



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Nina Šepić

**Procjena efikasnosti novih rješenja za
unapređenje performansi u šestoj generaciji
WLAN mreža**

- magistarski rad -

Podgorica, 2021.



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Nina Šepić

**Procjena efikasnosti novih rješenja za
unapređenje performansi u šestoj generaciji
WLAN mreža**

- magistarski rad -

Podgorica, 2021.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Nina Šepić**

Datum i mjesto rođenja: 12.02.1988. Pljevlja, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Elektronika, telekomunikacije i računari, 180 ECTS kredita, 2010.godine
Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Telekomunikacije, 60 ECTS kredita, 2011.godine

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet

Studijski program: Elektronika, telekomunikacije i računari - Telekomunikacije

Naslov rada: **Procjena efikasnosti novih rješenja za unapređenje performansi
u šestoj generaciji WLAN mreža**

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 29.05.2020.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 09.09.2020. god.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

1. Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić
2. Prof. dr Zoran Veljović
3. Prof. dr Enis Kočan

Mentor: Prof. dr Enis Kočan

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić
2. Prof. dr Zoran Veljović
3. Prof. dr Enis Kočan

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić
2. Prof. dr Zoran Veljović
3. Prof. dr Enis Kočan

Datum odbrane: 23.02.2021.

Datum promocije:

Sadržaj

Sažetak	1
Abstract	2
1 Uvod	3
2 Razvoj 802.11 mreža	6
2.1. Fizički komunikacioni nivo	6
2.2. Višestruki pristup	9
2.3. MAC komunikacioni nivo	11
3 802.11ax: koncept i osnovni zahtjevi	18
3.1. Modulacija	19
3.2. Višestruki pristup: MU-MIMO i OFDMA	19
3.3. <i>Spatial reuse</i> mehanizmi	23
3.3.1 Boja osnovnog servisnog skupa	23
3.3.2 Dinamičko podešavanje praga za detekciju zauzetosti kanala i emisione snage	24
3.3.3 Format protokolske jedinice podataka na fizičkom nivou	27
4 Analiza performansi u slučaju primjene BSS boje	30
4.1. Analiza performansi tehnike BSS boje u 802.11ax mrežama	31
4.1.1 <i>Outdoor</i> scenario	35
4.1.2 Rezidencijalni scenario	42
4.1.3 <i>Outdoor</i> scenario sa mobilnim stanicama	47
5 Analiza performansi u slučaju primjene 1024-QAM	53
5.1 Simulacioni scenario	55
5.2 Analiza rezultata	58
6 Zaključak	61
Literatura	63
Lista skraćenica	66

Sažetak

Porast broja prostorno bliskih bežičnih lokalnih mreža (WLAN - *Wireless Local Area Network*) je doveo do povećanja interferencije u nelicenciranom frekvencijskom opsegu oko 2.4 i 5 GHz. Zbog toga je 2014. godine pokrenut rad na razvoju šeste generacije WLAN mreža, a očekuje se da novi standard, označen kao IEEE 802.11ax, bude usvojen u prvoj polovini 2021. godine. Ovaj standard ima za cilj da unaprijedi spektralnu efikasnost u uslovima velike gustine pristupnih tačaka i korisnika. Jedno od predloženih rješenja podrazumijeva da se koriste dva praga detekcije zauzetosti bežičnog linka, pri čemu se za detekciju frejmova iz susjednih mreža primjenjuje prag veće vrijednosti. Pretpostavka je da će to uvećati broj prilika za prenos, a samim tim i prosječni protok podataka. Ovo rješenje je označeno kao “boja osnovnog servisnog skupa” (BSS boja - *Basic Service Set color*). U radu je analizirana efikasnost ovog rješenja kroz simulaciju različitih *indoor* i *outdoor* komunikacionih scenarija, pri čemu je korišćen ns-3 mrežni simulator. Cilj je bio modelovati okruženje sa nekoliko bežičnih lokalnih mreža, čije se oblasti pokrivanja preklapaju, i u takvim uslovima posmatrati prosječni protok prije i nakon primjene tehnike BSS boja. Analiza je pokazala kako se sa povećanjem vrijednosti praga za detekciju signala iz susjednih mreža može povećati prosječni protok podataka, ali samo za određeni opseg vrijednosti ovog parametra. Pored toga, u tezi su razmatrane i performanse budućih WLAN mreža u slučaju implementacije 1024-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) modulacije. Napravljeno je poređenje ostvarive brzine prenosa podataka po pristupnoj tački za scenario primjene 1024-QAM modulacije, sa slučajem kada je implementirana 256-QAM modulacija, koja predstavlja spektralno najefikasniju modulaciju u petoj generaciji WLAN mreža. Predstavljeni rezultati daju uvid u nivo povećanja brzine prenosa podataka u WLAN mrežama sledeće generacije, kao i koliko ostvariva brzina prenosa podataka u realnom komunikacionom scenariju, u uslovima velike gustine korisnika, odstupa od nominalne brzine.

Ključne riječi: 802.11ax, BSS boja, 1024-QAM, brzina prenosa podataka, ns-3

Abstract

Increased number of deployed wireless local area networks (WLANs), which are spatially close, has increased interference in unlicensed frequency spectrum around 2.4 and 5 GHz. This initiated development of the sixth generation of WLAN networks in 2014. and it is expected that new standard, denoted as IEEE 802.11ax, will be ratified in the first half of the year 2021. This standard aims to improve spectral efficiency in scenarios with high density of access points (AP) and/or stations (STA). One of the proposed solutions assumes using two signal detection thresholds while sensing the channel, with higher value being used for detecting frames from neighbouring networks. The assumption is that this will increase number of transmission opportunities and hence, average throughput. This solution is denoted as Basic Service Set (BSS) color. In this thesis, the efficiency of the proposed solution has been analyzed through simulation of different indoor and outdoor communication scenarios, using ns-3 network simulator. The goal was to model an environment with several overlapping basic service sets (OBSS) and observe average throughput before and after applying BSS color technique. Results have shown that increasing threshold for detection of neighbouring signals does increase average data rate, but only for a specific range of values. Also, this paper has analyzed performance of future WLANs that implement 1024-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). The level of throughput enhancement has been assessed by comparing average achievable data rate for scenario with 1024-QAM modulation implemented, with results obtained for the case of 256-QAM, which is the highest modulation order in the fifth generation of WLANs. Presented results give insight in the level of data rate increase in the next generation of WLAN networks, as well as in difference between nominal and achievable data rate, in a realistic communication scenario, with large user density.

Keywords: 802.11ax, BSS color, 1024-QAM, data rate, ns-3

Glava 1

Uvod

Brz razvoj internet tehnologija i aplikacija u posljednjih 20 godina je definisao način na koji pristupamo internetu. Navikli smo da imamo pristup internetu u bilo koje vrijeme i na bilo kom mjestu, što je omogućeno implementacijom celularnih i lokalnih bežičnih mreža (WLAN – *Wireless Local Area Network*). Celularne mreže se zasnivaju na tehnologiji koja radi u licenciranom frekvencijskom opsegu tj. opsegu čiju raspodjelu i način korišćenja određuju regulatorna tijela, pa je zbog toga i njihova primjena ograničena. Za razliku od njih, bežične lokalne mreže rade u nelicenciranom dijelu frekvencijskog spektra, što je omogućilo njihovu široku primjenu. Većina savremenih WLAN mreža zasniva se na grupi 802.11 standarda, koje razvija IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11 Radna Grupa (WG - *Working Group*). Ova tehnologija se uobičajeno naziva još i Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*), po organizaciji koja radi sertifikaciju uređaja prema specifikacijama 802.11 standarda. Termin Wi-Fi je danas postao sinonim za bežični pristup internetu, ali ovaj mrežni interfejs ima široku primjenu i u lokalnom povezivanju uređaja. WLAN mreže su jednostavne za implementaciju, skalabilne su i pristupačne u finansijskom pogledu. Sa napretkom elektronike i razvojem pametnih uređaja, bežično umrežavanje se proširilo od sektora računarskih mreža na industriju potrošačke elektronike, sigurnosnih sistema i uređaja za domaćinstvo. Ipak, uspostavljanje pristupa internetu je dominantna funkcija Wi-Fi uređaja, što ih čini neizostavnim dijelom mreža u rezidencijalnom i korporativnom okruženju, kao i na univerzitetskim kampusima. Sa rastom popularnosti internet aplikacija, bežični pristup internetu je postao neophodna usluga u većini ugostiteljskih objekata, ali i na aerodromima, stadionima, tržnim centrima i drugim mjestima javnih okupljanja. Pored direktnog pristupa internetu, Wi-Fi se koristi i za *offload* data

saobraćaja u celularnim mrežama. *Offload* data saobraćaja podrazumijeva upotrebu komplementarne mrežne tehnologije za prenos podataka koji su namijenjeni celularnoj mreži, sa ciljem da se smanji opterećenje licenciranog spektra. Dakle, zbog svoje praktičnosti, Wi-Fi je našao široku primjenu u različitim industrijama i postao *de facto* tehnologija za pružanje fiksnog bežičnog pristupa internetu. U prilog tome govore i statistički podaci o IP (*Internet Protocol*) saobraćaju. Prema *Cisco* prognozi za saobraćaj podataka, procijenjuje se da će do 2022. godine 51% od ukupnog IP saobraćaja biti generisano upravo u Wi-Fi mrežama, dok će 29% poticati od fiksnih i 20% od celularnih mreža, [1]. Osim toga, najnoviji izvještaj kompanije *Cisco* o Internet trendovima za period 2018-2023, predviđa da će već do 2023. godine 27.4% javnih *hotspot*-ova podržavati upravo šestu generaciju 802.11 standarda, odnosno Wi-Fi 6, [2]. Ove informacije ukazuju na to da će sledeća generacija Wi-Fi standarda imati ključnu ulogu u pružanju usluge pristupa internetu krajnjim korisnicima.

U rasponu od 20 godina 802.11 radna grupa je razvila pet generacija standarda za bežično lokalno umrežavanje. U tom periodu je zastupljenost WLAN mreža znatno porasla, o čemu svjedoči broj proizvedenih Wi-Fi uređaja, koji se povećao sa jedne milijarde u 2009. godini na čak 30 milijardi u 2019. godini, [3]. Pri razvoju prethodnih pet generacija iz grupe 802.11 standarda, akcenat je uvijek bio na povećanju brzine prenosa podataka kroz upotrebu veće širine bežičnog kanala, većeg broja prostornih tokova podataka (*strimova*), ili modulacije višeg nivoa. Međutim, šesta generacija standarda, 802.11ax, se razvija sa ciljem povećanja spektralne efikasnosti u uslovima velikog broja prostorno bliskih mreža. Zbog toga se 802.11ax standard često naziva i *High Efficiency Wireless* (HEW). Cilj je kroz efikasniju upotrebu spektra poboljšati i korisničko iskustvo (QoE - *Quality of Experience*), [4]. Zbog male širine frekvencijskog opsega u nelicenciranom dijelu spektra, veoma je bitno pronaći rješenja koja omogućavaju simultani prenos u uslovima više mreža čiji se oblasti pokrivanja preklapaju. U maju 2013. godine organizovana je HEW *Study Group* (HEW SG), studijska grupa u okviru 802.11 radne grupe, kako bi se ispitale mogućnosti za poboljšanje performansi WLAN mreža. Nakon što je 802 komitet odobrio zahtjev studijske grupe za pokretanjem HEW projekta, ona je raspuštena i organizovana je radna grupa 802.11ax (TGax – *Task Group AX*) koja je zvanično započela rad na novom amandmanu standarda u maju 2014. godine, [4]. Od predloženih rješenja za poboljšanje spektralne efikasnosti u WLAN mrežama, u ovom radu su analizirana dva – BSS boja i 1024 – kvadraturna amplitudska modulacija (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*). Efikasnost novih specifikacija ispitana je posredstvom simulacija u različitim mrežnim topologijama. Uz pomoć mrežnog simulatora kreirana su različita *indoor* i

outdoor komunikaciona okruženja i testirane performanse WLAN mreža koje implementiraju prethodnu i novu generaciju standarda.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način. U drugoj glavi je opisan razvoj WLAN mreža sa aspekta fizičkog (eng. *physical* – PHY) i MAC (*Medium Access Control*) komunikacionog nivoa. U trećem poglavlju su predstavljene specifikacije novog 802.11ax standarda, sa posebnim osvrtom na tehniku pristupa kanalu i spektralnu efikasnost, i ono je zaključeno uporednim pregledom svih šest generacija standarda. U četvrtoj glavi je detaljnije opisana BSS boja, kao predloženo rješenje za unapređenje tehnike pristupa kanalu. Ovde je dat i kratak pregled istraživanja na temu pomenute tehnike, koja još uvijek nije dovoljno proučena. BSS boja je identifikator mreže pomoću kojeg se može utvrditi porijeklo frejma koji zauzima kanal u datom trenutku. U mrežama koje koriste BSS boju postoje dva praga za detekciju zauzetosti kanala – niži prag za frejmove iz iste mreže i viši prag za frejmove iz susjednih mreža. Simulacioni rezultati pokazuju da se povećanjem praga detekcije frejmova iz susjednih mreža povećava i broj prilika za prenos, što direktno utiče i na povećanje prosječnog protoka. Međutim, na ovaj način se povećava i nivo dozvoljene interferencije, što može imati kontraproduktivan efekat u pogledu količine prenesenih podataka. Imajući to u vidu, u sklopu analize rezultata predložen je opseg optimalne vrijednosti praga detekcije frejmova iz susjednih mreža, tj. interferencije. U petom poglavlju opisano je poređenje performansi sistema u slučaju primijenjenih 256-QAM i 1024-QAM modulacija, što odgovara najvišim redovima modulacija u prethodnoj i novoj generaciji WLAN mreža – 802.11ac i 802.11ax, respektivno. Na osnovu simulacionih rezultata zaključuje se koji je očekivani procenat povećanja brzine prenosa u 802.11ax mrežama, kao i koliko će realni protok odstupati od nominalnog. U poslednjoj glavi su sumirani rezultati i istaknut njihov značaj.

Glava 2

Razvoj IEEE 802.11 mreža

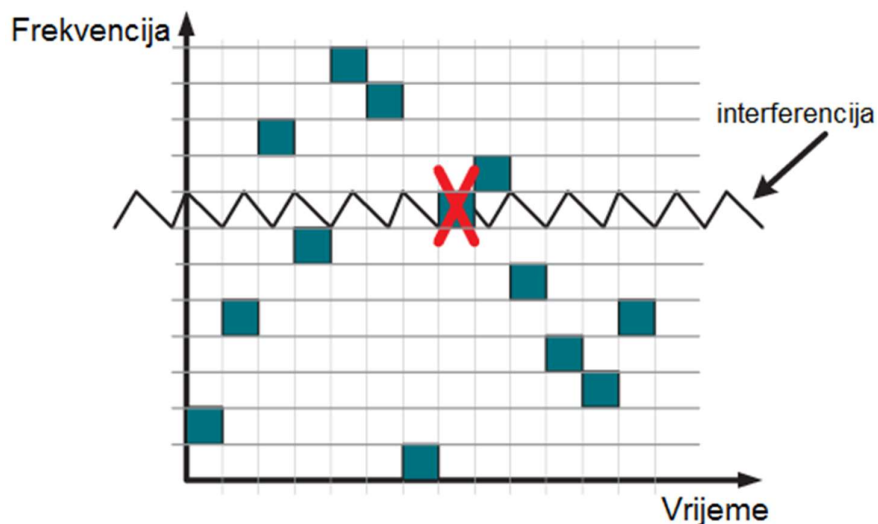
2.1. Fizički komunikacioni nivo

Način života krajem dvadesetog vijeka uslovio je potrebu za razvojem tehnologija koje će omogućiti mobilnu komunikaciju. Ovo je uspješno realizovano kroz implementaciju celularnih mreža, a sa pojavom Interneta bilo je očekivano da se isti trend prenese i na računarske mreže. Razvoj sistema za bežično lokalno umrežavanje počinje krajem 1980ih godina, nakon što su Federalna komisija za komunikacije (FCC – *Federal Communications Commission*) i Evropski institut za telekomunikacione standarde (ETSI – *European Telecommunication Standard Institute*) odredili uslove pod kojima se ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) dio frekvencijskog spektra može koristiti i u telekomunikacione svrhe, što znači i za individualnu, nelicenciranu upotrebu. Međutim, prva tehnološka rešenja su bila skupa i nisu dozvoljavala interoperabilnost, što je ograničilo njihovu širu primjenu. To je i motivisalo organizaciju IEEE da 1991. godine oformi 802.11 radnu grupu koja će objediniti sve zahtjeve za realizaciju pouzdane, robustne i ekonomične bežične komunikacije, [5].

Prvi 802.11 standard, koji je objavljen 1997. godine, definisao je tri fizička nivoa za bežični prenos signala, [6]:

- Prenos proširenim spektrom sa frekvencijskim skakanjem (FHSS - *Frequency Hopping Spread Spectrum*)
- Prenos proširenim spektrom sa direktnom sekvencom (DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*)
- Prenos u infracrvenom opsegu (IR - *Infrared*)

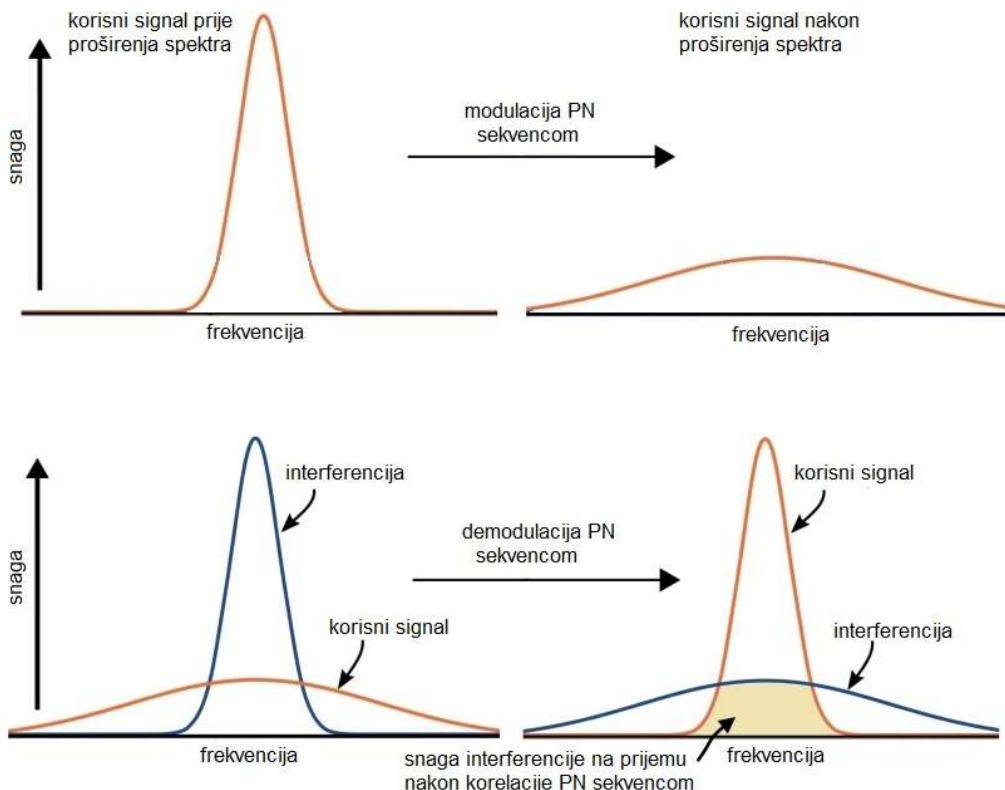
Tehnike prenosa proširenim spektrom (*Spread spectrum* tehnike) se zasnivaju na prenosu signala u frekvencijskom opsegu koji je širi od opsega korisnog signala. Karakteristične su po tome što primjenjuju pseudoslučajne sekvence, koje se koriste pri modulaciji, ili izboru frekvencija za prenos, i koje moraju biti poznate predajnoj i prijemnoj strani. Standardom je propisano da se za prenos signala koristi nelicencirani, ISM dio frekvencijskog spektra. U slučaju FHSS fizičkog sloja, spektar od 2.4 GHz do 2.495 GHz je podijeljen na 95 kanala širine po 1 MHz, [6], ali broj raspoloživih kanala zavisi od propisa nacionalnih regulatornih tijela, [7]. Od dostupnih kanala formira se sekvenca za promjenu (skakanje – *hopping*) frekvencija, odnosno skup frekvencija signala nosioca koje se rapidno mijenjaju. Na ovaj način se smanjuje vjerovatnoća pojave interferencije u frekvencijskom opsegu od interesa, što je ilustrovano na slici 2.1.



Slika 2.1 Ilustracija FHSS prenosa

Zavisno od regulative, *hopping* sekvenca može sadržati između 26 i 35 frekvencija, a sve sekvence su međusobno ortogonalne. Informacije su sadržane u promjeni frekvencije signala nosioca koja, uz primijenjenu GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) modulaciju, može imati 2 ili 4 vrijednosti, od čega će zavisiti i brzina prenosa podataka. FHSS sistemi su se primijenjivali vrlo kratko i potisnuti su sa pojavom DSSS tehnologije, koja se zasniva na modulaciji signala pseudoslučajnom sekvencom i diferencijalnom faznom modulacijom (DPSK – *Differential Phase Shift Keying*). Za DSSS fizički sloj je propisano 14 kanala širine po 5 MHz, počevši od 2.412 do 2.484 GHz, [7]. Međutim, nakon modulacije pseudoslučajnom sekvencom spektar signala zauzima širinu od 22 MHz, što znači da se interferencija od 802.11

signala može izbjeći samo pri prenosu u kanalima 1, 6 i 11, [7]. Međutim, zbog načina realizacije ovakvog prenosa, uticaj interferencije na prijemu je značajno umanjen (slika 2.2).



Slika 2.2 Ilustracija DSSS prenosa

Uz prenos FHSS i DSSS modulacionom tehnikom podaci su se mogli prenijeti brzinom od najviše 2 Mb/s, što je čak i 1997. godine bilo malo, u poređenju sa brzinom prenosa koja se mogla ostvariti žičanim putem. Glavna prednost ovih sistema je bila u njihovoj jeftinoj realizaciji i manjoj vjerovatnoći pojave interferencije pri prenosu, ali zbog male brzine prenosa podataka ubrzo su prevaziđeni. Što se tiče IR tehnologije, zbog jako ograničenog prostiranja elektromagnetnih (EM) talasa u infra-crvenom spektru, proizvodi zasnovani na 802.11 IR fizičkom sloju nisu nikada doživjeli praktičnu primjenu, [6].

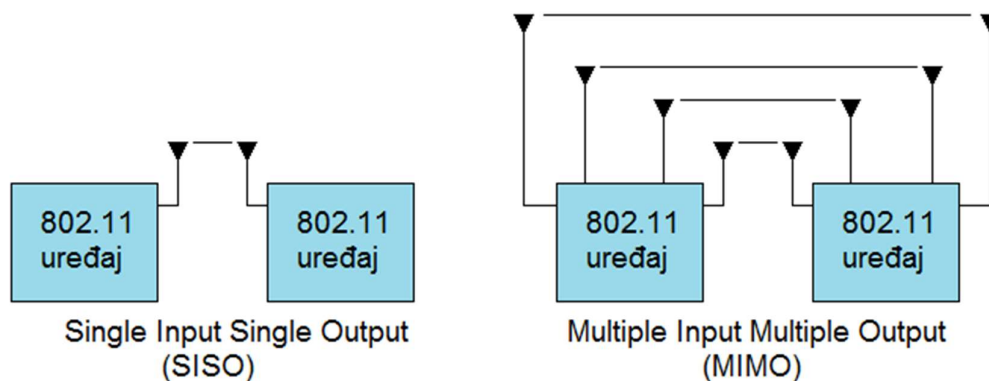
Dvije godine kasnije objavljene su dvije dopune standarda, označene kao IEEE 802.11a i IEEE 802.11b, koje su uključile još dvije tehnike prenosa – frekvencijsko multipleksiranje ortogonalnih podnosilaca (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* za 802.11a) i DSSS velike brzine prenosa podataka (HR/DSSS - *High-Rate Direct Sequence Spread*

Spectrum) za 802.11b, [6]. HR/DSSS se razlikuje od prvih DSSS sistema po naprednijoj modulaciji signala. U prethodnoj verziji standarda pseudoslučajna sekvenca se koristi samo za proširenje spektra, dok u slučaju HR sistema ona sadrži i korisne podatke. Zbog toga je moguće ostvariti i veću brzinu prenosa informacija koja, zavisno od broja bita u kodnoj riječi, iznosi 5.5 ili 11 Mb/s. IEEE 802.11a standard je objavljen u septembru 1999. godine, kao i 802.11b, u pokušaju 802.11 grupe da se rastereti tada već zasićeni ISM dio frekvencijskog spektra. Osim što definiše rad u frekvencijskom opsegu oko 5 GHz, 802.11a donosi potpuno nov pristup prenosu signala na fizičkom nivou, [6]. Sa razvojem bežičnih mreža početkom 21. vijeka, OFDM se izdvojio kao prikladno rješenje koje će ponuditi i veliku brzinu prenosa i robustnost u uslovima promjenljivog bežičnog kanala. Upravo zbog toga se tri naredne generacije 802.11 standarda (802.11g, 802.11n i 802.11ac), koje su usvojene od 1999. do 2013. godine, zasnivaju na OFDM tehnologiji, [8]. Ovaj način prenosa informacija podrazumijeva da se raspoloživi frekvencijski opseg podijeli na manje podopsege i da se signal paralelno prenosi višestrukim podnosiocima, pri čemu je svaki podnosilac modulisan faznom (BPSK - *Binary Phase Shift Keying* i QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*) ili *M*-arnom kvadraturnom amplitudskom modulacijom (*M*-QAM). Parametri OFDM prenosa, kao i ostale karakteristike fizičkog komunikacionog sloja, kao što su širina kanala, vrsta modulacije i broj prostornih strimova (SS - *Spatial Stream*), su se razvijale u skladu sa mogućnostima tehnologije i uvijek sa ciljem povećanja brzine prenosa podataka. Na ovaj način je maksimalna brzina u petoj generaciji WLAN mreža dostigla vrijednost od čak 6.9 Gb/s, pri prenosu kanalom širine 160 MHz, uz primjenu 256-QAM modulacije i osam prostornih tokova podataka (strimova), [8].

2.2. Višestruki pristup

Prekretnica u istoriji bežičnog lokalnog umrežavanja desila se sa četvrtom generacijom 802.11 grupe standarda, definisanjem IEEE 802.11n standarda. Ovaj standard je obuhvatio najznačajnije izmjene u načinu bežičnog prenosa – primjena šireg propusnog opsega, od 40 MHz, i višestrukih antena na predaji i prijemu (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*). Pored toga, bitne modifikacije su prisutne i na MAC nivou, u vidu agregacije frejmova, čime se znatno povećava efikasnost i brzina prenosa. Kompleksnost implementacije MIMO sistema je bio glavni razlog što se IEEE 802.11n standard razvijao u fazama, a cijeli proces je trajao čak sedam godina. Očekivanja su ispunjena 2009. godine, kada je zaključena standardizacija

bežične tehnologije koja će zamijeniti *Ethernet*. Brzinu prenosa reda stotina Mb/s omogućila je upravo primjena MIMO sistema, kroz istovremeni prenos višestrukih tokova podataka tj. prostornih strimova (slika 2.3). Mada je standard definisao opciono primjenu i do četiri strima, ovi uređaji nisu doživjeli masovnu proizvodnju sve do pojave pete WLAN generacije, [9].



Slika 2.3 Poređenje SISO i MIMO prenosa

IEEE 802.11ac standard u mnogo čemu predstavlja samo nadogradnju 802.11n standarda. Definiše mogućnost korišćenja širih kanala, od 80 i 160 MHz, modulacija višeg nivoa (256-QAM) i povećava broj strimova na osam. Međutim, ono po čemu se IEEE 802.11ac standard drastično izdvaja od svojih prethodnika je implementiranje višekorisničkog (MU - *Multi User*) prenosa u WLAN mrežama. MU oblik MIMO prenosa omogućava da pristupna tačka (AP - *Access Point*) istovremeno šalje strimove višestrukim korisnicima, čime se ostvaruje efikasniji pristup kanalu i povećava ukupan prosječan protok podataka. Iako IEEE 802.11ac definiše opcionu upotrebu osam prostornih strimova, MU prenos je ograničen na četiri korisnika. Kako bi se izbjegla interferencija između prostornih strimova, MU-MIMO se realizuje tako što se svaki strim usmjerava prema odgovarajućem korisniku. Ova tehnika se naziva *beamforming*. Usmjeravanjem energije emitovanog signala povećava se odnos signal-(šum+interferencija) (SINR - *Signal to Interference plus Noise Ratio*) na prijemu, što omogućava i veću brzinu prenosa podataka kroz primjenu modulacija višeg reda, [8]. *Beamforming* je bio predložen i kao dio IEEE 802.11n standarda, ali, kao i ideja upotrebe četiri prostorna strima, nije uključen u 'Wi-Fi CERTIFIED n' program sertifikacije, pa samim tim tada nije naišao na širu podršku u okviru ove industrije, [9]. Sa petom generacijom WLAN

mreža prenos podataka je dostigao gigabitne brzine, čime je 802.11 tehnologija osigurala sebi mjesto fiksne bežične pristupne mreže.

Paralelno sa ratifikacijom pete generacije otpočeo je rad i na standardu 802.11ah, kako bi se odgovorilo zahtjevima rastuće *Internet of Things* (IoT) industrije. Naime, mada se IEEE WLAN mreže mogu koristiti za komunikaciju pametnih uređaja, one nisu optimalno rešenje za realizaciju IoT infrastrukture, jer iziskuju relativno veliku potrošnju energije i ne podržavaju odgovarajući domet komunikacije. Takođe, IoT servisi zahtijevaju znatno manju brzinu prenosa, ali za veći broj stanica, što ne odgovara mogućnostima postojećih 802.11 sistema koji rade na malom broju kanala koji zauzimaju relativno široke opsege. 802.11ah standard je zadržao osnove 802.11ac standarda, ali uz izmjene na fizičkom i MAC komunikacionom nivou koje su omogućile spektralno i energetske efikasniji prenos. Ovo se ogleda u drugačijoj realizaciji nadmetanja za frekvencijske resurse, kao i definisanju širine kanala koja varira od 1 do 16 MHz. Uz upotrebu novog identifikatora omogućeno je povezivanje i do 8191 stanice, a kako se komunikacija odvija na frekvencijama ispod 1GHz, to je i domet povećan do 1km, [10]. Objavom 802.11ah standarda 2017. godine definisan je regulatorni okvir za IoT tržište, koje je bitno sa ekonomskog ali i sa društveno-političkog aspekta. Uzimajući u obzir da je 802.11 radna grupa oblikovala Wi-Fi sisteme i indirektno podstakla razvoj internet aplikacija, očekivano je da će isti uticaj imati i na masovnu mašinsku komunikaciju (M2M – *Machine to Machine*) koja čini IoT tehnologiju.

2.3 MAC komunikacioni nivo

Specifikacije vezane za MAC nivo su najbitniji dio 802.11 standarda, jer regulišu pristup medijumu za prenos signala, bez obzira na tip fizičkog nivoa. Takođe, one omogućavaju interoperabilnost različitih generacija standarda i komunikaciju sa žičanim dijelom mreže. Većina karakteristika MAC nivoa je preuzeta od postojećih standarda iz 802 grupe, ali su one adaptirane bežičnom prenosu i pojavama koje prate prostiranje elektromagnetnih talasa. Ovde se prije svega misli na obavezne potvrde o prijemu i retransmisije, koje treba da povećaju pouzdanost prenosa, kao i na mehanizam rezervacije kanala koji će biti objašnjen u narednom dijelu rada.

Osnovni metod pristupa kanalu u 802.11 mrežama je oblik distribuirane koordinacione funkcije (DCF – *Distributed Coordination Function*) koji podrazumijeva da svaka stanica prije

slanja osluškuje kanal i započinje prenos samo ako detektuje da je kanal slobodan, kako bi se izbjegla kolizija frejmova. Ovaj način pristupa kanalu naziva se višestruki pristup zasnovan na osluškivanju medijuma za prenos uz izbjegavanje kolizije (CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), [6]. U zavisnosti od tipa frejmova koji se prenose i kvaliteta usluge (QoS – *Quality of Service*) koji zahtijevaju, povrh DCF može biti implementiran i drugi način pristupa kanalu koji neće biti razmatran u ovom radu. *Carrier sense* se implementira kroz fizički i virtuelni mehanizam. Ako bilo koji od ova dva mehanizma indicira da je kanal zauzet, stanica ne započinje prenos. Fizički mehanizam je implementiran na fizičkom (PHY) nivou i podrazumijeva upoređivanje detektovanog nivoa snage sa unaprijed definisanim pragom koji se naziva prag za detekciju zauzetosti kanala (CST - *Carrier Sense Threshold* ili još i *Clear Channel Assesment Carrier Sense* - CCA CS). Vrijednost ovog parametra je definisana standardom i zavisi od osjetljivosti prijemnika pri određenoj širini kanala i modulaciji (MCS - *Modulation and Coding Scheme*) koja se koristi za prenos. Za OFDM fizički nivo ove vrijednosti su date u Tabeli 2.1 i podrazumijevaju nivo šuma prijemnika od 10dB i marginu od 5dB, koja je definisana zbog razlika u hardverskoj implementaciji, [7].

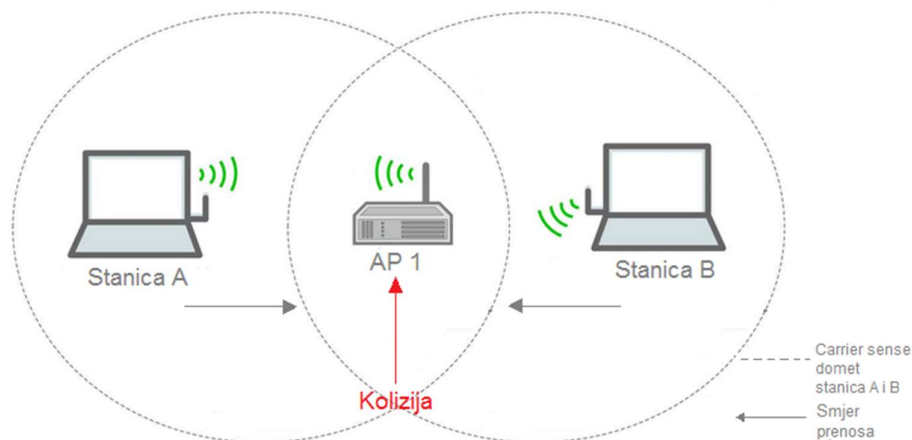
Tabela 2.1 Vrijednosti praga detekcije zauzetosti kanala za različite MCS

Modulacija	Kodni odnos	Minimalna osjetljivost [dBm] 20MHz	Minimalna osjetljivost [dBm] 40MHz	Minimalna osjetljivost [dBm] 80MHz	Minimalna osjetljivost [dBm] 160 ili 80+80 MHz
BPSK	1/2	-82	-79	-76	-73
QPSK	1/2	-79	-76	-73	-70
QPSK	3/4	-77	-74	-71	-68
16-QAM	1/2	-74	-71	-68	-65
16-QAM	3/4	-70	-67	-64	-61
64-QAM	2/3	-66	-63	-61	-58
64-QAM	3/4	-65	-62	-59	-56
64-QAM	5/6	-64	-61	-58	-55
256-QAM	3/4	-59	-56	-53	-50
256-QAM	5/6	-57	-54	-51	-48

CST prag se koristi prilikom detekcije 802.11 signala, odnosno kod signala kod kojih je detektovana preambula. Ukoliko detektovani signal nema preambulu, odnosno ne potiče od 802.11 frejma, koristi se prag za procjenu nivoa detektovane energije (*Clear Channel Assesment Energy Detection* - CCA ED), koji je za 20 dB viši od CST vrijednosti, [7]. Neophodno je implementirati dva parametra za osluškivanje kanala, jer se nelicencirani opseg oko 2.4 GHz koristi i za druge tehnologije (na primjer mikrotalasne rerne). Iz Tabele 2.1 može se zaključiti da, u slučaju OFDM fizičkog sloja, najniže vrijednosti CST i CCA ED praga iznose -82 dBm i -62 dBm, respektivno. Međutim, u praksi vrijednosti ovih parametara variraju, usled osjetljivosti prijemnika i najčešće zavise od proizvođača mrežne opreme.

Virtuelni CS mehanizam se implementira kroz vektor za alokaciju mreže (NAV - *Network Allocation Vector*) i odlaganje pristupa kanalu (eng. *access defferal*) na MAC nivou. Svaki 802.11 frejm sadrži polje u kom je definisano očekivano trajanje trenutnog prenosa. Njegovu vrijednost definiše stanica koja započinje prenos i mijenja se sa svakim poslatim frejmom. NAV predstavlja tajmer koji odbrojava od navedene vrijednosti do nule. Ukoliko NAV ima vrijednost nula, virtuelni CS mehanizam prepoznaje kanal kao slobodan. U suprotnom, kanal se smatra zauzetim. Kada NAV dostigne vrijednost nula i nakon isteka vremenskog intervala koji se naziva *Distributed Inter Frame Space* (DIFS), stanice odstupaju od kanala u periodu koji ima slučajno odabranu vrijednost iz unaprijed definisanog opsega. Ovaj period se naziva interval za nadmetanje (*Contention Window* – CW) ili *backoff period* i mjeri se brojem vremenskih slotova čija dužina zavisi od fizičkog sloja standarda. Neophodno je da *backoff period* ima slučajno odabranu vrijednost, jer bi u suprotnom sve stanice koje čekaju na slobodan kanal pokušale istovremeno da mu pristupe. Stanica sa najmanjim CW dobija pristup kanalu prva i može započeti sa slanjem, [6].

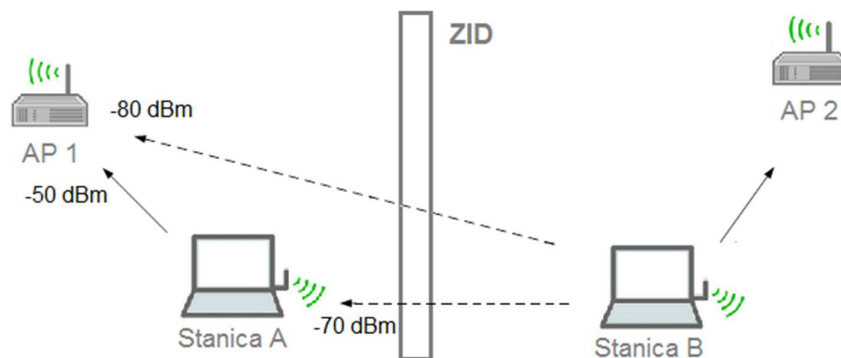
Carrier sense ima nekoliko nedostataka koji se najčešće ispoljavaju u vidu problema skrivenog i eksponiranog čvora. Skriveni čvor je stanica iz iste mreže čiji prenos nije detektovan kroz CS mehanizam i zbog toga uzrokuje koliziju prilikom komunikacije druge stanice ka istom odredištu, [6]. Ova situacija je ilustrovana na slici 2.4.



Slika 2.4 Ilustracija problema skrivenog čvora

Stanice A i B ne mogu komunicirati direktno, jer radio talasi koje emituju ne prelaze udaljenost između njih sa snagom koju bi detektovao prijemnik, pa su one jedna drugoj skriveni čvor. U ovakvoj situaciji CS mehanizam dozvoljava da obje stanice započnu prenos ka AP1 i pri tome ne bi detektovale koliziju, jer se bežični primopredajnici obično prave kao poludupleksni (*half-duplex*) uređaji, tj. ne mogu istovremeno emitovati i primiti signal. Kako bi se izbjegla ova situacija, 802.11 standard dozvoljava razmjenu *Request To Send* (RTS) i *Clear To Send* (CTS) poruka prije slanja frejmova podataka (*data* frejmova). RTS i CTS frejmovi imaju dvostruku ulogu – služe da rezervišu radio link i kao indikator ostalim stanicama u blizini da ne mogu započeti prenos, [6]. U primjeru sa slike 2.4 stanica A bi poslala zahtjev za slanjem pristupnoj tački, koji bi ona potvrdila CTS frejmom. U tom slučaju ne bi došlo do kolizije, jer bi stanica B detektovala CTS odgovor i smatrala kanal zauzetim. RTS/CTS rješava problem skrivenih čvorova, ali po cijenu smanjenog prosječnog protoka i dodatnog kašnjenja. Ovaj mehanizam nije obavezan i koristi se samo ako veličina frejma prelazi određenu vrijednost, [6].

Još jedna moguća nuspojava RTS/CTS mehanizma i *carrier sense* pristupa uopšte, jeste povećanje broja eksponiranih čvorova, što će biti bolje pojašnjeno uz pomoć slike 2.5, [11].

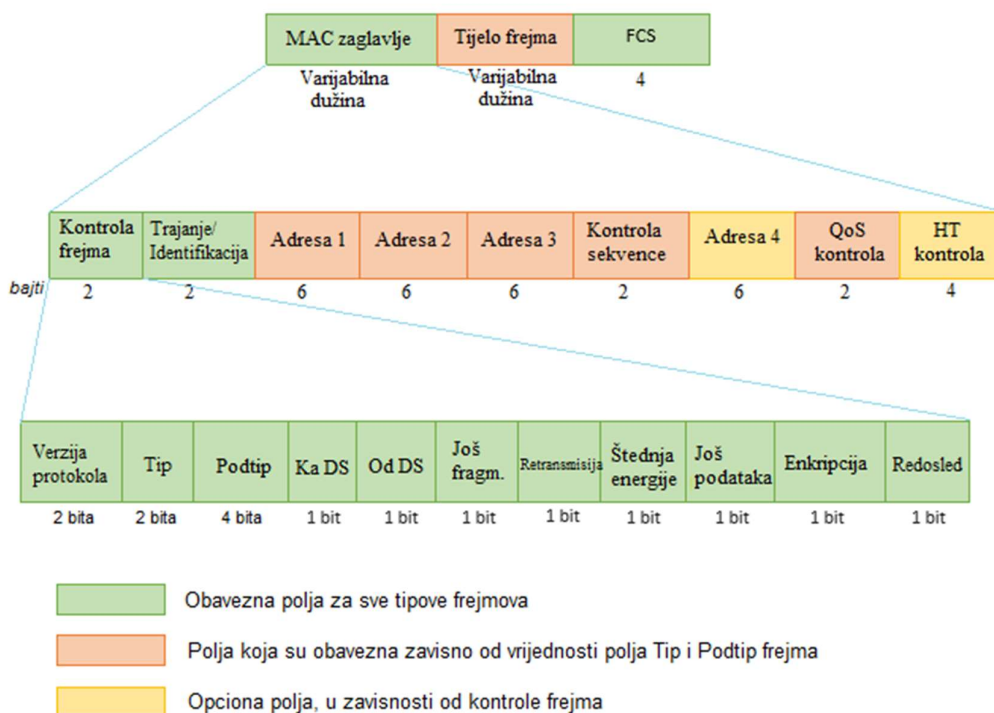


Slika 2.5 Ilustracija problema eksponiranog čvora

AP1 i AP2 sa povezanim stanicama A i B, respektivno, čine dva osnovna servisna skupa. Kada bilo koja od stanica komunicira sa svojom pristupnom tačkom, neaktivna stanica detektuje taj signal sa jačinom od -70 dBm. Prema pravilima CSMA/CA ove dvije stanice ne mogu istovremeno pristupiti kanalu, jer je najniža vrijednost CST praga -82 dBm. Međutim, u slučaju *uplink* komunikacije, u oba servisna skupa, jačina interferirajućeg signala na mjestu prijema nema dovoljnu jačinu da bi izazvala greške u odlučivanju. Dakle, ukoliko bi CS prag bio viši, stanice A i B bi mogle istovremeno koristiti isti kanal. U opisanom scenariju stanice A i B su eksponirani čvorovi. U kontekstu CTS frejmova, oni doprinose povećanju broja eksponiranih čvorova, zato što u zaglavlju prenose indikator o trajanju prenosa, odnosno o vremenskom periodu u kom će kanal biti zauzet i svaka stanica u dometu će odustati od pristupa kanalu upravo zbog detektovanog CTS frejma.

Način pristupa medijumu za prenos, kao i opisane pojave koje ga prate, odredili su format 802.11 MAC frejma, koji je pokazan na slici 2.6. Svaki frejm započinje kontrolnim dijelom koji sadrži informacije o generaciji, odnosno verziji 802.11 protokola, što će uticati na tumačenje ostalih polja u frejmu. Sledećih 6 bita prenose podatke o tipu frejma – da li je u pitanju RTS/CTS zahtjev, potvrda o prijemu, zahtjev za asocijacijom i slično. Ukoliko se podaci razmjenjuju između različitih servisnih skupova, putem distributivnog sistema (DS), onda je to naznačeno u naredna dva polja. U ostatku kontrolnog dijela frejma naznačeno je da li je paket sa IP nivoa fragmentiran, da li su podaci zaštićeni enkripcijom i trenutni režim rada stanice (aktivni ili režim štednje energije). Polje Trajanje/Identifikacija može imati funkciju NAV tajmera ili identifikatora. Ukoliko je poslednji bit 0, vrijednost polja predstavlja vremenski interval zauzetosti kanala u mikrosekundama. Sve stanice moraju pratiti vrijednost ovog polja kako bi imale ažurne informacije o stanju kanala. Ukoliko je poslednji bit u polju

1, tada ono predstavlja identifikator servisnog skupa stanice koja prelazi iz režima štednje energije u aktivni režim, u cilju preuzimanja baferovanih frejmova. Adresna polja 1-3 se koriste za identifikaciju porijekla frejma prilikom njihove razmjene u istom servisnom skupu, dok se četvrto polje koristi pri komunikaciji sa distributivnim sistemom, [6].



Slika 2.6 802.11 MAC frejm

Kontrola sekvence se koristi prilikom defragmentacije paketa i prepoznavanju dupliranih frejmova. Sekvenca od 12 bita se prosleđuje kao identifikator paketa sa IP nivoa i ona je ista za svaki fragment jednog IP paketa. Preostala 4 bita se koriste za identifikaciju fragmenta na MAC nivou i vrijednost ovog polja se uvećava za 1 sa svakim novim fragmentom. Poslednja dva polja u zaglavlju frejma su uvedena od četvrte WLAN generacije. Imaju različite vrijednosti u zavisnosti od verzije standarda ali približno istu svrhu, a to je signalizacija i usaglašavanje naprednih funkcija u prenosu. Kontrola kvaliteta usluge se koristi za grupne potvrde o prijemu i slanju informacija o stanju bafera, a 4 bita su rezervisana za identifikaciju vrste saobraćaja koji se prenosi. Polje HT (*High Throughput*) kontrola ima dvostruku ulogu. Prva je da pruži informacije o tome koje karakteristike fizičkog prenosa stanica podržava

(širina kanala, duži/kraći zaštitni interval, selekcija antene, modulacija,...). Druga uloga se odnosi na agregaciju MAC frejmova, koja je uvedena počevši od 802.11n standarda i služi za efikasnije iskorišćenje dobijenog pristupa kanalu. Obje funkcije su vezane za ostvarenje veće brzine prenosa podataka, po čemu je i polje dobilo HT oznaku, [8]. Nakon HT polja počinje korisni dio frejma i njegova maksimalna dužina je sa 802.11ac standardom dostigla vrijednost od 11 426 bajta. Na samom kraju frejma nalazi se dio za provjeru greške (FCS – *Frame Check Sequence*), [9].

Kada su u pitanju izmjene na MAC nivou 802.11ax standarda, one su uglavnom vezane za višekorisnički pristup. Od toga su najbitnije izmjene prisutne u HT kontrolnom polju čija vrijednost zavisi od tipa frejma. Između ostalog, ono će uključiti potvrdu OFDM višestrukog pristupa na *uplink*-u, informaciju o maksimalnom podržanom broju prostornih strimova i maksimalnom nivou emisione snage. Osim toga, u HE mrežama koristiće se dva NAV vektora, jedan koji mjeri vrijeme zauzetosti kanala u istoj mreži i jedan za sve susjedne mreže u blizini, [12]. Primjetno je da 802.11ax radna grupa pomjera određenu signalizaciju, vezanu za MAC, na fizički nivo. O tome, i o novom tipu kontrolnog frejma za OFDMA prenos, biće više riječi u sledećem poglavlju rada.

Glava 3

IEEE 802.11ax: koncept i osnovni zahtjevi

U ovom radu se govori o šestoj generaciji standarda iz grupe standarda za lokalno bežično umrežavanje, koje razvija radna grupa 802.11, u okviru komiteta 802, Instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE). Zadatak ove radne grupe je definisanje specifikacija fizičkog i MAC nivoa u bežičnoj lokalnoj mreži, kako bi se povezanim uređajima omogućila mobilnost koja će biti transparentna višim komunikacionim slojevima, [7]. Projekat 802.11ax je pokrenut formiranjem studijske grupe pod nazivom *High Efficiency WLAN Study Group* sa sledećim zadacima, [4]:

- unaprijediti spektralnu efikasnost i povećati protok podataka po jedinici površine,
- unaprijediti performanse u realnim zatvorenim (*indoor*) i otvorenim (*outdoor*) okruženjima, u različitim mrežnim topologijama i u prisustvu interferencije, tj. većeg broja pristupnih tačaka i povezanih stanica.

Kako bi se ostvarili ovi ciljevi uvode se izmjene u načinu pristupa kanalu i dijeljenju frekvencijskih resursa koje čine 802.11ax jedinstvenom bežičnom tehnologijom. To je prvi 802.11 standard koji uvodi OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) tehniku višestrukog pristupa u WLAN mreže. OFDM tehnika nije nova u 802.11 mrežama, ali se do šeste generacije WLAN mreža koristila kao modulaciona tehnika, tj. na način da se svi podnosioci dodjeljuju jednom korisniku. U mrežama sledeće generacije biće moguće podijeliti raspoloživi broj podnosilaca različitim korisnicima, što bi im ujedno omogućilo i istovremeni pristup kanalu, [12]. IEEE 802.11ax se izdvaja i kao prvi standard koji definiše upotrebu 1024 kvadraturene amplitudske modulacije (QAM) za bežični prenos signala [13], kao i višekorisnički (MU) prenos na *uplink* smjeru komunikacije u WLAN mrežama, [12]. U ovom

poglavlju rada će se govoriti o navedenim specifikacijama, kao i o izmjenama u fizičkom i MAC komunikacionom nivou koje su neophodne za njihovu realizaciju.

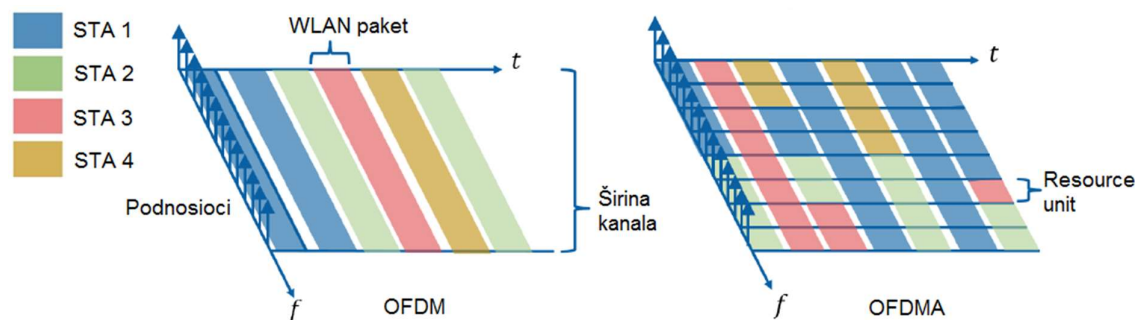
3.1 Modulacija

IEEE 802.11ax zadržava većinu karakteristika fizičkog sloja pete generacije standarda. Zasniva se na OFDM prenosu i podržava rad na kanalima širine od 20 do 160 MHz. Međutim, kako je planirano da šesta generacija uključi OFDMA tehniku pristupa kanalu, u skladu sa tim je prilagođeno trajanje OFDM simbola i zaštitnog intervala (eng. *Cyclic Prefix* - CP). Kako bi se povećao broj raspoloživih podnosilaca za višestruki pristup, trajanje simbola je produženo četiri puta i iznosi 12.8 μ s, dok je rastojanje između njih u frekvencijskom domenu smanjeno i iznosi 78.125 kHz, [12]. U skladu sa prethodne tri generacije standarda, i 802.11ax povećava nominalnu brzinu kroz viši red modulacije za prenos signala. 1024-QAM se može koristiti opciono, uz već postojeće modulacije nižih nivoa – BPSK, 16-QAM, 64-QAM i 256-QAM, [13]. Pri prenosu modulacijom najvišeg nivoa, kanalom najveće širine i primjenom osam prostornih strimova, maksimalna ostvariva brzina prenosa podataka na fizičkom nivou iznosi 9.6 Gb/s, što je povećanje od 39% u odnosu na petu generaciju WLAN mreža, [14]. Ispravan prijem simbola pri prenosu podataka primjenom 1024-QAM modulacije zahtijeva visok odnos signal-(šum+interferencija) (SINR), što se može ostvariti samo pri jako dobrim uslovima na kanalu. Zbog toga je očekivano da se povećanje brzine prenosa može realizovati u *indoor* komunikacionom scenariju, što je predmet analize u Glavi 5.

3.2 Višestruki pristup: MU-MIMO i OFDMA

Mada su IEEE 802.11n i 802.11ac standardi znatno unaprijedili tehniku pristupa kanalu kroz MIMO i MU-MIMO, respektivno, to je i dalje ostala slaba tačka 802.11 sistema. Naime, pristup kanalu se realizuje na način da svaka stanica prije slanja osluškuje kanal i započinje prenos samo ako detektuje da je kanal slobodan, kako bi se izbjegla kolizija frejmova. Isti princip važi i za *downlink* (DL) i za *uplink* (UL) smjer prenosa, što znači da dvije stanice ne mogu istovremeno započeti prenos ka istoj pristupnoj tački, [6]. Ovaj problem je u određenoj mjeri umanjen u petoj generaciji mreža uvođenjem MU-MIMO prenosa, ali samo na *downlink*-

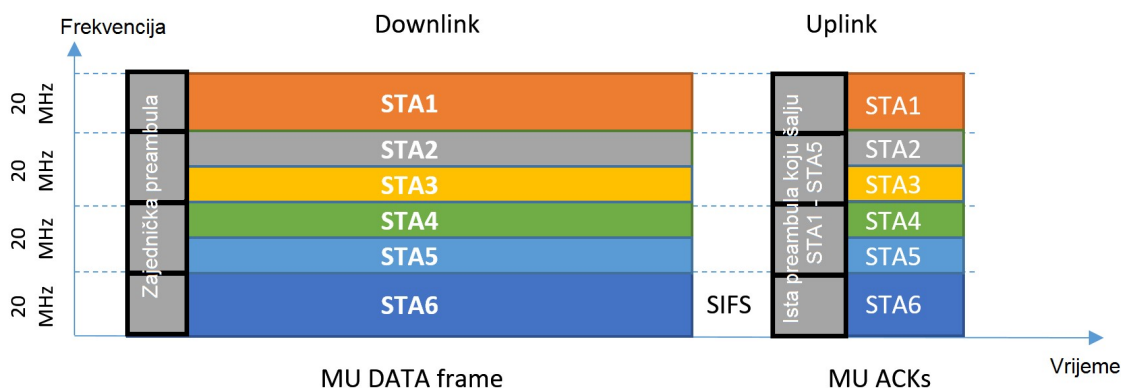
u. MIMO omogućava istovremeni pristup kanalu razdvajajući prenose u prostornom domenu. Međutim, kako bi se iskoristio puni potencijal MU tehnike, prenose ka i od različitih stanica bi trebalo razdvojiti i u frekvencijskom domenu. Upravo to je jedna od suštinski novih ideja u šestoj generaciji IEEE 802.11 grupe standarda, IEEE 802.11ax standardu, a realizuje se kroz OFDMA tehniku raspodjele ortogonalnih podnosilaca različitim stanicama, [12]. Može se reći da je usvajanje OFDMA najvažnija odlika novog standarda, zato što nudi potpuno nov pristup kanalu i na taj način najviše doprinosi povećanju spektralne efikasnosti. Postojeći pristup kanalu podrazumijeva da se cijeli raspoloživi frekvencijski opseg dodjeljuje jednom korisniku, što znači da, uz primjenu MU-MIMO, AP može istovremeno komunicirati sa najviše četiri korisnika, [8]. Ovakav pristup je dodatno problematičan ako se ima na umu da je i broj bežičnih lokalnih mreža i stanica u porastu, pri čemu se korišćeni nelicencirani opseg ne proširuje odgovarajućom brzinom. OFDMA podrazumijeva da se susjedni podnosioci grupišu u frekvencijske jedinice (eng. *Resource Unit* - RU) koje se dodjeljuju različitim korisnicima, što je ilustrovano na slici 3.1.



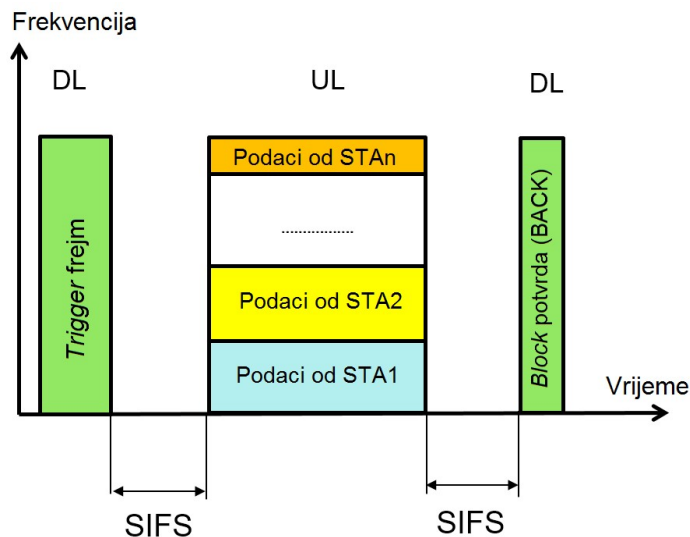
Slika 3.1 Raspodjela frekvencijskih resursa pri OFDM i OFDMA prenosu

RU može sadržati 26, 52, 106, 242, 484, 996 ili 2×996 podnosilaca. Imajući u vidu da jedan podnosilac zauzima opseg od 78.125 kHz i da širina kanala varira od 20 do 160 MHz, to znači da primjenom OFDMA tehnike kanalu istovremeno može pristupiti i do 74 korisnika, [15]. OFDMA višestruki pristup će biti obavezan i na *downlink* i na *uplink* smjeru komunikacije, [12]. To je još jedna velika promjena u odnosu na postojeće WLAN mreže, gdje je MU prenos realizovan implementacijom višestrukih strimova i to samo na DL smjeru prenosa. Dakle, IEEE 802.11ax će biti prvi WLAN standard koji omogućava UL MU prenos, [15]. Za razliku od 802.11ac mreža, koje podržavaju do četiri istovremena MU prenosa, u 802.11ax mrežama ovaj broj će biti povećan na osam, što znači da istu RU može istovremeno koristiti osam korisnika, kada se kombinuju OFDMA i MIMO tehnike, [15]. OFDMA se realizuje različito u

različitim smjerovima komunikacije pri čemu je u oba slučaja zajednička kontrola na AP strani. Kada je u pitanju *downlink* prenos, informacije o dodjeli podnosilaca AP šalje u dijelu preambule fizičkog frejma, koji je zajednički za sve HE stanice. Ovaj dio frejma sadrži i podatke specifične za pojedinačne stanice kao što su broj SS i modulacija. Podnosioci se dodjeljuju samo korisnicima koji imaju podatke za prenos, o čemu stanica informiše AP samostalno ili na njegov zahtjev, [15]. Višestruki pristup je teže organizovati na *uplink* smjeru, jer zahtijeva sinhronizaciju prenosa u vremenskom domenu, što je takođe zadatak pristupne tačke. AP koordinira *uplink* prenos tako što prvo šalje kontrolni frejm, koji se naziva *trigger* frejm, gdje su navedeni zajednički parametri UL MU prenosa – trajanje i zaštitni interval (eng. *Guard Interval* – GI) koji će koristiti sve stanice. U *trigger* frejmu se šalju i podaci o alokaciji RU, modulaciji, alokaciji SS (ukoliko se OFDMA kombinuje sa MIMO) i slično. AP putem ovog frejma informiše stanice i kojom snagom treba da emituju signal, kako bi snaga primljenih signala od svih korisnika bila jednaka, bez obzira na njihovu udaljenost od AP-a. Kako bi se postigla sinhronizacija, stanice započinju prenos tačno nakon *Short Inter Frame Space* (SIFS) perioda, što je ilustrovano na slici 3.2. SIFS je najkraći vremenski interval u 802.11 sistemima i koristi se pri razmjeni poruka sa najvećim prioritetom, kao što su potvrde, ili kada je stanica već dobila pristup kanalu i šalje niz frejmova. Na kraju UL prenosa AP šalje zajedničku potvrdu (eng. *Block Acknowledgement* - BACK) o prijemu frejmova svim korisnicima, [15]. Ilustracija DL i UL OFDMA prenosa data je na slikama 3.2 i 3.3.



Slika 3.2 Ilustracija DL OFDMA prenosa



Slika 3.3 Ilustracija UL OFDMA prenosa

OFDMA višestruki pristup će biti implementiran iznad postojećeg pristupa kanalu zasnovanog na osluškivanju medijuma za prenos (*carrier sense*). Prije početka UL prenosa obavezno je osluškivanje kanala, ukoliko nije drugačije naglašeno u *trigger* frejmu. Uslovi pod kojima se preskače CS mehanizam nisu definisani u dokumentima grupe i za sada je ostavljeno da bude odlučeno u samom načinu impementacije proizvođača hardvera, [16].

Osim što omogućava istovremeni pristup kanalu većem broju stanica i na taj način povećava prosječni protok podataka, OFDMA ima i druge prednosti. Prva od njih je što se podnosioci dodjeljuju prema stanju kanala iz perspektive prijemnika (eng. CSI – *Channel State Information*). Ovo rezultuje izborom frekvencijskog opsega u kom je odnos SINR veći, što omogućava i primjenu višeg reda modulacije. Druga prednost sastoji se u izboru odgovarajuće veličine RU. Prema dosadašnjoj realizaciji pristupa kanalu, stanica pri prenosu rezerviše cijeli raspoloživi frekvencijski opseg. U slučaju pete generacije WLAN mreža, to znači da stanica može rezervisati 160 MHz, bez obzira na količinu informacija koju šalje. Neefikasnost ovakvog pristupa postaje još očiglednija ako se ima na umu da je u određenim okolnostima neophodan RTS/CTS mehanizam razmjene poruka o rezervaciji kanala, kao i da svaki frejm zahtijeva potvrdu o prijemu. Međutim, izborom adekvatnog broja podnosilaca, u skladu sa potrebama stanice, kao i slanjem *block* potvrde (BACK) za i od više korisnika u jednom istom frejmu, iskorišćenost spektra se znatno povećava, što i jeste cilj višestrukog pristupa.

3.3 *Spatial reuse* mehanizmi

Uz OFDMA, ovo je najinteresantnija tema o kojoj se raspravlja u okviru 802.11ax radne grupe. Već 2013. godine, kada je oformljena studijska grupa, uočena je potreba da se izmijeni način na koji se koriste frekvencijski resursi u WLAN mrežama. To je indirektna posledica trendova u internet tehnologijama koji su usloveli masovnu implementaciju bežičnih lokalnih mreža i u rezidencijalnom okruženju i na javnim mjestima. Usled toga neminovno dolazi do preklapanja njihovih oblasti pokrivanja, a samim tim i do interferencije u prenosu. Mreže čije se oblasti pokrivanja preklapaju nazivaju se još i preklapajući osnovni servisni skupovi (eng. *Overlapping Basic Service Set* – OBSS). Kada su u pitanju 802.11 sistemi i prenos u istom frekvencijskom opsegu, ova pojava se manifestuje na dva načina, ali sa istom posledicom. U jednom slučaju detektovani prenosi iz drugih mreža sprečavaju stanicu da pristupi kanalu, što uzrokuje značajan pad u prosječnom protoku podataka. U drugom slučaju, iako detektovani prenosi ne ometaju pristup kanalu (detektovana snaga je ispod određenog praga), ipak superpozicija interferirajućih signala može narušiti SINR na prijemu. To može dovesti do pogrešnog odlučivanja i retransmisija, što opet za posledicu ima smanjen prosječni protok. Situacija je još nepovoljnija ukoliko je stanica daleko od pristupne tačke. Obje situacije se mogu izbjeći drugačijom raspodjelom frekvencija, prema stanju na kanalu u datom trenutku, kao što je predloženo u OFDMA modelu. Međutim, jedan od zadataka koji je postavljen pri formiranju grupe jeste i unaprijediti spektralnu efikasnost kako bi se unaprijedio protok podataka u uslovima velike gustine pristupnih tačaka i stanica, što znači da treba pronaći način da se **isti frekvencijski opseg**, u uslovima preklapajućih mreža, efikasnije iskoristi. Tehnike koje to omogućavaju nazivaju se *spatial reuse* (SR) mehanizmi, jer dozvoljavaju ponovnu upotrebu iste frekvencije u prostornom domenu. Na ovu temu podnijeto je više od stotinu predloga TGax grupi, ali je većina od njih odbačena, [15]. Ovde je predstavljeno nekoliko rješenja koja su prihvaćena.

3.3.1 Boja osnovnog servisnog skupa

BSS boja je naziv za mrežni identifikator koji se nalazi u preambuli frejma fizičkog nivoa i njegovu vrijednost određuje AP slučajnim izborom. U mrežama koje koriste BSS boju,

postoje dva praga za detekciju zauzetosti kanala – prag nižeg nivoa za frejmove iz iste mreže i prag većeg nivoa za frejmove iz susjednih mreža. BSS boja omogućava prepoznavanje frejmova iz susjednih WLAN mreža, pri čemu se za njihovu detekciju koristi prag većeg nivoa (OBSS_PD - *Overlapping Basic Service Set Preamble Detection*) pri osluškivanju kanala, u odnosu na prag za detekciju frejmova iz sopstvene mreže, [12]. Na ovaj način se smanjuje učestanost detektovanja zauzetosti kanala, što omogućava veći broj istovremenih, prostorno bliskih prenosa, u istom frekvencijskom opsegu. Međutim, na ovaj način se može povećati interferencija, ukoliko se izabere suviše visoka vrijednost praga detekcije za frejmove iz susjednih mreža. Tehnika BSS boje je opširnije predstavljena u Glavi 4, gdje je opisano i istraživanje na temu optimalne vrijednosti OBSS_PD praga.

3.3.2 Dinamičko podešavanje praga za detekciju zauzetosti kanala i emisione snage

Dokument specifikacija koje su do sada usvojene u okviru TGax grupe definiše da sledeći standard treba da uključi SR mehanizam koji podrazumijeva dinamičko podešavanje jednog ili svih navedenih parametara, [12]:

- praga za detekciju zauzetosti kanala (CCA CS - *Clear Channel Assessment Carrier Sense*),
- praga za detekciju frejmova iz drugih mreža (OBSS_PD),
- emisione snage (TPC – *Transmission Power Control*).

U pogledu prvog parametra, kao jedan od SR mehanizama o kom se najviše govori je algoritam dinamičke kontrole senzitivnosti (DSC - *Dynamic Sensitivity Control*), [17]. Logika iza ove ideje je slična kao kod tehnike BSS boja, s tim što se prag većeg nivoa primjenjuje za sve frejmove, bez obzira na njihovo porijeklo. Kako bi se povećao broj prilika za prenos, vrijednost praga bi trebalo povećati. Međutim, vrijednost praga treba da bude i dovoljno mala, kako bi se izbjegla kolizija usled nedetektovanih prenosa u istoj mreži. Predloženo rješenje podrazumijeva da se CS prag dinamički podešava na strani stanica srazmjerno prosječnoj vrijednosti primljene snage od pristupne tačke (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*), uz određenu dinamičku marginu. Detaljan opis principa rada može se naći u [17]. Autori u [18]

su analizirali uspješnost ovog algoritma u rezidencijalnom scenariju sa 100 pristupnih tačaka, od kojih svaka opslužuje po pet stanica. Napravljeno je poređenje između performansi mreža koje koriste dinamičku i fiksnu vrijednost CS praga. Rezultati su pokazali da algoritam daje očekivane rezultate u pogledu povećanja protoka podataka i to od 20%, kada se kombinuje sa izborom optimalnog kanala, ali po cijenu povećanog procenta greške po frejmu (FER – *Frame Error Rate*), što je takođe očekivano, usled povišenog nivoa interferencije. Može se pretpostaviti da će algoritam, koji podešava CCA CS prag prema jačini signala od pristupne tačke, dati prednost stanicama koje su bliže AP-u. Međutim, sa druge strane, analiza pokazuje da DSC poboljšava kvalitet usluge za eksponirane stanice (eng. *exposed nodes*). Eksponirani čvorovi u mreži su stanice koje zbog detektovanog prenosa u drugoj mreži ne mogu pristupiti kanalu, iako ta dva prenosa zbog lokacije prijemne tačke ne bi međusobno značajno interferirali. Dakle, mada dinamičko podešavanje CCA CS praga daje prednost stanicama koje su bliže AP-u, u isto vrijeme smanjuje broj eksponiranih čvorova, čime je raspodjela resursa izbalansirana. U ovom istraživanju DSC algoritam je primijenjen samo na strani stanica i u uslovima koji podrazumijevaju samo *uplink* saobraćaj. Međutim, isti autori su prepoznali da je u slučaju većeg broja mreža koje se preklapaju, kao u opisanom rezidencijalnom scenariju, *downlink* smjer komunikacije podjednako bitan, jer i AP može biti eksponirani mrežni čvor. Zbog toga je predmet njihovog sledećeg istraživanja bio DSC algoritam koji se može primijeniti na strani pristupnih tačaka, [19]. U prethodnom radu granična vrijednost praga detekcije signala se računala dinamički, u zavisnosti od RSSI pristupne tačke na koju je stanica povezana. Analogno tome, novi algoritam za AP računa prag detekcije prema snazi signala najdalje stanice, osim u slučaju kada je interferirajuća stanica bliže – tada vrijednost praga zavisi od vrijednosti snage dominantne smetnje, što je glavna razlika između dvije opisane verzije istog algoritma. Novo istraživanje se sprovodi u istom komunikacionom scenariju, ali su u mreži implementirana oba rješenja na odgovarajućim stranama. Od predstavljenih rezultata bitno je izdvojiti povećanje prosječnog protoka od 30% (uz selekciju optimalnog kanala), u odnosu na slučaj konvencionalnog pristupa kanalu sa fiksnim pragom detekcije. Vjerovatnoća greške po frejmu je takođe uvećana sa 0.14 (konvencionalni pristup, fiksni prag) na 0.18, ali je to ipak manja vjerovatnoća greške nego u slučaju kada je algoritam primijenjen samo na strani stanica i prelazi 0.3, [18]. U dokumentima grupe za sada nije precizno navedeno rješenje za dinamičko podešavanje CCA CS parametra i možda će, uz određena ograničenja, to biti zadatak samih proizvođača mrežnih uređaja. Uvidom u opisano istraživanje može se

zaključiti da će predloženi DSC algoritam, i za stanice i za pristupne tačke, biti polazno a možda i konačno rješenje.

Predloženi način dinamičkog podešavanja emisione snage se vezuje za mehanizam BSS boje, odnosno povećanje OBSS_PD praga praćeno je i odgovarajućim smanjenjem emisione snage. Cilj je na ovaj način povećati broj istovremenih prenosa u istom kanalu ali pri tome ne povećati nivo interferencije. Na primjer, ukoliko je vrijednost OBSS_PD = -82 dBm a primljeni OBSS frejm je za X dB jači od OBSS_PD praga, stanica će prvo povećati OBSS_PD prag za X dB (tada će kanal biti smatran slobodnim) a zatim smanjiti emisionu snagu za X dB kako ne bi predstavljala interferenciju stanici iz OBSS mreže, [15].

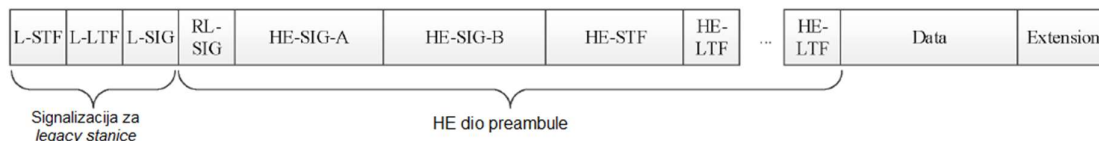
Opširno istraživanje na temu dinamičkog podešavanja sva tri parametra sprovedeno je od strane članova TGax grupe iz *Sony* korporacije, [20]. U rezidencijalnom, korporativnom i *indoor hotspot* okruženju simuliran je prenos različitih vrsta saobraćaja u opsegu od 2.4 i 5 GHz i kao metrika performansi svih tehnika korišćen je korisni protok (eng. *goodput*). Najzahtjevniji scenario u pogledu gustine mrežnih čvorova je *indoor hotspot*, sa 19 prijemnih tačaka i 40 stanica po AP-u, a najjednostavniji rezidencijalni sa 34 AP-a i po 10 stanica. U svakom okruženju prvo je simuliran prenos u 802.11 *legacy* mreži, tj. sa fiksnim vrijednostima emisione snage, CS i OBSS_PD praga. Zatim se uvodi BSS boja kao mrežni identifikator i zajednički parametar u svim simulacijama povrh koga se implementira dinamičko podešavanje jednog ili više pomenutih parametara. Iz rezultata se može uočiti isti šablon rasta brzine prenosa podataka sa dinamičkim podešavanjem bilo koje kombinacije parametara. Suština istraživanja je da se najbolji rezultati u sva tri scenarija postižu istovremenom primjenom dinamičkog podešavanja emisione snage (TPC) i CS praga (DSC algoritam) i ovaj procenat povećanja brzine prenosa podataka iznosi između 30% i 100%, zavisno od scenarija. Značajna je razlika između pojedinačnih scenarija u pogledu generisanog i prenesenog saobraćaja na DL smjeru komunikacije. U rezidencijalnom i korporativnom scenariju ostvaruje se brzina prenosa koja iznosi oko 50% i blizu 100% od brzine generisanja saobraćaja, respektivno, dok je u *indoor hotspot* okruženju situacija znatno drugačija. Kako je ovo topologija sa najvećim brojem stanica po prijemnoj tački i kako se sva komunikacija odvija u prostoru bez prepreka, to će nivo uzajamne interferencije biti najveći. Ovo se odnosi na zauzetost kanala usled prenosa u istoj i u susjednim mrežama. Kao posledica toga ostvarena brzina prenosa na *downlink*-u iznosi svega oko 15% brzine generisanog saobraćaja, [20].

Prva dva *indoor* scenarija imaju jednu zajedničku karakteristiku po pitanju ostvarenih rezultata, a to je najmanji stepen povećanja protoka za slučaj kada se implementira samo

dinamičko podešavanje OBSS_PD praga, [20]. To je razumljivo jer je topologija mreže u oba scenarija takva da su signali interferencije iz susjednih mreža izloženi gubitku usled propagacije kroz zidove. Zbog toga je i njihov uticaj na ukupne performanse sistema manji nego uticaj signala iz iste mreže (kada se primjenjuje DSC ili TPC). Ovo će biti pokazano i kroz analizu performansi BSS boje u narednoj glavi.

3.3.3 Format protokolske jedinice podataka na fizičkom nivou

Izmjene u načinu pristupa kanalu u 802.11ax mrežama podrazumijevaju i novi format protokolske jedinice podataka na fizičkom sloju (PPDU – *PHY Protocol Data Unit*) koji je predstavljen na slici 3.4, [15].



Slika 3.4 IEEE 802.11ax PPDU

PPDU se sastoji od preambule, korisnih podataka i ekstenzije. Prva tri polja preambule su namijenjena stanicama prethodnih pet generacija (eng. *legacy* stanice) i služe za sinhronizaciju predajnika i prijemnika (L-STF - *Legacy Short Training Field*, L-LTF – *Legacy Long Training Field*) i računanje dužine trajanja frejma (L-SIG – *Legacy Signal*). *Legacy* stanice ne mogu dekodirati HE PPDU, ali će za vrijeme njegovog prenosa smatrati kanal zauzetim. Ostatak preambule se sastoji od polja koja su namijenjena HE stanicama, osim L-SIG polja koje se ponavlja radi lakše detekcije frejma u uslovima povišene interferencije i ranijeg prepoznavanja verzije standarda od strane prijemnika. *High Efficiency Signal Field A* (HE-SIG-A) je obavezno polje i njegov sadržaj zavisi od toga da li je u pitanju pojedinačni ili grupni prenos. Ovde se nalaze informacije o smjeru prenosa (DL/UL), širini kanala, modulaciji, broju SS, indikator SR mehanizma i podaci neophodni za ispravan prijem ostatka PPDU. Podaci o boji mreže (*BSS color*) se nalaze takođe u ovom polju. HE-SIG-B polje nije obavezno i pojavljuje se samo u slučaju DL MU prenosa. Ovde se nalaze podaci koji su zajednički za sve stanice kao što je dodjela RU, ali i podaci specifični za pojedinačne stanice (modulacija, SS i slično). HE-SIG-B polje prate HE-LTF (*High Efficiency Long Training Field*) i HE-STF (*High*

Efficiency Short Training Field) polja, čija je dužina varijabilna i koriste se pri MIMO prenosu. Konkretno, HE-STF polje služi za poboljšanje procjene automatskog dobitka antene, dok HE-LTF polje sadrži informacije o procjeni MIMO kanala između predajnika i prijemnika. *Data* polje sadrži korisni dio frejma i prenosi se četiri puta dužim OFDM simbolom. Duži simbol i veći broj podnosilaca znače i duže vrijeme za demodulaciju signala. Ovo može predstavljati problem za uređaje sa nižom procesorskom moći, jer je vrijeme za slanje potvrde o prijemu (ACK) ograničeno SIFS periodom. Povećanje vremena za slanje potvrde nije opcija, jer bi onemogućilo kompatibilnost uređaja nove i prethodnih pet generacija. Kako bi se to izbjeglo 802.11ax PPDU sadrži ekstenziju, čija dužina zavisi od samog prenosa i mogućnosti prijemnika, i koristi se upravo kao dodatno vrijeme za obradu signala, [15].

Ovde su navedene samo najbitnije izmjene koje su predložene u draftu novog standarda. Osim njih predloženo je i niz drugih, poput slučajnog UL OFDMA pristupa kojim se omogućava neplanirani pristup kanalu rezervacijom određenog broja podnosilaca samo za tu namjenu. Takođe, predloženo je i poboljšanje postojećeg *carrier sense* pristupa uvođenjem parametara koji će koristiti samo HE stanice, kako se ne bi ugrozio kvalitet usluge *legacy* stanica. Osim toga, posebna pažnja je posvećena i mehanizmima za štednju energije. Oni su se do sada zasnivali samo na periodičnom mijenjanju aktivnog i neaktivnog perioda korisnika prema unaprijed definisanom rasporedu. 802.11ax proširuje ovaj mehanizam kroz *microsleep* i *target wake time* tehnike. Detalji realizacije su različiti, ali se oba pristupa zasnivaju na tome da AP eksplicitno određuje u kom periodu stanica može isključiti radio jedinicu, čime se ostvaruje ušteda energije. Detaljnije o realizaciji svih poboljšanja može se pročitati u opsežnoj analizi treće verzije drafta, [15], a sumirani pregled razlika u fizičkom i MAC nivou šest generacija 802.11 standarda dat je u Tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Poređenje različitih generacija IEEE 802.11 standarda

Parametar	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax
Frekvencija	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	2.4/5 GHz	5 GHz	2.4/5/6 GHz
Širina kanala	5 MHz	5,10,20 MHz	5,10,20 MHz	20 i 40 MHz	20, 40, 80, 80+80, 160 MHz	20, 40, 80, 80+80, 160 MHz
Rastojanje podnosioca	-	78.125-312.5 kHz	78.125-312.5 kHz	312.5 kHz	312.5 kHz	78.125 kHz
Trajanje OFDM simbola	-	3.2/6.4/12.8 μ s + 0.8/1.6/3.2 μ s CP	3.2/6.4/12.8 μ s + 0.8/1.6/3.2 μ s CP	3.2 μ s + 0.4/0.8 μ s CP	3.2 μ s + 0.4/0.8 μ s CP	12.8 μ s + 0.8/1.6/3.2 μ s CP
Najviši red modulacije	DQPSK	64-QAM	64-QAM	64-QAM	256-QAM	1024-QAM
Maksimalna teoretska brzina	11 Mb/s	54 Mb/s	54 Mb/s	600 Mb/s	6933 Mb/s	9607.8 Mb/s
SR mehanizmi	-	-	-	-	-	DSC, TPC, BSS color
Pristup kanalu	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	OFDMA, CSMA/CA
MU prenos	-	-	-	-	DL MIMO	DL i UL MIMO, DL i UL OFDMA
MIMO broj strimova	-	-	-	4 (1 korisnik)	8 (4 korisnika)	8 (8 korisnika)

Glava 4

Analiza performansi u slučaju primjene BSS boje

Pojam boje osnovnog servisnog skupa javlja se prvi put u 802.11ah standardu, gdje se takođe koristi kao mrežni identifikator, ali ne za unapređenje spektralne efikasnosti, već za uštedu energije, [15]. Kako bi se smanjila vjerovatnoća da dvije prostorno bliske pristupne tačke odaberu istu vrijednost BSS boje, TGax povećava dužinu polja sa 3 na 6 bita, a samim tim i broj mogućih vrijednosti, [12]. U prethodnoj glavi je ukratko opisan mehanizam BSS boje i istaknuto je da se nedostaci povezani sa *carrier sense* pristupom mogu ublažiti dinamičkim podešavanjem CST i OBSS_PD praga, kao i emisione snage. Ideja dinamičke promjene CST je prisutna odavno u istraživačkom radu i javlja se mnogo prije ideje o formiranju TGax radne grupe. U više naučnih radova pokazane su prednosti varijabilne nad fiksnom vrijednošću CS praga, [21]-[24]. Međutim, posebna pažnja ovoj temi posvećena je tek sa prognozama rasta u broju *hotspot*-ova, pametnih uređaja i količini internet saobraćaja. Članovi TGax grupe su proučavali efekat primjene DSC algoritma i BSS boje pojedinačno, [25]. Pri tome se BSS boja koristila samo kao identifikator za ranu detekciju stranih prenosa, ali ne i za primjenu drugog OBSS_PD praga. Naime, čak i bez podešavanja praga za strane frejmove, BSS boja može dovesti do povećanja protoka, jer stanica obustavlja prijem ranije što znači da je slobodna za prijem novih paketa. Rezultati su pokazali da DSC ima mnogo više uticaja na povećanje protoka nego sama BSS boja. Međutim, daljom analizom zaključeno je da se najbolji rezultati u pogledu brzine prenosa postižu kombinacijom obje tehnike i to do 10% bolji nego u slučaju samostalne primjene algoritma, [25]. Za razliku od algoritama za dinamičku promjenu CS praga, BSS boja još uvijek nije jednako zastupljena u istraživačkom radu. Jedan od razloga je sigurno i nedostatak simulacionih alata koji podržavaju ovaj SR mehanizam. Grupa autora je

analizirala BSS boju uz pomoć ns-3 mrežnog simulatora u okviru tri istraživačka rada, [26]-[28]. U prvom radu se BSS boja ispituje u okruženju sa velikim brojem postojećih i 802.11ax stanica. Pokazano je da se efikasnost BSS boje (sa dva praga detekcije) u ovakvim okolnostima uočava samo kada je broj HE (eng. *high efficiency*) stanica veći. U sledećem istraživanju je predložen novi algoritam za podešavanje OBSS_PD praga. Mada ovo rješenje zahtijeva manje izmjene u postojećem MAC nivou, u simuliranoj mreži se pokazao boljim od DSC algoritma u pogledu ukupnog protoka, i to za 56%. Najskorije istraživanje od iste grupe autora, ujedno i njihovo najopsežnije, vezano je za novi algoritam za odabir optimalne modulacije za prenos (eng. *rate control algorithm*). U okviru ovog rada pokazano je da će kombinacija BSS boje sa postojećim *rate control* algoritmima rezultovati povišenom interferencijom i degradacijom mrežnih performansi. Zbog toga je predložen novi algoritam koji koristi BSS boju ne samo za podešavanje OBSS_PD praga, već i za izbor odgovarajuće modulacije za prenos. U svakom od četiri testirana okruženja novi algoritam se pokazao boljim od postojećeg *MinstrelHT* algoritma i to sa do 113% većom ostvarenom brzinom prenosa na *uplink*-u.

Opisani istraživački rad na temu BSS boje podrazumijeva dinamičko podešavanje vrijednosti praga za detekciju interferencije (OBSS_PD). U dijelu koji slijedi takođe se analizira uticaj promjene OBSS_PD praga na performanse 802.11 mreže, ali u drugačijim uslovima. Prije svega, vrijednost OBSS_PD praga u toku trajanja jedne simulacije je statična i mijenja se sa fiksnim korakom od 5 dB. Testno okruženje se takođe razlikuje u odnosu na ono u istraživanjama [26]-[28] i sastoji se isključivo od 802.11ax prijemnih tačaka i stanica koje komuniciraju u opsegu 5 GHz. Naučni radovi na ovu temu jasno pokazuju da se podešavanjem OBSS_PD praga mogu postići bolji rezultati u pogledu ukupnog protoka mreže. Međutim, kako se parametar mijenja dinamički nije pokazano koji opseg vrijednosti daje najbolje rezultate u datim uslovima. Ono po čemu se ovo istraživanje najviše razlikuje u odnosu na do sada opisana, je što se uz analizu rezultata predlaže i optimalna vrijednost ovog parametra u različitim okruženjima.

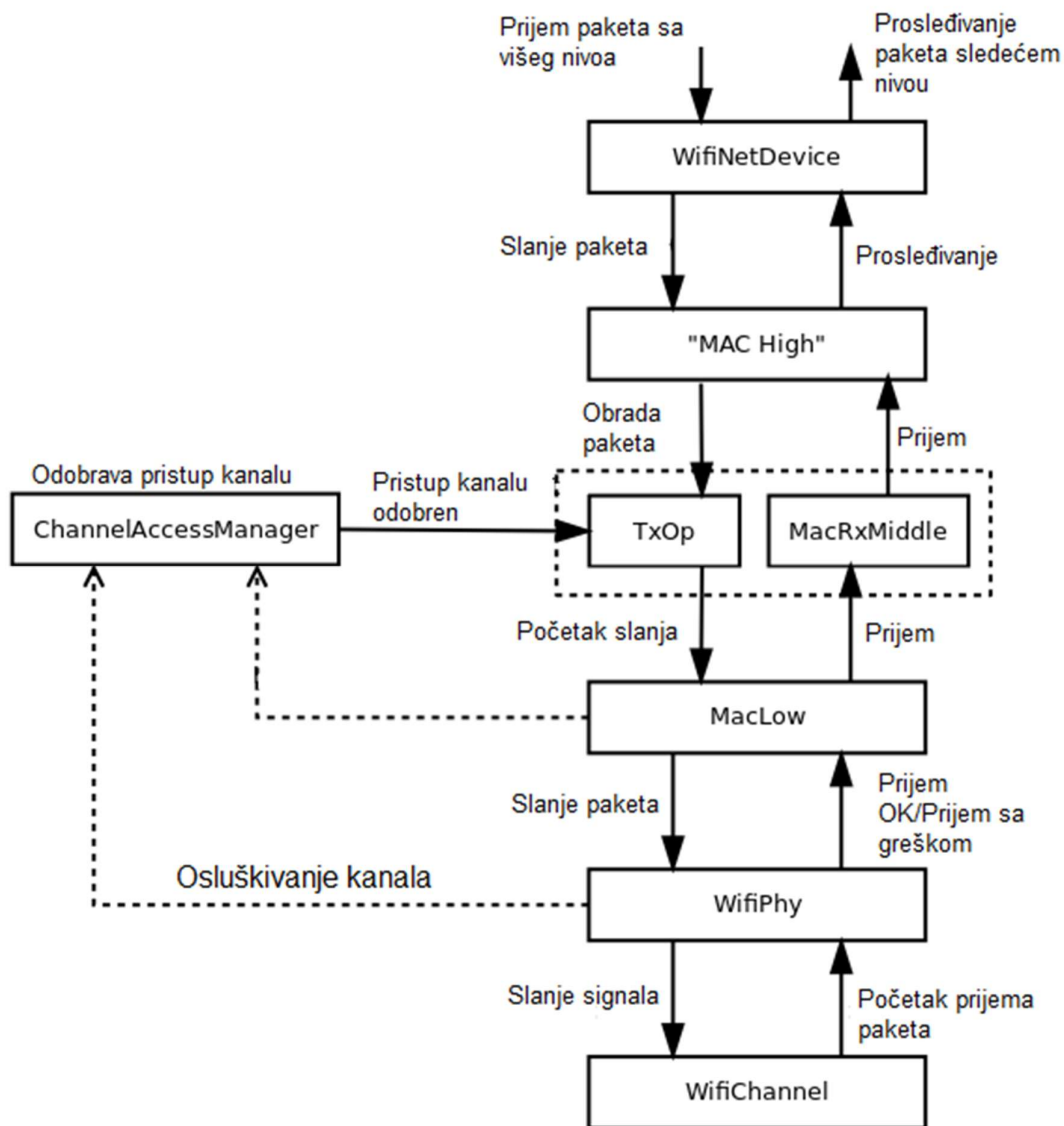
4.1 Analiza performansi tehnike BSS boje u 802.11ax mrežama

Za ispitivanje performansi tehnike BSS boje odabran je isti mrežni simulator kao u opisanim radovima, odnosno ns-3, [29]. Ovaj softver je razvijen u C++ jeziku i sastoji se od

skupa biblioteka koje služe za simulaciju različitih vrsta mreža kao što su 3G, 4G, WLAN (Wi-Fi) i WiMax. Najbitniji dio WLAN modula jeste *WifiNetDevice* objekat, koji modeluje mrežnu karticu za bežično povezivanje (eng. *Network Interface Card* - NIC). *WifiNetDevice* se sastoji od tri podnivoa koji modeluju različite dijelove TCP/IP (TCP – *Transmission Control Protocol*) komunikacionog sistema:

- model fizičkog nivoa (PHY)
- model nižeg MAC nivoa (MAC *low*)
- model višeg MAC nivoa (MAC *high*)

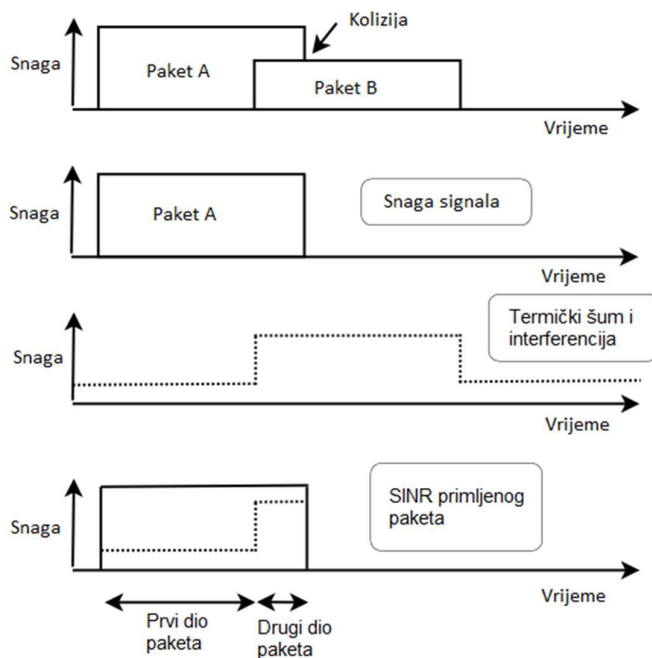
Šematski prikaz veze između različitih podnivoa pokazan je na slici 4.1, [29]. MAC *high* podnivo se sastoji od klasa koje definišu elemente u mrežnoj topologiji – prijemne tačke i stanice. Moguće je kreirati dvije vrste osnovnog servisnog skupa - infrastrukturni i nezavisni ili *ad hoc*. Za potrebe ovog rada simuliran je infrastrukturni BSS, odnosno mreža koja se sastoji od pristupnih tačaka i stanica. Na ovom podnivou su implementirane i funkcije koje započinju komunikaciju AP-STA, poput asocijacije stanice, slanje *beacon* frejmova i slično. MAC *low* podnivo je zadužen za razmjenu kontrolnih poruka kao što su RTS/CTS, potvrde o prijemu i prijem samog paketa. Ovde se obavlja i obrada paketa u smislu fragmentacije ili retransmisija, ukoliko su potrebne. MAC *low* podnivo prima informacije od fizičkog nivoa, koje su potrebne za realizaciju pristupa kanalu tj. CSMA/CA mehanizma. Glavni dio fizičkog nivoa čine klase *WifiPhy* i *WifiChannel*. Prva klasa je zadužena za prijem i slanje frejmova, praćenje interferencije i kalkulaciju SINR odnosa i vjerovatnoće greške, dok je druga klasa zadužena za slanje samog signala, pri čemu se vodi računa o primijenjenom propagacionom modelu i kašnjenju usled prostiranja EM talasa, [29].



Slika 4.1 Šematski prikaz komunikacionih podnivoa u Wi-Fi modulu simulatora

Kako bi analiza simulacija bila razumljivija, ovdje će biti pojašnjen način prijema paketa u Wi-Fi modulu, kao i model interferencije. Prvi korak prijema sastoji se od odbacivanja paketa čija je snaga ispod praga osjetljivosti prijemnika. Ovaj korak je uveden kako bi se izbjegla suvišna obrada paketa, koji zbog suviše malog nivoa signala ne bi uticali na ishod simulacije. *RxSensitivity* parametar definiše osjetljivost prijemnika i to je ujedno i prag za detekciju signala iz iste mreže. Njegova podrazumijevana vrijednost je -92 dBm i ona u simulacijama nije mijenjana, [29]. Ukoliko paket zadovoljava prvi uslov prijema, prelazi se na detekciju preambule i korisnog dijela paketa, koji se odvojeno analiziraju. To podrazumijeva

ispitivanje vjerovatnoće greške u poslatom frejmu, na osnovu vrijednosti SINR. Informacije o SINR čuvaju se u *InterferenceHelper* objektu, koji prati sve prenose na kanalu i prema tome računa nivo interferencije i sprovodi *carrier sensing* mehanizam. Pri proračunu vjerovatnoće greške paket se prvo dijeli, a zatim se svaki dio nezavisno procijenjuje prema njegovom odnosu signal/šum. *InterferenceHelper* zatim, prema vjerovatnoći greške pojedinačnih dijelova paketa, određuje ukupnu vjerovatnoću greške i vraća rezultat objektu *WifiPhy*, koji donosi odluku o ispravnom ili pogrešnom prijemu. Ovo je ilustrovano na slici 4.2, [29].



Slika 4.2 Ilustracija SINR funkcije u ns-3 simulatoru

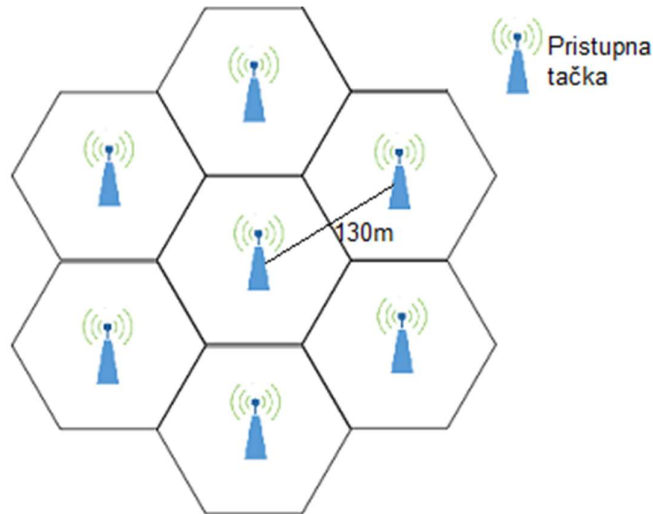
Vjerovatnoća greške po bitu će zavistiti od odnosa SINR i primijenjenog modela greške. U ovom istraživanju koristi se model greške koji je razvijen namjenski za ns-3 simulator i naziva se *Yans (Yet Another Network Simulator) Error Rate* model. Svi modeli greške trenutno podrazumijevaju samo aditivni Gausov šum, bez efekata fedinga, [29]. Prenos signala je određen načinom izbora modulacije. U prvom slučaju tip modulacije (MCS) se zadaje na početku simulacije i ostaje isti do njenog završetka. Međutim, pri ovakvom prenosu nije moguće zadati vjerovatnoću greške jer će se podaci, bez obzira na trenutno stanje na kanalu, slati uvijek konstantnom brzinom. Drugi način prenosa podrazumijeva dinamički izbor modulacione šeme, prema odnosu SINR posljednjeg poslatog paketa. Podatak o odnosu SINR se šalje u potvrdi o prijemu paketa i on, uz zadatu vjerovatnoću greške po bitu (BER - *Bit Error*

Rate), određuje optimalnu modulaciju za prenos narednog paketa. Opisani algoritam se naziva *IdealRateManager* i ne primjenjuje se u praksi. U istraživanju o efektima tehnike BSS boje modulacija se bira dinamički, uz zadatau vjerovatnoću greške po bitu od 10^{-5} .

Kroz *WifiNetDevice* klasu implementirane su sve bitne karakteristike fizičkog i MAC nivoa 802.11 sistema prvih pet generacija, kao što su pristup kanalu, agregacija frejmova na oba nivoa, OFDM i MIMO. Međutim, od novog 802.11ax standarda uključeno je svega nekoliko novih specifikacija fizičkog nivoa (duži OFDM simbol, duži GI i nova 1024-QAM modulacija) a od SR mehanizama samo BSS boja, [29]. Upravo sve što je implementirano je i testirano u sklopu ovog istraživanja. U pogledu izbora komunikacionog scenarija konsultovan je dokument TGax grupe, koji definiše tri *indoor* i jedan *outdoor* scenario od interesa, [30]. Tri indoor scenarija se razlikuju po vrsti okruženja, tipu objekta i rasporedu prostorija. Ovo su karakteristike koje sa postojećim klasama nije moguće modelovati u ns-3 simulatoru. Međutim, pošto Wi-Fi modul u ns-3 simulatoru svakako ne podržava modelovanje efekata propagacije (eng. *multipath propagation*) ne bi ni bilo svrhe kreirati ovakav tip okruženja. Iz navedenih razloga, za simulaciju je odabran jedan reprezentativan *indoor* scenario (rezidencijalni) i jedan *outdoor*. Oba scenarija ispunjavaju uslov velike gustine korisnika, što je ciljano okruženje za testiranje BSS boje. Treći scenario je varijacija *outdoor* okruženja, ali sa mobilnim stanicama.

4.1.1 *Outdoor* scenario

Sva četiri predložena scenarija podrazumijevaju između 19 i 100 pristupnih tačaka, koje opslužuju između 50 i 100 stanica, [30]. Simulacija ovog nivoa prevazilazi prosječnu procesorsku moć personalnog računara, pa je zbog toga simulirana mrežna topologija prilagođena praktičnim mogućnostima. Broj AP mrežnih čvorova je smanjen sa predloženih 19 na 7, sa po 10 povezanih stanica na fiksnim pozicijama. Svaki AP se nalazi u centru odgovarajuće ćelije, na visini od 10m. Udaljenost između centara susjedne dvije ćelije iznosi 130m, kao što je pokazano na slici 4.3.

Slika 4.3 Topologija mreže u *outdoor* scenariju

Stanice su raspoređene u radijusu od 65 metara od odgovarajuće pristupne tačke i njihova pozicija se bira slučajnim izborom iz zadatih granica, dok je visina fiksna i iznosi 1.5m. Zbog gustine stanica, one nisu prikazane na slici 4.3. Pošto BSS boja treba da unaprijedi postojeći pristup kanalu iz perspektive stanica, za procjenu performansi BSS boje odabrana je komunikacija na *uplink* smjeru. Paketi se šalju sa intervalom od 1ms, što odgovara generisanom saobraćaju od 12 Mb/s. Svaka stanica ima ulogu UDP (*User Datagram Protocol*) klijenta, koji šalje pakete UDP serveru, čiju ulogu ima AP. Prosječni protok se mjeri na UDP nivou i trajanje simuliranog prenosa iznosi 10 sekundi. Odabrane vrijednosti u pogledu saobraćaja odgovaraju preporukama TGax grupe, gdje je predložena klasa *best effort* prenosa u samo jednom smjeru komunikacije i pri punom *buffer*-u. Pošto je cilj kreirati OBSS okruženje, svaki AP koristi istu frekvenciju od 5.18 GHz i širinu kanala od 20MHz. Izbor modulacije se vrši prema algoritmu ns-3 simulatora, uz zadatu vjerovatnoću greške po bitu od 10^{-5} , što nije u skladu sa preporukama radne grupe 802.11ax, koje definišu upotrebu fiksne modulacije u svim scenarijima. Međutim, s obzirom da je takav prenos analiziran u prethodnom istraživanju, [31], ovde je odabran drugačiji pristup. Propagacioni model je odabran u skladu sa predlogom TGax grupe i zasniva se na *Urban Macro Line of Sight* modelu iz ITU-R (*International Telecommunication Union – Radiocommunication sector*) preporuke, koji je razvijen prema različitim mjerenjima i primjenjiv je za opseg frekvencija 2-6 GHz, [32] :

$$L(d < d_{BP}) = 22 * \log_{10}(d) + 28 + 20 * \log_{10}(f) \quad (4.1)$$

$$L(d > d_{BP}) = 40 * \log_{10}(d) + 7.8 - 18 * \log_{10}(h_{BS} - 1) - 18 * \log_{10}(h_{MS} - 1) + 2 * \log_{10}(f) \quad (4.2)$$

Ovde je:

L - slabljenje signala usled propagacije u dB

f - centralna frekvencija u GHz

d - 3D udaljenost između mrežnih elemenata u metrima, uz uslov $d = \max(3D \text{ udaljenost}, 10)$

h_{BS} - visina AP-a u metrima

h_{MS} - visina stanice u metrima

Prva jednačina se koristi za $10 \leq d < d_{BP}$ dok se druga koristi za udaljenost $d_{BP} < d < 5000$, pri čemu je d_{BP} (eng. *breakpoint distance*) definisano jednačinom (3):

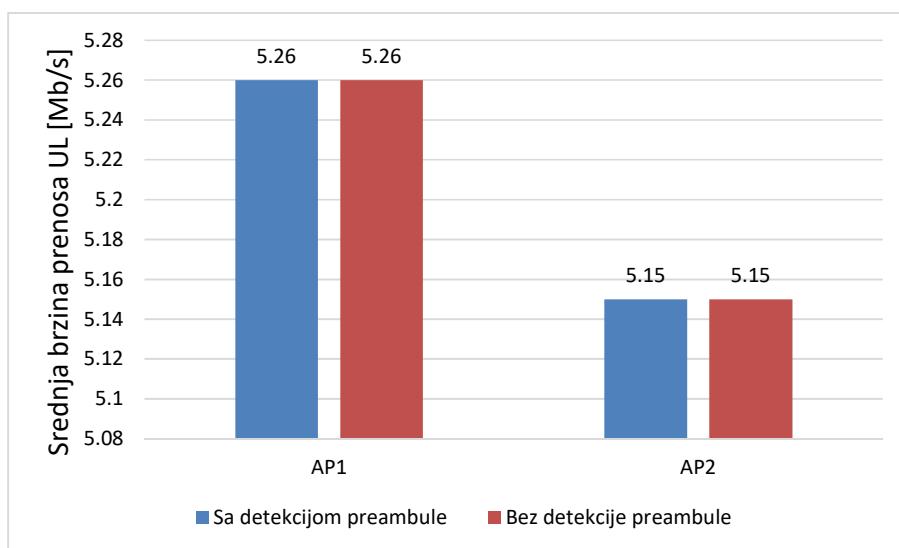
$$d_{BP} = \frac{4(h_{BS} - 1)(h_{MS} - 1)}{c} f \quad (4.3)$$

U trećoj jednačini c je brzina svjetlosti u m/s a f je centralna frekvencija signala u Hz . Ostali relevantni parametri simulacije, fizičkog i MAC nivoa, su navedeni u Tabeli 4.1.

Tabela 4.1 PHY i MAC parametri simulacije

Parametar	Vrijednost
Centralna frekvencija signala	5.18 GHz
Širina kanala	20 MHz
Standard	802.11ax
Emisiona snaga AP-a	20 dBm
Emisiona snaga stanice	15 dBm
Br. Tx/Rx antena AP-a	1
Br. Tx/Rx antena stanice	1
Dobitak antena	0 dBi
Šum prijemnika	7 dB
CST prag	-92 dBm
OBSS_PD prag	-82 do -62 dBm
Trajanje OFDM simbola	12.8 μ s
Zaštitni interval	800 ns
Veličina paketa	1472 B

Upotreba BSS boje je obično vezana i za povećanje OBSS_PD praga. Međutim, u ranije opisanom istraživanju, koje je sprovedeno u okviru TGax grupe, rečeno je da i samostalna upotreba mrežnog identifikatora, bez podešavanja OBSS_PD praga, može u veoma maloj mjeri uticati na povećanje prosječnog protoka [25]. Ranom identifikacijom prenosa, kroz detekciju preambule i boje mreže, može se napustiti prijem ostatka frejma, ukoliko se utvrdi da ne potiče iz iste mreže. Na ovaj način stanica je ranije slobodna za prijem novih frejmova nego u slučaju identifikacije putem MAC adrese. Dakle, dok povećanje OBSS_PD praga stvara više prilika za prenos, samostalna upotreba BSS boje, bez promjene praga detekcije interferencije, stvara više prilika za prijem. U opisu *WifiPhy* klase ns-3 simulatora nije eksplicitno navedeno da li se nakon detekcije preambule obustavlja prenos frejma, ali prema simulacionim rezultatima, to nije slučaj. Naime, izmjeren je prosječni protok u jednostavnom scenariju dva servisna skupa koji čine dva AP-a sa po jednom stanicom, prije i nakon omogućene detekcije preambule (bez promjene OBSS_PD praga). Rezultati pokazuju da se ukupan prosječni protok u mreži ne mijenja, odnosno da je identičan u oba slučaja, što je pokazano na grafiku na slici 4.4.

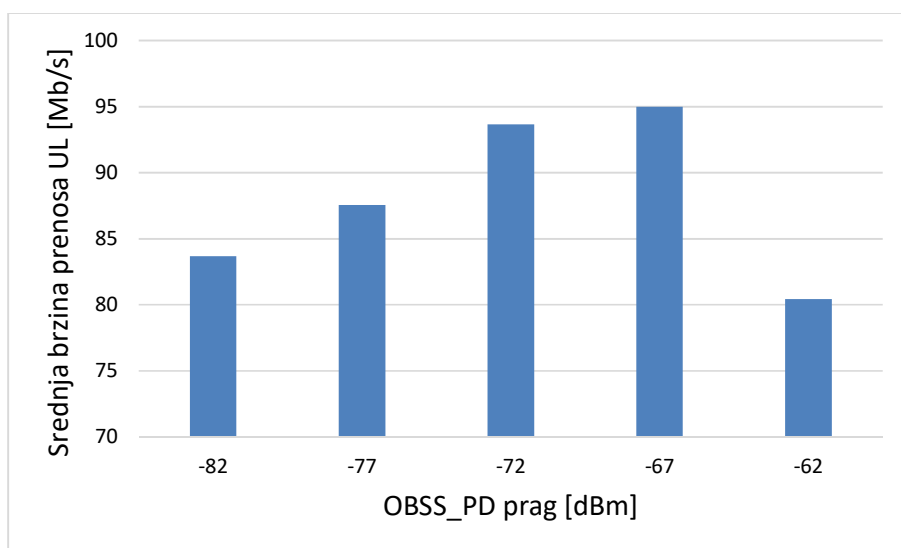


Slika 4.4 Ispitivanje razlike u brzini prenosa sa i bez detekcije preambule

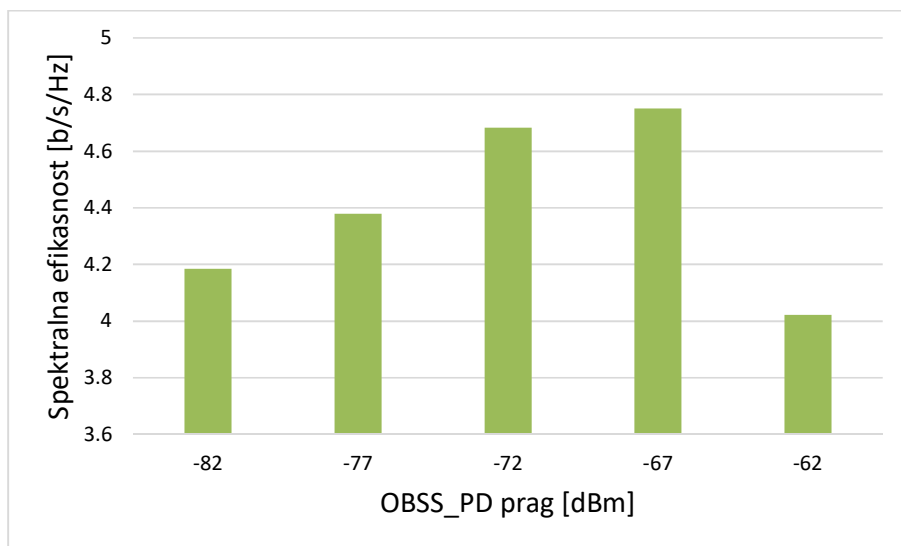
Istraživanja o DSC algoritmu su pokazala da se sa povećanjem CS praga povećava i vjerovatnoća greške po frejmu. Ovo se dešava jer se povećanjem praga detekcije zauzetosti kanala povećava i broj istovremenih prenosa u istom kanalu, a samim tim i nivo interferencije. Međutim, identifikacijom detektovanih frejmova, prema vrijednosti BSS boje i povećanjem samo OBSS_PD praga, moguće je kontrolisati nivo interferencije. To se upravo ispituje u ovom

istraživanju. Prvo se simulira rad sedam osnovnih servisnih skupova čiji se oblasti pokrivanja preklapaju i kod kojih nije omogućena identifikacija frejmova putem BSS boje. Dakle, to odgovara načinu pristupa kanalu u današnjim WLAN mrežama. Zatim se omogući identifikacija BSS boje na svim mrežnim čvorovima, pri čemu ne postoji kolizija boje, odnosno svaki AP dodjeljuje svojim stanicama različit identifikator mreže. Za detekciju frejmova iz iste mreže, svaki BSS koristi isti podrazumijevani CST prag, koji je jednak osjetljivosti prijemnika i iznosi -92 dBm, dok se OBSS_PD prag povećava sa korakom od 5 dB, od -82 dBm, do gornje granice od -62 dBm (CCA ED). Promjena praga u opsegu od -92 do -82 dBm nema efekta na performanse mreže, pa ti rezultati nisu ni predstavljeni na graficima. Kao metrika za evaluaciju rezultata koristi se srednja brzina prenosa podataka u mreži, u svih sedam servisnih skupova. Cilj je utvrditi opseg vrijednosti OBSS_PD praga koje će unaprijediti performanse mreže, kao i gornju granicu ovog parametra iznad koje protok počinje da opada.

Ukupan prosječni protok značajno varira zavisno od pozicija stanica u mreži, jer od toga zavisi i količina interferencije i SINR. Da bi rezultati bili mjerodavni iste simulacije se ponavljaju za različit raspored korisnika, pri čemu pozicija pristupnih tačaka ostaje ista. To se u simulatoru definiše promjenom vrijednosti *seed* broja, što je u vezi sa generatorom slučajno odabranih vrijednosti. Za potrebe ovog istraživanja sve simulacije su ponovljene za šest različitih vrijednosti *seed* broja, odnosno za šest slučajno odabranih pozicija stanica. Rezultati u vidu srednje brzine prenosa i odgovarajuće spektralne efikasnosti pokazani su na slikama 4.5 i 4.6, respektivno.



Slika 4.5 Uticaj promjene OBSS_PD praga na srednju brzinu prenosa, *outdoor* scenario

Slika 4.6 Uticaj promjene OBSS_PD praga na spektralnu efikasnost, *outdoor* scenario

Iz prezentovanih rezultata može se vidjeti da se sa povećanjem OBSS_PD praga, od najniže vrijednosti do -67dBm, povećava ukupni prosječni protok podataka u mreži. Najveći prosječni protok je ostvaren pri vrijednosti OBSS_PD praga od -67dBm i iznosi 13.5% više nego u slučaju kada se u mreži koristi samo jedna vrijednost praga detekcije zauzetosti kanala. Povećanje brzine prenosa u istom frekvencijskom opsegu znači i bolje iskorišćenje spektra, što se ogleda u povećanju broja prenijetih bita u sekundi po hercu, sa 4.18 na 4.75. Sa daljim povećanjem vrijednosti OBSS_PD praga, ukupni protok podataka u mreži opada i pri gornjoj granici od -62dBm je neznatno niži nego u slučaju kada se u mreži ne primjenjuje BSS boja (na grafiku rezultat za OBSS_PD = -82 dBm). Numerički rezultati su dati u Tabeli 4.2.

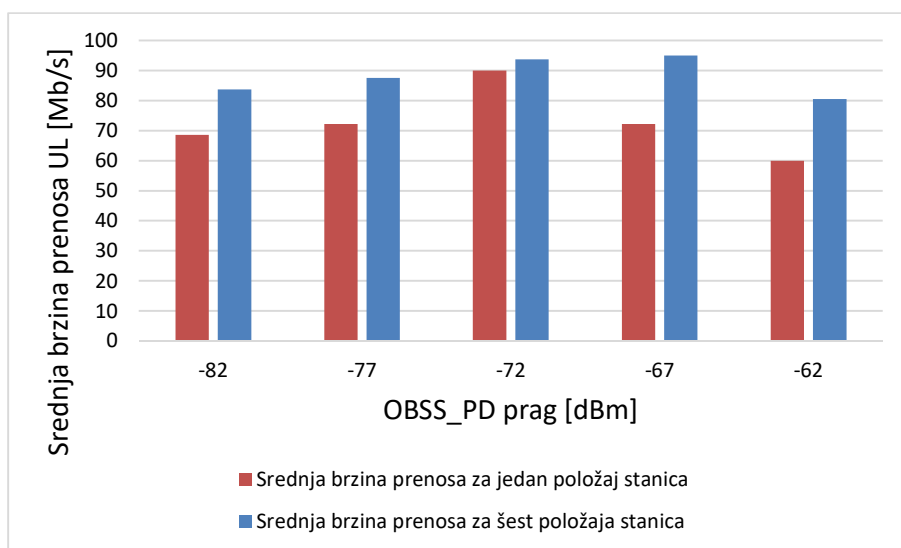
Tabela 4.2 Numerički rezultati za *outdoor* scenario

OBSS_PD [dBm]	Ukupan prosječni protok [Mb/s]	Procenat povećanja protoka
-82	83.68	-
-77	87.57	4.65
-72	93.68	11.95
-67	95	13.53
-62	80.44	-3.87

Objašnjenje je sledeće. Povećanjem OBSS_PD praga, stanice će češće detektovati kanal kao slobodan, čime se stvara više prilika za prenos. Međutim, kako se sa povećanjem praga za

detekciju stranih frejmova povećava i dozvoljeni nivo interferencije, to direktno utiče na odnos SINR i na ostvareni protok. Uvidom u rezultate simulacije *outdoor* komunikacionog scenarija, može se konstatovati da optimalna vrijednost OBSS_PD praga, u opisanom okruženju, varira u opsegu od -77 do -67 dBm. Iz ovih rezultata se takođe može zaključiti da BSS boja ostvaruje postavljeni zahtjev u pogledu efikasnijeg iskorišćenja spektra.

Istaknuto je da od položaja stanica zavisi slabljenje signala, a količina interferencije na određenoj lokaciji će definisati i koliko često će kanal biti detektovan kao slobodan. Raspored korisnika u blizini AP-a će odrediti SINR odnos, a samim tim i ispravan ili pogrešan prijem. To direktno utiče na vjerovatnoću greške po bitu (BER), broj retransmisija i ukupan prosječni protok. Da bi se naglasio značaj uzajamnog položaja AP-a i korisnika, na sledećoj slici je dato poređenje ukupnog prosječnog protoka u mreži za svih šest različitih vrijednosti *seed* parametra (isti rezultati sa slike 4.5) i ostvarenog protoka za samo jedan slučajno odabrani položaj stanica.



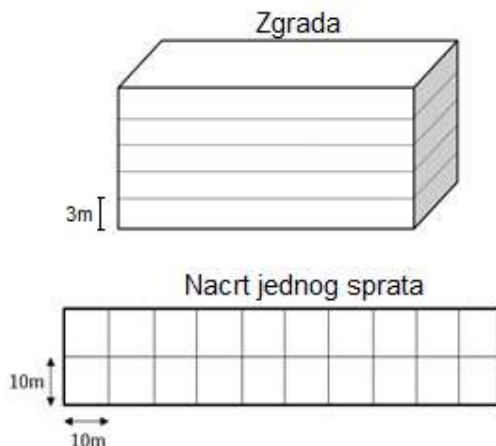
Slika 4.7 Uticaj položaja stanica na srednju brzinu prenosa

Rezultati iz odabrane grupe simulacija, tj. za jednu odabranu *seed* vrijednost, odstupaju i do 24% od srednje vrijednosti svih rezultata. Ovo je značajno u uslovima nedostatka frekvencijskih resursa, kao što je slučaj u nelicenciranom opsegu. Dalje, može se zaključiti da jedna vrijednost OBSS_PD praga u određenom trenutku nema jednak efekat u svakom servisnom skupu. Na primjer, mada OBSS_PD=-67dBm rezultuje smanjenjem protoka pri jednom određenom položaju stanica, vidno je da u preostalim simulacijama ista vrijednost unapređuje performanse mreže, što se vidi po većoj srednjoj vrijednosti svih rezultata za istu

vrijednost $OBSS_PD = -67$ dBm. Sa slike je takođe uočljivo da u slučaju izdvojenih simulacija protok počinje da opada pri nižim vrijednostima $OBSS_PD$ praga i to u opsegu -72 do -67 dBm, dok se za veću grupu rezultata to dešava tek od -67 do -62 dBm.

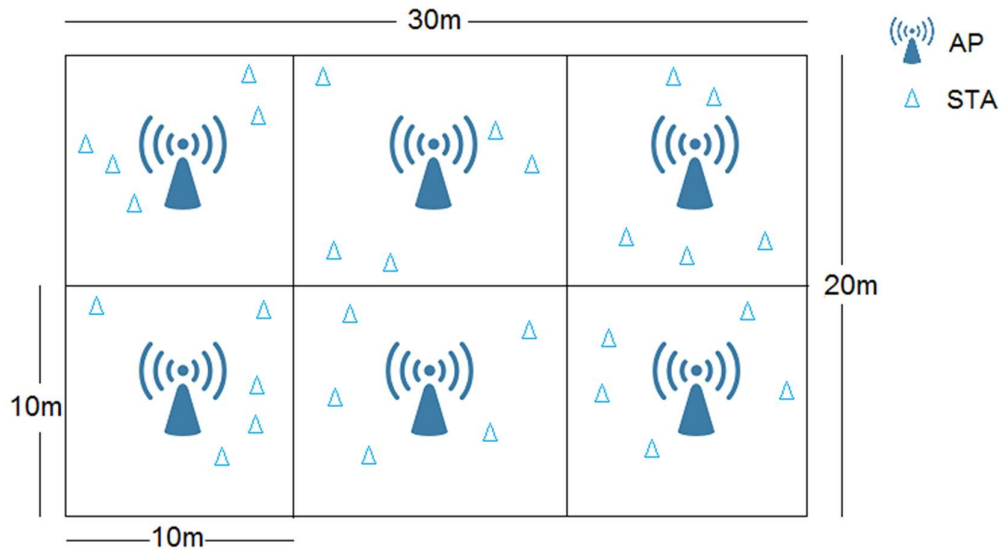
4.1.2 Rezidencijalni scenario

Najkompleksniji od svih predloženih scenarija je upravo rezidencijalni, jer podrazumijeva najveći broj pristupnih tačaka, veliku gustinu stanica i složeniji model propagacije. Šematski prikaz originalnog rezidencijalnog scenarija, po predlogu TGax radne grupe, prikazan je na slici 4.8, [30]. Komunikaciono okruženje podrazumijeva 100 stanova sa po jednim AP-om, dok ukupan broj korisnika varira između 4 i 20 po jednom AP-u. Iz opisanih karakteristika može se jasno vidjeti koji su to očekivani uslovi za implementaciju 802.11ax mreža.



Slika 4.8 Rezidencijalni scenario radne grupe TGax

Kako je i ranije navedeno, ovakvi simulacioni scenariji postavljaju veliki zahtjev u pogledu potrebne procesorske moći, tako da je i ovaj scenario izmijenjen. Bitno je naglasiti i da propagacioni modeli ns-3 simulatora ne rade kalkulaciju gubitka usled prostiranja signala kroz spratove, odnosno horizontalne prepreke. Stoga je za potrebe ovog istraživanja testno okruženje svedeno na jedan sprat, šest stanova i šest pristupnih tačaka sa po pet stanica, kao na slici 4.9. Ovakvi uslovi su jednostavniji za realizaciju, a ipak predstavljaju približno realno okruženje stambene zgrade.



Slika 4.9 Topologija mreže za rezidencijalni scenario

Kao i u slučaju *outdoor* scenarija, cilj je simulirati nekoliko 802.11ax servisnih skupova čije se oblasti pokrivanja preklapaju, kako bi se procijenio efekat promjene OBSS_PD praga, ali sada u *indoor* okruženju. Od dimenzija koje nisu pokazane na slici, treba naglasiti da je visina sprata 3m i to je visina na kojoj su smještene pristupne tačke, dok je visina stanica 1.5m. Položaj stanica je fiksni i njihov raspored slučajno odabran u granicama jednog stana, čiji su zidovi od betona i imaju prozore. Kao što je naglašeno u slučaju *outdoor* scenarija, da bi dobijeni rezultati bili mjerodavni, ista grupa simulacija se ponavlja za nekoliko slučajno odabranih pozicija stanica. Parametri koji određuju generisani saobraćaj, kao i parametri fizičkog i MAC sloja su definisani prema dokumentu simulacionih scenarija, [30], i isti su kao za *outdoor* okruženje. MAC i PHY karakteristike su navedene u Tabeli 4.1, dok se komunikacija AP-STA odvija po UDP modelu server-klijent na *uplink* smjeru i traje 10 sekundi. *Indoor* okruženje zahtijeva drugačiji model slabljenja signala, koji je razvila TGax grupa i zasniva se na postojećim modelima kanala za IEEE 802.11n i 802.11ac standarde, [33]. Slabljenje se računa prema prilagođenoj formuli, bez gubitka usled prostiranja kroz spratove, [29]:

$$L(d) = 40.05 + 20 * \log_{10} \left(\frac{f}{2.4} \right) + 20 * \log_{10} (\min(d, 5)) + (d > 5) \\ * 35 * \log_{10} \left(\frac{d}{5} \right) + 5 * W \quad (4.4)$$

Ovde je:

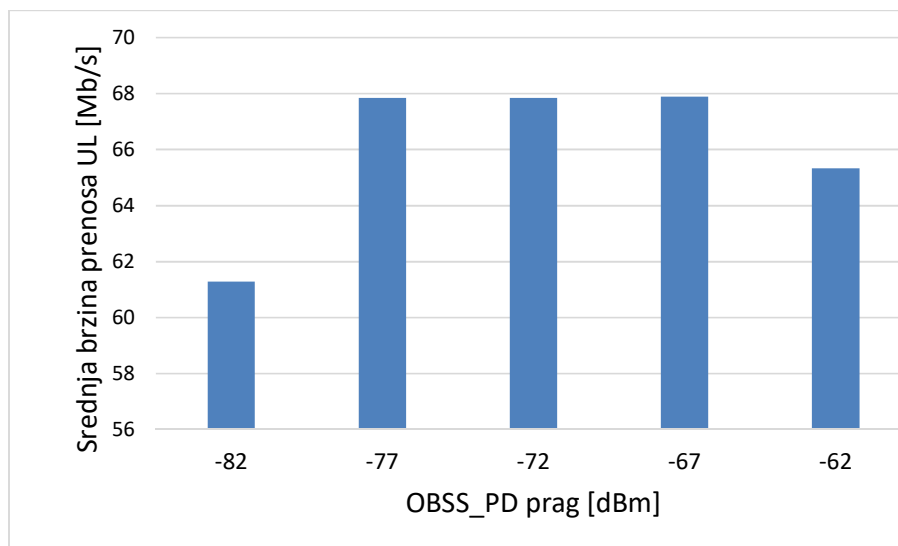
L - slabljenje signala usled propagacije u dB

f - centralna frekvencija u GHz

d - 3D udaljenost između mrežnih elemenata u metrima, uz uslov $d = \max(3D \text{ udaljenost}, 1)$

W - ukupan broj zidova u x i y smjeru kroz koje signal prolazi

U modelu propagacije ns-3 simulatora je vrijednost parametra W fiksna i iznosi $W = 1$. Vrijednost praga detekcije zauzetosti kanala za frejmove iz iste mreže je fiksna i jednaka je osjetljivosti prijemnika $CST = -92dBm$, a vrijednost parametra $OBSS_PD$ se mijenja u rasponu od -82 do -62 dBm , sa korakom od 5 dB . Kao metrika uticaja promjene $OBSS_PD$ praga na performanse mreže koristi se prosječna brzina prenosa. Simulacije su ponovljene za šest različitih položaja stanica i srednja vrijednost rezultata je pokazana na slici 4.10.



Slika 4.10 Uticaj promjene $OBSS_PD$ praga na srednju brzinu prenosa, *indoor* scenario

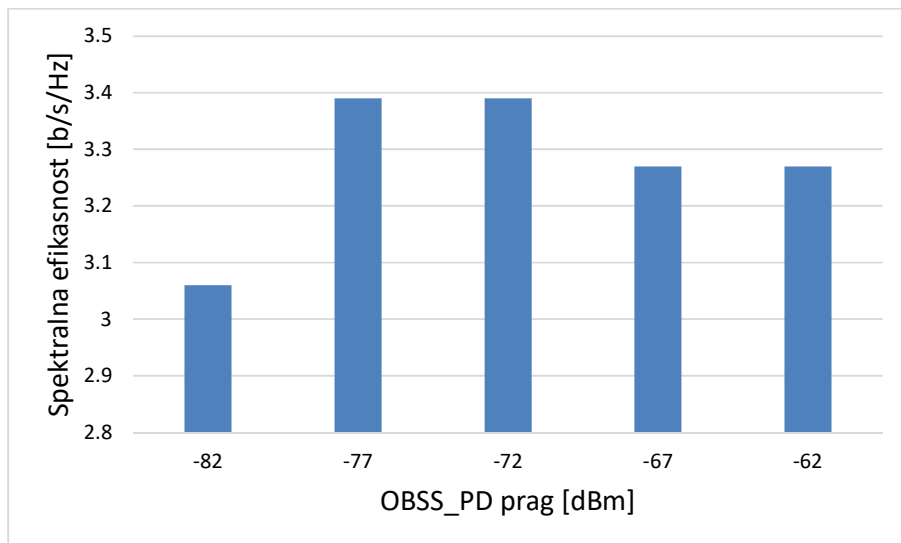
Sa grafika je uočljivo da sa povećanjem praga detekcije stranih frejmova raste i ukupan izmjereni protok podataka. Maksimalna prosječna brzina prenosa se postiže za vrijednost $OBSS_PD = -67$ dBm i ona je oko 11% veća u odnosu na početno stanje u mreži, odnosno kada je $OBSS_PD = -82$ dBm . Daljim povećanjem $OBSS_PD$ praga, prosječni protok podataka počinje da opada, ali se ne smanjuje ispod početne vrijednosti, kao što je to bio slučaj u *outdoor* scenariju. To znači da signal od stanica iz susjednih mreža nema dovoljnu jačinu da naruši prijem. Ovo je posledica drugačijeg modela propagacije. Naime, slabljenje signala usled prostiranja EM talasa u slobodnom prostoru je znatno manje, nego u slučaju prostiranja kroz

zidove i to se ogleda u modelima propagacije. Primjera radi, za $d = 15m$ slabljenje signala u *outdoor* scenariju iznosi oko 68 dB, dok za isto rastojanje u zatvorenom prostoru slabljenje iznosi oko 82 dB. Ovde se uzima u obzir da za $d = 15m$ signal od stanica iz susjednih stanova prolazi kroz zid. Precizni numerički rezultati za drugi scenario, sa procentom povećanja protoka podataka, su dati u Tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Numerički rezultati za *indoor* scenario

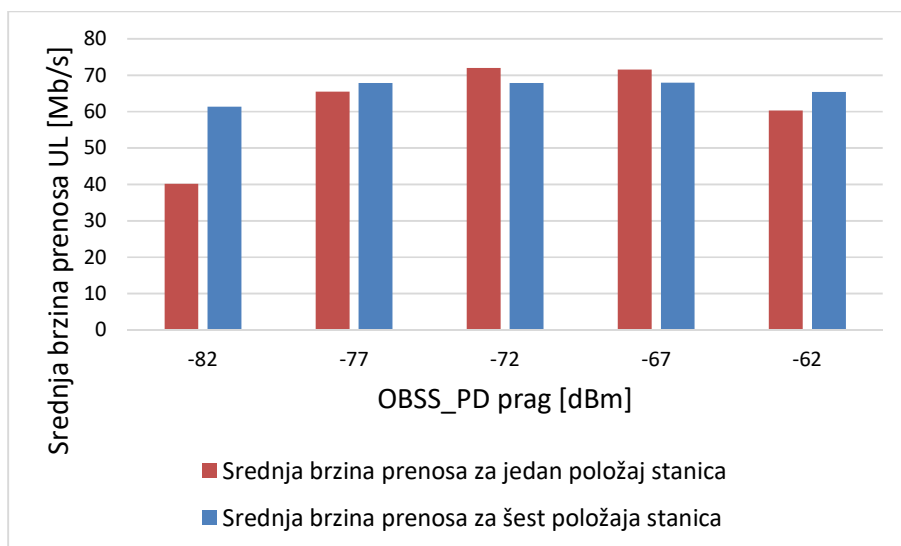
OBSS_PD [dBm]	Ukupan prosječni protok [Mb/s]	Procentat povećanja protoka
-82	61.29	-
-77	67.84	10.69
-72	67.85	10.7
-67	67.9	10.78
-62	65.33	6.59

Poređenjem numeričkih rezultata *outdoor* i *indoor* scenarija, vidi se da u pogledu procenta povećanja prosječne brzine prenosa nema značajnih razlika. Međutim, jako je bitno istaknuti razliku u pogledu efekta propagacije na interferirajuće frejmove u različitim sredinama, jer će to definisati gornju granicu opsega vrijednosti OBSS_PD praga. Dok je ova granica u otvorenom prostoru -67 dBm, u rezidencijalnom okruženju je jednaka maksimalnoj vrijednosti OBSS_PD praga. Dakle, očekivano je da će povećanje praga detekcije interferencije u cijelom predloženom opsegu od -82 dBm do -62 dBm imati pozitivne efekte na vrijednost protoka podataka u mreži, čime se pokazala tačnom pretpostavka da BSS boja i u *indoor* scenariju poboljšava spektralnu efikasnost, što je pokazano i grafički na slici 4.11.



Slika 4.11 Uticaj promjene OBSS_PD praga na spektralnu efikasnost, rezidencijalni scenario

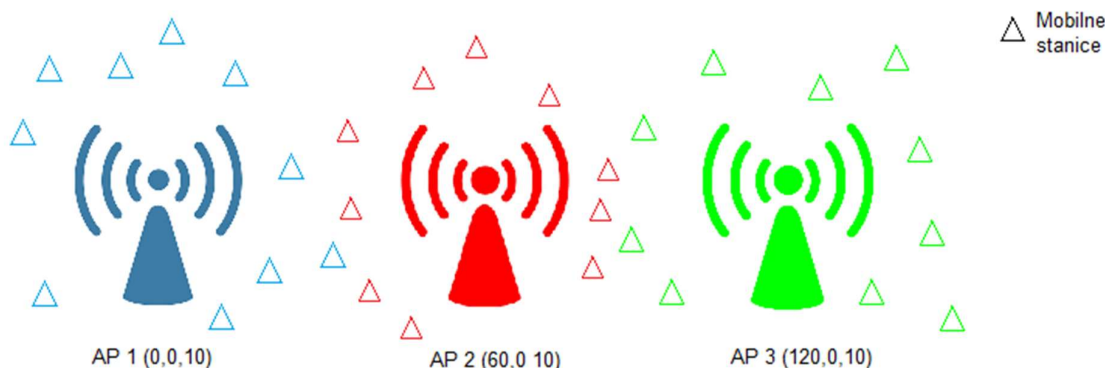
Analiza rezultata prethodnog scenarija je zaključena konstatacijom da optimalna vrijednost OBSS_PD praga zavisi od uzajamnog položaja AP-a i stanica, kao i stanica iz drugih mreža u neposrednoj blizini. Iako se *indoor* i *outdoor* okruženje u mnogo čemu razlikuju, isti zaključak o značaju rasporeda korisnika se može i ovde primijeniti. U tom cilju na slici 4.12 se pokazuje poređenje srednje vrijednosti rezultata brzine prenosa podataka i rezultata za jedan slučajno odabrani položaj stanica.



Slika 4.12 Uticaj položaja stanica na ukupan protok podataka u mreži

4.1.3 Outdoor scenario sa mobilnim stanicama

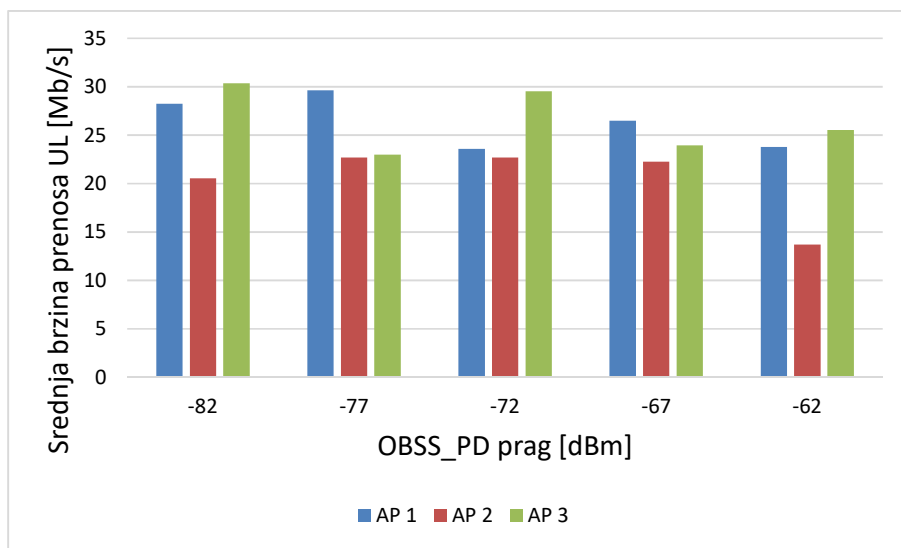
Istaknuto je da WLAN mreže sledeće generacije treba da pruže bolje korisničko iskustvo (QoE) i bolju spektralnu efikasnost u uslovima velike gustine korisnika. Zbog toga je od interesa procijeniti kako promjena OBSS_PD praga utiče na protok podataka u mreži u *outdoor hotspot* okruženju sa mobilnim korisnicima. Ovakvo okruženje je simulirano kroz tri servisna skupa tj. tri 802.11ax mreže, čiji je uzajamni položaj pokazan na slici 4.13



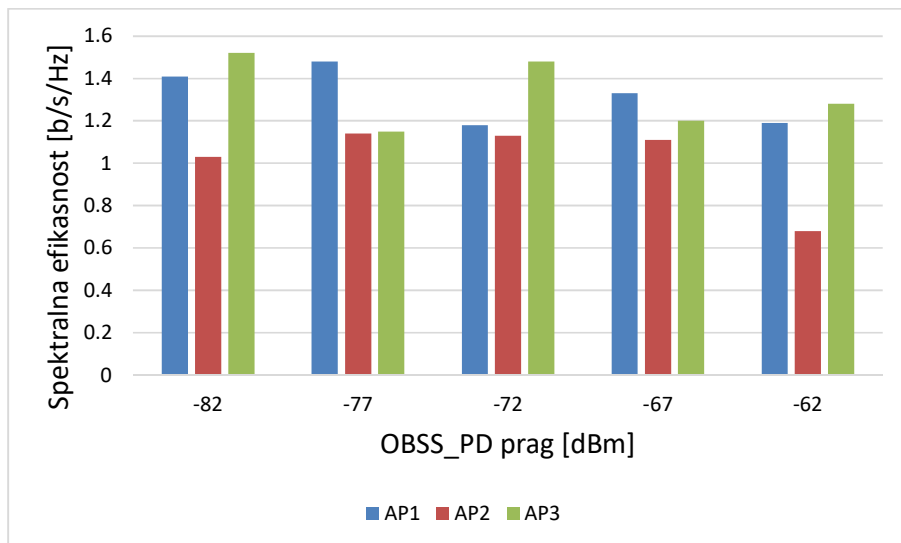
Slika 4.13 Topologija mreže za *outdoor hotspot* scenario

Svaki AP je pozicioniran na visini od 10m i opslužuje po deset mobilnih korisnika. Visina korisnika je 1.5m, a njihov početni položaj u radijusu od 10m od odgovarajuće pristupne tačke. Implementiran je *RandomWalk2D* model kretanja sa brzinom od 1m/s i slučajnom promjenom smjera svake dvije sekunde. Granice kretanja su određene radijusom od 60m. Ovaj scenario korisnicima daje početnu prednost u odnosu na korisnike u prvom *outdoor* scenariju, jer ih na početku simulacije smješta u neposrednoj blizini AP-a. U prethodnom slučaju su stanice bile raspoređene na većoj udaljenosti od pristupne tačke, pa je zbog toga i uticaj interferencije na *uplink*-u bio veliki. Međutim, očekivano je da to neće biti slučaj u *hotspot* okruženju zbog manjeg rastojanja između AP-a i stanica. Kretanje stanica može poboljšati, ali i pogoršati njihov položaj, što će se vidjeti u prosječnom protoku podataka. Iz topologije mreže jasno je da će mreža u sredini biti podložna najvećem stepenu interferencije, jer je u dometu emitovanja mreža sa lijeve i desne strane. Mreže A i C će takođe biti izložene određenom stepenu interferencije od mreže B, ali znatno manjem. Očekivano je da će protok podataka u mreži B biti niži nego u susjednim mrežama, usled nedostatka prilika za prenos. Takođe je očekivano da se na zauzetost kanala može uticati promjenom OBSS_PD praga i time povećati prosječna

brzina prenosa, što je i urađeno kroz naredni skup simulacija. U pogledu parametara PHY i MAC sloja nema promjena u odnosu na prethodno opisane scenarije, kao i u pogledu razmijenjenog saobraćaja. Međutim, zbog mobilnosti stanica, varijacije u prenosu će biti veće nego u slučaju fiksnih stanica. Zbog toga je trajanje simulacije dva puta duže nego u rezidencijalnom okruženju, kako bi se dobili mjerodavni rezultati. Prosječna brzina prenosa se mjeri u intervalu od 20 sekundi i nakon svake simulacije povećava se prag detekcije interferencije (OBSS_PD) za po 5 dB u opsegu od -82 do -62 dBm. Zatim se ista serija simulacija ponavlja za još pet vrijednosti *seed* parametra. U prethodna dva scenarija *seed* parametar je definisao samo položaj stanica u mreži. Međutim, u *hotspot* okruženju, od ove vrijednosti će zavistiti i početni položaj stanica u mreži i slučajni karakter njihovog kretanja. Gubitak usled prostiranja signala u slobodnom prostoru računa se prema *Urban Macro Line of Sight* modelu propagacije, koji je definisan jednakostima (4.1)-(4.3). Simulaciono dobijeni rezultati za treći scenario su pokazani na slikama 4.14 i 4.15, dok su numerički rezultati dati u tabelama 4.4 i 4.5.



Slika 4.14 Uticaj promjene OBSS_PD praga na srednju brzinu prenosa, *outdoor* scenario sa mobilnim stanicama



Slika 4.15 Uticaj promjene OBSS_PD praga na spektralnu efikasnost, *outdoor* scenario sa mobilnim stanicama

Prvo što se uočava sa grafika jeste da rezultati ne prate isti obrazac kao u simulacijama sa fiksnim korisnicima. Primjetna je i manja vrijednost protoka podataka u središnjem servisnom skupu, u odnosu na mreže 1 i 3, kao što je i pretpostavljeno. Sa grafika je vidljivo i da se u mreži 2 ostvaruje približno ista prosječna brzina prenosa do OBSS_PD=-67dBm i da nakon ove vrijednosti dolazi do značajne degradacije mrežnih performansi.

Tabela 4.4 Numerički rezultati za *outdoor* scenario sa mobilnim stanicama

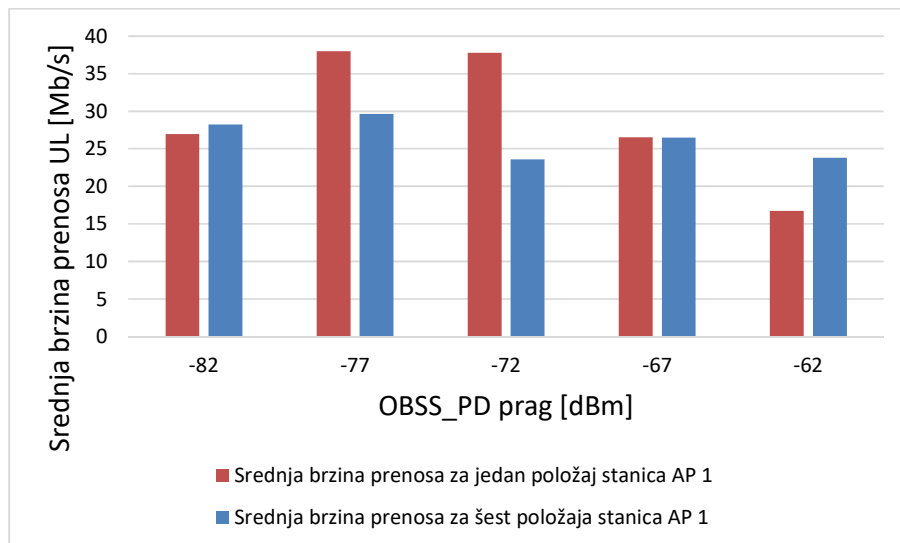
OBSS_PD [dBm]	Ukupan prosječni protok [Mb/s]		
	AP1	AP2	AP3
-82	28.22	20.46	30.35
-77	29.62	22.70	22.98
-72	23.56	22.69	29.54
-67	26.51	22.27	23.93
-62	23.80	13.69	25.52

Prelazeći na numeričke rezultate, vidi se da se maksimalno povećanje brzine prenosa u mreži 2, oko 10%, ostvaruje za OBSS_PD=-77 dBm. Što se tiče prvog i trećeg servisnog skupa, prisutne su značajne varijacije u srednjoj vrijednosti rezultata i ne može se ustanoviti optimalna vrijednost praga detekcije stranih frejmova. U prilog tome date su slike 4.16, 4.17 i 4.18 koje pokazuju razlike između pojedinačnih i srednjih rezultata za sva tri servisna skupa, iz čega se

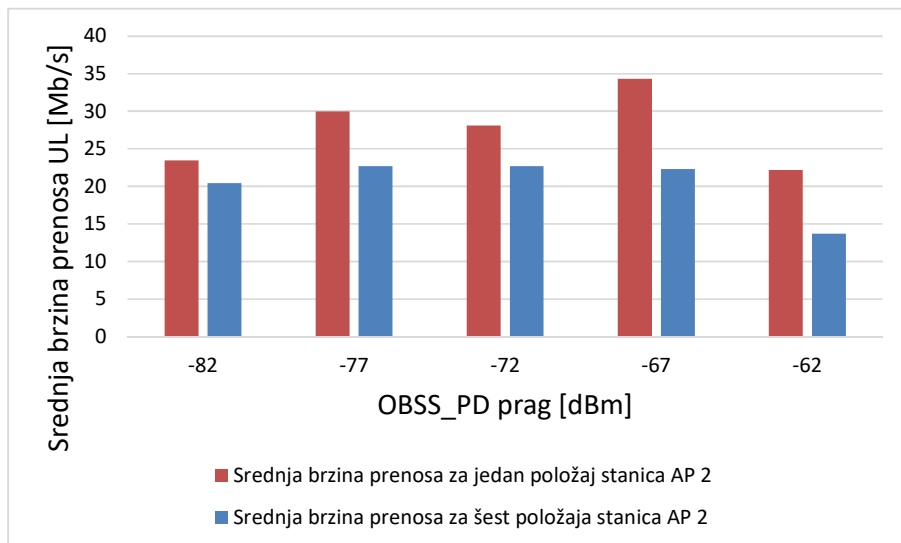
može zaključiti da fiksna vrijednost praga detekcije interferencije nije optimalno rješenje u slučaju kada su korisnici mobilni.

Tabela 4.5 Procenat promjene brzine prenosa pri promjeni OBSS_PD praga

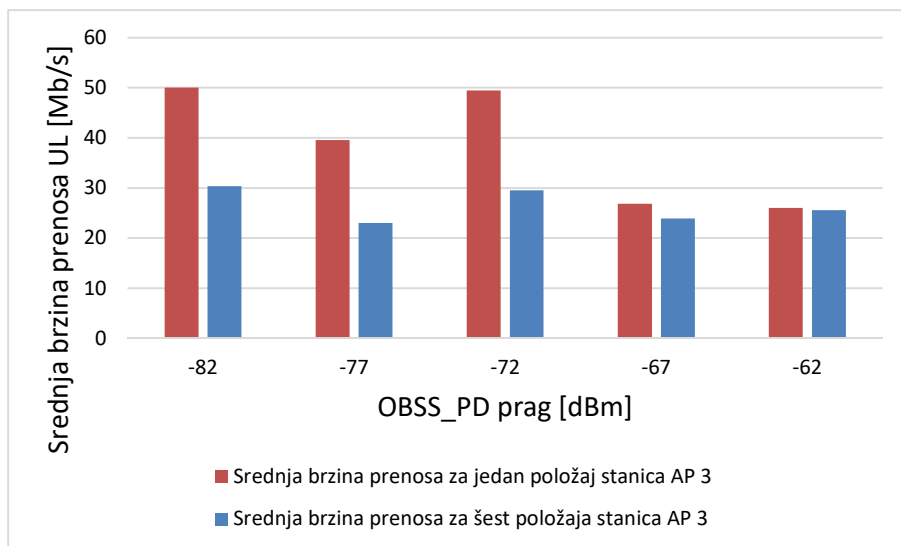
OBSS_PD [dBm]	Procenat povećanja prosječne brzine prenosa		
	AP1	AP2	AP3
-82	-	-	-
-77	4.96	10.95	-24.28
-72	-16.5	10.9	-2.67
-67	-6.06	8.85	-21.15
-62	-15.66	-33.09	-15.91



Slika 4.16 Uticaj položaja stanica na ukupan protok podataka u prvom servisnom skupu



Slika 4.17 Uticaj položaja stanica na ukupan protok podataka u drugom servisnom skupu



Slika 4.18 Uticaj položaja stanica na ukupan protok podataka u trećem servisnom skupu

Iz opisanog istraživanja na temu performansi BSS boje, zaključuje se da ova tehnika može unaprijediti spektralnu efikasnost u WLAN mrežama sledeće generacije. Podešavanjem OBSS_PD praga u opsegu od -77 do -67 dBm u *outdoor* okruženju može se povećati prosječna brzina prenosa do 13 %. U slučaju rezidencijalnog scenarija pokazano je da, zbog propagacije

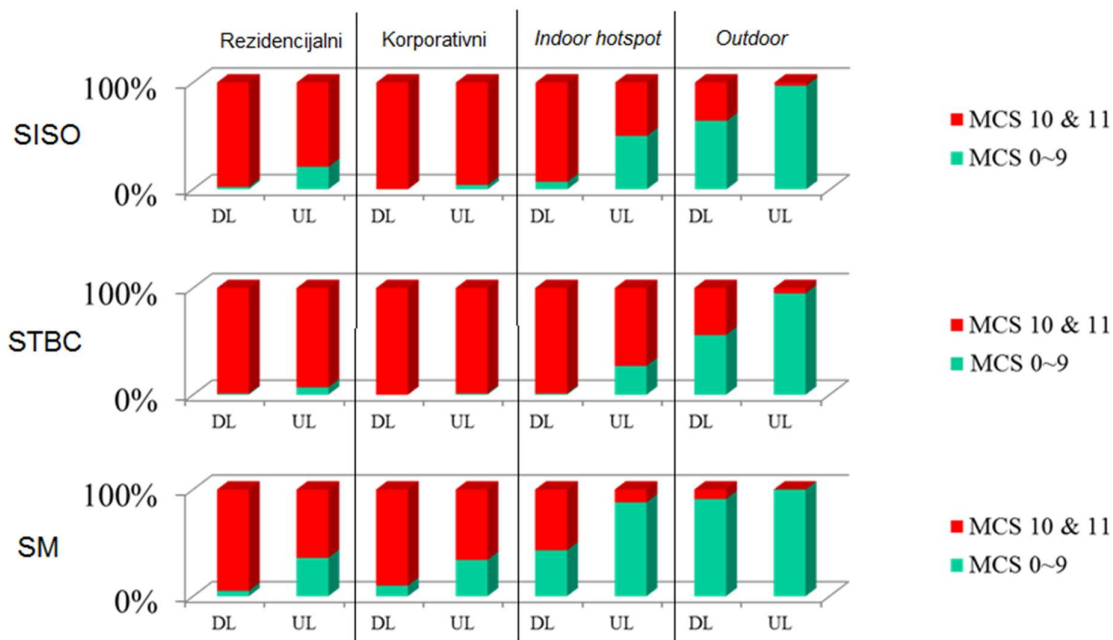
signala kroz fizičke prepreke, interferencija iz susjednih mreža neće imati veliki uticaj na prijem. Zbog toga je gornja granica optimalne vrijednosti OBSS_PD praga ujedno i maksimalna vrijednost, odnosno -62 dBm.

Situacija je drugačija sa scenarijem koji podrazumijeva mobilnost stanica. Pokazano je da povećanje OBSS_PD praga može doprinijeti povećanju srednje brzine prenosa, ali će to umnogome zavisiti od pozicija stanica, odnosno slučajnog karaktera njihovog kretanja, kao i stepena preklapanja oblasti pokrivanja različitih mreža. U takvim uslovima bi se mogla koristiti fiksna vrijednost OBSS_PD praga ukoliko susjedne mreže nisu previše blizu. U suprotnom, optimalnu vrijednost praga detekcije bi trebalo dinamički prilagoditi u zavisnosti od bliskih izvora interferencije.

Glava 5

Analiza performansi u slučaju primjene 1024-QAM

Prvo istraživanje na temu primjene 1024-QAM modulacije u okviru TGax grupe uradili su predstavnici *LG Electronics* korporacije u maju 2014. godine, [34]. Zbog većeg broja prenijetih bita u jednom simbolu, 1024-QAM pruža 25% veću nominalnu brzinu prenosa na nivou linka u odnosu na 256-QAM, što je spektralno najefikasnija modulacija u poslednjoj generaciji WLAN mreža. Međutim, to ne garantuje jednako povećanje brzine prenosa i na nivou sistema, pa je cilj ovog istraživanja bio da se utvrdi koja su realna očekivanja od implementacije modulacije višeg nivoa. 1024-QAM se uvodi u sklopu dvije nove modulacione šeme – MCS 10 uz kodni odnos 3/4 i MCS 11 uz kodni odnos 5/6. Prije testiranja brzine prenosa ispitano je koja modulaciona šema se bira sa najvećom vjerovatnoćom u kojem scenariju, pri upotrebi algoritma za automatsko prilagođavanje MCS uslovima na kanalu. Rezultati su pokazali da se i pri SISO i STBC (*Space Time Block Code*) načinu prenosa, kao i pri prostornom multipleksiranju (*SM – Spatial Multiplexing*), u *indoor* okruženju, MCS 10 i MCS 11 biraju sa visokim stepenom vjerovatnoće, u slučaju korporativnog okruženja čak 100%, što je pokazano na slici 5.1, [34]. Zatim je analizirano povećanje brzine prenosa u 4 predložena simulaciona scenarija: rezidencijalni, korporativni (eng. *enterprise*), *indoor hotspot* i *outdoor*, [30]. Pokazano je da se uključivanjem 1024-QAM modulacije u adaptivni algoritam izbora MCS, brzina prenosa može povećati preko 20% u *indoor* scenarijima. Pri tome su u toku 93-100% trajanja simuliranog prenosa podataka, u sva tri *indoor* okruženja, korišćene MCS 10 i MCS 11 na DL smjeru komunikacije, pa se prema tome povećanje brzine može pripisati upravo ovim modulacijama, [34].



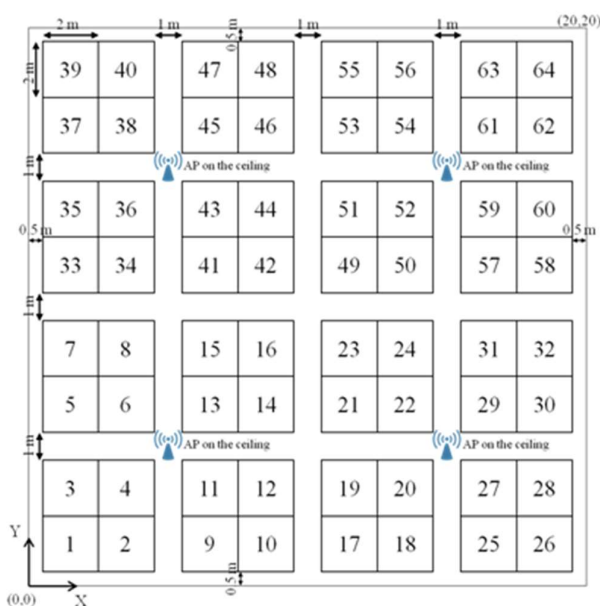
Slika 5.1 Vjerovatnoća izbora različitih modulacija u različitim scenarijima

Sa rezultatima ovog istraživanja tim *LG Electronics* i predstavnici drugih kompanija (*Sony*, *Cisco*, *Apple*, *Broadcom*,...) zvanično iznose predlog upotrebe 1024-QAM modulacije za prenos u 802.11ax mrežama na sastanku TGax grupe u septembru 2015. godine, [13]. Osim očiglednog argumenta u smislu povećanja nominalne brzine prenosa, oni predočavaju i marketinške prednosti ovog poteza. Naime, uz procenat povećanja brzine od 15%, usled većeg broja podnosilaca za prenos podataka u OFDM simbolu, i 25% povećanja brzine koje dolazi od upotrebe 1024-QAM modulacije, IEEE 802.11ax se može oglašavati kao prva WLAN tehnologija koja dostiže brzinu od 10 Gb/s. Unapređenje spektralne efikasnosti kroz OFDMA i SR mehanizme je značajno sa naučnog aspekta, ali ono što privlači prosječnog korisnika novoj tehnologiji je veća brzina prenosa. Takođe, 802.11ax bi na ovaj način privukao pažnju i kao prva bežična tehnologija koja koristi 1024-QAM, [13]. Nakon pozitivnih argumenata, u okviru iste prezentacije je izložen skup potencijalnih poteškoća u vezi sa hardverskom realizacijom tako visokog nivoa modulacije. Tu se prije svega ističe zahtjev za visokim odnosom SINR. Naime, kako bi se ostvario prenos uz zadatu vjerovatnoću greške po paketu (PER - *Packet Error Rate*) od 10%, MCS 11 zahtijeva SINR odnos od 32 dB. Uz to, treba imati u vidu i odstupanje frekvencije podnosilaca (CFO – *Carrier Frequency Offset*), što bi se uz odgovarajući dizajn pilot nosilaca moglo kompenzovati. U zaključku prezentacije konstatovano je da su se navedeni izazovi mogli prevazići čak i sa tadašnjom tehnologijom

(2015. godina), a da se do završetka procesa standardizacije očekuje dalji napredak u tom pogledu, [13], pa je predlog upotrebe 1024-QAM u 802.11ax mrežama usvojen, [12].

5.1 Simulacioni scenario

Uvidom u predstavljene rezultate tima *LG Electronics*, za procjenu performansi u slučaju primjene 1024-QAM modulacije, odabran je modifikovani korporativni scenario, pokazan na slici 5.2.



Slika 5.2 Topologija mreže za korporativni simulacioni scenario

Slika 5.2 predstavlja nacrt jedne prostorije u korporativnom okruženju koju čine 64 radna odjeljka (eng. *cubicles*). U svakom radnom odjeljku nalaze se tri stanice, ali je za potrebe ove simulacije taj broj smanjen na jedan, tako da svaki broj na slici predstavlja po jednog korisnika. Četiri AP-a su postavljena na plafonu, na visini od 3m i svaki opslužuje 16 korisnika. Stanice su na fiksnim pozicijama, u središtu odjeljka i na visini od 1m. Ostali parametri vezani za topologiju dati su u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Parametri mrežne topologije

Parametar	Vrijednost
Opis topologije	Jedan sprat betonske zgrade bez prozora Dimenzije 20x20x3 m, 64 radna odjeljka
Lokacije AP-a	4 AP-a pozicionirana na plafonu: AP1: (x=5,y=5,z=3) AP2: (x=15,y=5,z=3) AP3: (x=5,y=15,z=3) AP4: (x=15,y=15,z=3)
Lokacije stanica	U odnosu na donji lijevi ugao prostorije 1 stanica u centru odjeljka, visina=1m

Pošto je cilj testirati performanse modulacija višeg nivoa, model generisanog saobraćaja se razlikuje u odnosu na prethodno opisane scenarije. Paketi se šalju svakih 20 μ s u trajanju od 10s. Za potrebe procjene SR mehanizma bilo je potrebno kreirati okruženje sa interferirajućim stanicama. Međutim, ovde je fokus na performansama modulacije, tačnije na poređenju maksimalne ostvarive brzine prenosa podataka u WLAN mrežama pete i šeste (nove) generacije. To znači da je cilj simulirati uslove u kojima će 1024-QAM i 256-QAM modulacije dati što bolje rezultate. Zbog toga je svakom servisnom skupu dodijeljena različita centralna frekvencija na kanalima koji se ne preklapaju, iz opsega oko 5 GHz. Modeluje se *best effort* klasa saobraćaja odnosno UDP klijent-server komunikacija. Radi efikasnijeg uvida u performanse u slučaju primijenjene 1024-QAM modulacije, modulaciona šema je fiksna tokom trajanja simulacija, što za ns-3 simulacioni alat znači da nije moguće zadati vjerovatnoću greške. Propagacioni model za korporativni scenario zasnovan je na ITU-R P.1238 preporuci, koja definiše karakteristike propagacije signala iz opsega od 900 MHz do 100 GHz u *indoor* okruženju, [35]. Ovaj model propagacije je određen relacijom:

$$L = 20 * \log_{10}f + N * \log_{10}d + L_f(n) - 28 \quad (5.1)$$

gdje je:

L – slabljenje signala usled propagacije u *dB*

f – frekvencija signala u *MHz*

N – koeficijent slabljenja usled rastojanja

d – rastojanje između AP i stanice, u metrima, uz uslov $d > 1$

L_f – gubitak usled penetracije kroz spratove

n – broj spratova između AP i stanice, uz uslov $n \geq 1$

Vrijednosti parametara N i $L_f(n)$ su dobijene putem različitih mjerenja i za korporativno okruženje iznose $N = 30$ i $L_f(n) = 15 + 4 * (n - 1)$, pa je konačan oblik modela propagacije:

$$L = 20 * \log_{10} f + 30 * \log_{10} d - 13 \quad (5.2)$$

U skladu sa postavljenim simulacionim zahtjevima, primjenjuje se agregacija na MAC nivou (A-MPDU – *Aggregate MAC Protocol Data Unit*). Jedan A-MPDU frejm u sebi sadrži više paketa sa IP nivoa, od kojih svaki ima svoje MAC zaglavlje i čini A-MPDU *subframe*. Maksimalna veličina A-MPDU frejma zavisi od primijenjenog standarda i u slučaju 802.11n i 802.11ac mreža iznosi 64 KB i 1 MB, respektivno, [8]. Ovde se primjenjuje agregacija od 64 KB. Agregacijom frejmova postiže se efikasniji prenos, jer se manje vremena gubi na razmjenu kontrolnih poruka za rezervaciju kanala, kao i na međuintervale za sinhronizaciju prenosa, o kojima je bilo riječi ranije (IFS – *Inter Frame Space*). Preostali zajednički parametri simulacija dati su u Tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Parametri fizičkog nivoa

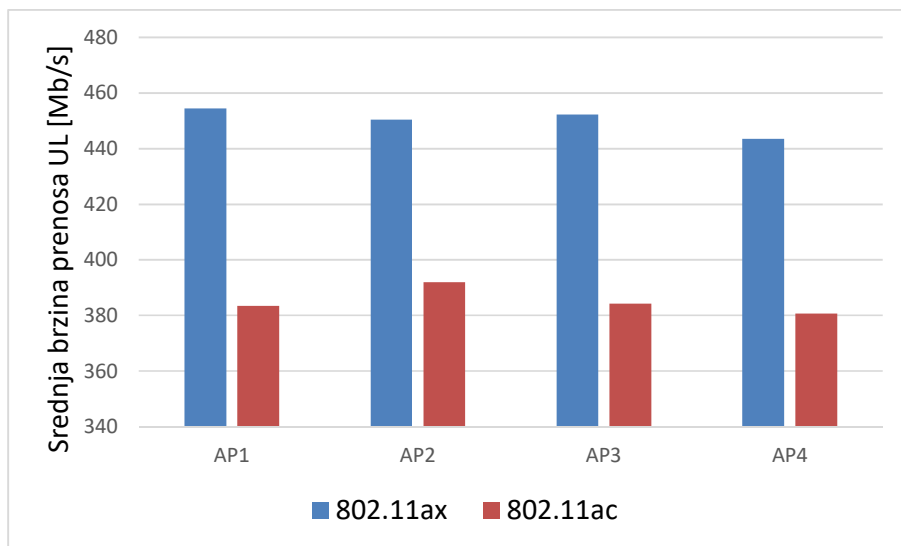
Parametar	Vrijednosti
Centralna frekvencija [GHz]	5.21 (AP1, STA 1-16) 5.29 (AP2, STA 17-32) 5.53 (AP3, STA 33-48) 5.61 (AP4, STA 49-64)
Širina kanala	80 MHz
Emisiona snaga AP-a	20 dBm
Emisiona snaga stanice	15 dBm
Br.Tx/Rx antena AP-a	2
Br.Tx/Rx antena stanice	2
Dobitak antene AP/STA	0 dBi
Šum prijemnika	7 dB
Zaštitni interval	800 ns
Trajanje OFDM simbola 802.11ax	12.8 μ s
Broj <i>data</i> podnosilaca	980
MCS za 802.11ax	11
Trajanje OFDM simbola 802.11ac	3.2 μ s
Broj <i>data</i> podnosilaca	234
MCS za 802.11ac	9

U prvoj simulaciji testira se brzina penosa na *uplink*-u u 802.11ac mreži. Primjenjuje se OFDM prenos koji podrazumijeva trajanje simbola od 3.2 μ s i 256-QAM modulaciju. U drugoj

simulaciji kreira se 802.11ax mreža sa drugačijim parametrima fizičkog nivoa – broj podnosilaca u OFDM simbolu je veći, trajanje simbola duže, a za modulaciju podnosilaca bira se 1024-QAM uz kodni odnos 5/6. Takođe, primijenjen je novi format frejma, opisan u Glavi 3. Cilj simulacija je dvostruk. Prvi je, odrediti stepen povećanja brzine prenosa podataka u 802.11ax mreži u odnosu na mrežu pete generacije, u realnom okruženju. Drugi cilj je steći uvid u realno ostvarivu brzinu prenosa podataka u 802.11ax mreži. Naime, 1024-QAM modulacija omogućava veliku brzinu prenosa na fizičkom nivou. Međutim, u praksi je pokazano da nominalna brzina prenosa podataka u 802.11 sistemima nije ostvariva uz DCF pristup kanalu i da je realno očekivani protok između 50% i 75% ove vrijednosti, [9]. To se dešava usled prenosa nekorisnog dijela paketa, poput preambule i zaglavlja frejma, kao i vremenskih intervala neophodnih za sinhronizaciju (IFS). Zbog toga je za ispitivanje praktičnog dometa 802.11ax mreža, i WLAN mreža uopšte, potrebno izmjeriti brzinu prenosa na nivou sistema.

5.2 Analiza rezultata

Grafički i numerički rezultati prethodno opisanih simulacija pokazani su na slici 5.3 i u Tabeli 5.3, respektivno, [36].

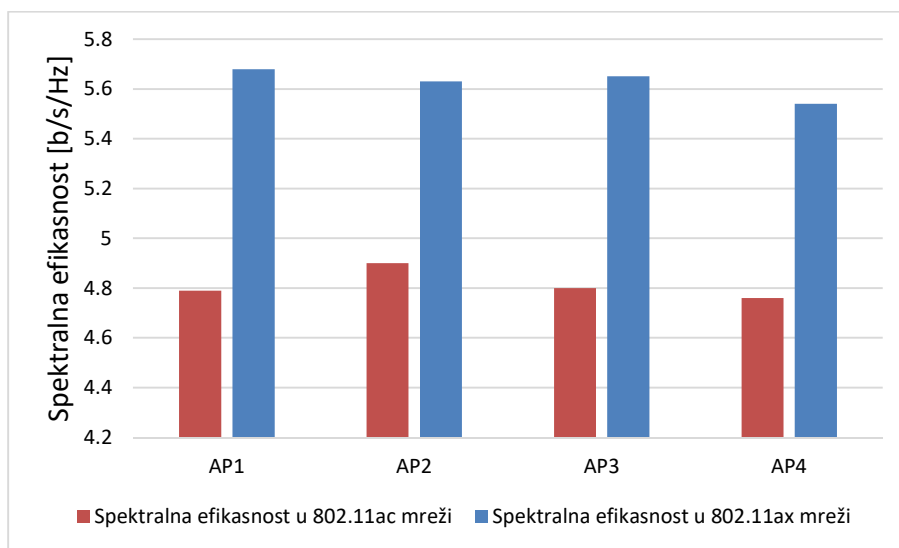


Slika 5.3 Poređenje brzine prenosa podataka u WLAN mrežama pete i šeste generacije

Tabela 5.3 Srednja brzina prenosa podataka u 802.11ac i 802.11ax mrežama

AP	802.11ac [Mb/s]	802.11ax [Mb/s]	Procenat povećanja protoka
AP1	383.49	454.48	18.51
AP2	391.96	450.4	14.91
AP3	384.21	452.26	17.71
AP4	380.65	443.56	16.53

Sa grafika je očigledno da korisnici 802.11ax mreže ostvaruju veću brzinu prenosa podataka, nego korisnici u 802.11ac mreži. Razlog tome je primjena većeg broja podnosilaca za prenos podataka u OFDM simbolu i modulacije višeg nivoa, čime se postiže povećanje brzine prenosa između 15% i 19%. To odgovara i rezultatima koje su predstavili članovi TGax grupe. Prosječni protok na različitim pristupnim tačkama je približno jednak u okviru istog standarda, što je i očekivano, jer svi servisni skupovi imaju istu topologiju i primijenjen je isti model saobraćaja. Poređenje spektralnih efikasnosti pokazano je na slici 5.4.

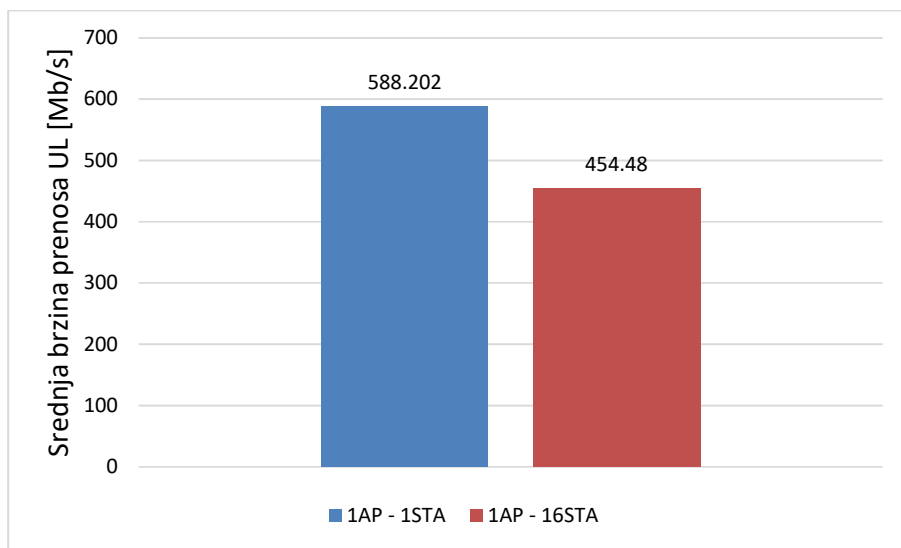


Slika 5.4 Spektralna efikasnost u 802.11ac i 802.11ax mrežama

Što se tiče drugog postavljenog cilja, iz numeričkih rezultata se može vidjeti da je realno ostvariva brzina prenosa u 802.11ax mreži, u datim uslovima, oko 450 Mb/s. Ovi uslovi podrazumijevaju 16 korisnika koji se nadmeću za pristup na istom kanalu i prema istoj pristupnoj tački. Kako bi se stekao bolji uvid u performanse u slučaju primjene 1024-QAM modulacije, modelovan je još jedan scenario 802.11ax mreže, u kom se ostvaruje komunikacija samo jednog AP-a i jedne stanice. Svi parametri zadržavaju iste vrijednosti (širina kanala,

MCS, centralna frekvencija, model propagacije), a mijenja se samo broj mrežnih elemenata. Jasno je da će brzina prenosa podataka u ovim uslovima biti veća, ali cilj je napraviti poređenje sa prethodno dobijenim rezultatima, kako bi došao do izražaja efekat CSMA/CA (DCF) pristupa kanalu na performanse sistema, u slučaju primijenjene 1024-QAM modulacije.

Uredni pregled rezultata je dat na slici 5.5 i iz njih se vidi da prosječna brzina prenosa podataka, u slučaju kada saobraćaj generiše samo jedna stanica, iznosi 588.2 Mb/s, što predstavlja oko 49% teorijski ostvarive brzine prenosa. Poređenja radi, brzina prenosa podataka na fizičkom nivou, pri definisanim parametrima - MCS 11, GI 800 ns, širina kanala 80 MHz, 2 SS - iznosi 1201 Mb/s, [37].



Slika 5.5 Uticaj broja stanica na srednju brzinu prenosa podataka u mreži

U poređenju sa prethodnim slučajem, rezultati su oko 30% veći, što je očekivano. Razlika je znatna i ona svjedoči o tome koliko nadmetanje za frekvencijske resurse može uticati na performanse mreže. Zbog toga je bitno uvesti MU pristup i na *uplink* smjeru komunikacije, što će biti omogućeno u narednoj generaciji WLAN mreža. Na taj način će, kroz tehnike OFDMA i MIMO, biti moguće stvoriti uslove u kojima će se bolje iskoristiti potencijal višenivoovskih modulacija.

Glava 6

Zaključak

2014. godine započet je rad na razvoju šeste generacije standarda za bežično lokalno umrežavanje, koji je nazvan 802.11ax. Od nove tehnologije se očekuje da značajno izmijeni način pristupa kanalu i uvede mehanizme koji će unaprijediti spektralnu efikasnost, u cilju poboljšanja korisničkog iskustva u uslovima velike gustine pristupnih tačaka i korisnika. Zbog kompleksnosti realizacije postavljenih zahtjeva, prije svega u dijeljenju frekvencijskih resursa, rad na ovom standardu traje već šest godina, a odobrenje konačne verzije se očekuje u prvoj polovini 2021. godine. Među bitnim izmjenama izdvajaju se SR mehanizmi BSS boja i DSC algoritam, kao i primjena modulacije višeg nivoa, ali u pogledu poboljšanja mrežnih performansi i korisničkog iskustva najviše se očekuje od implementacije OFDMA i MU pristupa na *uplink*-u. Iako novi standard nije još uvijek objavljen, Wi-Fi alijansa je već u drugoj polovini 2019. godine započela 'Wi-Fi CERTIFIED 6' program sertifikacije, tako da na tržištu već postoje uređaji koji podržavaju određeni skup funkcionalnosti novog standarda.

Istraživanje predstavljeno u ovom radu zasniva se na pretpostavci da tehnika BSS boje i modulacije višeg nivoa mogu unaprijediti spektralnu efikasnost u 802.11ax mrežama, što je i pokazano kroz modelovanje više komunikacionih okruženja. BSS boja je osmišljena kao rješenje koje će omogućiti ponovnu upotrebu istog kanala na prostoru gdje se preklapaju oblasti pokrivanja više mreža, uz primjenu praga višeg nivoa za detekciju interferirajućih signala. Pri tome se uzima u obzir da zbog fizičke udaljenosti izvora interferirajućih frejmova, oni neće imati bitan uticaj na mjestu prijema. Odabrana su tri relevantna scenarija u skladu sa preporukama TGax grupe i kroz analizu ostvarenih brzina prenosa podataka, što je bila metrika mrežnih performansi, pokazano je da BSS boja može unaprijediti spektralnu efikasnost. Uz to

su predložene i optimalne vrijednosti praga za detekciju interferencije u različitim okolnostima. Tako je u slučaju *outdoor* okruženja sa fiksnim stanicama pokazano da se najbolji rezultati postižu za opseg vrijednosti praga od -72 do -67 dBm, kada je brzina prenosa podataka bila oko 13% veća nego prije primjene BSS boje. Ustanovljeno je da u rezidencijalnom scenariju interferencija ima manji uticaj nego u slučaju *outdoor* okruženja, jer se signal prostire kroz betonske zidove. Zbog toga se u ovakvom okruženju može koristiti i viši nivo praga za detekciju stranih frejmova, odnosno očekivano je da će za sve vrijednosti iz opsega -82 do -62 dBm prosječni protok podataka biti veći nego u slučaju kada se za detekciju zauzetosti kanala koristi samo jedan prag.

Poboljšanja su prisutna i u trećem scenariju, koji modeluje *outdoor hotspot* uslove, ali sa određenim odstupanjima. Naime, pokazano je da se u mreži gdje je prisutan visok nivo interferencije, može povećati srednja brzina prenosa podataka, ali rezultati nisu predvidivi za sve preklapajuće servisne skupove, usled mobilnosti korisnika. Ukoliko uslovi na kanalu suviše brzo variraju, usled bliskih i mobilnih izvora interferencije, fiksna vrijednost OBS_PD praga nije optimalno rješenje, već bi ovaj parametar trebalo dinamički prilagođavati datim uslovima.

1024-QAM je najviši red kvadraturene amplitudske modulacije, ne samo u WLAN mrežama, već i u bežičnom prenosu uopšte. Pokazano je da se upravo zbog primjene ove modulacije od IEEE 802.11ax standarda može očekivati povećanje brzine prenosa podataka od 15 do 19%. Takođe, zaključeno je i da bi realno ostvariva brzina uz 1024-QAM modulaciju mogla biti znatno veća, ukoliko bi se izmijenio način pristupa kanalu, tj. način raspodjele frekvencijskih resursa, što je i očekivano uz planiranu implementaciju tehnika višestrukog pristupa.

Literatura

- [1] Cisco, VNI: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017 - 2022
- [2] Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023)
- [3] <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/20-years-of-wi-fi>
- [4] http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [5] S. Banerji, R. S. Chowdhury - "*On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology*", International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT), August 2013.
- [6] Matthew S. Ghasst "*802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*", O'Reilly, April 2002.
- [7] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications
- [8] Matthew S. Ghasst "*802.11ac: A Survival Guide*", O'Reilly, July 2015.
- [9] Matthew S. Ghasst "*802.11n: A Survival Guide*", O'Reilly, March 2012.
- [10] T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barcelo, M. Oliver - "*IEEE 802.11ah: The Wi-Fi Approach for M2M Communications*", IEEE Wireless Communications, December 2014.
- [11] G. Smith, "*Dynamic Sensitivity Control v2*"
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [12] IEEE 802.11 WLAN – Specification Framework for TGax
- [13] E. Park, et al, "1024 QAM Proposal"
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [14] "*Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless*", National Instruments White paper, March 2019.
- [15] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov and G. Bianchi, "*A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs*", IEEE Comm. Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, Firstquarter 2019.
- [16] K. Ryu – "*Indication for UL MU Carrier Sensing*"

- http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [17] G. Smith, "*Dynamic Sensitivity Control Implementation*"
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [18] M. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera, G. Smith, and D. Camps, "Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE802.11ax," in *IEEE WCNC*, March 2015.
- [19] M. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera and D. Camps, "Dynamic Sensitivity Control of Access Points for IEEE 802.11ax", in *IEEE ICC*, May 2016.
- [20] T. Itagaki, M. Mori, K. Sakoda - "Dynamic CCA control and TPC simulation results with SS1~SS3"
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [21] J. Deng, B Liang, P.K. Varshney, "Tuning the Carrier Sensing range of 802.11 MAC", IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM, December 2004.
- [22] E. Haghani, M.N. Krishnan, A. Zakhor, "Adaptive Carrier-Sensing for Throughput Improvement in IEEE 802.11 Networks", IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM, December 2010
- [23] C. Chau, I. W. H. Ho, Z. Situ, S. C. Liew, J. Zhang "Effective Static and Adaptive Carrier Sensing for Dense Wireless CSMA Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, February 2017.
- [24] O. F. Topal, G. K. Kurt, A. Soysal "Adaptation of Carrier Sensing Threshold to Increase Throughput in Dense 802.11ac Wireless Networks", 2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), Oktober 2018.
- [25] T. Itagaki, Y. Morioka, M. Mori, K. Ishihara, S. Shinohara, and Y. Inoue. "Performance Analysis of BSS Color and DSC" doc. IEEE802.11-14/1403r0, 2014
- [26] I. Selinis et al. "Evaluation of the DSC algorithm and the BSS color scheme in dense cellular-like IEEE 802.11ax deployments" 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)
- [27] I. Selinis, K. Katsaros, S. Vahid and R. Tafazolli "Control OBSS/PD Sensitivity Threshold for IEEE 802.11ax BSS Color" 2018 IEEE 29th Annual International Symposium PIMRC
- [28] I. Selinis, K. Katsaros, S. Vahid, and R. Tafazolli, "Damysus: A Practical IEEE 802.11ax BSS Color Aware Rate Control Algorithm", International Journal of Wireless Information Networks, July 2019.

- [29] ns-3 Network Simulator, <https://www.nsnam.org/>
- [30] IEEE 802.11 WLAN – TGax Simulation Scenarios
- [31] Nina Šepić, Enis Kočan, Milica Pejanović-Đurišić: "*Evaluating spatial reuse in 802.11ax networks with interference threshold adjustment*", Žabljak IT konferencija 2020, Žabljak, Montenegro; Februar 2020.
- [32] Report ITU-R M.2135-1 (12/2009) Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT – Advanced
- [33] IEEE 802.11 WLAN – IEEE 802.11ax Channel Model Document
- [34] E. Park, et al, "*Investigation on 1024-QAM feasibility in 11ax*"
http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm
- [35] Recommendation ITU-R P.1238 - "*Propagation data and prediction models for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz*"
- [36] Nina Šepić, Enis Kočan, Zoran Veljović, Milica Pejanović Đurišić: "*Assessment of novel solutions for throughput enhancement in IEEE 802.11ax networks*", TELFOR 2019, Belgrade, Serbia; November 2019.
- [37] Modulation and Coding Index
<http://mcsindex.com/>

Lista skraćenica

A-MPDU – *Aggregate MAC Protocol Data Unit*

AP – *Access point*

BACK - *Block Acknowledgement*

BER – *Bit Error Rate*

BPSK - *Binary Phase Shift Keying*

BSS - *Basic Service Set*

CCA CS - *Clear Channel Assesment Carrier Sense*

CCA ED - *Clear Channel Assesment Energy Detection*

CFO – *Carrier Frequency Offset*

CP - *Cyclic Prefix*

CS - *Carrier sense*

CSI – *Channel State Information*

CSMA/CA - *Carrier Sense with Collision Avoidance*

CST - *Carrier Sense Threshold*

CW - *Contention Window*

DCF – *Distributed Coordination Function*

DIFS - *Distributed Inter Frame Space*

DL – *Downlink*

DPSK – *Differential Phase Shift Keying*

DSC - *Dynamic Sensitivity Control*

DS – *Distributive System*

DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*

EM – *Electromagnetic*

ETSI - *European Telecommunication Standard Institute*

FCC – *Federal Communications Commission*

FCS – *Frame Check Sequence*

FER – *Frame Error Rate*

FHSS - *Frequency Hopping Spread Spectrum*

GFSK - *Gaussian Frequency Shift Keying*

GI - *Guard Interval*
HE – *High Efficiency*
HE-LTF - *High Efficiency Long Training Field*
HE-SIG-A - *High Efficiency Signal Field A* HE-SIG-A
HE-STF - *High Efficiency Short Training Field*
HEW - *High Efficiency Wireless*
HEW SG - *High Efficiency Wireless Study Group*
HR/DSSS - *High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum*
HT – *High Throughput*
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IFS – *Interframe Space*
IP - *Internet Protocol*
IR – *Infrared*
ISM – *Industrial, Scientific and Medical*
ITU-R - *International Telecommunication Union – Radiocommunication sector*
L-LTF – *Legacy Long Training Field*
L-SIG – *Legacy Signal*
L-STF - *Legacy Short Training Field*
M2M – *Machine to Machine*
MAC - *Medium Access Control*
MCS - *Modulation and Coding Scheme*
MIMO - *Multiple Input Multiple Output*
MU - *Multi-User*
MU-MIMO – *Multi User Multiple Input Multiple Output*
NAV - *Network Allocation Vector*
NIC - *Network Interface Card*
OBSS - *Overlapping Basic Service Set*
OBSS_PD - *Overlapping Basic Service Set Preamble Detection*
OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OSI - *Open System Interconnection*
PER – *Packet Error Rate*
PHY - *PHYSical*

PPDU – *PHY Protocol Data Unit*
QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*
QoE - *Quality of Experience*
QoS – *Quality of Service*
QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*
RSSI - *Received Signal Strength Indicator*
RTS/CTS - *Request to Send/Clear to Send*
RU – *Resource Unit*
SIFS - *Short Inter Frame Space*
SINR – *Signal to Interference plus Noise Ratio*
SISO - *Single Input Single Output*
SM – *Spatial Multiplexing*
SR - *Spatial Reuse*
SS – *Spatial Stream*
STA - *Station*
STBC - *Space Time Block Code*
TCP – *Transmission Control Protocol*
TPC – *Transmission Power Control*
UDP - *User Datagram Protocol*
UL - *Uplink*
WG - *Working Group*
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*
WLAN - *Wireless Local Area Network*
YANS - *Yet Another Network Simulator*