sve tehnologije, a pogotovo tehnologije koje rade u nelicenciranom dijelu frekvencijskog spektra kao što je Wi-Fi. Ekspanzija IoT aplikacija uglavnom zahtijeva energetski što efikasnije komunikacije zbog baterijskog napajanja krajnjih uređaja dok brzine prenosa nisu od posebnog značaja. U svemu tome, potrebno je naći tehničko rješenje koje će zadovoljiti što više postavljenih zahtjeva i na optimalan način iskoristiti raspoložive resurse. Sa šestom generacijom Wi-Fi mreža pažnja je dominantno bila usmjerena na scenarije sa gusto raspoređenim uređajima, te standard nije doveo do značajnijih poboljšanja performansi u pogledu kašnjenja, brzine prenosa i skalabilnosti [4]. Zbog svega navedenog, 2019. godine je kreirana radna grupa sa ciljem modifikacije fizičkog i MAC komunikacionog nivoa IEEE 802.11 standarda kako bi se omogućio rad u najmanje jednom režimu koji podržava maksimalnu brzinu prenosa podataka od najmanje 30 Gb/s i definiše najmanje jedan način rada koji smanjuje maksimalno kašnjenje u odnosu na prethodnu generaciju standarda [5]. Kako se navodi u [5], potreba za ovim projektom ogleda se u sve većoj raznovrsnosti aplikacija koje koriste WLAN mreže za prenos podataka i koje sve više zahtijevaju velike brzine prenosa i kašnjenja manja od 5 ms. Standard je označen kao IEEE 802.11be, Wi-Fi 7 ili EHT (*extremely high throughput*). Kao i prethodni 802.11 standardi, i ovaj će definisati pravila komunikacije na fizičkom i MAC nivou.

Na fizičkom nivou među glavnim novitetima koje donosi Wi-Fi 7 su povećana maksimalna širina kanala na 320 MHz, 4096-QAM modulacija i 16x16 MIMO (*multiple input multiple output*). Na MAC nivou, po prvi put se uvodi multi-link funkcionisanje na 2 (ili 3) opsega istovremeno kao i koordinisan rad više pristupnih tačaka. Prvi put se standardom predlaže i primjena HARQ-a (*hybrid automatic repeat request*) u Wi-Fi mrežama, a kada su u pitanju noviteti na MAC nivou dodatno treba izdvojiti i šeme i algoritme koji treba da omoguće implementaciju 16x16 MIMO sistema. Cilj ovog istraživanja je sagledati kompletnu evoluciju Wi-Fi mreža kao i koraka koji su doveli do razvoja sedme generacije, dati pregled i analizu predloženih tehničkih rješenja koja se očekuju u Wi-Fi mrežama sedme generacije i poboljšanja performansi koje one donose.

Rad je organizovan na sledeći način. U drugoj glavi opisan je nastanak i razvoj Wi-Fi standarda. Date su osnovne tehničke karakteristike prvih šest generacija ovih mreža, poput korišćenih frekvencijskih opsega i širina kanala, modulacionih i koding šema, tehnika pristupa medijumu, ali i drugih implementiranih funkcija. Treća glava je posvećena pregledu tehničkih rješenja koja su predložena za Wi-Fi mreže sedme generacije, i to kroz nova rješenja na fizičkom i MAC komunikacionom nivou. Što se tiče fizičkog komunikacionog nivoa, predstavljena je 4096-QAM modulacija, implementacija kanala širine do 320 MHz, poboljšani dizajn preambule, ali i motiv i princip dodjele više resursnih jedinica (RU - *resource unit*) jednom korisniku. Na MAC komunikacionom nivou su opisana MIMO poboljšanja neophodna radi podrške 16x16 MIMO sistemima, kao i implementacija HARQ-a u Wi-Fi mrežama. Predstavljene su predložene tehnike koordinisanog rada više pristupnih tačaka – multi-AP (*access point*) koordinacije i dat je pregled multi-link funkcionisanja sa izmjenama u arhitekturi koje je bilo potrebno napraviti radi podrške ove funkcionalnosti. U četvrtoj glavi data je analiza primjene 4096-QAM modulacije u rezidencijalnom korisničkom scenariju. U tom pogledu je pomoću Matlab simulacionog alata ispitano kako *beamforming* tehnika utiče na primjenu ovog reda modulacije. Dalje su u glavi 5 predstavljena poboljšanja u pogledu povećanja ukupne propusnosti u mreži i smanjenja srednjeg kašnjenja po paketu pri korišćenju multi-link operacija, na osnovu dobijenih ns-3 simulacionih rezultata. Dato je poređenje sa modelom single-link funkcionisanja, koji je bio primjenjivan u prethodnim generacijama ovog standarda. Poslednja glava sumira ostvarene rezultate i daje zaključna razmatranja, kao i potencijalne naredne korake u razvoju Wi-Fi mreža.

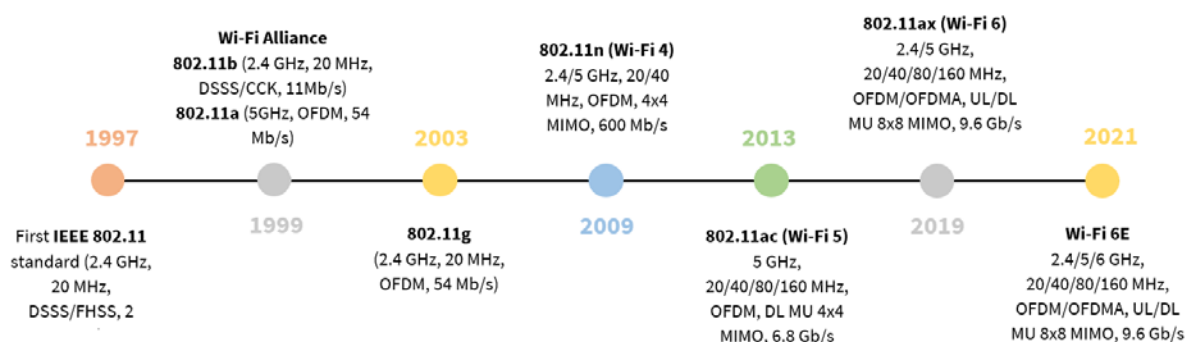
Glava 2

Razvoj Wi-Fi standarda

Začeci u razvoju tehnologije koja će kasnije biti označena kao Wi-Fi datiraju sa početka 90-ih godina 20. vijeka, kada je američka kompanija NCR (*National Cash Register*) zajedno sa AT&T (*American Telephone and Telegraph Company*) u ogranku kompanije u Holandiji razvila WaveLAN bežičnu tehnologiju namijenjenu za korišćenje u sistemima sa kasama. U tom periodu je i u istraživačkom centru CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) u Australiji patentirano prototipsko testno okruženje za razvoj i testiranje bežičnih lokalnih mreža. Kako se pokazalo da razvijane tehnologije imaju veliki potencijal, istraživač NCR kompanije - Vik Hajs zajedno sa istraživačima iz AT&T Bell Labs je pristupio IEEE organizaciji sa zahtjevom za definisanje standarda za razvijanu tehnologiju. IEEE organizacija je već imala standardni komitet sa oznakom 802, koji se bavio standardizovanjem mrežnih protokola i bežičnih standarda, a za predloženu tehnologiju kreirana je 802.11 radna grupa.

Prvi zvanični IEEE 802.11 standard objavljen je 1997. godine i iako je imao veliki potencijal, nedostajala mu je interoperabilnost sa mnogim komercijalnim uređajima, pošto je standard razvijan samo pod nadzorom IEEE organizacije. Zbog toga je 1999. godine nekoliko kompanija formiralo nezavisnu organizaciju - Wi-Fi alijansu, koja je kao osnovni zadatak imala stvaranje uslova za proboj ovih mreža na tržište. Iste godine IEEE je kreirao glavnu verziju IEEE 802.11b standarda, a Wi-Fi alijansa ga je brendirala kao Wi-Fi i pomogla da se premosti jaz između razvijenog standarda i komercijalnih rješenja. Zajednički rad na projektu se pokazao kao vrlo uspješan i Wi-Fi je počeo da privlači pažnju velikih kompanija u oblasti računarskih tehnologija i komunikacija, poput Cisca, Motorole, Apple-a itd. Polako ali sigurno se probijao na tržište, a prva značajna komercijalna upotreba Wi-Fi-ja počela je sa usvajanjem Wi-Fi

mrežnog povezivanja na Apple e-Book seriji laptopova. 1999. godine objavljen je i standard 802.11a, dok je standard označen kao 802.11g usvojen 2003. godine. Ova tri standarda (b, a i g) su kasnije dobili status prve tri generacije Wi-Fi tehnologija respektivno. Nakon toga su uslijedili standardi 802.11n (Wi-Fi 4), 802.11ac (Wi-Fi 5) i 802.11ax (Wi-Fi 6), a na proljeće 2024. godine se očekuje da će i standard sa oznakom 802.11be (Wi-Fi 7) biti usvojen. Na slici 2.1 se može vidjeti vremenska linija razvoja najznačajnijih Wi-Fi standarda koji će biti opisani u nastavku.



Slika 2.1. Vremenska linija razvoja najznačajnijih Wi-Fi standarda

2.1. Wi-Fi 1, 2 i 3

802.11b je nastavio sa radom na 2.4 GHz opsegu prateći primjer 802.11 standarda, ali je uveo neke nove tehnologije kao i nižu cijenu realizacije, pošto je prvi standard bio prilično skup za masovno usvajanje i trebalo ga je poboljšati. 802.11b je dodao opciju korišćenja CCK (*complementary code keying*) modulacije, pored DSSS (*direct sequence spread spectrum*) modulacije, koja je korišćena u prvom 802.11 standardu. Maksimalna brzina prenosa podataka je porasla sa 2 Mb/s (802.11) na 11 Mb/s, ali još dok je trajao rad na standardu bilo je jasno da to neće moći zadovoljiti predstojeće korisničke zahtjeve.

Uporedo je trajao rad i na 802.11a standardu koji je funkcionisao na 5 GHz opsegu. I ovaj standard je uveo neke novitete, od kojih je najznačajniji upotreba ortogonalnog frekvencijskog multipleksiranja (OFDM - *orthogonal frequency division multiplexing*) kao modulacione tehnike. Maksimalna brzina prenosa podataka je dostigla 54 Mb/s, ali je domet bio nešto manji, a sam standard nije bio kompatibilan sa 802.11b verzijom koja je već ušla u masovnu proizvodnju. Zbog navedenog, ali i skuplje cijene hardvera u odnosu na 802.11b,

standard 802.11a nije doživio masovnu upotrebu, ali su brojna tehnička rješenja koja su tu uvedena zadržana u narednim generacijama standarda u modifikovanoj formi.

802.11g je objedinio karakteristike koje su se najbolje pokazale u prethodna dva standarda - modulacija je bila bazirana na OFDM-u, korišćen je opseg 2.4 GHz, bila je zadovoljena kompatibilnost sa 802.11b, ali je moguće bilo i *dual-band* povezivanje zbog podrške 802.11a uređaja. Novi standard je postizao maksimalnu brzinu prenosa podataka kao i standard 802.11a - 54 Mb/s, ali novi problem koji je postajao sve učestaliji je interferencija sa drugim tehnologijama i uređajima, poput Bluetooth-a, mikrotalasnih rerni, *baby*-monitora... Privremeno rješenje je bilo smanjivanje broja dostupnih kanala, ali brzo rastući broj korisnika je ovo rješenje otpisao u startu.

2.2. Wi-Fi 4

2009. godine je objavljen 802.11n standard, iako je njegova primjena uveliko počela još i prije zvaničnog objavljivanja. Standard je kasnije označen kao Wi-Fi 4 i sa njim je počela prava ekspanzija Wi-Fi mreža. Za razliku od svojih prethodnika, koji su omogućavali komunikaciju samo na jednom opsegu, Wi-Fi 4 je omogućio rad na oba do tada korišćena opsega - 2.4 i 5 GHz. Ipak, istovremena komunikacija na oba opsega će tek biti moguća od sedme generacije Wi-Fi mreža, što će biti opisano kasnije u radu. Što se tiče četvrte generacije Wi-Fi mreža, maksimalna moguća brzina je dostigla 600 Mb/s, a to je posledica duplo šireg kanala u odnosu na prethodne generacije, smanjivanja zaštitnog intervala između frejmova (sa 800ns na 400ns), ali i uvođenja MIMO (*multiple input multiple output*) sistema. Sa MIMO sistemima su mogla da se prenesu do 4 prostorna toka i time da se poboljša ukupna propusnost mreže, ali osim toga MIMO je umanjio efekte prostiranja talasa po višestrukim putanjama (*multipath* feding). Dva susjedna kanala od po 20 MHz su mogla biti združena i na taj način kreiran kanal od 40 MHz, a osim toga bilo je moguće i korišćenje zaštitnog intervala između kanala, pa se maksimalna propusnost uvećala nešto više od 2 puta. Iako je zadržano da je maksimalna modulacija koja se može primijeniti na jednom OFDM podnosiocu 64-QAM, kodni odnos (koji označava odnos korisnih bita i ukupnog broja bita koji se prenose među kojima su i biti potrebni za korekciju greške) je povećan na 5/6, a osim toga definisane su i moguće MCS (*modulation coding scheme*) šeme. Zaštitni vremenski interval između frejmova je smanjen, kao što je to gore već navedeno, zbog toga što se pokazalo da je to sasvim dovoljan

zaštitni vremenski interval za primjenu u manjim prostorima, kućama, kancelarijama i sl., što je tada bio najzastupljeniji korisnički scenario.

Na MAC nivou uvedene su dvije važne metode agregacije - agregirana jedinica MAC servisnih podataka (A-MSDU - *aggregate MAC service data unit*) i agregirana jedinica podataka na MAC nivou (A-MPDU - *aggregate MAC protocol data unit*). Ovo je značajno smanjilo veličinu zaglavlja, kao i prostor između frejmova, ali i poboljšalo pouzdanost [3].

2.3 Wi-Fi 5

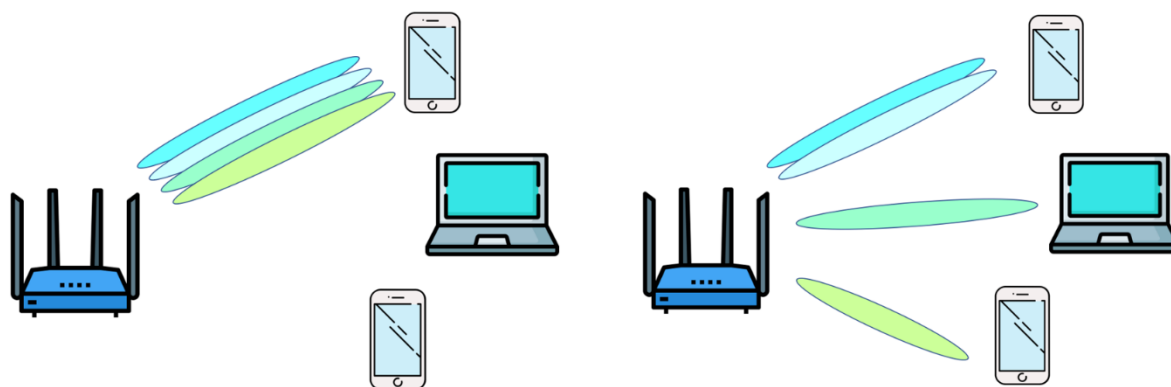
Wi-Fi 4 standard je WLAN mrežama donio do tada najveći porast broja korisnika, ali je to sa druge strane kao posledicu imalo i širi spektar aplikacije, zahtjev za većom brzinom prenosa podataka po korisniku, manjim kašnjenjem, boljom pouzdanošću itd. Već u završnim fazama razvoja Wi-Fi 4 standarda postalo je jasno da on neće moći da isprati sve te rastuće korisničke zahtjeve, pa je 2007. godine kreirana VHT (*very high throughput*) radna grupa koja se sastojala od dvije podgrupe, koje su tokom svog rada kreirale standarde 802.11ac i 802.11ad. Obje grupe imale su cilj da omoguće gigabitne brzine prenosa podataka, ali je radna frekvencija bila različita - za *ad* to je bilo 60 GHz sa kanalima širine 4 GHz, dok je za *ac* standard radni opseg frekvencija trebao da bude ispod 6 GHz, kao u prethodnim standardima. Iako je *ad* standardom uvedeno dosta noviteta, on nikada nije ostvario masovnu primjenu, a zbog prirode prostiranja elektromagnetnih talasa na tako visokim frekvencijama i jako malog dometa bio je primjenljiv samo u peer-to-peer komunikacijama. *Ac* standard je sa druge strane postigao mnogo veći uspjeh kada je u pitanju primjena, a kasnije je označen i kao peta generacija Wi-Fi mreža.

Wi-Fi 5 je bio evolucijski naslednik Wi-Fi 4 standarda, ali je otišao korak dalje i to u pogledu:

- maksimalne širine kanala (obavezna implementacija kanala širine 80 MHz, opciono 160 MHz),
- maksimalnog reda modulacije (sa 64- na 256-QAM),
- MIMO sistema (omogućena podrška za maksimalno 8 prostornih tokova (strimova) u poređenju sa maksimalno 4 prostorna strima u prethodnoj generaciji).

Iz MCS šema su uklonjeni neki rijetko korišćeni modulacioni postupci, a povećanje reda modulacije na 256-QAM značilo je i korišćenje 8 umjesto do tada korišćenih 6 bita po jednom

OFDM podnosiocu, što je rezultiralo povećanjem kapaciteta od 30%. Cijena koja je plaćena bili su strožiji zahtjevi u pogledu magnitude vektora greške (EVM - *error vector magnitude*), te su uvedeni kodovi male gustine za provjeru pariteta (LDPC - *low density parity-check*) i minimizacija grešaka na analognom ulaznom dijelu, kako bi se makar malo kompenzovali strogi EVM zahtjevi. Iako je primjena dobro poznate *beamforming* tehnike fokusiranja elektromagnetnog zračenja počela još sa četvrtom generacijom Wi-Fi mreža, tehnika je standardno usvojena tek u petoj generaciji i tada je značajnije zaživjela. To je za Wi-Fi mreže bilo od velikog značaja, jer *beamforming* utiče na poboljšanje odnosa signal/šum (SNR - *signal to noise ratio*). To je omogućilo i implementaciju višekorisničkih MIMO sistema (MU-MIMO - *multi user MIMO*). Time je omogućeno da se u toku jednog prenosa opsluži više korisnika i da se koristi prostorno multipleksiranje, povećan je ukupni kapacitet mreže, smanjen broj kolizija i poboljšani EVM parametri. Na slici 2.2 prikazana je razlika između SU- (*single user*) i MU-MIMO prostornog multipleksiranja u scenariju sa 4 prostorna strima.



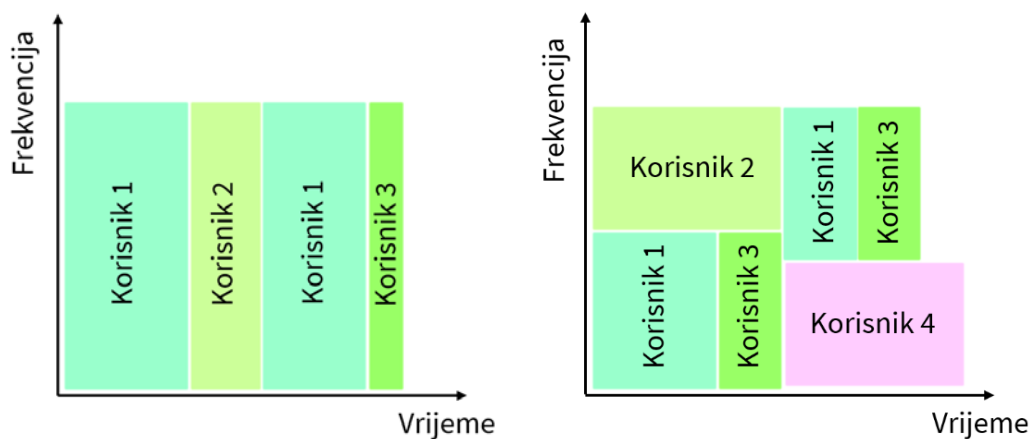
Slika 2.2. Razlika između SU-MIMO i MU-MIMO prenosa

2.4 Wi-Fi 6

Scenariji primjene poput komunikacija mašinskog tipa, IoT komunikacija, ali i sve gušće raspoređene mreže nisu mogle biti opslužene petom generacijom Wi-Fi mreža, a još jedan nedostatak je bilo i funkcionisanje samo na 5 GHz opsegu. U cilju implementacije Wi-Fi mreža u scenarijima gusto raspoređenih mreža i korisnika, IEEE i Wi-Fi alijansa kreirali su novi standard - 802.11ax, poznatiji pod nazivom Wi-Fi 6. Maksimalni red modulacije povećan je na 1024-QAM, broj antena i na prijemnoj i na predajnoj strani sada je mogao ići do 8, a MU-MIMO je realizovan i na *uplink-u* i na *downlink-u*, za razliku od prethodne generacije koja je

imala samo *downlink* realizaciju. Uključeni su neki novi bezbjednosni protokoli, a u cilju smanjenja potrošnje energije uvedena je i opcija ciljnog vremena buđenja uređaja (TWT - *target wake time*). Ova funkcija je od posebne koristi za uređaje sa baterijskim napajanjem, poput brojnih IoT uređaja, jer im omogućava da budu u sleep komunikacionom režimu kada nema prenosa podataka. Ipak, dva najznačajnija uvedena noviteta bili su uvođenje OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*) tehnike višestrukog pristupa i tehnike BSS (*basic service set*) boje.

Korišćenje OFDM modulacije u Wi-Fi mrežama je uvedeno sa 802.11a standardom još 1999. godine. Kada se koristi OFDM, svi podnosioci jednog OFDM frejma se dodjeljuju jednom korisniku. Wi-Fi 6 uvodi korišćenje OFDMA, što podrazumijeva da su podnosioci grupisani u resursne jedinice (RU - *resource unit*) različitih veličina. Definisane su RU veličina od 26, 52, 106, 242, 484 ili 996 podnosilaca (poređenja radi, RU od 242 podnosioca odgovara spektru širine 20 MHz), a dozvoljene su i neke kombinacije poput RU od 2x996 podnosilaca u cilju kreiranja kanala širine 160 MHz. Ovo omogućava svakom korisniku da uzme onu raspoloživu veličinu RU koja najbolje odgovara njegovim zahtjevima, bez potrebe za zauzimanjem drugih RU iz istog kanala. Ovakav pristup je omogućio mnogo efikasnije iskorišćenje resursa i omogućio znatno većem broju korisnika da koristi istu Wi-Fi mrežu. Razlika između OFDM i OFDMA prikazana je na slici 2.3.



Slika 2.3. Grafik lijevo predstavlja OFDM dodjelu resursa, grafik desno OFDMA princip dodjele resursa

Iako se OFDMA pokazao kao efikasno rješenje za opsluživanje velikog broja korisnika sa visokim zahtjevima u pogledu brzine prenosa, povećan broj uređaja i mreža doveo je do drugog problema - preklapanja BSS-ova. BSS se definiše kao mreža sa jednom pristupnom

tačkom i više klijentskih stanica, a OBSS (*overlapping basic service set*) se javlja kada dvije ili više pristupnih tačaka koriste iste kanale za komunikaciju sa svojim klijentima tako da im se polje zračenja preklapa. To dovodi do značajnog smanjenja kvaliteta signala izazvanog interferencijom tih BSS-ova, a da bi se prevazišao ovaj problem uvedena je tehnika BSS boje. Uređaji u jednom BSS-u su “obojani” jedinstvenim numeričkim identifikatorom koji se sastoji od 6 bita i koji pristupna tačka distribuira korisničkim stanicama u fazi povezivanja. Prilikom prenosa podataka, BSS boja je sadržana u zaglavlju prenošenih paketa sa podacima. MAC kontrola pristupa medijumu se zasniva na CCA (*clear channel assessment*) indikacijama koje se koriste za određivanje zauzetosti kanala, a samo “oslušivanje” zauzetosti kanala odnosno generisanje CCA indikacija se vrši na svakih 20 MHz spektra. Uvođenjem BSS boje, sada se umjesto jednog praga za određivanje zauzetosti kanala, koriste dva praga detektovane snage signala. Ako se detektuje signal sa snagom ispod -82 dBm, kanal se smatra slobodnim. Ukoliko se detektuje prenos sa snagom iznad -82 dBm, vrši se i provjera BSS boje. Ukoliko je BSS boja detektovanog signala odnosno prenosa ista (intra-BSS prenos), sama procedura pristupanja kanalu ostaje ista kao i u prethodnim standardima i tu nema neke izmjene. Sa druge strane, ako je BSS boja detektovanog signala različita (radi se o inter-BSS prenosu) - uređaji pripadaju različitim BSS-ovima, prag zauzetosti kanala je na -62 dBm. Ako je detektovana snaga signala manja od ove vrijednosti, kanal se smatra slobodnim, odnosno zauzetim ako je detektovana snaga iznad tog praga. Iako ne djeluje kao velika promjena, BSS boja omogućava više istovremenih prenosa u scenarijima sa gusto raspoređenim uređajima, smanjuje među-kanalnu interferenciju i omogućava efikasniju ponovnu prostornu upotrebu (*spatial reuse*).

Međutim, kako su frekvencijski resursi i kanali definisani Wi-Fi standardima prilično ograničeni i ni jedna od navedenih tehnika ne može proširiti, već samo efikasnije koristiti dostupne frekvencijske resurse, 2020. godine je FCC (*Federal Communications Commission*) za Ameriku otvorio upotrebu nelicenciranog opsega na 6 GHz i to donji (5945 - 6425 MHz) i gornji (6425 - 7125 MHz) dio opsega. Time je obezbijeđen veći kapacitet, što za posledicu ima i manji nivo smetnji. U Evropi, na Bliskom Istoku i u Africi za sada je otvoren samo donji 6 GHz podopseg, dok se dozvola komunikacija na gornjem dijelu opsega još uvijek razmatra [6]. Ovaj opseg, kao i neka poboljšanja uvršteni su u ekstenziju šeste generacije označenu kao Wi-Fi 6E.

Glava 3

Pregled tehničkih rješenja predloženih za Wi-Fi 7 mreže

Sedma generacija Wi-Fi mreža donosi brojne tehnološke novitete koji treba da omoguće značajno veću brzinu prenosa podataka, manje kašnjenje, veću spektralnu efikasnost, ali i poboljšano sveukupno korisničko iskustvo. Među glavnim tehničkim inovacijama izdvajaju se povećanje maksimalne širine kanala do 320 MHz, maksimalnog reda modulacije do 4096-QAM, primjena 16x16 MIMO, HARQ-a, itd. Kao jedan od najvećih noviteta izdvaja se multi-link funkcionisanje (MLO - *multi-link operations*). Prethodne generacije Wi-Fi standarda imale su mogućnost komunikacije između Wi-Fi pristupne tačke i korisničkog uređaja samo na jednom frekvencijskom opsegu - 2.4 GHz, 5 GHz ili kod 6E nadogradnje Wi-Fi 6 standarda 6 GHz. To za posledicu ima da uređaj koji ima mogućnost komuniciranja na 2 ili 3 frekvencijska opsega u jednom trenutku funkcionise samo na jednom, čime preostali raspoloživi frekvencijski resursi za taj uređaj ostaju neiskorišteni. U okviru 802.11be standarda prvi put su definisani multi-link uređaji koji imaju mogućnost komunikacije na 2 ili tri opsega istovremeno, čime se postiže mnogo bolje iskorišćenje resursa i brzina prenosa značajno uvećava, a smanjuje se kašnjenje. Još jedan od noviteta koji se prvi put pojavljuju u standardu je i koordinacija između više pristupnih tačaka odnosno multi-AP koordinacija (AP - *access point*). Ona ima za cilj da poboljša efikasnost, ukupnu propusnost mreža, ali i sveukupno funkcionisanje cijelog Wi-Fi ekosistema.

Po uzoru na prethodne IEEE 802.11 standarde i ovaj definiše pravila funkcionisanja na fizičkom i MAC komunikacionom nivou. U skladu sa tim će u nastavku ovog poglavlja biti dat

pregled novih tehničkih rješenja predloženih za sedmu generaciju Wi-Fi mreža sa ciljem da se prikažu poboljšanja performansi koje ti noviteti donose.

3.1 Fizički komunikacioni nivo

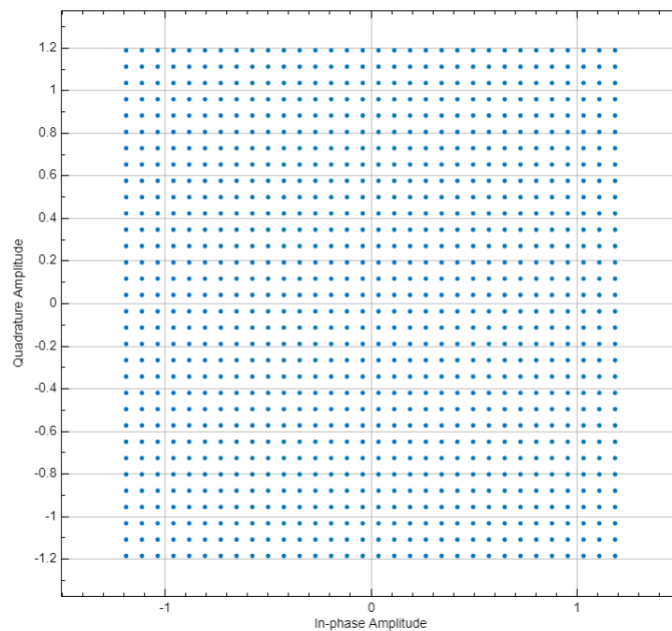
Kada je u pitanju fizički komunikacioni nivo, nova tehnička rješenja koja su predložena uključuju kanale maksimalne širine do 320 MHz, 4096-QAM modulaciju, mogućnost dodjeljivanja više resursnih jedinica jednom korisniku, kao i poboljšani dizajn preambule. Broj prostornih strimova kod MIMO sistema se sa 8 povećao na 16, ali kako je realizacija toga povukla više izmjena na MAC komunikacionom nivou, ovo unapređenje će biti prikazano u dijelu koji tretira MAC izmjene.

3.1.1 4096-QAM

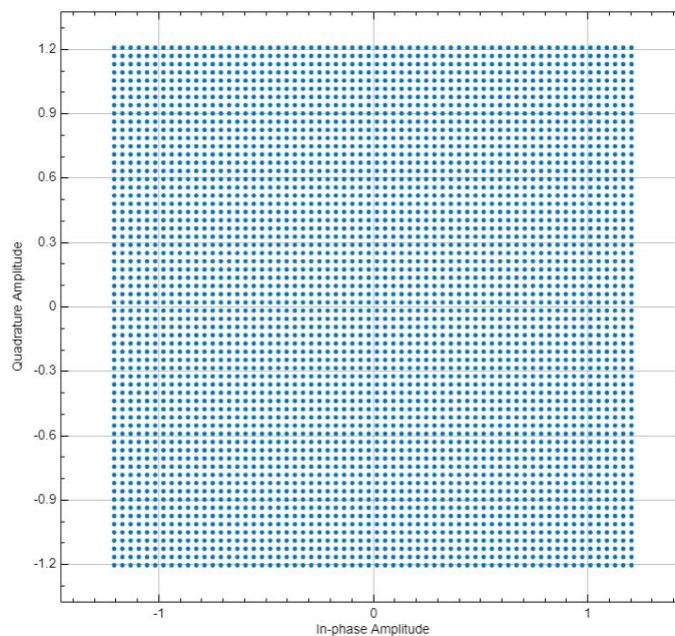
Povećanje maksimalnog reda modulacije sa 1024-QAM na 4096-QAM znači i korišćenje 12 bita po simbolu umjesto 10 bita za 1024-QAM, i teoretski povećava brzinu prenosa za 20%. To je manje poboljšanje u odnosu na 33% koliko je postignuto povećanjem reda modulacije sa 256-QAM na 1024-QAM u šestoj generaciji Wi-Fi standarda. Osim toga, sa stanovišta ispravnosti prijema, povećanje reda modulacije za posledicu ima i značajno strožije EVM zahtjeve [7], što se da zaključiti i sa 1024- i 4096-QAM konstalacionih dijagrama prikazanih na slikama 3.1 i 3.2. Kako je cijena koja se plaća za relativno malo poboljšanje velika, u prvim fazama razvoja standarda razmatralo se da li ovaj red modulacije uopšte može biti primijenjena u praksi. Ipak, smatra se da će beamforming da bude jedna od ključnih tehnologija koje će omogućiti primjenljivost 4096-QAM modulacije, jer može da poveća odnos signal/šum (SNR) na strani prijema za zahtijevanu vjerovatnoću greške po bitu ili paketu, te se 4096-QAM našla u predlogu standarda, ali je njena primjena ostavljena kao opciona.

U [8] se na primjeru pokazuje da je za ispravan prijem signala bez primjene *beamforming*-a potreban SNR od 45 dB, za šta se navodi da ne može biti ostvareno u realnim scenarijima. Autori dalje pokazuju da se SNR za ispravan prijem 4096-QAM modulisanog signala može spustiti na 30 dB, kada se koristi beamforming sa 4 predajne antene na kanalu sa ravnim fadingom. Ovaj SNR se u realnim scenarijima može postići, što povlači zaključak da je 4096-QAM modulacija realno ostvariva [8], ali će ova tema i u narednom periodu biti otvorena kako bi primjena ovog reda modulacije zaživjela.

U Glavi 4 biće ispitana primjenljivost 4096-QAM modulacije u rezidencijalnom korisničkom scenariju i data analiza kako na primjenu ovog reda modulacije utiče *beamforming* tehnika sa različitim redovima MIMO sistema.



Slika 3.1. Konstalacioni dijagram 1024-QAM modulacije



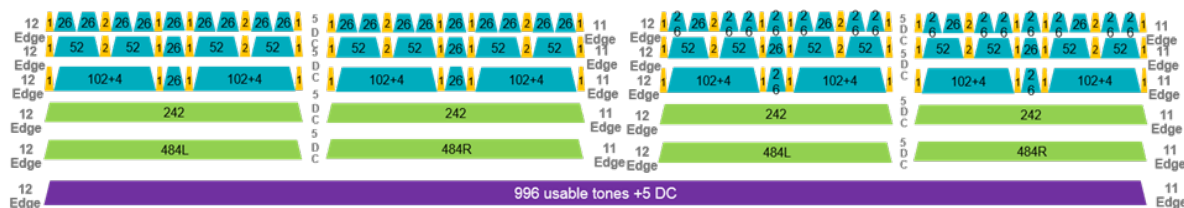
Slika 3.2. Konstalacioni dijagram 4096-QAM modulacije

3.1.2 Širina kanala do 320 MHz

Uvođenjem novog nelicenciranog opsega na 6 GHz za Wi-Fi sisteme data je mogućnost korišćenja čak ~ 1.2 GHz dodatnog spektra, što donosi brojne benefite - kako u pogledu scenarija sa gusto raspoređenim korisničkim uređajima, tako i u pogledu smanjenja interferencije sa drugim mrežama [9]. Osim toga, otvaranje ovog opsega je dozvolilo istraživačima da razmotre uvođenje duplo šireg kanala u odnosu na prethodne generacije, pa se uvođenje kanala širine do 320 MHz našlo u sklopu predloga novog standarda. Funkcionisanje na kanalu širine 320 MHz bi teoretski duplo povećalo maksimalnu nominalnu propusnost [3], što bi bilo od posebnog značaja za vremenski osjetljive mreže (TSN - *time sensitive network*) i real-time aplikacije. Poboljšanje propusnosti prikazano je i u [10], gdje se pokazuje da za 4x2 MIMO sistem i MCS 9 (256-QAM) korišćenjem kanala od 160 MHz ostvaruje propusnost od 1.9 Gb/s, dok se korišćenjem kanala od 320 MHz ostvaruje propusnost od 3.8 Gb/s, što je 100% poboljšanja. Isti procenat poboljšanja postignut je i za MCS 11 (1024-QAM) gdje je brzina prenosa korišćenjem kanala od 160 MHz iznosila 2.4 Gb/s, dok je brzina prenosa korišćenjem kanala od 320 MHz iznosila 4.8 Gb/s.

U okvirnim specifikacijama standarda [11] stoji da je upotreba kanala od 320 MHz opciona, odnosno da ne moraju svi uređaji podržavati opciju korišćenja kanala širine 320 MHz, kao i da je moguća opcija združivanja dva susjedna kanala od 160 MHz u cilju kreiranja 320 MHz kanala. U [11] se dalje navodi i da je moguće koristiti i spektar širine 240 MHz koji bi se dobio združivanjem dva nesusedna 160+80 MHz kanala ili uzimanjem 240 MHz od kanala 320/160+160 MHz, jer kanal širine 240 MHz nije standardno definisan.

U šestoj generaciji Wi-Fi standarda definisane su RUs i u skladu sa tim je napravljen tonski plan za OFDMA podnosiocima na opsegu od 80 MHz koji je prikazan na slici 5 [10]. Definisane su RU veličine od 26, 52, 106, 242, 484 i 996 podnosilaca, pri čemu RU veličine 242 podnosioca odgovara opsegu od 20 MHz. Tonski plan za 320 MHz OFDMA predstavlja duplicirani 160 MHz OFDMA plan (koji je definisan kao duplicirani 80 MHz OFDMA plan i prikazan je na slici 3.3). Iako je ovo bila najjednostavnija opcija, kako se navodi u [12] to nije i najefikasnija opcija, jer bi se dizajniranjem novog 160 MHz ili 320 MHz tonskog plana mogla dobiti veća propusnost, ali bi nedostak ovih planova bila primjena samo za kontinualni spektar i ne bi se mogli koristiti za neke nekontinualne slučajeve.



Slika 3.3. Tonski plan za 80 MHz OFDMA

U pogledu 320 MHz kanala u [12] se predlažu i 2 pristupa za omogućavanje 16 prostornih strimova i to prvi pristup koji bi podrazumijevao korišćenje maksimalno do 8 SS (*spatial streams*), odnosno 8 antena na jednoj strani za 160 MHz spektra na svakom od opsega. Drugi predloženi pristup je 16 SS za 320 MHz na 6 GHz opsegu i korišćenje *multi-band* agregacije u cilju dobijanja šireg spektra i primjene više SS.

3.1.3 Multi-RU za jednog korisnika

Kao što je već navedeno, OFDMA koji je uveden u šestoj generaciji Wi-Fi mreža podrazumijeva grupisanje podnosilaca u resursne jedinice (RUs), a AP može dodijeliti samo jednu RU jednom korisniku. Iako se uvođenjem RU jedinica spektralna efikasnost povećala, mogućnost dodjele više RU jedinica jednom korisniku bi dodatno poboljšalo iskorišćenje spektralnih resursa. Ovo bi bilo od posebnog značaja za scenarije sa malim brojem korisnika. Pa tako na primjer, ukoliko imamo 2 korisnika koji dijele kanal od 80 MHz, gdje je jednom korisniku dodijeljena RU od 242 podnosioca (20 MHz), drugi korisnik može dobiti samo RU od 484 podnosioca (40 MHz), čime 25% tog kanala ostaje neiskorišteno [3]. Osim navedenog primjera sa malim brojem korisnika, dodjeljivanje više RU jednom korisniku omogućava i bolju podršku aplikacijama koje zahtijevaju velike brzine prenosa podataka, kao i aplikacijama koje zahtijevaju prenos podataka u realnom vremenu.

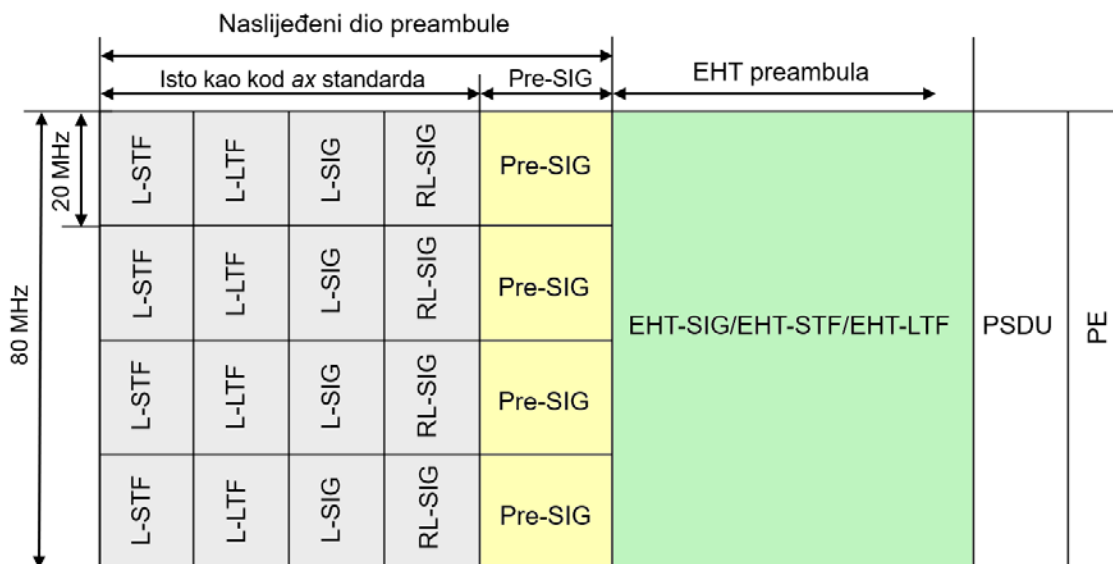
Wi-Fi 7 pravi podjelu na male i velike RU jedinice, pri čemu u velike spadaju sve RU jedinice koje sadrže 242 ili više podnosilaca, a sve ostale u male. Standardom je takođe definisano da su dozvoljene samo međusobne kombinacije malih ili međusobne kombinacije velikih RU jedinica, pošto su istraživači došli do zaključka da kombinovanje malih i velikih RU ne bi unijelo značajno poboljšanje u korišćenju spektra, a zahtijevalo bi nešto složeniju realizaciju [11].

Kako se za svaku RU definišu jedinstveni parametri, poput MCS šeme i broja prostornih strimova, u [13] je predloženo da samo prva dodijeljena RU sadrži opis svih

parametara, dok je za ostale RU opis parametara referenca na prvu RU. U cilju jednostavnije realizacije rasporeda i dodjele RU, takođe je predloženo da broj RU kombinacija bude ograničen i prethodno definisan [14].

3.1.4 Poboljšani dizajn preambule

Biti preambule omogućavaju funkcije poput ispravne sinhronizacije, automatske kontrole pojačanja (AGC - *automatic gain control*), korekcije u vremenskom/frekvencijskom domenu, procjenu kanala, auto-detekciju, signalizaciju... Svaka generacija standarda ima specifičan dizajn preambule napravljen u skladu sa karakteristikama koje treba omogućiti. Prilikom dizajna, od posebne važnosti je omogućiti kompatibilnost sa prethodnim verzijama i zadržati one funkcije koje su se pokazale kao dobre. Dodatno, svakoj generaciji su potrebni neki dodatni biti za nove funkcije (kao npr. multi-link funkcionisanje i multi-AP koordinaciju). Međutim, povećanjem broja bita se ne ostvaruje zahtjev da preambula bude što manja kako bi i sam prenos bio brži i efikasniji, te je u svemu tome potrebno naći kompromis. Slika 3.4 prikazuje predloženi dizajn preambule [15].



Slika 3.4. Predloženi dizajn preambule za primjer kanala od 80 MHz

Odlučeno je da struktura Pre-EHT preambule bude ista kao kod šeste generacije Wi-Fi-ja. Ovaj dizajn uključuje L-STF (*legacy short training field* - naslijeđena kratka trening sekvenca) i L-LTF (*legacy long training field* - naslijeđena duga trening sekvenca) koji se

koriste za detekciju početka paketa, grubu korekciju frekvencije kao i za AGC podešavanja. Nakon toga idu L-SIG (*legacy signal field* - naslijeđeno signalno polje) i RL-SIG (*repeated legacy signal field* - naslijeđeno ponovljeno signalno polje) koji sadrže modulacionu brzinu i dužinu paketa, kao i dodatne rezervisane bite i bite parnosti. Ovo je neohodno kako bi se odredilo koliko simbola se dekodira i na koji način. Pre-SIG (u literaturi negdje označeno i kao U-SIG, odnosno univerzalni dio) sadrži neke zavisne i nezavisne informacije vezane za Wi-Fi verziju, BSS boju kao i TXOP (*transmission opportunity* - mogućnost prenosa). U [16] je predloženo da ovo polje od sedme generacije Wi-Fi-ja ima fiksnu strukturu i da bude sastavljeno od 2 simbola, što je sasvim dovoljno, čak i za proširenu BSS boju. Ukoliko bi kasnije postojala potreba za dodatnim bitima, oni bi svakako mogli da se prenose u sledeće polje - EHT-SIG. U [16] se takođe predlaže, u cilju što efikasnijeg dizajna preambule, da se već razvijene funkcije poput auto-detekcije razvijene u šestoj generaciji zadrže i iskoriste umjesto da se razvijaju nove.

Kada je u pitanju EHT dio preambule, potrebno je razdvojiti *single-user* i *multi-user* PPDU (*physical protocol data unit*) realizacije. Za SU realizaciju, struktura EHT-SIG polja ne zahtijeva značajnije izmjene u odnosu na SIG polja prethodne generacije za SU primjene. Kada je u pitanju MU PPDU realizacija, u [17] su predložene dvije opcije prema kojima bi EHT-SIG polje sadržalo dva zajednička dijela označena kao A i B i dio koji se specificira posebno za svakog korisnika. Kako je predloženo da se EHT dio preambule ne duplicira za svakih 20 MHz, što je korišćeno u prethodnim generacijama, prva predložena opcija bi podrazumijevala dupliciranje zajedničkog dijela A, dok to ne bi bio slučaj za zajednički dio B i polja specificirana za svakog korisnika, dok druga opcija nema dupliciranje ni za zajednički dio A. Sa druge strane, kada je u pitanju EHT-LTF polje, mogu se koristiti postojeće sekvence za kontinuiranu procjenu kanala za sve širine kanala, obezbjeđujući usklađenost sa PAPR (*peak to average power ratio*) zahtjevima [18]. Nakon preambule slijedi PSDU (*physical layer service data unit*) koji sadrži podatke korisnika u formatu koji odgovara fizičkom nivou i PE (*packet extension field*).

3.2 MAC komunikacioni nivo

Kao što je to već navedeno, glavna poboljšanja na MAC komunikacionom nivou se tiču poboljšanja koja je bilo neophodno napraviti radi podrške 16x16 MIMO sistema, zatim

implementacija HARQ mehanizma u Wi-Fi mrežama kao i uvođenje dvije potpuno nove funkcije – zajednički rad više pristupnih tačaka odnosno multi-AP koordinacija i funkcionisanje na više opsega istovremeno odnosno multi-link operacije (MLO). Kada je u pitanju multi-AP koordinacija, u nastavku će biti dat pregled osnovne terminologije kao i predloženih modova funkcionisanja, dok će za MLO biti opisane izmjene u arhitekturi koje je bilo potrebno napraviti kako bi se podržao ovakav vid prenosa, opis pristupa kanalu i tipovi prenosa.

3.2.1 MIMO poboljšanja

Povećanjem broja prostornih tokova (SS) sa 8 na 16, kapacitet mreže će se teoretski udvostručiti. Ipak, sa druge strane, kako bi primjena MIMO sistema bila uspješna, potrebno je prikupljati informacije o stanju kanala (CSI - *channel state information*). CSI parametri su neophodni za pravilno podešavanje i usmjeravanje radio talasa, formiranje snopova, ali i za neke druge funkcije poput prekodiranja za višekorisničke (MU - *multi user*) primjene. *Sounding* algoritmi za prikupljanje CSI parametara, koji su korišćeni u petoj generaciji Wi-Fi mreža su se uglavnom u nepromijenjenoj formi zadržali i u šestoj generaciji, što je za posledicu imalo i to da dio njih ne podržava MU-MIMO, a to je neophodno promijeniti u sedmoj generaciji. Osim toga, uvećavanje SS broja sa 8 na 16 za posledicu ima i to što trenutni *sounding* algoritmi za 16 SS generišu značajno veću količinu CSI parametara. Zbog toga je potrebno unaprijediti postojeće, ali i dizajnirati nove *sounding* procedure.

Metode koje se koriste za dobijanje CSI parametara se mogu podijeliti u dvije grupe - implicitne i eksplicitne. Implicitne metode za CSI procjenu koriste podatke sa predajne strane i reciproćitet kanala, dok se kod eksplicitnih metoda zahtijeva da prijemna strana izvrši CSI procjenu i pošalje te podatke nazad predajniku, koji će u skladu sa tim da podesi SS usmjeravanje. U prethodnim generacijama Wi-Fi mreža, koristile su se eksplicitne metode, dok je implicitna metoda bila predložena u četvrtoj generaciji, ali nikad nije zaživjela u praksi. Korišćenje eksplicitnih metoda nastaviće se i u sedmoj generaciji Wi-Fi mreža radi kompatibilnosti sa prethodnim verzijama, ali potrebno je napraviti neka prilagođenja. Naime, problem sa eksplicitnim metodama je taj što se za 16 SS generiše prevelika količina povratnih informacija koje šalje svaki uređaj pojedinačno u CBR (*compressed beamforming report*) frejmovima. Tu su sadržani kompresovani podaci srednjeg SNR-a za svaki SS, SNR vrijednosti za svaku prijemnu antenu, Givenovi rotacioni uglovi matrice povratnih informacija za svaki

četvrti ili šestanaesti podnosilac i još neke dodatne informacije ukoliko je podržan MU-MIMO. Smanjivanje ovih povratnih informacija može biti ostvareno povećavanjem grupe podnosilaca za koje se šalju CSI parametri, omogućavanjem djelimičnih povratnih informacija za više RU istovremeno, ili dozvoljavajući povratnu SNR informaciju jedne RU [4]. Među predloženim novim eksplicitnim *sounding* metodama koje će se potencijalno koristiti, prema [4] najviše se ističu sledeće:

- Povratne informacije od više komponenti (*multiple component feedback*),
- Konačne povratne informacije (*finite feedback*),
- *Two-way sounding* kanala.

Ipak, čak i poboljšane, navedene metode ne mogu značajno smanjiti količinu povratnih informacija, a samim tim ni vrijeme koje je potrebno da se iste prenesu i koliko god unaprijeđene, ovaj problem i dalje ostaje u većoj ili manjoj mjeri. Zbog toga tehnika implicitnog *sounding*-a ovoga puta dobija više na značaju. Umjesto slanja *sounding* frejmova od AP ka uređajima i prikupljanja eksplicitnih povratnih informacija od svakog uređaja pojedinačno, kod implicitne metode AP šalje NDP (*null data packet*) trigger frejm a uređaji zatim *uplink*-om šalju NDP frejmove koji sadrže samo preambulu fizičkog sloja (naslijeđeni i ne-naslijeđeni dio), što je značajno manje od veličine CBR frejmova. Nakon toga, AP na osnovu kanalnog reciprociteta direktno računa kanalnu matricu, što ima za posledicu i to da nema gubitaka CSI parametara zbog kvantizacije i kompresije koja je morala biti napravljena kod eksplicitnih metoda.

Neki od problema zbog kojih se implicitna metoda nije koristila u prethodnim generacijama su nemogućnost pouzdane kalibracije, kao i činjenica da se povratne informacije ne mogu sakupiti sa dijela antena koje su imale samo mogućnost primanja podataka. Međutim, u [19] se navodi da je u međuvremenu ostvaren napredak po pitanju kalibracije i da se ti problemi mogu riješiti. Kalibracija bi se mogla realizovati na predajnoj strani bez zahtjeva da i prijemna strana u njoj učestvuje, a što se drugog problema tiče, frejmovi sa CSI parametrima bi mogli biti poslani antenama koje imaju mogućnost slanja ili kada se one prebace u režim slanja, a mogle bi se koristiti i eksplicitne metode za ovakve korisnike jer je njih sve manje.

3.2.2 HARQ u Wi-Fi mrežama

Hibridni zahtjev za automatsko ponavljanje (HARQ) koji se koristi kao mehanizam za ispravljanje grešaka i sastoji se od kombinacije brze korekcije greške unaprijed (FEC - *forward error correction*) i automatskog zahtjeva za ponavljanje (ARQ - *automatic repeat request*), godinama se već koristi u celularnim tehnologijama. Međutim, u Wi-Fi tehnologijama će primjenu prvi put naći u sedmoj generaciji. HARQ se prethodno nije implementirao u Wi-Fi mrežama zbog njihove same prirode - rada u nelicenciranom opsegu zbog kojeg bi implementacija zahtijevala značajnije promjene protokola, zbog velikog broja nezavisnih protokola i mehanizama, ali i nedovoljne računarske moći nekih uređaja koji koriste Wi-Fi mreže. Ipak, kako se Wi-Fi uređaji, ali i sami protokoli, sve više razvijaju i postaju sve efikasniji, jedan od zahtjeva koji se postavio pred Wi-Fi mrežama jeste i bolja pouzdanost, kao i adaptacija linkova i retransmisija, što je specificirano i u zahtjevu za autorizaciju projekta [5]. Sve ovo dovelo je do neizbježne primjene HARQ mehanizma u Wi-Fi mrežama.

Kao najznačajnije prednosti implementacije HARQ-a u Wi-Fi mrežama u [20] se navode poboljšanje performansi kao rezultat kombinovanih retransmisija, bolje pokrivanje u oblastima niskog SNR-a i povećan domet, ali i poboljšana adaptacija linka, koja je do sada dominantno postizana prilagođavanjem MCS šema na osnovu povratnih informacija o kvalitetu kanala (CQI - *channel quality information*). Iako će HARQ poboljšati kvalitet veze, kao i prosječnu BSS propusnost, njegova implementacija u Wi-Fi mrežama sa sobom nosi dosta prilagođenja i izazova, kako zbog samog načina realizacije tako i zbog *bursty* prirode Wi-Fi saobraćaja koja uzrokuje povećan broj kolizija paketa. Zbog toga je potrebno uložiti dodatne napore kako bi se HARQ mehanizmi optimizovali za primjenu u Wi-Fi mrežama, kako bi se prilagodio PPDU dizajn, kao i dizajn ACK (*acknowledgment*) i NACK (non-ACK) mehanizama povratnih informacija [21].

3.2.3 Multi-AP koordinacija

Ekspanzija Wi-Fi-ja rezultirala je jako velikim brojem mreža u stambenim zgradama, preduzećima, na javnim površinama itd. Zbog toga su smetnje ko-kanalnog tipa postale jedan od glavnih problema, a jedno rješenje u prethodnoj generaciji bila je tehnika BSS boje, čija se primjena nastavlja i u Wi-Fi mrežama sedme generacije. Međutim, BSS boja i *spatial reuse* tehnike neće biti dovoljna rješenja za buduće scenarije i aplikacije, pa je u okviru Wi-Fi 7

predstavljeno još jedno rješenje - koordinisan rad više pristupnih tačaka (multi-AP koordinacija), koje će donijeti i druge prednosti osim navedenih.

Od 2018. godine do 2020. predloženo je više tehnika multi-AP koordinacije koje su gore navedene, pa je u [22] predložena osnovna terminologija koja bi obuhvatila sve ove tehnike. Multi-AP procedura se sastoji iz tri koraka: multi-AP *setup*, multi-AP koordinacija i multi-AP prenos (u okviru kojeg je prije slanja podataka potrebno odraditi multi-AP sounding). Definisane su dvije grupe uređaja u okviru multi-AP operacija i to:

- Multi-AP *Candidate Set* (M-AP-CS) - grupa koja obuhvata jedan koordinatorski AP (*coordinator AP*) koji uspostavlja M-AP-CS i jedan ili više koordinisanih AP-ova (*coordinated APs*), kao i korisničke uređaje koji su označeni za učestvovanje u multi-AP operaciji. Ova grupa je upravljana od strane koordinatorskog AP koji može poslati *broadcast* zahtjev koji sadrži mogućnosti koordinatorskog AP, a u cilju kreiranja M-AP-CS grupe ili *unicast* zahtjeve ciljanim koordinisanim AP-ovima.
- Multi-AP *Operation Set* (M-AP-OS) - predstavlja podgrupu M-AP-CS, a sadrži se od *sharing AP* (EHT AP koja upravlja vremenskom i frekvencijskom sinhronizacijom prilikom multi-AP prenosa) i *shared AP*-ova (EHT AP-ovi koji se sinhronizuju prema *sharing AP* prilikom multi-AP prenosa).

Da bi se proces standardizovao i da bi bila omogućena što efikasnija i jednostavnija implementacija navedenog rješenja, radna grupa koja je radila na *be* standardu (TGbe - *task group be*) predlaže dva tipa multi-AP tehnika:

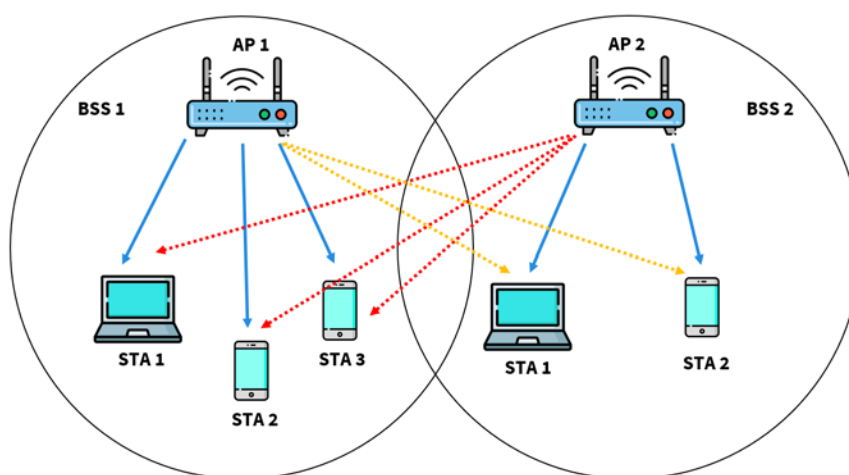
- Tehnike koje u svom nazivu sadrže riječ koordinisane - podaci se korisniku šalju od strane samo jednog AP. U okviru ovoga, glavna predložena rješenja su koordinisani *beamforming*, koordinisani OFDMA i koordinisani *spatial reuse*.
- Zajedničke (*joint*) tehnike - podaci se korisniku šalju od strane više AP-ova.

Cijena koju je potrebno platiti biće uvođenje sinhronizacije između AP-ova, što donekle usložnjava Wi-Fi sisteme, ali implementacija ove tehnike donijeće brojne druge prednosti i ostaviti prostor za buduća unapređenja i poboljšanja u funkcionisanju cijelog Wi-Fi ekosistema.

Koordinisani *spatial reuse* je tehnika koja bi trebala da poboljša *spatial reuse* koji je uveden u šestoj Wi-Fi generaciji, a koji je podrazumijevao kontrolu emisije snage i modulacionih i MCS šema, ali i tehniku BSS boje. Jedan AP se bira da koristi OBSS-PD (*overlapping basic service set packet detect*) sa prilagođenim CCA/CS (*clear channel*

indication/carrier sense) indikacijama, dok drugi koriste standardno definisane CCA/CS indikacije [23]. To rezultira poboljšanim TXOP i boljom spektralnom efikasnošću, ali bi koordinisani spatial reuse mogao donijeti dodatna poboljšanja, gdje bi se TPC (*transmission power control*) mogla odvijati na koordinisan način, prilagođavanjem OBSS-PD-ova za svaku BSS i to prilikom svakog prenosa, ili na periodičan način. Iako je periodični način energetski efikasniji i zahtijeva manja zaglavlja i manji broj kontrolnih paketa, prilagođavanje pragova pri svakom prenosu ima svoje prednosti u scenarijima dinamičkih WLAN okruženja [23].

Koordinisani *beamforming* je tehnika koja se u literaturi često naziva i *null steering*, a podrazumijeva koordinisani rad više AP-ova koji *beamforming* zračenja usmjeravaju ka svojim korisnicima, dok ka korisnicima iz drugih (O)BSS-ova formiraju takozvano “nulto zračenje”, što je prikazano na slici 3.5. Plavom bojom su označeni prenosi unutar jedne BSS dok su crvenom i žutom bojom označena ta tzv. nulta zračenja ka uređajima druge (O)BSS.

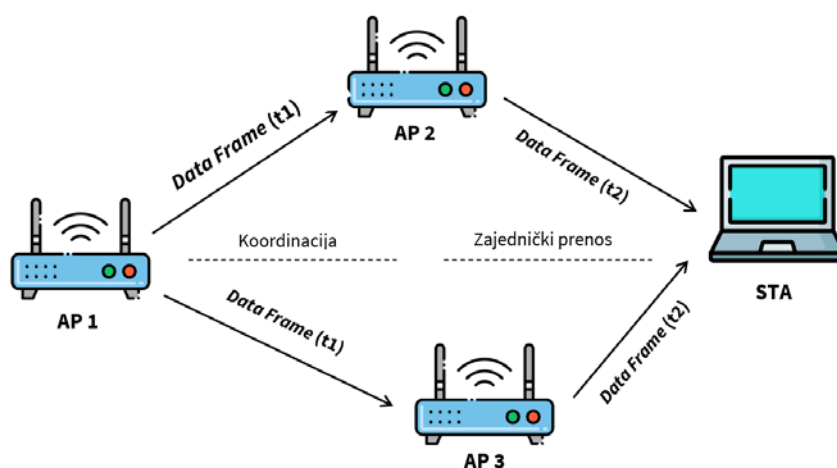


Slika 3.5. Koordinisani *beamforming*

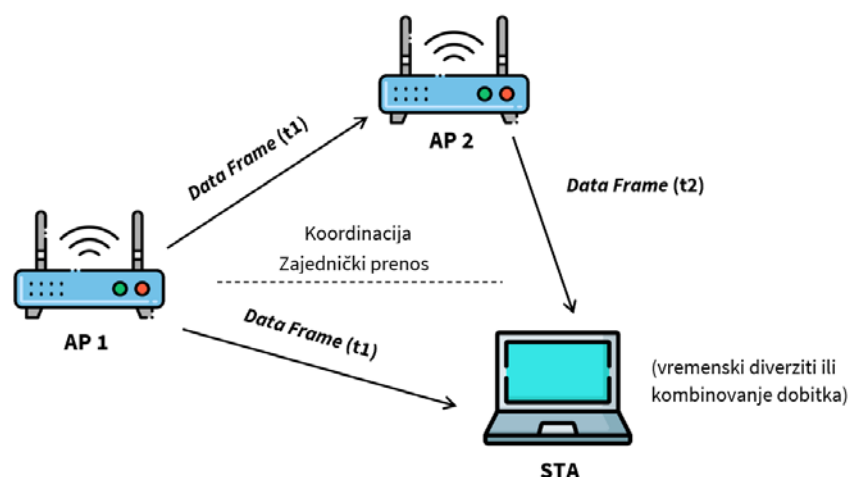
Koordinisani OFDMA je tehnika koja ima za cilj efikasnije iskorišćenje frekvencijskih resursa. Kod šeste generacije Wi-Fi sistema, jedan AP ne može da pristupi istim frekvencijama kao drugi AP iz susjedne BSS u istoj TXOP, čime se ograničava mogućnost sistema za postizanje veće propusnosti [23], dok BSS boja samo donekle unosi poboljšanja, jer prag prijema i dalje postoji, samo je za inter-BSS prenos on niže vrijednosti. Sa koordinisanom OFDMA tehnikom omogućilo bi se da korisnički uređaji iz različitih, ali susjednih BSS-ova, mogu pristupiti istim frekvencijskim resursima ili istim RU jedinicama ukoliko su udaljeni dovoljno da ne dođe do interferencije. U suprotnom, dodjela istih frekvencijskih resursa ili RU

jedinica ne bi bila moguća. U okviru toga, definišu se i dvije grupe dodjele resursa - inter-kanalne i intra-kanalne [23].

Procedure gdje se prenos podataka ka korisničkom uređaju obavlja od strane više AP-ova nazvane su multi-AP zajedničke (*joint*) tehnike prenosa. Zajednički prenos uključuje multi-AP *sounding* sa povratnim informacijama, a zatim i dinamičku selekciju AP nakon koje se obavlja zajednički prenos. *Sounding* procedura predložena u [24] podrazumijeva postojanje jednog master AP čvora koji igra ulogu koordinatorskog AP i upravlja zajedničkim prenosom (najava zajedničkom prenosu, *trigger* frejm zajedničkog prenosu, prenos podataka, slanje drugih kontrolnih informacija...) i jednog ili više slave AP čvorova koji učestvuju u prenosu i predstavljaju koordinisane AP-ove. U zavisnosti od šeme i drugih potencijalno omogućenih tehnika, AP-ovi mogu koristiti iste ili različite vremenske/frekvencijske resurse. Na slikama 3.6 i 3.7 prikazana su dva potencijalna scenarija predložena u [24].



Slika 3.6. Zajednički prenos, scenario 1: koordinatorska AP upravlja prenosom dok koordinisane AP prenose podatke uređaju



Slika 3.7. Zajednički prenos, scenario 2: u prenosu podataka uređaju učestvuju i koordinatorska AP i koordinisane AP

3.2.4 Multi-link operacije (MLO)

Jedna od najznačajnijih tehničkih inovacija predloženih za sedmu generaciju Wi-Fi mreža su multi-link operacije (MLO). Starije generacije Wi-Fi standarda pružaju mogućnost komunikacije između Wi-Fi pristupne tačke i korisničkog uređaja, samo na jednom frekvencijskom opsegu - 2.4, 5 ili 6 GHz u posmatranom vremenskom intervalu, iako su uređaji poslednjih generacija sposobni za slanje podataka na 2 ili čak 3 frekvencijska opsega od 6E verzije standarda. Ipak, istovremeni prenos na različitim opsezima nije bio moguć, te su preostali frekvencijski resursi za ovaj uređaj ostajali neiskorišteni [25]. Prenos saobraćaja na više opsega ili kanala istovremeno može poboljšati ukupnu propusnost mreže i smanjiti kašnjenje, što je bio jedan od ključnih zahtjeva izloženih u [5]. Osim toga, u [5] se takođe sugeriše i da bi agregacija i rad na više opsega/kanala mogli biti od velike važnosti za scenarije balansiranja opterećenja, uzevši u obzir da se u njihovim trenutnim realizacijama unosi značajno kašnjenje. U [26] je pokazano da se visoko efikasno prebacivanje sa jednog frekvencijskog opsega može uspješno iskoristiti za scenarije balansiranja opterećenja.

Prema specifikaciji za 802.11be uređaje [11], zahtijeva se da AP-ovi i korisnički uređaji podržavaju sledeće funkcije:

- Procedure otkrivanja uređaja,
- Procedure podešavanja,

- Sigurnosne procedure,
- Podrazumijevano mapiranje - da su svi TID-ovi (*traffic identifiers* - identifikatori saobraćaja) mapirani na sve linkove i da su svi linkovi namijenjeni za podešavanje postavljeni,
- Da TIM-ovi (*traffic indication maps* - mape saobraćajnih indikacija) ukazuju na BU (bufferable unit - jedinice koje mogu da baferuju podatke) na MLD (*multi-link device* - multi-link uređaj) nivou,
- Uštedu energije po linku,
- Indikacije promjene stanja napajanja po linku,
- Kritične procedure ažuriranja parametara na BSS nivou.

Pored toga, u [11] je takođe navedeno da se osim ovih mogu dodati i neke druge funkcionalnosti. Da bi se podržala makar većina ovih funkcija za MLD uređaje, predlagani su različiti kontrolni paketi, ali kako bi se sve to objedinilo u [27] predložen je zajednički format paketa za sve njih, odnosno, zajednički multi-link element prikazan na slici 3.8. Ovaj paket se inicijalno prenosi prethodno specificiranim linkom tokom faze asocijacije između AP i MLD uređaja kako bi se omogućilo inicijalno podešavanje tog linka, a u sebi sadrži i potrebne informacije za ostale linkove kao i neke generalne MLO informacije, pri čemu može biti poslat i kasnije na zahtjev kako bi se izvršile određene funkcije poput TID mapiranja, bili ažurirani neki parametri i slično. Djelovi zajedničkog multi-link elementa mogu biti uključeni i u neke druge kontrolne pakete kasnije kako bi MLO bila realizovana uspješno.

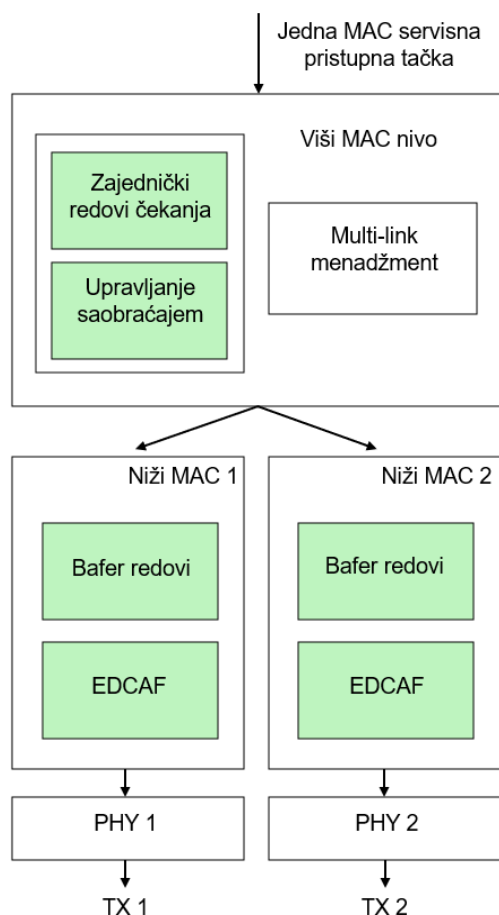
ID Elementa	Dužina	Ekstenzija ID elementa	Kontrola		Zajedničke informacije (prema tipu)	Informacije po linku (prema tipu)
			Tip	Bit-mapa prisutnosti		

Slika 3.8. Zajednički multi-link element

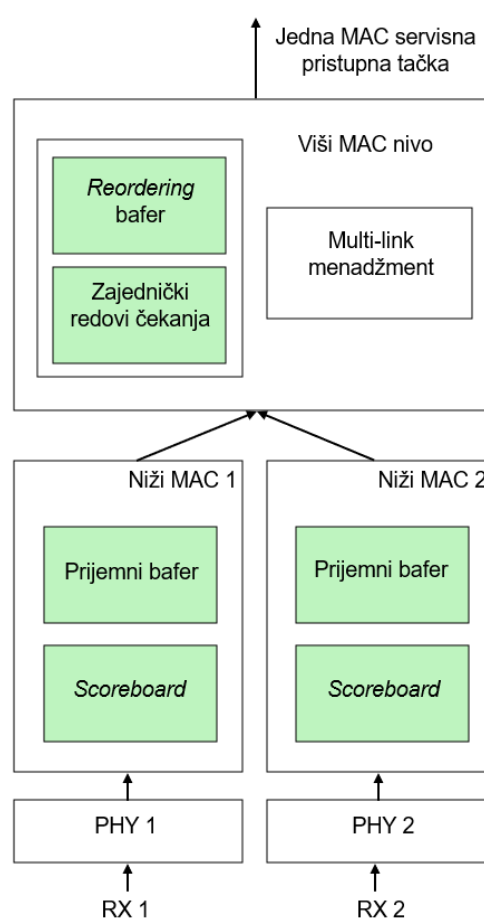
Tako na primjer, ako je tip multi-link elementa osnovno otkrivanje uređaja, informacije koje bi se njime prenosile u polju zajedničkih informacija su MLD MAC adresa, SSID (*service set identifier*) uređaja, MLD mogućnosti uređaja i sl. Za tip multi-link elementa MLD zahtjev, prenosile bi se informacije za zahtijevani link. Osim toga, tip se može odnositi i na indikacije nekih zabrana, pri čemu bi se onda nakon kontrolnih bita prenosile informacije zabrana poput vrijednosti nekih frekvencijskih pragova isl. U [27] date su i dvije opcije za tipove - jedna na

osnovu upotrebe (multi-link otkrivanje, multi-link podešavanje, multi-link BSS ažuriranje parametara, mapiranje TID-ova prema linkovima...), a druga na osnovu sadržaja (mogućnosti, operacioni parametri, BSS ažuriranje parametara...).

Kada je u pitanju arhitektura, predložene su dvije osnovne konfiguracije za multi-link: agregacija na nivou paketa i na nivou toka [28]. Pošto se očekuje da će agregacija na nivou paketa biti mnogo više zastupljena [29], na osnovu ovog rješenja predložene su izmjene u arhitekturi. U tom pogledu, Wi-Fi 7 definiše multi-link uređaje (MLDs). Prethodni standardi su definisali uređaje koji su imali samo jedan fizički i MAC nivo, te nije bilo moguće istovremeno prenositi signale na različitim opsezima. Kako bi to bilo moguće a promjene arhitekture i infrastrukture bile minimalne, predloženi su multi-link uređaji koji bi imali jedan interfejs za kontrolu logičke veze a nekoliko povezanih radio interfejsa sa odvojenim fizičkim i nižim MAC nivoima. MAC adresa bi za uređaj bila jedinstvena, kao i podešavanja bezbjednosti i upravljanja, čime veličina zaglavlja ne bi bila veća u odnosu na prethodne standarde. Arhitekture MLD uređaja na predajnoj i prijemnoj strani prikazane su na slikama 3.9 i 3.10, respektivno. Možemo primijetiti da se i kod MLD predajnika i prijemnika primjenjuju zajednički redovi čekanja na višim MAC nivoima, a zatim se saobraćaj distribuira nižim MAC nivoima, gdje se primjenjuju zasebne EDCA (*enhanced distributed channel access*) procedure koje za cilj imaju razvrstavanje saobraćaja u odgovarajuće kategorije omogućavajući time QoS (*quality of service*) prioritizaciju saobraćanja, zadržavajući neke parametre postavljene od strane višeg MAC sloja [30]. Na prijemnoj strani se paketi prikupljaju sa više linkova, a zatim se prosleđuju višem MAC nivou, gdje je potrebno vratiti prvobitan redosled paketa.



Slika 3.9. Arhitektura MLD predajnika



Slika 3.10. Arhitektura MLD prijemnika

Prema [30], MLO se mogu klasifikovati u 2 tipa, kako bi se podržali i novi MLD ali i stariji uređaji koji ne podržavaju multi-link:

- Uređaji sa jednim radio interfejsom i više antena - mogu da oslušuju stanje na više kanala istovremeno koristeći različite antene, ali prenos u jednom trenutku je moguć samo na jednom kanalu.
- Uređaji sa više radio interfejsa i više antena - mogu da funkcionišu na više linkova istovremeno. U tom pogledu postoje dva tipa prenosa - simultani prenos preko linkova (kod kojeg je potrebno napraviti odgovarajuću separaciju kanala na kojima će linkovi da funkcionišu, kako bi se izbjegla interferencija) i ne-simultani prenos preko linkova (kako bi se izbjegla interferencija i greške pri prijemu).

Iako je standard još uvijek u proceduri zvaničnog usvajanja, MLD korisnički uređaji i ruteri su već uveliko u prodaji.

Kako bi MLO funkcionisale ispravno, osim arhitekture, potrebno je dizajnirati i efikasne metode pristupa kanalu koje će onemogućiti interferenciju između linkova i osigurati

koegzistenciju sa uređajima prethodnih generacija [31]. Trenutne metode pristupa kanalu definišu samo slučajeve kada se prenos vrši preko jednog linka te ih je potrebno modifikovati kako bi se podržale i multi-link komunikacije. Trenutno se pristup kanalu vrši prema CCA indikacijama za svakih 20 MHz i to pristupanjem primarnom (pod)kanalu od 20 MHz, a nakon toga proširivanjem spektra ukoliko je raspoloživ. Prema tome, pristup kanalu se može vršiti na osnovu jednog primarnog kanala, ali to će rezultirati manjom fleksibilnošću u izboru kanala, posebno u scenarijima guste primjene [4] i nije adekvatan izbor kada je u pitanju multi-link. Pristup kanalu zasnovan na više primarnih kanala je bolja opcija u situacijama sa multi-link prenosom, gdje se sekundarni kanali mogu privremeno predstaviti kao primarni. Ipak, kada je u pitanju multi-link prenos, kod pristupa kanalu potrebno je voditi računa i o tipu prenosa. U tom pogledu MLO mogu biti klasifikovane u simultani prijemno-predajni prenos (STR - *simultaneous transmit receive*) i ne-simultani prenos (non-STR - *non simultaneous transmit receive*). Oba načina mogu biti realizovana na sinhronizovan (prenosi/prijemi počinju u istim trenucima) način, što ima smisla jer se to odvija na nivou jednog MLD uređaja, ili na nesinhronizovan način (prenosi/prijemi mogu početi u različitim trenucima).

Kod oba tipa prenosa - STR i non-STR, MLD uređaj može istovremeno da prima ili da šalje podatke preko više različitih linkova. Međutim, kod STR tipa, uređaj može da prenosi podatke ili izvršava CCA proceduru preko jednog linka, prenoseći podatke preko drugog linka simultano [32]. Glavni nedostatak koji se javlja kod STR načina prenosa je taj što postoji velika šansa da dođe do interferencije između linkova (*cross-link* interferencija) zbog tzv. “curenja energije” sa predajnog linka, što za posledicu ima miješanje u proces prijema na drugom linku. Istraživači su identifikovali nekoliko metoda kako bi se omogućila primjena STR tipa prenosa, uključujući smanjivanje snage prenosa, korišćenje više izolovanih antena, primjenu visoko kvalitetnih niskopropusnih filtara kao i podešavanje dovoljnog rastojanja između kanala [33]. Uzevši u obzir da je indikacija STR/non-STR mogućnosti veoma važna, u [34] se predlaže da se STR mogućnosti oba linka moraju najaviti prije izbora linka i prenosa. Predloženo je da se izdvoji jedan poseban bit u zajedničkim informacijama multi-link elementa za odgovarajući tip elementa. Drugi način predložen u [33] za određivanje STR mogućnosti bio bi da se postavi određeni frekvencijski prag blizine dva linka i ukoliko je njihovo rastojanje veće od praga, bilo bi zaključeno da je moguće ostvariti STR prenos. Takođe je predloženo i nekoliko opcija za utvrđivanje tog praga frekvencijskog rastojanja između dva linka - taj prag može biti specificiran od strane predajnika, može biti specificiran za cijelu BSS ili može biti zajednički definisan. U [35] predloženo je da AP koji treba da postavi multi-link BSS treba da ima STR

mogućnost za sve raspoložive parove linkova, dok ostali uređaji u toj BSS mogu a ne moraju imati STR mogućnost. Što se tiče samih PDU parametara, oni na svakom linku mogu biti nezavisni - mogu se prenositi paketi različitih dužina, sa različitim MCS šemama itd.

Kao što je već navedeno, i STR i non-STR tip prenosa se može realizovati na sinhronizovan ili nesinhronizovan način. Kada je u pitanju nesinhronizovan način, pristup kanalu se može realizovati nezavisno za svaki link i u tom slučaju osim uzimanja u obzir navedenih indikacija za STR i non-STR tip prenosa, trenutni mehanizmi i *backoff* procedure ne moraju biti značajnije mijenjani i mogu se primijeniti zasebno na svakom linku. Takođe može biti primijenjen i standardni EDCA protokol kojim se saobraćaj razvrstava u različite kategorije u skladu sa prioritetom prenosa. Prednost nesinhronizovanog načina prenosa je u tome što se raspoloživi resursi mogu koristiti na jako efikasan način, ali u [36] se uočavaju i nedostaci kada je u pitanju QoS. Nesekvencijalni prijem paketa može izazvati dodatna kašnjenja, mogu se dešavati nepotrebne retransmisije zbog različitih kvaliteta linkova ili neuspješan prijem usled već pomenutog curenja energije na susjedne kanale. Sinhroni multi-link prenos sa druge strane osim nepotrebnih retransmisija zbog različitih kvaliteta linkova nema drugih QoS problema, ali je kod njega potrebno voditi računa da prenos na svim linkovima mora početi u istom trenutku, što bi značilo čekanje CCA indikacija za svaki link. Ovo zahtijeva razvoj dodatnih procedura koje bi određeno vrijeme držale linkove "slobodnim" dok se ne dobiju CCA indikacije koje ukazuju na dostupnost svih linkova. U [37] predlaže se korišćenje jednog primarnog kanala radi jednostavnosti realizacije koja ne bi zahtijevala značajnije izmjene u odnosu na već postojeće procedure i gore opisane dodatne izmjene, ali je dato i par primjera situacija gdje je potrebno primijeniti pristup kanalu koji je zasnovan na više primarnih kanala.

Uvođenje prenosa preko više linkova za posledicu ima veću potrošnju energije, pa je jedna je opcija štednje energije veoma važna za MLD uređaje. U [38], autori navode da nezavisan režim uštede energije za svaki link nije poželjna opcija kada su u pitanju MLD uređaji. Zbog toga predlažu uvođenje ekstremnog *low-power* multi-link režima sa jednim određenim *anchor* linkom koji može biti kasnije dinamički promijenjen. *Anchor* link predstavlja jedan odabrani link (od svih postavljenih linkova za dati non-AP MLD) preko kojeg se izvršavaju *power save* mehanizmi. Na taj način se mogu efikasno koristiti prednosti MLO-a, a dio vremena kada se link ne koristi, primjenjuje se režim rada izuzetno niske potrošnje snage. Promjena stanja napajanja mora biti brza i efikasna, pa se u [38] takođe predlaže i korišćenje svič frejmova za ulazak i izlazak iz moda ekstremne štednje snage, za razliku od

prethodnih generacija koje su koristile mnogo veće pakete u tu svrhu i indikacije stanja napajanja. Svič frejm se može prenijeti preko bilo kojeg linka, a treba da sadrži identifikator *anchor* linka ako se prenosi preko nekog drugog. Izlazak iz režima ekstremne štednje energije može se izvršiti pomoću prethodno definisanog TID-*to-link* mapiranja koje je urađeno pri ulasku uređaja u ovaj režim, ali uređaji takođe mogu i eksplicitno signalizirati izlazak iz ovog režima.

Implementacija simultanog prenosa podataka preko više linkova, osim očiglednih poboljšanja u pogledu ukupne propusnosti, otvara mogućnosti i za implementaciju različitih funkcija i poboljšanje nekih već postojećih. Arhitektura dizajnirana za sinhroni i asinhroni MLO prenos može da služi i u druge svrhe, poput brzog prebacivanja prenosa na drugi link ili rezervisanja jednog linka za prenos svih kontrolnih paketa [4].

Brzo prebacivanje prenosa na drugi kanal/link je opcija koja već postoji u IEEE 802.11 specifikacijama, ali sa MLO implementacijom, ona će biti mnogo efikasnija. To će pomoći i u efikasnijem balansiranju saobraćaja u cilju poboljšanja QoS-a, jer saobraćaji prioriternih kategorija mogu brzo biti prebačeni na drugi (ili bolji) link bez trenutno postojećih dugotrajnih procedura unakrsnih razmjenjivanja poruka za prelazak prenosa sa jednog kanala/linka na drugi. Osim toga, očekuje se da će dinamičko brzo prebacivanje naći svoju primjenu i u smanjenju interferencije između susjednih čvorova, a pogotovo uzimajući u obzir da se kanalna smetnja i smetnje između kanala koji se nalaze u blizini veća kako se povećava širina kanala [4]. Brzo i dinamičko prebacivanje linkova će prema tome omogućiti efikasnije prebacivanje saobraćaja na neaktivne kvalitetnije linkove.

Alokacija jednog linka za kontrolnu ravan i prenos kontrolnih paketa može biti jako korisna, posebno za aplikacije sa velikim kontrolnim paketima. Takav koncept je predložen u [39], gdje autori tvrde da razdvajanje kontrolne i ravni podataka u Wi-Fi sistemima može značajno poboljšati performanse. Na ovaj način jedan ili više linkova mogu biti namijenjeni za prenos podataka, dok jedan link preuzima kontrolne pakete poput paketa potrebnih za pristup kanalu, usmjeravanje saovraćaja..., kao i brojne pakete koji se prenose u funkciji upravljanja mrežom.

Glava 4

Analiza primjene 4096-QAM modulacije u rezidencijalnom korisničkom scenariju

U Glavi 3 dat je pregled tehničkih rješenja predloženih za Wi-Fi 7 mreže, i jedan od predloga na fizičkom nivou je i 4096-QAM modulacija. Kako je to navedeno u 3.1.1, predlogom standarda primjena 4096-QAM modulacije je opciona za Wi-Fi 7, a ukoliko se ista koristi teoretski bi se mogla povećati brzina prenosa za 20% u odnosu na 1024-QAM modulaciju. Ipak, ono što je navedeno kao problem pri realizaciji jeste potreba za jako velikim odnosom signal/šum na strani prijema, a kao jedna od najznačajnijih predloženih tehnika za rješavanje ovog problema je *beamforming*. U nastavku će biti analizirano kako primjena *beamforming* tehnike utiče na zahtijevani odnos signal/šum na prijemu radi primjene 4096-QAM modulacije u rezidencijalnom scenariju. Simulacija je realizovana u Matlab programskom okruženju, gdje su u okviru WLAN Toolbox alata date osnovne funkcije za projektovanje, simulaciju i analizu WLAN sistema. 802.11be standard je prvi put uvršten u R2022b verziju Matlaba, a kroz R2023a i R2023b verzije su uvedene i neke nove funkcionalnosti. Ipak, nisu sva predložena tehnička rješenja implementirana, pa se neka (poput multi-link prenosa) očekuju tek u narednim verzijama Matlaba.

4.1 Postavke simulacije

Za propagaciono okruženje korišćen je wlanTGax kanal koji je kreiran u skladu sa IEEE 802.11ax modelom kanala koji je definisan u [40]. Radna grupa 802.11be standarda je kreirala i dokument u kojem je specificirala samo osnovne postavke IEEE 802.11be modela

kanala [41]. Postavke kanala vezane za funkcionalnosti realizovane prethodnim standardima ostale su iste kako je to definisano 802.11ax (kao i 802.11n i 802.11ac) standardom, a za 802.11be standard ih je bilo potrebno proširiti za opseg na 6 GHz, širinu kanala do 320 MHz, više od 8 prostornih strimova, ali i model kanala za multi-AP sisteme. Kako 802.11be model kanala još uvijek nije implementiran u Matlabu, primijenjen je wlanTGax kanal u kojem je maksimalan broj antena na jednoj strani 8, odnosno maksimalan MIMO sistem 8x8.

Pri modelovanju ovog kanala od posebnog značaja su *large-scale* i *small-scale* feding. *Large-scale* feding predstavlja spore promjene snage primljenog signala oko srednjeg nivoa, uočljive na većim rastojanjima, reda od nekoliko desetina do stotinu metara. *Small-scale* feding je sa druge strane uočljiv na rastojanjima reda metra, odnosi se na brze promjene anvelope primljenog signala koje su posledica rasipanja, refleksije i/ili difrakcije talasa od objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini.

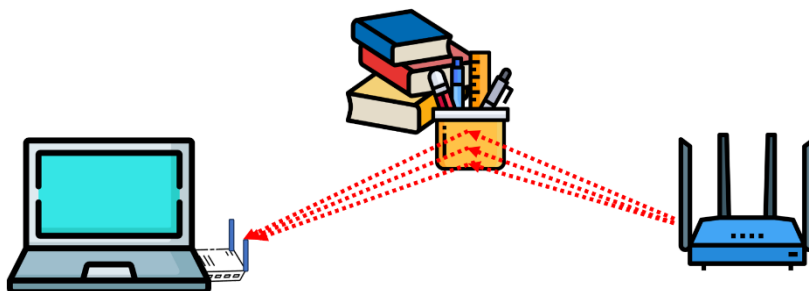
Simuliran je rezidencijalni scenario, pa se na osnovu [42], *path loss* definiše kao ukupno slabljenje usled propagacije elektromagnetnog talasa i definisan je formulom:

$$PL_{overall} = PL_{indoor}(d) + PEL_{floor} + PEL_{wall}, \quad (4.1)$$

gdje je:

- PL_{indoor} slabljenje usled propagacije u zatvorenoj prostoriji. Zavisi od rastojanja i računa se kao $PL_{indoor}(d) = L_{FS}(d)$ za rastojanja koja su (za korišćeni model B) manja od $d_{BP} = 5 \text{ m}$, što predstavlja LOS (*line-of-sight*) prenos, odnosno $PL_{indoor}(d) = L_{FS}(d) + 35 \log_{10}(d/d_{BP})$ za rastojanja veća od $d_{BP} = 5 \text{ m}$, što predstavlja NLOS (*non-line-of-sight*) prenos. $L_{FS}(d)$ je slabljenje elektromagnetnog talasa (u dB) u slobodnom prostoru;
- PEL_{floor} dodatno slabljenje (u dB) zbog prodiranja elektromagnetnog talasa po spratu;
- PEL_{wall} dodatno slabljenje (u dB) zbog prodiranja elektromagnetnog talasa kroz zid.

Radi modelovanja *small-scale* fedinga, u okviru 802.11ax modela kanala za *indoor* okruženje definisani su modeli A, B, C, D, E i F, koji simuliraju različite propagacione scenarije i definišu RMS (*root mean square*) *delay spread* (vremensko širenje primljenog signala koje je posledica *multipath* prenosa signala), broj klastera kao i tapova po klasteru, propagacioni scenario i model korišćenja. *Multipath* propagacija se na osnovu [43] modeluje u vidu klastera koji predstavljaju grupacije pojedinačnih *multipath* komponentni (tapova, zraka). Na slici 4.1 predstavljen je primjer modelovanja jednog klastera.



Slika 4.1. Primjer modelovanja jednog klastera

Na osnovu [44] impulsni odziv ovako modelovanog sistema se može predstaviti kao:

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\beta_{kl} e^{j\phi_{k,l}} \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \right), \quad (4.2)$$

gdje su:

- l i k - oznake broja klastera i tupa u klasteru respektivno,
- β_{kl} - amplituda k -tog tupa u l -tom klasteru koja prati Rejljevu raspodjelu,
- $e^{j\phi_{k,l}}$ - statistički nezavisna slučajna faza povezana sa svakim pojedinačnim dolaskom, gdje je $\phi_{k,l}$ uniformno raspodijeljen na opsegu $[0, 2\pi)$,
- T_l - kašnjenje (vrijeme dolaska) prvog tupa l -tog klastera, modelovano Poasonovom raspodjelom,
- $\tau_{k,l}$ - kašnjenje (vrijeme dolaska) k -tog tupa u l -tom klasteru, modelovano Poasonovom raspodjelom.

Na osnovu ovoga, MIMO kanal se opisuje *steering* matricom za sve kombinacije prijemnih i predajnih antena, koja se primjenjuje na svaku pojedinačnu RU, kako bi se definisali parametri zračenja antena.

Na osnovu [45] ukupna prijemna snaga za r -tu prijemnu antenu se može predstaviti kao:

$$P_r = \int_0^{2\pi} AG(\alpha)p(\alpha)d\alpha, \quad (4.3)$$

gdje je:

- A - prosječna prijemna snaga,
- $G(\alpha)$ - pojačanje antene za ugao dolaska α ,
- $p(\alpha)$ - snaga talasa koji dolazi pod uglom α , a koja eksponencijalno opada u vremenu.

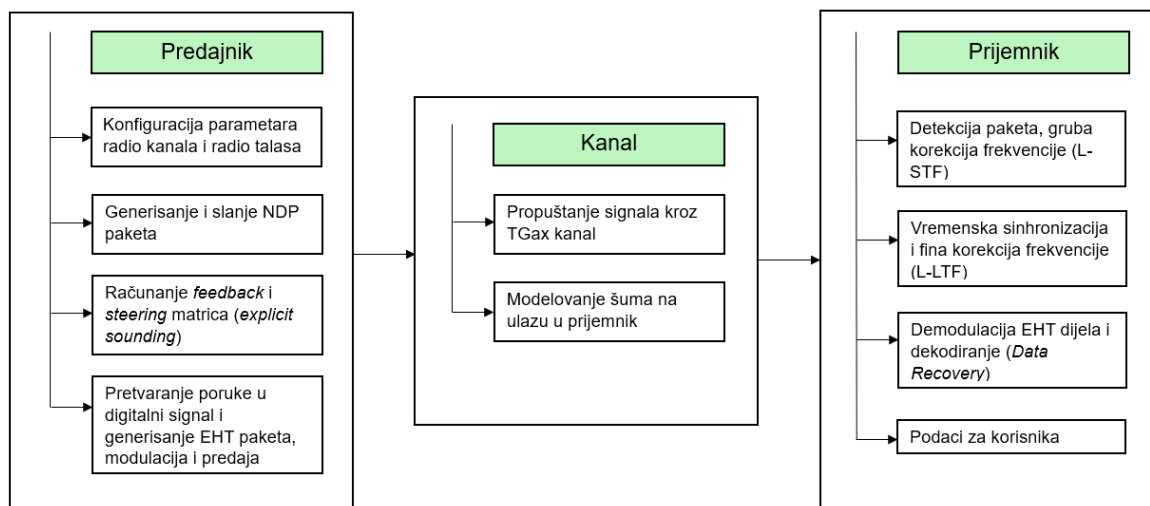
Dodatno, ako su kašnjenje i fazna razlika između tapova istog klastera minimalni, snage pojedinačnih tapova po klasteru mogu biti sumirane [45].

U simulaciji je korišten *indoor* rezidencijalni scenario opisan modelom B, čiji su parametri dati u tabeli 1. Simulirani broj tapova po klasteru je 9, što je za nijansu složenija verzija u odnosu na broj tapova od 5 (za prvi klaster) i 7 (za drugi klaster), što je definisano u [42].

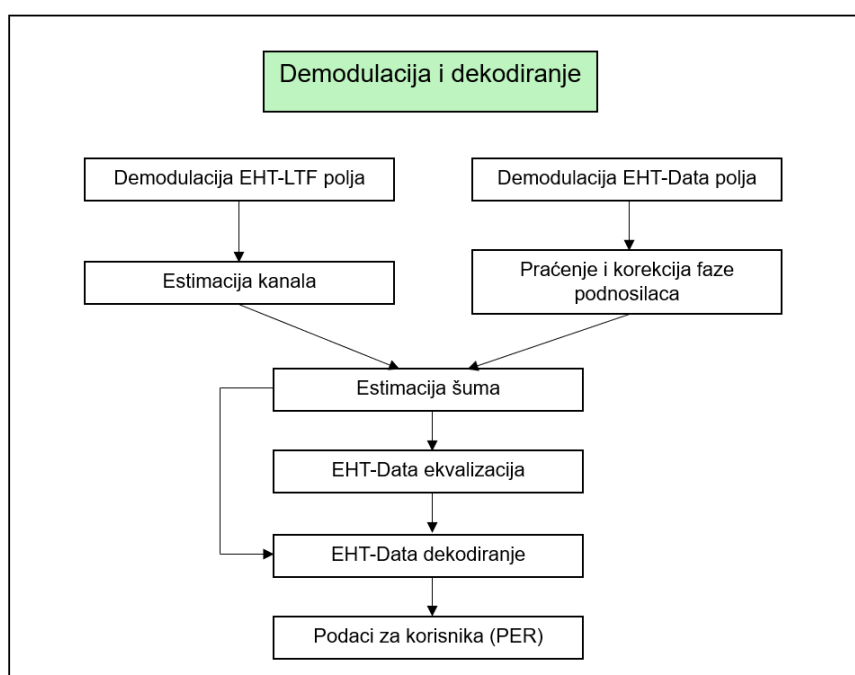
Tabela 4.1. Parametri modela kanala za *indoor* rezidencijalni scenario

RMS Delay Spread (ns)	Broj klastera	Broj tapova po klasteru	Propagacioni scenario	Model korišćenja
15	2	9	<i>Indoor</i> rezidencijalni	Unutar sobe, između soba

Na slici 4.2 principski je prikazan simulirani primo-predajni proces. Na prijemnoj strani se vrši konfiguracija parametara koji su prikazani u tabeli 4.1, a izračene snage su prilagođene evropskim standardima. Da bi se odredile potrebne *steering* matrice, prijemnik obezbjeđuje povratnu informaciju o stanju na kanalu na osnovu impulsnog odziva, i to za svaki podnosilac (eksplicitna *sounding* tehnika), kako bi se zračenje antena moglo podesiti na odgovarajući način za izabranu RU a u skladu sa karakteristikama kanala. Nakon postavljenih potrebnih parametara, slijedi generisanje podataka, pretvaranje u digitalni signal, generisanje EHT paketa i predaja istog. Paket se prenosi linijom veze koja je predstavljena TGax kanalom, a prije ulaza u prijemnik modelovan je i aditivni bijeli Gausov šum (AWGN - *additive white Gaussian noise*), gdje se definiše zadati SNR i to po svakom aktivnom podnosiocu. Na prijemnoj strani prvo je potrebno detektovati paket, odraditi grubu korekciju frekvencije na osnovu L-STF polja, zatim slijede vremenska sinhronizacija i fina korekcija frekvencije na osnovu L-LTF polja. Nakon toga vrši se demodulacija EHT-LTF polja, estimacija kanala i EHT *Data Recovery*, za šta je na slici 4.3 principski prikazan simulirani proces. Osim same demodulacije i dekodiranja, potrebno je odraditi i estimaciju kanala radi estimacije šuma, koja je potrebna u procesu ekvalizacije EHT podataka i njihovog dekodiranja.



Slika 4.2. Prinsipna šema simuliranog primo-predajnog procesa



Slika 4.3. Prinsipna šema procesa demodulacije i dekodiranja

U tabeli 4.2 predstavljeni su konfiguracioni parametri primijenjeni u simulaciji. Širina kanala je 80 MHz, a za kanalno kodiranje uzet je LDPC kod. To je linearni kod za ispravljanje grešaka koji je pogodan za primjenu u sistemima gdje se prenose veliki paketi preko kanala koji imaju visok nivo šuma i smetnji, kakav je slučaj sa radio kanalima. LDPC kodiranje dodatno poboljšava performanse u pogledu uklanjanja grešaka, a u Wi-Fi sistemima se već dugo

koristi, mada je tek od šeste generacije postao obavezan i to za 1024-QAM, pa je tako obavezan i za 1024- i 4096-QAM primjene u sedmoj generaciji Wi-Fi sistema.

Tabela 4.2. Parametri simulacije

Parametar	Vrijednost
Širina kanala	80 MHz
Kanalno kodiranje	LDPC (<i>low-density parity check</i>)
Delay profil	B (<i>indoor</i> rezidencijalni model)
Rastojanje između predajnika i prijemnika	3 m (LOS)
Broj prostornih strimova	1
Opseg SNR tačaka	30 ÷ 50 dB
Veličina MIMO sistema	1x1 ÷ 8x8
MCS šema	13 (4096-QAM sa 5/6 kodiranjem)
Dužina paketa (korisni podaci)	1000 B

4.2 Rezultati simulacije

Performanse sistema se tumače kroz PER (*packet error rate*) koji se određuje nakon EHT-Data dekodiranja za sve simulirane vrijednosti SNR-a na strani prijema. Za svaku SNR tačku generisano je po 1000 slučajnih paketa. Za svaki primljeni paket provjerava se da li je uspješno primljen, a ukupan broj pogrešno primljenih paketa se uvećava za 1 ako:

- Se ne detektuje L-STF polje, odnosno prvo polje PPDU-a,
- Ako je paket primljen izvan očekivanih opsega kašnjenja za dati kanal,
- Ako se nađe na makar 1 pogrešan bit u paketu.

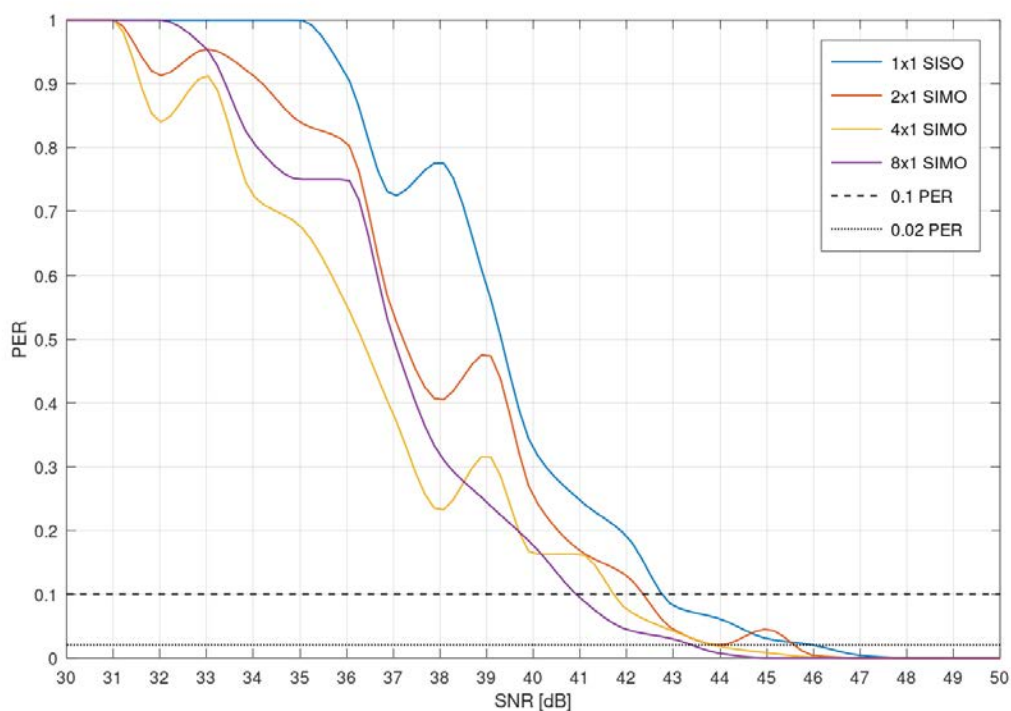
Na slici 4.4 možemo vidjeti kako povećanje broja predajnih antena utiče na performanse sistema, odnosno za koju vrijednost SNR-a na strani prijema se dobija zadovoljavajući PER. Slika 4.5 nam pokazuje kako povećanje broja prijemnih antena utiče na performanse i to za slučaj kada na predajnoj strani imamo 4 antene, dok nam slika 4.6 takođe

pokazuje kako povećanje broja prijemnih antena utiče na performanse, ali za slučaj kada na predajnoj strani imamo 8 antena. Za sve sisteme (osim za 1x1 SISO) korišćena je *beamforming* tehnika fokusiranja zračenja ka prijemniku.

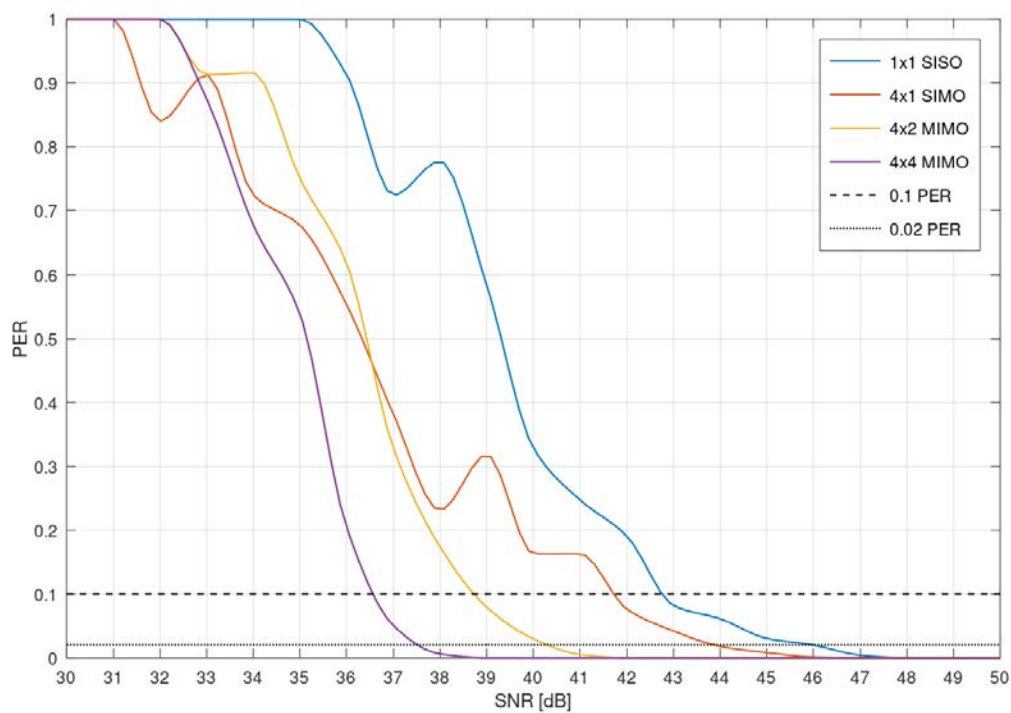
Na slikama 4.4, 4.5 i 4.6 možemo primijetiti da do PER vrijednosti od 0.1, SNR-PER karakteristika značajno varira, što je posledica toga da je vrijednost SNR-a na prijemnoj strani mnogo manja od one koja je potrebna za ispravnu demodulaciju i dekodiranje poslatog paketa. Osim toga, broj generisanih paketa za svaku SNR tačku je po 1000, a prelazak na sledeću tačku se vrši nakon 20 pogrešno primljenih paketa ili nakon 1000 primljenih i dekodiranih paketa, ukoliko je broj pogrešno primljenih paketa manji od 20. Prema tome, značajno manje potrebne vrijednosti SNR-a za ispravnu demodulaciju i dekodiranje i navedeno ograničenje u pogledu broja generisanih i prenetih paketa po svakoj SNR tački se manifestuje varijacijama PER-SNR karakteristike, što je posebno izraženo za vrijednosti PER-a koje su veće od 10%. Zbog toga će se za pouzdaniju estimaciju uzimati one SNR vrijednosti za koje je PER manji od 10%.

Sa slika 4.4, 4.5 i 4.6 dodatno možemo zaključiti sledeće:

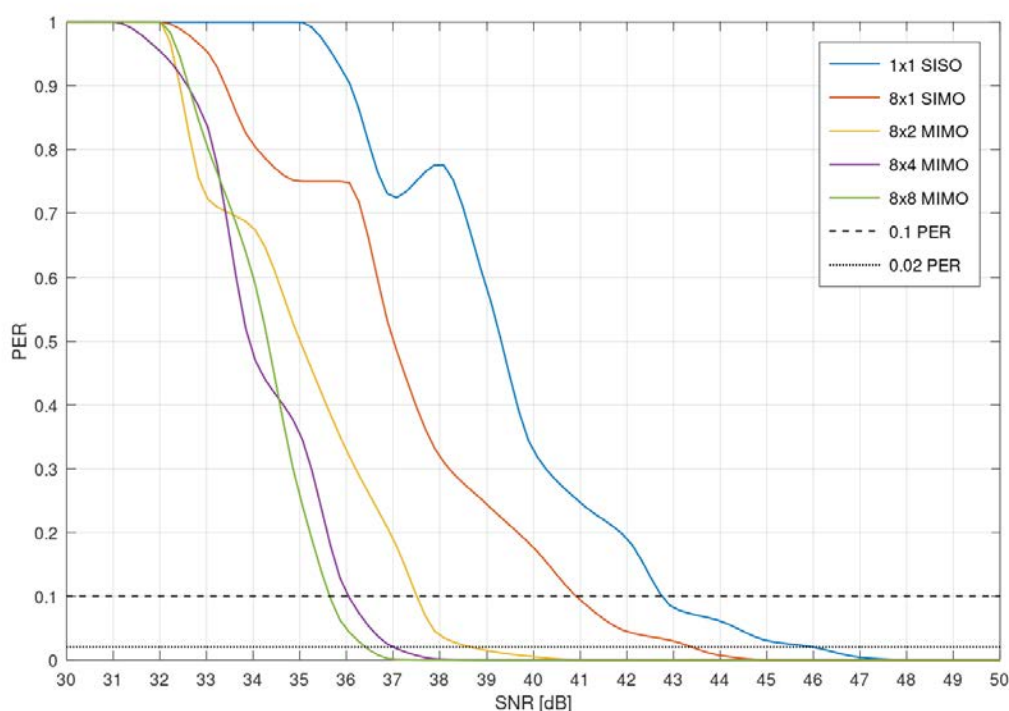
- Za 1 prijemnu antenu, potrebni SNR na prijemnoj strani kada na predajnoj strani imamo 1 antenu je ~ 46 dB (ukoliko se uzme da je zadovoljavajuća vrijednost PER-a 2%), dok za slučaj kada na predajnoj strani imamo 8 antena, potreban SNR je ~ 43.4 dB. To znači da povećavanje broja antena na predajnoj strani sa 1 na 8 dovodi do maksimalno 2.6 dB poboljšanja u pogledu zahtijevanog SNR-a.
- Za 4 predajne antene, potrebni SNR na prijemnoj strani koja ima 1 antenu je ~ 44 dB, dok je za prijemnu stranu sa 4 antene to ~ 37.5 dB. Za ovakav sistem i date parametre, povećanje broja prijemnih antena sa 1 na 2 i 4 na prijemnoj strani unosi 2.8 i 6.5 dB poboljšanja u pogledu SNR-a, respektivno.
- Za osam predajnih antena, potrebni SNR na prijemnoj strani koja ima jednu antenu je ~ 43.4 dB, a povećavanje broja prijemnih na 2 unosi poboljšanje potrebnog SNR-a od 4.6 dB. Povećanja na 4 i 8 prijemnih antena unose poboljšanja od 6.4 dB i 7 dB respektivno.
- Povećanje broja predajnih antena, zadržavajući jednu prijemnu nema značajnog uticaja u pogledu zahtijevanog SNR-a, te se može zaključiti da jedna prijemna antena nije dovoljna. Tek nakon povećanja i broja predajnih i broja prijemnih antena uočava se značajnije poboljšanje u pogledu zahtijevanog SNR-a.



Slika 4.4. PER karakteristika za različite vrijednosti SNR-a na strani prijema za sisteme sa promjenljivim brojem predajnih antena, broj prijernih antena = 1



Slika 4.5. PER karakteristika za različite vrijednosti SNR-a na strani prijema za sisteme sa promjenljivim brojem prijernih antena, broj predajnih antena = 4



Slika 4.6. PER karakteristika za različite vrijednosti SNR-a na strani prijema za sisteme sa promjenljivim brojem prijemnih antena, broj predajnih antena = 8

Ukoliko se u obzir uzmu podaci iz prakse prikazani u tabeli 3 koji oslikavaju kvalitet Wi-Fi konekcije, možemo uočiti da je SNR od 25 – 40 dB karakterisan dobrim kvalitetom konekcije, dok je sve preko 41 dB odličan kvalitet. Dodatno, ako se to uporedi sa podacima u pogledu zahtijevanog SNR-a za 4096-QAM modulaciju, gdje se može postići da zahtijevani odnos SNR bude čak ispod 40 dB (to je postignuto sa 4x4 MIMO, 8x2 MIMO, 8x4 MIMO i 8x8 MIMO sistemima), može se zaključiti da je 4096-QAM modulaciju moguće primijeniti u praksi, ali da je potreban dobar ili odličan kvalitet konekcije.

Dodatna poboljšanja u pogledu zahtijevanog SNR-a mogu biti ostvarena korišćenjem *dual-carrier modulation* (DCM) tehnike koja omogućava da se isti podaci modulišu na više različitih grupa podnosilaca [4]. Iako je DCM tehnika u prethodnom Wi-Fi standardu bila primjenjiva samo za MCS šeme 0, 1, 3 i 4, odnosno modulacione tehnike BPSK sa kodnim odnosom 1/2, QPSK sa kodnim odnosom 1/2, QPSK sa kodnim odnosom 3/4, i 16-QAM sa kodnim odnosom 1/2, respektivno, u [4] se navodi da DCM može biti primijenjena i kod modulacija višeg reda ukoliko se koristi multi-AP tehnika i HARQ.

U predlogu standarda navedeno je da je primjena 4096-QAM modulacije opcionalna, što je bila posljedica strogih zahtjeva u pogledu zahtijevanog SNR-a koje je moguće ostvariti u praksi, ali i relativno visoke računarske moći koja je potrebna za realizaciju iste, što ne zadovoljava veći dio korisničkih uređaja. Ipak, kao što je pokazano u [8] za slučaj kanala sa ravnim fadingom i u odrađenoj simulaciji za kanal koji odgovara rezidencijalnom scenariju, a koja je prikazana u ovom master radu, 4096-QAM modulacija se ipak može primijeniti u praksi kada AP i korisnički uređaji imaju više antena i kada je stanje na kanalu dobro, odnosno kada se može postići SNR od 36dB i više. Prema tome, kada su u pitanju *real-time* aplikacije (ali i sve aplikacije koje zahtijevaju veliku brzinu prenosa, brze odgovore koji su skoro u realnom vremenu itd.), ovo povećanje u pogledu brzine prenosa koje se ostvaruje primjenom ove modulacije definitivno može biti od značaja. Uzevši u obzir da Wi-Fi mreža može značajno doprinosti ukupnom kašnjenju u prenosu podataka kada se posmatra RTT (*round trip time*) [46], a da povećanje ostvarive brzine prenosa sa sobom povlači i manje kašnjenje, 4096-QAM modulaciju definitivno ne treba zanemariti kada mogu biti ispunjeni uslovi za njenu primjenu.

Tabela 4.3 Kvalitet Wi-Fi konekcije u praksi za različite SNR vrijednosti na prijemu

SNR	Kvalitet konekcije
10 – 15 dB	Loš
16 – 24 dB	Slab
25 – 40 dB	Dobar
41dB ili više	Odličan

Glava 5

Analiza performansi multi-link operacija u rezidencijalnom korisničkom scenariju

Princip funkcionisanja multi-link operacija, izmjene u arhitekturi, kao i potencijalne primjene su opisani u 3.2.4 dijelu ovog master rada. Navedeno je da su benefiti primjene ove funkcije mnogobrojni – od povećanja ukupne propusnosti, preko smanjenog kašnjenja, što je od velikog značaja za primjenu TSN i *real-time* aplikacija, ali se očekuje i da će multi-link operacije omogućiti brzo prebacivanje linkova, *load-balancing* itd. Kako se navodi u [3], visoka propusnost nije dovoljan uslov za podršku *real-time* saobraćaja, jer neki paketi mogu čekati jako puno vremena da se oslobodi link i da budu isporučeni, pa se osim visoke propusnosti u obzir moraju uzeti i QoS zahtjevi, kao i srednja kašnjenja paketa. U ovoj glavi prikazani su rezultati simulacija multi-link operacija i to u rezidencijalnom korisničkom scenariju. U prvom dijelu date su postavke simulacije – opisano je kako se odvija simulacija MLO, date su postavke kanala, prikazan je simulirani predajno-prijemni proces i dati su neki parametri simulacija. Poboljšanja u pogledu ukupne propusnosti su prikazana za 256-QAM, 1024-QAM i 4096-QAM, dato je poređenje sa SLO modom koji je bio primjenjivan u prethodnim generacijama, a dato je i poređenje ostvarive propusnosti sa 4096-QAM modulacijom i nižim redovima modulacija. Osim toga, prikazano je i kako MLO utiče na smanjenje srednjeg kašnjenja po paketu.

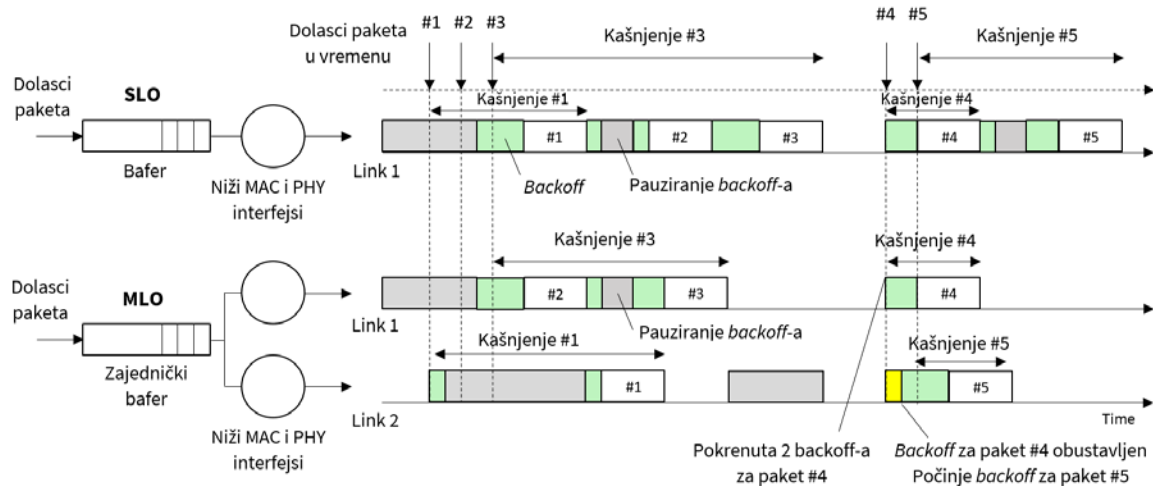
5.1 Opšte postavke simulacije

Ukupna poboljšanja propusnosti i manjeg kašnjenja koje pruža MLO su analizirana u *indoor* scenariju simuliranom u ns-3 simulatoru. To je *open-source* simulator zasnovan na C++ programskom jeziku. Softverska infrastruktura se sastoji od različitih modula čijim se kombinovanjem dobijaju različita simulaciona okruženja. Kao dio simulatora razvijen je i Wi-Fi modul u sklopu kojeg je definisan *WifiNetDevice* objekat koji predstavlja osnovu za simulaciju 802.11 mreža. Implementacija je modularna i sastoji se iz tri osnovna sloja:

- Fizički sloj, koji je zadužen za definiciju fizičkih karakteristika uređaja. Definišu se specifični djelovi PHY procesiranja, PPDU i modelovanje grešaka (greške se unose statistički, na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka).
- Niži MAC sloj, koji je zadužen za pristup kanalu kao i mehanizme prenosa koji uključuju RTS/CTS ili ACK.
- Viši MAC sloj, koji je više orjentisan na softverski dio arhitekture i u sklopu kojeg se dešinišu osnovni elementi - AP, STA (sa 802.11be standardom MLD) i STA u nezavisnom BSS-u (uređaji koji kreiraju *ad hoc* mreže).

U okviru poslednje verzije ns3 simulatora definisane su i osnovne 802.11be funkcionalnosti fizičkog nivoa - modelovan je *multi-link* element, kao i *multi-link* uređaji, čija je arhitektura prikazana na slikama 3.9 i 3.10.

Na osnovu primjera iz [47] na slici 5.1 možemo vidjeti nesinhronizovani model MLO prenosa koji je simuliran, kao i razliku u odnosu na SLO.



Slika 5.1. Razlika između SLO i MLO prenosa. Sivi slotovi označavaju da je link zauzet, zeleni slotovi označavaju da je u toku *backoff* procedura, dok žutom bojom označen slot predstavlja započetu pa obustavljenu *backoff* proceduru

Na osnovu MLO situacije sa slike 5.1 možemo zaključiti sledeće:

- Kada paket #1 dođe, link 1 je zauzet, dok je link 2 slobodan i paket #1 ide u bafer reda čekanja za link 2 i počinje *backoff* procedura. U trenutku dolaska paketa #2, oba linka su zauzeta, a prvi se oslobađa link 1, pa *backoff* procedura za paket #2 počinje na linku 1. Detektovanjem nekog drugog prenosa na linku 1, *backoff* procedura se pauzira, a uređaj nastavlja sa praćenjem zauzetosti kanala kako bi se nastavio *backoff* čim se kanal oslobodi i prenio paket, ukoliko *backoff* bude uspešno završen.
- U trenutku dolaska paketa #3, oba linka su zauzeta, a prvi slobodan je prvi link, gdje će početi *backoff* procedura za taj paket. Takođe možemo primijetiti da se *backoff* pauzira, što je vrlo vjerovatno posledica prenosa ACK paketa za paket #2, ali čim se detektuje slobodan link, *backoff* za paket #3 se nastavlja a nakon toga vrši se i sam prenos paketa.
- U trenutku dolaska paketa #4 oba linka su slobodna te u momentu počinje *backoff* procedura na oba linka. Međutim, nakon detekcije započetog *backoff*-a za isti paket na oba linka, *backoff* se obustavlja na jednom od ta dva linka i on postaje slobodan za *backoff* i prenos paketa #5, koji je u trenutku dolaska naišao na oba zauzeta linka (jer je u tom trenutku *backoff* procedura za paket #4 bila na oba linka aktivna).
- Poređenjem sa SLO implementacijom, možemo zaključiti da MLO implementacija može izazvati duže vrijeme čekanja odnosno kašnjenja za neke pakete, kao što je to

primjer za paket #1, ali ukupno kašnjenje u prenosu paketa je značajno manje, a propusnost veća.

Ns3 simulator se dominantno fokusira na MAC sloj, dok se na fizičkom nivou ne implementira kanal na način kako je to realizovano u Matlabu. U simulaciji je primijenjen *Hybrid Building Propagation Loss* model koji gubitke definiše u skladu sa ITU-R 1238 standardom. Gubici uslijed propagacije se definišu kao:

$$Path Loss = ITU - R 1238(a, b) + Internall Walls Loss (a, b), \quad (5.1)$$

gdje su a i b oznake za klase koje predstavljaju uređaje između kojih se ostvaruje komunikacija, a koji sadrže između ostalog i položaje tih uređaja.

Gubici prema ITU-R 1238 standardu se definišu kao:

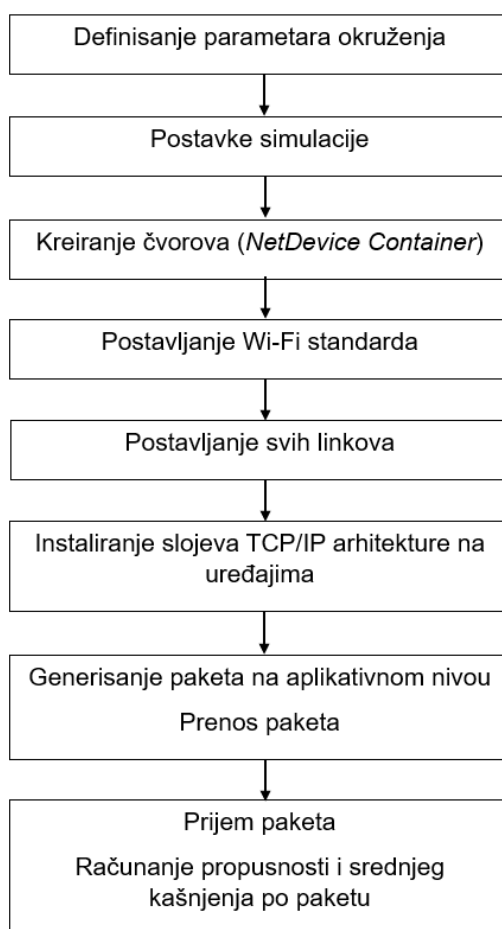
$$L_{total} = 20 \log f + N \log d + L_f(n) - C[dB] \quad (5.2)$$

gdje je:

- f - frekvencija na kojoj se vrši komunikacija izražena u MHz,
- N - koeficijent gubitaka snage koji zavisi od frekvencije i tipa okruženja, za rezidencijalni scenario i Wi-Fi radne frekvencije je 28,
- d - rastojanje izraženo u metrima između dva uređaja između kojih se ostvaruje komunikacija, a koje se dobija na osnovu a i b ,
- $L_f(n)$ - faktor gubitaka usled penetracije elektromagnetnog talasa kroz spratove. Za rezidencijalni scenario $L_f(n) = 4n$, gdje je n broj spratova između uređaja koji ostvaruju komunikaciju, a koji se opet dobija na osnovu a i b , ali i definisanih parametara okruženja, pošto se prilikom integracije *Hybrid Building Propagation* modula definiše zgrada, njen broj prostorija, dimenzije, itd.
- $C[dB]$ - konstanta koja zavisi od primjene, za rezidencijalni scenario to je 28dB.

Ns3 dalje odlučuje da li je paket uspješno primljen ili se desila greška na osnovu SNR-a (plus interferencije do koje može doći na primjer uslijed kolizije paketa), odnosno SINR-a i to na osnovu *error rate* modela grešaka (*error rate* modela) i tablica. Modeli grešaka su zasnovani na *end-to-end* simulacionim tablicama koje opisuju SNR-PER karakteristiku za AWGN kanale. Pošto je nemoguće napraviti tablicu za sve veličine paketa, primijenjene su preporuke 802.11ax radne grupe za estimaciju PER-a za željenu veličinu paketa. U konkretnoj simulaciji primijenjen je model grešaka zasnovan na tabeli (*table based error model*), koji je definisan na osnovu rezultata iz Matlab WLAN Toolbox alata.

Na slici 5.2 je prikazan princip simulacije primo-predajnog procesa. On se sastoji iz definisanja parametara propagacionog okruženja, koji su ovdje postavljeni pomoću *Hybrid Building Propagation* modela. Zatim je potrebno postaviti parametre simulacije poput širine kanala, definisati frekvencijske opsege za linkove, dužinu paketa... Opšti parametri simulacija su prikazani u tabeli 5.1. Nakon toga se kreiraju čvorovi pomoću *NetDevice Container*-a, postavlja se Wi-Fi standard, kao i svi linkovi i instaliraju slojevi TCP/IP arhitekture na pojedinačnim uređajima kako bi se kasnije omogućio cio proces komunikacije. Nakon toga slijedi generisanje paketa na aplikacionom nivou, prenos paketa, prijem, definisanje greške na način kako je to opisano iznad i računanje ukupne propusnosti. Dalje se posebnim *sniffer*-ima vrši dodatna analiza u cilju pronalaska srednjeg kašnjenja po paketu.



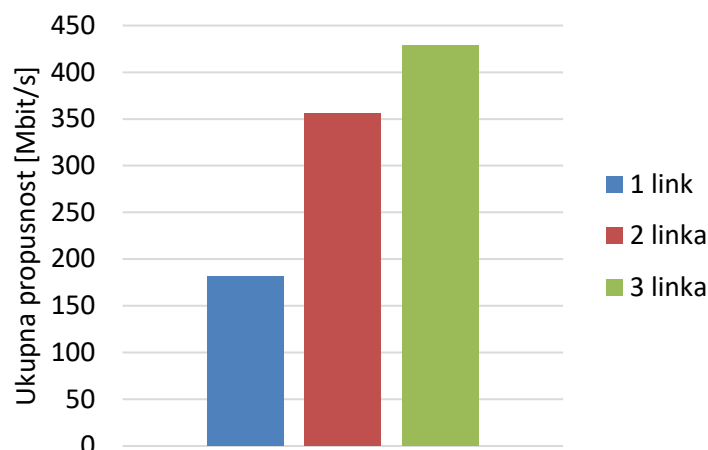
Slika 5.2. Simulirani primo-predajni process

Tabela 5.1. Opšti parametri simulacija

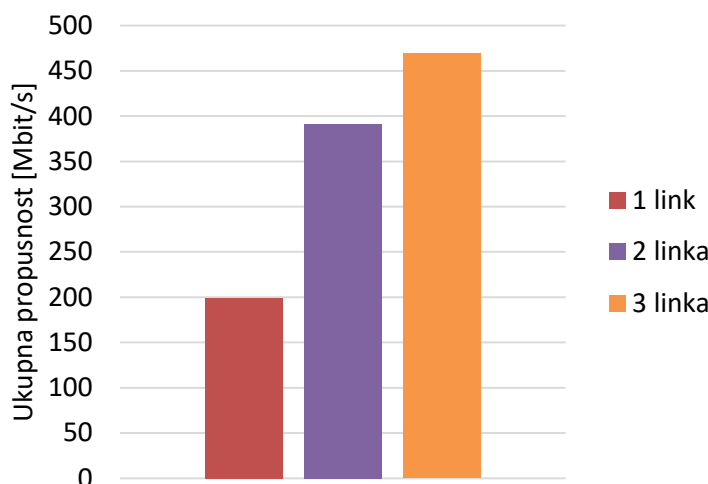
Parametar	Vrijednost
AP/STA Tx snaga	16 dBm
AP/STA nivo šuma	7 dB
CCA prag osjetljivosti	-82 dBm
Dužina paketa (korisni podaci)	1500 B
Zaštitni (<i>guard</i>) interval	800 ns
Trajanje simulacije	10 s

5.2 Poboljšanja u pogledu ukupne propusnosti

Cilj prvog simuliranog scenarija je bio prilagoditi parametre prosječnom korisničkom scenariju u kojem krajnji uređaj nema velike računarske moći i dovoljno snage za modulacije višeg nivoa poput 1024-QAM i 4096-QAM i/ili neke napredne algoritme i ispitati koliko poboljšanje se tu očekuje. Definisana su tri linka i to po jedan na svim radnim opsezima: 2.4 GHz, 5 GHz i 6 GHz (na tržištu se već uveliko nalaze uređaji koji podržavaju rad na ovom opsegu), a širina kanala je ograničena na 40 MHz kako bi se isti mogao primijeniti i na 2.4 GHz. Primijenjene su fiksne MCS vrijednosti odnosno modulacione šeme i to 256-QAM sa kodnim odnosom 3/4 (MCS 8) i 256-QAM sa kodnim odnosom 5/6 (MCS 9). MLD uređaj se u oba slučaja nalazi u oblasti pokrivanja za datu MCS. Razmatra se samo *downlink* saobraćaj i nema prioritizacije saobraćaja. Kao što je već navedeno, BSS je locirana u rezidencijalnom propagacionom okruženju i ne postoje prepreke između AP i MLD uređaja, kao ni drugi izvori interferencija jer je cilj bio ispitati očekivano poboljšanje koje se ostvaruje primjenom MLO-a. Slike 5.3 i 5.4 prikazuju ukupnu propusnost za MCS šeme 8 i 9, respektivno, u Wi-Fi mreži sedme generacije. Obje slike predstavljaju rezultate za SLO (jedan link aktivan) i MLO (dva i tri linka aktivna) modove funkcionisanja.



Slika 5.3. Ukupna propusnost za MCS 8, širinu kanala 40 MHz po linku i različit broj linkova (1, 2 i 3)



Slika 5.4 Ukupna propusnost za MCS 9, širinu kanala 40 MHz po linku i različit broj linkova (1, 2 i 3)

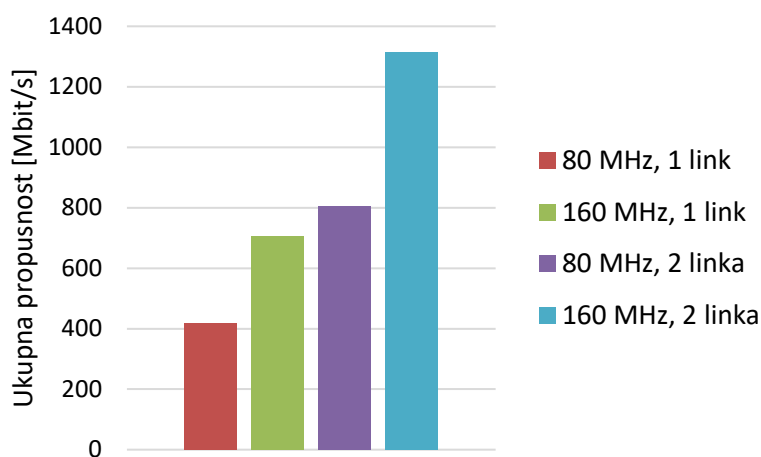
Na osnovu slika 5.3 i 5.4, kao i rezultata prikazanih u [48], može se zaključiti sledeće:

- Ukupna maksimalna ostvariva propusnost kada se koristi MCS šema 8 za SLO implementaciju ovdje je 180 Mbit/s, dok se za MLO implementaciju sa dva linka može uočiti propusnost od 355 Mbit/s. Ovo predstavlja poboljšanje od 97.22%, što je jako blizu teoretskog povećanja od 100% koje je bilo očekivano. Kada je u pitanju MLO sa tri linka, poboljšanje koje se može primijetiti je 136% (propusnost se povećala sa 180

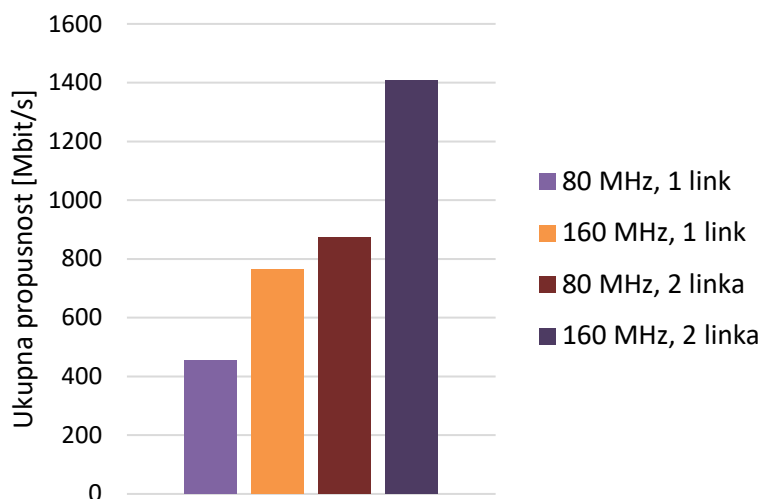
Mbit/s na 425 Mbit/s), dok je povećanje u poređenju sa MLO implementacijom sa tri linka svega 20.5%.

- Kada je u pitanju maksimalna ukupna propusnost ostvariva u ovoj mreži za primijenjenu MCS šemu 9, može se primijetiti poboljšanje od skoro 100% kada se uporedi SLO implementacija sa jednim linkom i MLO implementacija sa dva linka, odnosno maksimalna propusnost se povećala sa 198.8 Mb/s na 391.6 Mb/s [48]. Sa druge strane, uvođenje trećeg linka donosi poboljšanje od 140% u poređenju sa SLO implementacijom, odnosno maksimalna propusnost se povećala na 474 Mb/s, ali to je svega oko 20% poboljšanje u odnosu na slučaj kada su aktivna dva linka [48].

Dalje su modelovani SLO i MLO mod sa 2 linka i to za MCS šeme 10 i 11. Kod SLO moda, modelovan je link na 5 GHz opsegu, dok je kod MLO moda prvi link na 5 GHz opsegu a drugi na 6 GHz. Na slici 5.5 prikazana je maksimalna ostvariva propusnost u mreži kada je primijenjena MCS šema 10, odnosno za 1024-QAM modulaciju sa 3/4 kodnom brzinom, i to za slučajeve sa širinama kanala od po 80 i 160 MHz po linku. Slika 5.6 takođe predstavlja propusnost ostvarivu za date SLO i MLO implementacije ali za slučaj primijenjene MCS šeme 11, odnosno za 1024-QAM modulaciju sa 5/6 kodnom brzinom i širinama kanala od po 80 i 160 MHz po linku.



Slika 5.5. Ukupna propusnost za MCS 10 i različite širine kanala (80 i 160 MHz) po linku, kao i različiti broj linkova (1 i 2)



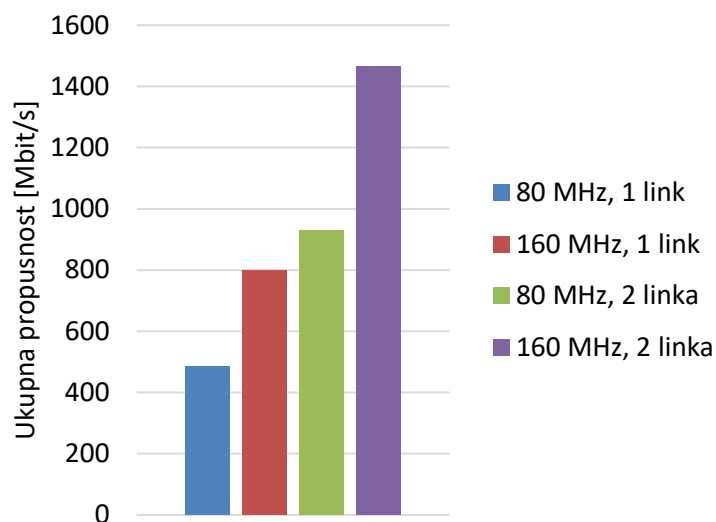
Slika 5.6. Ukupna propusnost za MCS 11 i različite širine kanala (80 i 160 MHz) po linku, kao i različiti broj linkova (1 i 2)

Na osnovu slika 5.5 i 5.6 može se zaključiti sledeće:

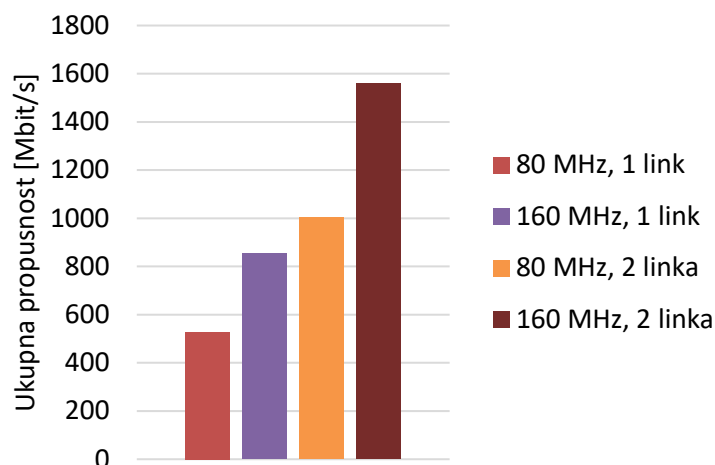
- Za MCS vrijednost 10, implementacija MLO sa 2 linka donosi poboljšanje od 92.82% u odnosu na SLO mod za kanale od 80 MHz (propusnost se povećala sa 418 Mbit/s na 806 Mbit/s), odnosno 86.26% za kanale od 160 MHz (propusnost se povećala sa 704 Mbit/s na 1313 Mbit/s). Za MCS vrijednost 11, poređenjem SLO i MLO moda sa 2 linka uočava se poboljšanje od 92.07%, odnosno povećanje propusnosti sa 455 Mbit/s na 874 Mbit/s za kanale od 80 MHz. Za kanale od 160 MHz imamo povećanje od 84.03%, odnosno povećanje propusnosti sa 764 Mbit/s na 1406 Mbit/s. Ovo poboljšanje je nešto manje u odnosu na poboljšanje koje je ostvareno u simulaciji sa parametrima prikazanim u tabeli 4, gdje je uvođenjem drugog linka poboljšanje u pogledu ukupne propusnosti bilo 97%. Dakle, pokazuje se da se uvođenjem drugog linka ne ostvaruje teoretsko uvećavanje ukupne propusnosti od 100% kada se koristi kanal iste širine na drugom linku, već se te vrijednosti umanjuju kako se uvećavaju redovi modulacionih tehnika i širine kanala.
- Za MCS vrijednost 10, korišćenjem 2 linka sa kanalima od po 80 MHz ostvaruje se ukupna propusnost od 806 Mbit/s, dok se korišćenjem jednog linka sa kanalom od 160 MHz ostvaruje propusnost od 704 Mbit/s. Dakle, korišćenje istog ukupnog opsega od 160 MHz, MLO implementacija pokazuje 14.48% poboljšanja u odnosu na SLO implementaciju. Za MCS vrijednost 11 i isti primjer korišćenja istog ukupnog opsega od 160 MHz to poboljšanje je slično, odnosno ukupna propusnost pri MLO

implementaciji je 874 Mbit/s, dok je ukupna propusnost pri SLO imlementaciji 764 Mbit/s, što predstavlja 14.39% poboljšanja. Prema tome, pokazuje se da za isti ukupni propusni opseg, MLO mod sa dva linka ima nešto bolje performanse u odnosu na SLO mod.

Rezultati ostvarene propusnosti SLO i MLO moda sa 2 linka za MCS šeme 12 i 13 prikazani su na slikama 5.7 i 5.8, respektivno. MCS šema 12 predstavlja 4096-QAM modulaciju sa 3/4 kodnim odnosom, a odrađene su simulacije za različite širine kanala – 80 i 160 MHz po linku, slično kao u prethodnom primjeru. MCS šema 13 predstavlja 4096-QAM modulaciju sa 5/6 kodnim odnosom i takođe su odrađene simulacije za širine kanala od 80 i 160 MHz po linku. Isto kao i u prethodnim primjerima, uređaji se nalaze u oblasti pokrivanja za date MCS šeme. Ovdje je, kao što je to prikazano u glavi 4, potreban jako dobar kvalitet kanala, ali to je postignuto prilagođavanjem rastojanja da odgovara oblasti pokrivanja za ove dvije modulacione šeme, kako bi se testirala ukupna ostvariva propusnost i kako bi se uporedile performanse u SLO i MLO modovima, ali i poboljšanja koja se dobijaju implementacijom 4096-QAM.



Slika 5.7. Ukupna propusnost za MCS 12 i različite širine kanala (80 i 160 MHz) po linku, kao i različiti broj linkova (1 i 2)



Slika 5.8. Ukupna propusnost za MCS 11 i različite širine kanala (80 i 160 MHz) po linku, kao i različiti broj linkova (1 i 2)

Sa slika 5.7 i 5.8 može se zaključiti sledeće:

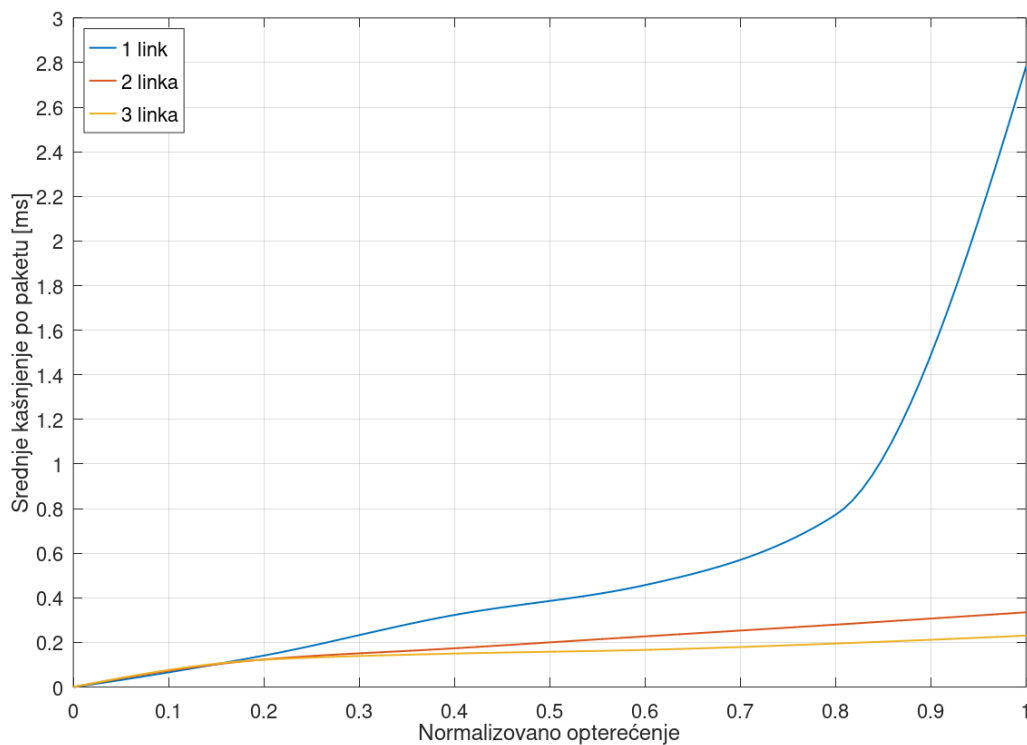
- Za MCS šemu 12 i širinu kanala od 80 MHz po linku, uvođenjem drugog linka ostvaruje se 91.11% poboljšanje propusnosti (propusnost se povećala sa 485 Mbit/s na 927 Mbit/s), dok se za širinu kanala od 160 MHz po linku uvođenjem drugog linka ostvaruje nešto manje poboljšanje i to 83.68% (propusnost se povećala sa 797 Mbit/s na 1464 Mbit/s). Za MCS šemu 13 i širinu kanala od 80 MHz po linku, MLO mod u pogledu propusnosti ostvaruje 89.77% poboljšanja (imamo povećanje propusnosti sa 528 Mbit/s na 1002 Mbit/s), dok je za širinu kanala od 160 MHz po linku poboljšanje 82.25% (propusnost se povećala sa 854 Mbit/s na 1559 Mbit/s). Dakle, slično kao i u prethodnim simulacijama, može se zaključiti da se ne ostvaruje teoretsko povećanje propusnosti od 100% već to opada sa povećavanjem redova modulacionih šema i širina kanala.
- Osim toga, slično kao u primjerima sa MCS šemama 10 i 11, uočava se da se nešto veća propusnost ostvaruje korišćenjem MLO moda sa dva linka sa kanalima od po 80 MHz umjesto SLO moda i kanala od 160 MHz. Za MCS šemu 12 to poboljšanje je 16.31% dok je za MCS šemu 13 to poboljšanje 17.33%, što je nešto veće poboljšanje u odnosu na analogna poboljšanja ostvarena za MCS šeme 10 i 11.
- Dalje, ako se uporede propusnosti u SLO modovima koje su ostvarene sa MCS šemom 11 i MCS šemom 13, za kanale od 80 MHz to poboljšanje iznosi 16.04% (propusnost se povećala sa 455 Mbit/s na 528 Mbit/s), odnosno za kanale od 160 MHz to poboljšanje

je 11.78% (povećanje propusnosti sa 764 Mbit/s na 854 Mbit/s). Prema tome, može se zaključiti da se ne ostvaruje teoretsko povećanje propusnosti od 20%, već je to povećanje nešto manje.

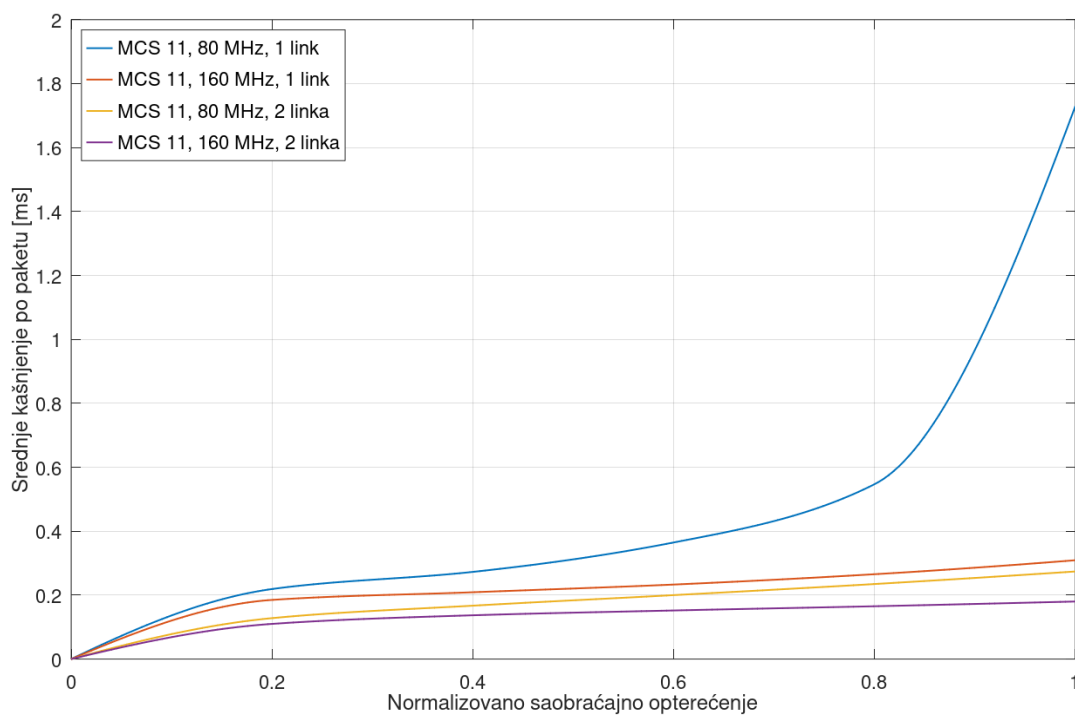
5.3 Poboljšanja u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu

Kada je u pitanju srednje kašnjenje po paketu, rezultati su prikazani za MCS šeme 9 i 11. Za predstavljanje poboljšanja performansi u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu, opterećenje je normalizovano prema maksimalnoj propusnosti koja se može ostvariti za implementaciju sa jednim linkom. Naime, za svako opterećenje koje je veće od toga, u SLO modu će srednje kašnjenje po paketu biti reda sekundi, a velika je vjerovatnoća i da se dio paketa izgubi odnosno odbaci uslijed popunjavanja kapaciteta bafera. Prema tome, radi fer poređenja SLO i MLO implementacija, maksimalno opterećenje je podešeno prema maksimalnoj propusnosti kod SLO implementacije, kako taj link ne bi postao usko grlo (*bottleneck* link). Sa slike 5.4 možemo vidjeti da je maksimalno saobraćajno opterećenje koje može da podrži SLO mod u ovakvoj realizaciji ~200 Mbit/s, te je ta vrijednost uzeta za ekvivalentno opterećenje 1, što je ujedno i maksimalno opterećenje prikazano na slici 5.9. Opterećenje od 100 Mbit/s bi bilo analogno normalizovanom opterećenju od 0.5, dok bi opterećenje od 180 Mbit/s bilo analogno normalizovanom opterećenju od 0.9.

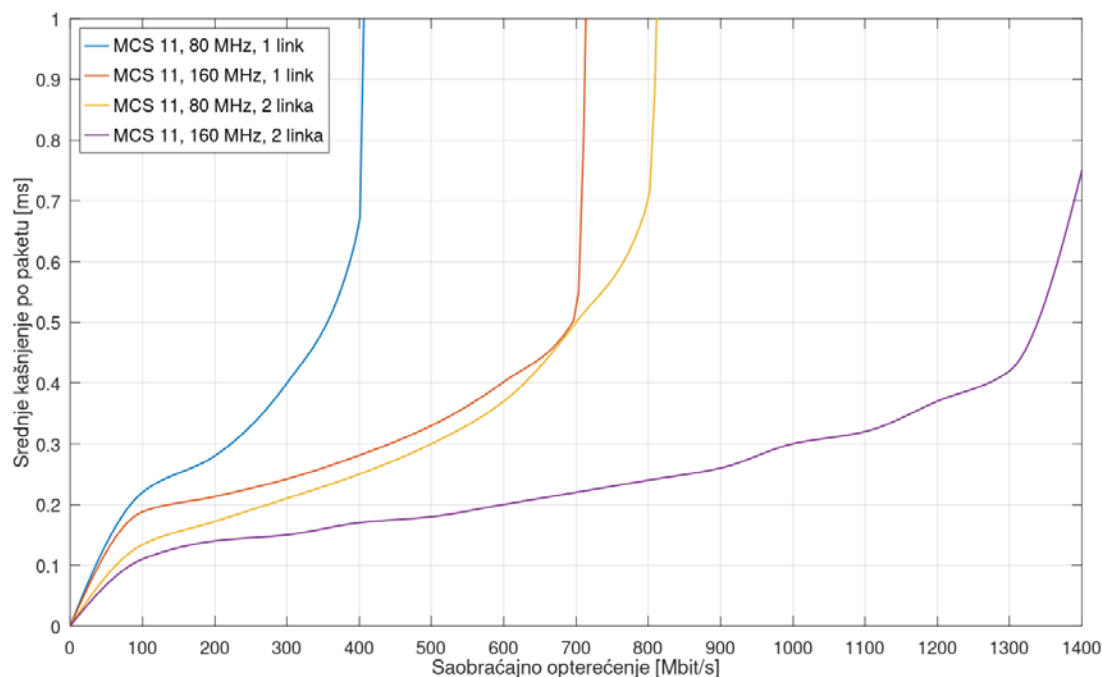
Maksimalno saobraćajno opterećenje na slici 5.10 je normalizovano u skladu sa maksimalnom ostvarivom propusnošću za MCS šemu 11, SLO mod i kanal od 80 MHz, odnosno saobraćajno opterećenje od 455 Mbit/s je ekvivalentno normalizovanom opterećenju 1. Na slici 5.11 je prikazano srednje kašnjenje po paketu u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja bez normalizacije. Tu je izvršeno prilagođenje grafika po osi koja prikazuje srednje kašnjenje, kako bi poboljšanja od interesa bila uočljivija, jer približavanjem maksimalnoj propusnosti za dati slučaj kašnjenje jako brzo raste, a nakon te maksimalne propusnosti baferi se kreću puniti i dio paketa će biti odbačen, pa te vrijednosti kašnjenja primljenih paketa svakako ne bi bile validne za poređenje.



Slika 5.9. Srednje kašnjenje po paketu u zavisnosti od normalizovanog opterećenja za MCS 9 i širinu kanala od 40 MHz i različit broj linkova (1, 2 i 3)



Slika 5.10. Srednje kašnjenje po paketu u zavisnosti od normalizovanog opterećenja za MCS 11 i različite širine kanala (80 i 160 MHz) po linku i za različiti broj linkova (1 i 2)



Slika 5.11. Srednje kašnjenje po paketu u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja za MCS 11 i različite širine kanala (80 i 160 MHz) po linku i za različit broj linkova (1 i 2)

Sa slika 5.9, 5.10 i 5.11 može se zaključiti sledeće:

- Kada je u pitanju srednje kašnjenje po paketu za MCS šemu 9 (slika 5.9), može se primijetiti da je ostvareno značajno smanjenje kašnjenja u MLO realizacijama. Tako na primjer, za nivo normalizovanog opterećenja od oko 0.9 (odnosno 180 Mb/s), MLO sa 2 linka donosi 5 puta manje srednje kašnjenje po paketu u odnosu na SLO implementaciju [48]. Može se primijetiti i da treći link donosi određeno poboljšanje u pogledu srednjeg kašnjenja u odnosu na implementaciju sa dva linka. Za isti navedeni primjer opterećenja od 0.9, poboljšanje u pogledu kašnjenja pri MLO realizaciji sa tri linka je oko 33.4% u odnosu na realizaciju sa dva linka (sa 0.3 ms na 0.2 ms) [48]. Uzevši u obzir da su rezultati prikazani u skladu sa maksimalnim propusnošću koju može ostvariti SLO mod, ne može se napraviti značajnija analiza za poređenje MLO modova od 2 i 3 linka, jer će u tom slučaju smanjenje kašnjenja postati uočljivije za veće vrijednosti saobraćajnog opterećenja, koje se približavaju maksimalnoj propusnosti za MLO mod sa 2 linka [48].
- Kada je u pitanju realizacija sa MCS šemom 11 i kanalima od 80 MHz, MLO mod donosi značajno poboljšanje u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu, što posebno dolazi do izražaja za veće vrijednosti normalizovanog saobraćajnog opterećenja (iznad

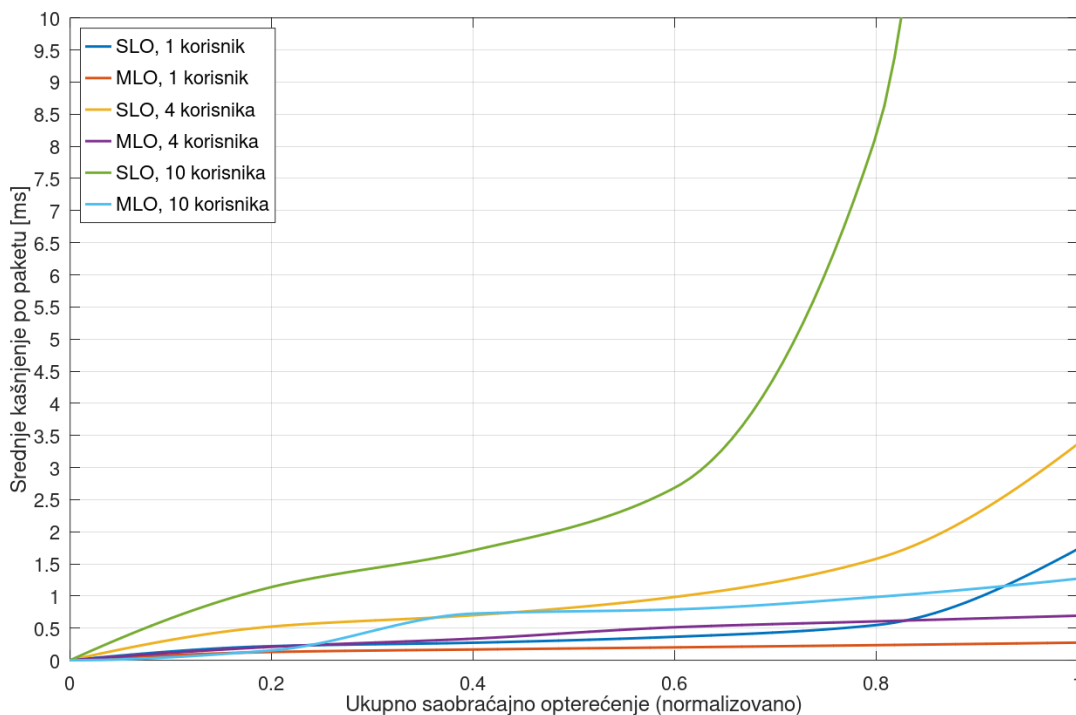
0.6). Pa tako, za normalizovano saobraćajno opterećenje od oko 0.9 (što je ekvivalentno opterećenju od ~410 Mbit/s), možemo primijetiti da je kašnjenje u MLO modu ~0.3 ms, dok je kašnjenje u SLO modu ~1 ms, što predstavlja oko 70% poboljšanja, odnosno kašnjenje je smanjeno nešto više od 3 puta.

- Sa slike 5.11 se vidi da je srednje kašnjenje po paketu za MLO mod sa dva linka i kanalima od po 80 MHz nešto manje u odnosu na kašnjenje pri SLO modu i kanalu od 160 MHz, ali razlika nije izražena sve do saobraćajnog opterećenja od oko 700 Mbit/s. Tada SLO mod sa kanalom od 160 MHz postaje usko grlo i razlika između navedena dva moda je izražena sve do 800 Mbit/s kada i MLO mod sa dva linka i kanalima od po 80 MHz na svakom linku postaje usko grlo.

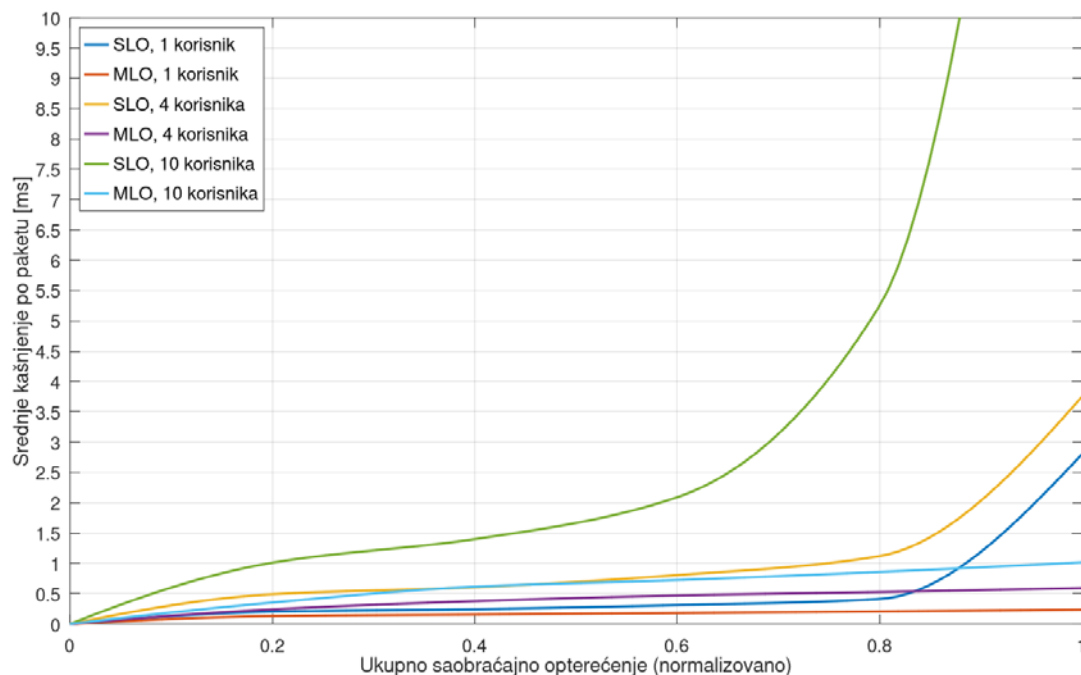
Rezultati prikazani na slikama 5.9, 5.10 i 5.11 su simulirani za slučaj kada se cijela dostupna propusnost stavlja na raspolaganje jednom uređaju, što je u Wi-Fi sistemima rijedak slučaj. Ipak, ovaj scenario je razmatran jer oslikava poboljšanja koja se ostvaruju kada se propusnost reda nekoliko stotina Mbit/s, ili veća, stavi na raspolaganje jednom uređaju, što će sigurno biti slučaj u Wi-Fi 7 sistemima, jer će osim MLO moda moći da se primijeni brojne druge tehnike koje povećavaju ukupnu propusnost (poput prostornog multipleksiranja do 16 prostornih strimova, 4096-QAM modulacije itd.) čime se pojedinačnim uređajima na raspolaganje može staviti veća brzine prenosa, čak i u mrežama sa velikim brojem korisnika.

Na slikama 5.12 i 5.13 prikazana su srednja kašnjenja po paketu za različit broj korisnika u mreži. Uz određene modifikacije, modelovan je simulacioni scenario iz reference [42] za slučajeve sa 1, 4 i 10 aktivnih korisnika u mreži. Primijenjena je MCS šema 11, a realizovani su SLO i MLO mod sa dva linka i kanalima od 80 i 160 MHz po linku, pri čemu na slici 5.12 su prikazani rezultati za kanale od 80 MHz, a na slici 5.13 za kanale od 160 MHz. Kao tehnika višestrukog pristupa, primijenjena je OFDMA tehnika. Položaj postavljenih uređaja je fiksna i odabran slučajno, u skladu sa oblašću pokrivanja AP-a za datu MCS šemu a unutar definisane prostorije. Propagacioni scenario je rezidencijalni, kao i u prethodnim primjerima. Na slici 5.12, saobraćajno opterećenje je normalizovano prema maksimalnoj propusnosti za SLO mod i kanal od 80 MHz, odnosno ukupno normalizovano saobraćajno opterećenje od 1 je ekvivalentno ukupnom saobraćajnom opterećenju u mreži od 455 Mbit/s. Za sliku 5.13, saobraćajno opterećenje je normalizovano prema maksimalnoj propusnosti za SLO mod i kanal od 160 MHz, što je 764 Mbit/s. Za slučajeve sa 4 i 10 korisnika, svaki korisnik je generisao isto opterećenje. Tako na primjer, za ukupno saobraćajno opterećenje od 400 Mbit/s i 4

korisnika, svaki korisnik je generisao po 100 Mbit/s saobraćaja, odnosno za slučaj sa 10 korisnika, svaki je generisao po 40 Mbit/s saobraćaja. Iako je u praksi situacija nešto drugačija i različite aplikacije zahtijevaju različite brzine prenosa, a samim tim korisnici generišu različitu količinu saobraćajnog opterećenja, ovaj primjer je uzet da bi se jasno uočila poboljšanja koja donosi MLO u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu kada je raspoloživa propusnost u mreži podijeljena na više korisnika istovremeno.



Slika 5.12. Srednje kašnjenje po paketu u zavisnosti od normalizovanog ukupnog saobraćajnog opterećenja za različiti broj korisnika u mreži (80 MHz kanali)



Slika 5.13. Srednje kašnjenje po paketu u zavisnosti od normalizovanog ukupnog saobraćajnog opterećenja za različiti broj korisnika u mreži (160 MHz kanali)

Na osnovu slika 5.12 i 5.13 možemo zaključiti sledeće:

- Ako posmatramo rezultate za SLO modove, možemo vidjeti da kako se povećava broj korisnika i raste ukupno saobraćajno opterećenje, povećava se i srednje kašnjenje po paketu, pri čemu je ono najveće za slučaj sa 10 korisnika. Može se primijetiti i da sa porastom broja korisnika rastu i poboljšanja u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu koja se ostvaruju prilikom MLO realizacija.
- Dalje se može primijetiti da za slučaj sa 10 korisnika kašnjenje po paketu naglo raste i prije maksimalne ostvarive propusnosti, što je indikacija da se stvorio efekat uskog grla već za vrijednost normalizovanog opterećenja nešto malo iznad 0.8 za slučaj na slici 5.12, odnosno malo manje od 0.9 normalizovanog opterećenja za slučaj na slici 5.13. To znači da se osim većeg kašnjenja paketa koje se može primijetiti i maksimalna propusnost ostvariva u mreži smanjuje za 10-20%, kada je aktivno 10 korisnika. Ako se posmatra realizaciju sa 10 korisnika u MLO modu može se primijetiti da je poboljšanje koje se ostvaruje u odnosu na SLO sa 10 korisnika značajno čak i za manja saobraćajna opterećenja. Pa tako, za normalizovano saobraćajno opterećenje od 0.5 i realizaciju sa kanalima od 80 MHz, kod MLO moda imamo 2.66 puta manje kašnjenje u odnosu na SLO mod (kašnjenje se smanjuje sa 2 ms na 0.75 ms), dok je za isto

normalizovano saobraćajno opterećenje od 0.5 pri realizaciji sa kanalima od 160 MHz ostvareno 3.5 puta manje kašnjenje (kašnjenje se smanjilo sa 1.75 ms na 0.5 ms). Za veća saobraćajna opterećenja ta poboljšanja u pogledu srednjeg kašnjenja po paketu su i veća. Za normalizovano saobraćajno opterećenje od 0.8 ostvaruje se 8 puta manje kašnjenje kod MLO moda za realizaciju sa kanalima od 80 MHz, odnosno 6.5 puta manje kašnjenje za realizaciju sa kanalima od 160 MHz.

Glava 6

Zaključak

Ekspanzija Wi-Fi mreža dominantno je posledica lakoće postavljanja, rada u nelicenciranom dijelu frekvencijskog spektra, ali i stalnih napora IEEE organizacije i Wi-Fi alijanse koji uz snažnu podršku industrije obezbjeđuju da standard isprati nadolazeće zahtjeve korisnika. Wi-Fi sertifikovani čipovi se nalaze u svim pametnim telefonima, računarima, u velikom broju pametnih IoT uređaja, ali i u mnoštvu drugih komunikacionih uređaja. U ovom radu predstavljene su glavne tehničke karakteristike fizičkog i MAC nivoa prvih šest Wi-Fi generacija, a zatim i očekivana tehnička rješenja sedme generacije ovih mreža, koja bi trebalo da bude u potpunosti standardizovana tokom 2024. godine.

Od najznačajnijih noviteta u Wi-Fi 7 standardu izdvajaju se širina kanala do 320 MHz, povećan red modulacije na 4096-QAM, zatim 16x16 MIMO sistemi, ali i primjena HARQ-a u Wi-Fi mrežama. Ipak, dva potpuno nova rješenja su zajednički rad više pristupnih tačaka odnosno multi-AP koordinacija i istovremeno funkcionisanje na više opsega, odnosno multi-link operacije. Date su osnovne karakteristike predloženih poboljšanja, sa akcentom na multi-link operacije, za koje se očekuje da će biti jedna od osnovnih funkcija koja treba da omogući ekstremno visoke brzine prenosa i time opravda drugi naziv Wi-Fi 7 standarda – EHT (*extremely high throughput*).

Kako se o primjeni 4096-QAM modulacije diskutovalo zbog strogih EVM zahtjeva, u radu je pokazano je da se isti mogu ostvariti korišćenjem *beamforming* tehnike. U ovom radu je ispitano kako broj antena na predajnoj i prijemnoj strani i *beamforming* utiču na zahtijevani odnos signal/šum na strani prijema u rezidencijalnom korisničkom scenariju. Dobijeni rezultati su pokazali da se ovaj red modulacije može primijeniti u rezidencijalnom korisničkom

scenariju kada je stanje na kanalu dobro i da se sa odgovarajućim redom MIMO sistema i *beamforming*-om zahtijevani odnos signal/šum na strani prijema može spustiti ispod 40 dB, što su visoke, ali ostvarive vrijednosti. Uzevši u obzir da sve više raste procesorska moć korisničkih uređaja, a da sa druge strane rastu i korisnički zahtjevi u pogledu brzine prenosa, srednjeg kašnjenja, ali i brojnih drugih performansi, poboljšanja koja mogu biti ostvorena primjenom ovog reda modulacije ne treba zanemariti.

U nastavku rada prikazana je i analiza performansi multi-link operacija u pogledu povećanja propusnosti i smanjenja kašnjenja. Rezultati pokazuju da je implementacija MLO-a u Wi-Fi 7 mrežama neophodna. Dodavanje drugog linka u rezidencijalnom korisničkom scenariju za niži red modulacije (256-QAM) skoro udvostručuje ukupnu propusnost i donosi značajno smanjenje kašnjenja, koje je posebno uočljivo u regionu velikih saobraćajnih opterećenja. Dodavanje trećeg linka u istom scenariju ne donosi velika poboljšanja u pogledu ukupne propusnosti, ali ukoliko postoji potreba za jako velikom propusnošću i ovo poboljšanje je značajno. Iako je povećanje propusnosti dodavanjem drugog linka kod viših redova modulacije (1024-QAM i 4096-QAM) nešto manje i kreće se u granicama od 82-93% u zavisnosti od primijenjene modulacije i širine kanala, to je i dalje najznačajnije povećanje brzine prenosa. Pokazano je da je to povećanje manje za više redove modulacija i veće širine kanala, ali i da nešto bolje performanse u pogledu ostvarive propusnosti daje MLO za isti ukupni opseg u odnosu na SLO mod prenosa, kao i da se primjenom 4096-QAM modulacije može ostvariti 16-17% veća brzina prenosa u odnosu na 1024-QAM. Kada je u pitanju srednje kašnjenje po paketu, MLO značajno smanjuje kašnjenje u odnosu na SLO implementacije za velika saobraćajna opterećenja, a najznačajnija poboljšanja su dobijena za slučaj sa većim brojem korisnika.

Kako se zvanično usvajanje standarda bliži, a na tržištu se već uveliko nalaze uređaji koji imaju Wi-Fi 7 čipove, postavlja se pitanje koji će biti naredni koraci u razvoju Wi-Fi mreža. U septembru 2023. godine IEEE organizacija je kreirala 802.11bn radnu grupu, koja za cilj ima definisanje sledećeg standarda sa kojim bi se postigla ultra velika pouzdanost i time otišlo korak dalje u bežičnim tehnologijama na nelicenciranom opsegu. Prognoze su da će se noviteti uvedeni Wi-Fi 7 standardom, a dominantno multi-AP koordinacija i multi-link operacije, dodatno unaprijediti, ali će biti potrebna i neka nova rješenja kako bi se obezbijedila što sigurnija konekcija i kako bi se kontrolisalo kašnjenje i u najnepovoljnijim scenarijima.

Literatura

- [1] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper, Available:
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [2] Number of internet and social media users worldwide as of October 2023, Available:
<https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/>
- [3] E. Khorov, I. Levitsky and I. F. Akyildiz, "Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7," in IEEE Access, vol. 8, pp. 88664-88688, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993448.
- [4] C. Deng et al., "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 4, pp. 2136-2166, Fourthquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.3012715.
- [5] L. Cariou et al., "EHT draft proposed PAR," IEEE 802.11 Documents, Mar. 2019.
[Online]. Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1231&is_group=0eht.
- [6] Wi-Fi. "Wi-Fi 6E Insights Newsletter", wi-fi.org. [Online]. Available: <https://www.wi-fi.org/wi-fi-download/42611>. [Accessed: Nov. 15, 2023]
- [7] 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.
- [8] S. Schelstraete, "Feasibility of 4096QAM", IEEE 802.11 Documents, Apr. 2019,
[online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=0637&is_group=00be.
- [9] Toni Adame, Marc Carrascosa-Zamacois and Boris Bellalta, "Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7", IEEE 802.11 and Wireless Sensors Network, Sensors 2021, 21(15), 4954.
- [10] A. Chen, L. Yang, B. Tian, Y. Kim, S. Vermani, S. Shellhammer, "320MHz Channelization and Tone Plan", IEEE 802.11 Documents, May 2019, [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=797&is_group=00be&is_year=2019

- [11] IEEE Specification Framework for TGbe, IEEE 802.11 Documents, Feb. 2020, [online] Available: https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbe_update.html.
- [12] E. Park, D. Lim, J. Kim, S. Yun, J. Choi, "Consideration on 320MHz Bandwidth and 16 Spatial Streams", Documents, May 2019, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=778&is_group=00be&is_year=2019
- [13] L. Huang, Y. Ding, U. Yoshio, R. Chitrakar, "Signaling Support for multi-RU assignment", IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1868&is_group=00be&is_year=2019
- [14] J. Liu, S. Hu, Multiple RU Combinations for EHT, IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1907&is_group=00be&is_year=2019
- [15] X. Chen, "11be Preamble Structure", IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1516&is_group=00be&is_year=2019
- [16] R. Jian Yu, "Preamble Structure in 11be", IEEE 802.11 Documents, Sep. 2019, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1099&is_group=00be&is_year=2019
- [17] M. Hu, R. Jian Yu, M. Gan, "Preamble Structure and SIG Contents", IEEE 802.11 Documents, Sep. 2019, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0029-03-00be-preamble-structure-and-sig-contents.pptx>
- [18] J. Chun, E. Park, D. Lim, J. Choi, "Consideration on EHT-LTF sequences", IEEE 802.11 Documents, Apr. 2020, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=608&is_group=00be&is_year=2020
- [19] R. Marks, L. Yunping, Y. Bo, Y. Fangchao, "Reconsidering Implicit Feedback for Beamforming", IEEE 802.11 Documents, Mar. 2018, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-0509-00-0wng-reconsidering-implicit-feedback-for-beamforming.pptx>
- [20] 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), Bangalore, India, 2021, pp. 342-350, doi: 10.1109/COMSNETS51098.2021.9352833.
- [21] E. Park, "Overview of PHY Features for EHT", IEEE 802.11 Documents, Jan. 2019, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1967-01-0eht-overview-of-phy-features-for-eht.pptx>
- [22] O. Kedem, B. B. Yang, L. Y. Lyu, "Multi-AP Operation - Basic Definition", IEEE 802.11 Documents, Apr. 2020, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0617-03-00be-multi-ap-operation-basic-definition.pptx>
- [23] S. Verma, T. K. Rodrigues, Y. Kawamoto, M. M. Fouda, N. Kato, "A Survey on Multi-AP Coordination Approaches over Emerging WLANs: Future Directions and Open Challenges", DOI:10.48550/arXiv.2306.04164
- [24] K. Ryu, Consideration on multi-AP coordination for EHT, IEEE 802.11 Documents, Jan. 2019, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1982-01-0eht-consideration-on-multi-ap-coordination-for-eht.pptx>
- [25] G. Naik, D. Ogbe and J. -M. J. Park, "Can Wi-Fi 7 Support Real-Time Applications? On the Impact of Multi Link Aggregation on Latency," ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications, Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500256.
- [26] Po-Kai Huang, Extremely Efficient Multi-band Operation, IEEE 802.11 DocumentsA, Nov. 2019, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=822&is_group=00be&is_year=2019
- [27] R. Chitrakar, "Multi-Link Element format", IEEE 802.11 Documents, May. 2020, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0772-02-00be-multi-link-element-format.pptx>
- [28] A. Patil, "Multi-Link Aggregation", IEEE 802.11 Documents, Sept. 2019, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=823&is_group=00be&is_year=2019
- [29] M. Gan, "Multi-Link Architecture", IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020, [online] Available: https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1921&is_group=00be&is_year=2019

- [30] M. C. Zamacois, G. Geraci, L. G. Giordano, A. Jonsson, B. Bellalta, "Understanding Multi-link Operation in Wi-Fi 7: Performance, Anomalies, and Solutions", DOI:10.48550/arXiv.2210.07695
- [31] Wisnu Murti, Ji-Hoon Yun, "Multi-Link Operation with Enhanced Synchronous Channel Access in IEEE 802.11be Wireless LANs: Coexistence Issue and Solutions", *Sensors*, vol.21, no.23, pp.7974, 2021.
- [32] S. Adhikari, S. Verma, "TDM Multilink Operation", IEEE 802.11 Documents, July 2020, [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=659&is_group=00be&is_year=2020
- [33] I. Levitsky, Y. Okatev and E. Khorov, "Study on Simultaneous Transmission and Reception on Multiple Links in IEEE 802.11be networks," 2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T), Dolgoprudny, Russia, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/EnT50437.2020.9431275.
- [34] Y. Zhou, "Simultaneous Tx/Rx Capability indication for multi-link operation", IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019, [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1550&is_group=00be&is_year=2019
- [35] S. Naribole, "Multi-Link Operation Channel Access Discussion", IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019, [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1405&is_group=00be&is_year=2019
- [36] R. Hirata, "Discussion on Multi-band operation", IEEE 802.11 Documents, Nov. 2019, [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=818&is_group=00be&is_year=2019
- [37] [29] Y. Li, G. Huang, Y. Guo, Y. Zhou, Y. Li, "Channel Access Design for Synchronized Multi-Links", IEEE 802.11 Documents, Jan. 2020, [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=1548&is_group=00be&is_year=2019
- [38] S. Naribole, S. Kandala, W. B. Lee, A. Ranganath, "Multi-link Power Save Discussion", [online] Available:
https://mentor.ieee.org/802.11/documents?is_dcn=370&is_group=00be&is_year=2020
- [39] P. Zhou, X. Fang, X. Wang and L. Yan, "Multi-Beam Transmission and Dual-Band Cooperation for Control/Data Plane Decoupled WLANs," in *IEEE Transactions on*

- Vehicular Technology, vol. 68, no. 10, pp. 9806-9819, Oct. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2933543.
- [40] IEEE 802.11ax Channel Model Document, IEEE Documents, IEEE 802.11 Documents, Sept. 2014, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0882-04-00ax-tgax-channel-model-document.docx>
- [41] IEEE 802.11be Channel Model Document, IEEE Documents, Mar. 2019, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-0359-00-0eht-tgbe-channel-model-document.docx>
- [42] TGax Simulation Scenarios, IEEE Documents, July 2015, [online] Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-16-00ax-simulation-scenarios.docx>
- [43] A. Saleh, R. Valenzuela, "A statistical model for indoor multi-path propagation," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. SAC 5, no. 2, pp. 138–146, Feb. 1987.
- [44] M. A. Jensen, B. D. Jeffs, A. L. Swindlenhurst, Q. H. Spencer, "Modeling the statistical time and angle of arrival characteristics of an indoor environment," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 5, pp. 561–570, May 2002
- [45] T. Paul and T. Ogunfunmi, "Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment," in IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 28-54, First Quarter 2008, doi: 10.1109/MCAS.2008.915504.
- [46] C. Pei et al., "WiFi can be the weakest link of round trip network latency in the wild," IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 1-9, doi: 10.1109/INFOCOM.2016.7524396.
- [47] B. Bellalta, M. Carrascosa, L. Galati-Giordano and G. Geraci, "Delay Analysis of IEEE 802.11be Multi-Link Operation Under Finite Load," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 12, no. 4, pp. 595-599, April 2023, doi: 10.1109/LWC.2023.3235001.
- [48] Ana Jeknić, Enis Kočan, "Development Steps that Brought to Wi-Fi 7", ETF Journal of Electrical Engineering, Vol. 29, No. 1, November 2023, DOI: <https://doi.org/10.59497/jee.v29i1.266>

Lista skracenica

ACK - *Acknowledgment*

AGC - *Automatic Gain Control*

A-MPDU - *Aggregate MAC Protocol Data Unit*

A-MSDU - *Aggregate MAC Service Data Unit*

AP - *Access Point*

ARQ - *Automatic Repeat Request*

AT&T - *American Telephone and Telegraph Company*

BSS - *Basic Service Set*

BU - *Bufferable Unit*

CA - *Carrier Sense*

CBR - *Compressed Beamforming Report*

CCA - *Channel Clear Assessment*

CCK - *Complementary Code Keying*

CQI - *Channel Quality Information*

CSI - *Channel State Information*

CSIRO - *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*

DCM - *Dual Carrier Modulation*

DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*

EDCA - *Enhanced Distributed Channel Access*

EHT - *Extremely High Throughput*

EVM - *Error Vector Magnitude*

FCC - *Federal Communications Commission*

FEC - *Forward Error Correction*

HARQ - *Hybrid Automatic Repeat Request*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineering*

IoT - *Internet of Things*

LDPC - *Low Density Parity Check*

L-LTF - *Legacy Long Training Field*

L-SIG - *Legacy Signal Field*

L-STF - *Legacy Short Training Field*

MAC - *Medium Access Control*
M-AP-CS - *Multi Access Point Coordinate Set*
M-AP-OS - *Multi Access Point Operation Set*
MCS - *Modulation Coding Scheme*
MIMO - *Multiple Input Multiple Output*
MU - *Multi User*
MLD - *Multi Link Device*
MLO – *Multi-Link Operation*
MU-MIMO - *Multiple User Multiple Input Multiple Output*
NDP - *Null Data Packet*
Non-STR - *Non Simultaneous Transmit and Receive*
NRC - *National Cash Register*
OBSS - *Overlapping Basic Service Set*
OBSS-PD - *Overlapping Basic Service Set Packet Detect*
OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA - *Orthogonal Frequency Divison Multiple Access*
PARP - *Peak to Average Power Ratio*
PHY - *Physical*
PPDU - *Physical Protocol Data Unit*
QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*
QoS - *Quality of Service*
RL-SIG - *Repeated Legacy Signal Field*
RTT - *Round Trip Time*
RU - *Resource Unit*
SINR - *Signal to Interference and Noise Ratio*
SNR - *Signal to Noise Ratio*
SS - *Spatial Stream*
STR - *Simultaneous Transmit and Receive*
SSID - *Service Set Identifier*
SU-MIMO - *Single User Multiple Input Multiple Output*
TGbe - *Task Group BE*
TID - *Traffic Identifier*
TIM - *Traffic Indication Map*

TPC - *Transmission Power Control*

TSN - *Time Sensitive Network*

TWT - *Target Wake Time*

TxOP - *Transmission Opportunity*

VHT - *Very High Throughput*

WAN - *Wide Area Network*

WLAN - *Wireless Local Area Network*