

Karakteristike Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) tehnologije, unapređenja koja donosi i očekivanja od Wi-Fi 8

Dejan Nemeć

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije

Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Novi Sad, Srbija

denem@uns.ac.rs

Sažetak – IEEE 802.11be (Institute of Electrical Electronics Engineers) je najnoviji standard iz serije IEEE 802.11 standarda. Wi-Fi Alijansa (Wi-Fi – Wireless Fidelity, WFA - Wi-Fi Alliance) ga je nazvala kao Wi-Fi 7, s obzirom da sledi nakon Wi-Fi 6/6E. Wi-Fi bežična tehnologija, koja je nastala krajem 90-tih godina XX veka i danas je veoma često prisutna u praksi. Vremenom, tokom četvrt veka, od brzine od 1 Mbit/s, evoluirala je do tehnologije koja danas omogućava maksimalnih 46 Gbit/s. Ovako velike brzine moguće su unapređenjem tehnologija koje su se koristile do sada i uvođenjem nekih novih. Konačan IEEE 802.11be standard biće usvojen u narednim mesecima, dok je Wi-Fi 7 proces sertifikacije startovao 8. januara 2024. u cilju omogućavanja interoperabilnosti uređaja različitih proizvođača. Iako ne postoje specifikacije, već je u najavi i sledeća, Wi-Fi 8, generacija koja bi trebalo da donose nova unapređenja i predviđa se da će odgovoriti izazovima Industrial 4.0 i IIoT (Industrial Internet of Things). U ovom radu navedene su karakteristike, odnosno tehnologije koje se vezuju za Wi-Fi 7, poređenje sa prethodnim tehnologijama gde se prikazuju unapređenja koja Wi-Fi 7 donosi, kao i predviđanja osnovnih karakteristika Wi-Fi 8.

ključne riječi – IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, Wi-Fi 8

I. UVOD

Wi-Fi (*Wireless-Fidelity*) je i dalje jedna od najpoželjnijih bežičnih tehnologija u svetu, sa rekordnih 19,5 milijardi uređaja koji su u upotrebi krajem 2023. godine [1]. Mnogi faktori doprineli su širokom usvajanju i uspehu Wi-Fi tehnologije, uključujući njenu podršku mobilnosti i njenu sveprisutnost zbog rada u nelicenciranim opsezima, kao i relativno niske cene primene.

Tokom godina, Wi-Fi evoluirao je kako bi podržao nove aplikacije i inovativne slučajeve upotrebe. Danas korisnici očekuju više od svog Wi-Fi-ja nego ikada ranije kod kuće, na radnom mestu i u školi. Kako potražnja za većim brzinama podataka i kapacitetom nastavlja da raste, kašnjenje i pouzdanost su postali ključni indikatori performansi za podršku aplikacijama kao što su *online* igre, video konferencije, proširena stvarnost (AR – *Augmented Reality*) i virtuelna stvarnost (VR – *Virtual Reality*).

Wi-Fi je zasnovan na IEEE 802.11 standardu (IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) i amandmanima na taj standard. Amandmani IEEE 802.11 redovno uvode nove funkcije za pružanje većih brzina i kapaciteta, povećanje efikasnosti spektra, manje kašnjenje i

manju potrošnju energije. Wi-Fi 6 tehnologiju (baziranu na IEEE 802.11ax), sertifikovala je Wi-Fi Alijansa (WFA – *Wi-Fi Alliance*) 2018. za rad u opsezima od 2,4 GHz i 5 GHz, a Wi-Fi 6E je lansiran u početkom 2021. za rad na opsegu od 6 GHz. Wi-Fi 6/6E je snažno prihvaćen na tržištu, a WFA je 8. januara 2024. predstavila program za sertifikaciju naredne generacije Wi-Fi 7 za podršku aplikacija koje se stalno razvijaju [1].

II. WI-FI 7 I IEEE 802.11BE STANDARD

Širom sveta, danas su rasprostranjene bežične mreže koje se baziraju na IEEE 802.11 standardu. Za ovu seriju standarda vezuje se i termin Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) koji predstavlja zaštitni znak organizacije pod nazivom Wi-Fi Alijansa. Wi-Fi alijansa ima sledeće ciljeve [2]:

- Promovisanje Wi-Fi sertifikacije proizvoda širom sveta kako bi podstakla proizvođače da prate standardizovane 802.11 procese prilikom razvoja WLAN (*Wireless Local Area Network*) proizvoda.
- Izgradnja i održavanje tržišta Wi-Fi proizvoda koji se nude raznim korisnicima, kao što su domaćinstva, mala i srednja preduzeća i velike kompanije.

IEEE 802.11be tehnologija, koja se naziva još *Extremely High Throughput* (EHT), treba da bude specificirana u najnovijem standardu IEEE 802.11 standardu, kojeg prati i termin Wi-Fi 7. Izgrađen je na bazi IEEE 802.11ax, fokusirajući se na podršku rada u zatvorenom i otvorenom prostoru u frekventnim opsezima od 2,4 GHz, 5 GHz i 6 GHz sa stacionarnim stanicama i stanicama koje se kreću brzinom pešaka. Veruje se da će brzina prenosa može dostići teoretski maksimum od 46 Gbit/s, iako su stvarni rezultati niži [3].

IEEE 802.11be radnu grupu (TG – *Task Group*) predvode predstavnici kompanija Qualcomm, Intel, i Broadcom, dok predstavnici Huawei, Maxlinear, NXP i Apple imaju seniorske pozicije u grupi [3].

Razvoj amandmana 802.11be je u toku. Nacrt (*draft*) usvojen je u martu 2021, a konačna verzija očekuje se do kraja 2024. godine. Uprkos tome, brojni proizvodi najavljeni su još 2022. na osnovu nacrta standarda, a u maloprodaji su se našli početkom 2023. Wi-Fi Alijansa je 8. januara 2024. predstavila svoj program „Wi-Fi CERTIFIED 7“ za sertifikaciju Wi-Fi 7 uređaja. Iako se konačna ratifikacija ne očekuje do kraja 2024. godine, tehničke specifikacije su u suštini završene.

III. WI-FI ALIJANSA I PROGRAM WI-FI CERTIFIED

Wi-Fi Alijansa predstavlja mrežu kompanija na svetskom nivou koja se bavi sertifikacijom, interoperabilnošću i drugim stvarima koja su u vezi sa Wi-Fi. Članovi Wi-Fi Alijanse okupljaju se iz celog Wi-Fi ekosistema sa zajedničkom vizijom da povežu sve i svakoga, svuda, uz pružanje najboljeg mogućeg korisničkog iskustva. Od marta 2000. godine, od kada je program pod nazivom Wi-Fi CERTIFIED startovao, Wi-Fi Alijansa izdala je više od 80.000 Wi-Fi sertifikata za različite uređaje. Ovaj program obezbeđuje širom sveta prepoznatljivu oznaku koja označava interoperabilnost između 802.11 uređaja različitih proizvođača, uključujući pristupne tačke (AP – *Access Point*) i bežične stanice (STA – *Station*), kvalitet i omogućava da Wi-Fi proizvodi korisnicima nude najbolja iskustva u korišćenju opreme koja se odnosi na bežične računarske mreže. Oznaka Wi-Fi CERTIFIED® označava proizvode sa utvrđenom interoperabilnosti, kompatibilnošću sa prethodnim standardima i najvišim industrijskim standardima bezbednosne zaštite. Danas se korišćenjem Wi-Fi tehnologije i sve većeg broja aplikacija prenosi više od polovine internet saobraćaja. Wi-Fi Alijansa podstiče usvajanje i evoluciju Wi-Fi, na koji se milijarde ljudi oslanjaju svakog dana. Wi-Fi Alijansa će i dalje vršiti sertifikaciju i time podsticati upotrebu Wi-Fi proizvoda i servisa na novim i postojećim tržištima [2], [4], [5].

Wi-Fi CERTIFIED 7 program testira i potvrđuje kritične karakteristike standarda IEEE 802.11be, interoperabilnost sa opremom više proizvođača i pragove performansi. Wi-Fi CERTIFIED 7 pruža prednosti koje su zajedničke svim Wi-Fi CERTIFIED programima:

- Interoperabilnost sa drugim generacijama Wi-Fi CERTIFIED opreme bilo kog proizvođača.
- Kompatibilnost sa prethodno sertifikovanom opremom koja radi u istim frekventnim opsezima.
- Wi-Fi sigurnost pri korišćenju koju obezbeđuje WPA3 (*Wi-Fi Protected Access 3*) standard.

Da bi proizvođači u potpunosti imali koristi od sertifikacije Wi-Fi CERTIFIED 7, i AP i STA (ili dve ravnopravno povezane STA) treba da budu sertifikovane za Wi-Fi 7 [4].

Nakon završetka programa testiranja, proizvođači WLAN opreme dobijaju Wi-Fi sertifikat za njihove proizvode u zavisnosti koju Wi-Fi generaciju zadovoljavaju (Sl. 1).



Slika 1. Wi-Fi sertifikacione oznake [6], [7]

Dakle, 802.11be je jednak sa Wi-Fi 7. Bez obzira na to kako se pominje, sledeća generacija Wi-Fi radi u spektru od 2,4 GHz, 5 GHz i 6 GHz na isti način na koji radi Wi-Fi 6E, takođe poznat kao 802.11ax. Kao evolucija 802.11, Wi-Fi 7 je i dalje poludupleksna tehnologija sa zajedničkim medijumom. Međutim, dodaje nekoliko novih funkcija i mogućnosti koje je izdvajaju od trenutnih i prošlih standarda [5].

IV. KARAKTERISTIKE WI-FI 7

Wi-Fi 7 obećava velika poboljšanja u odnosu na Wi-Fi 6/6E i mogao bi da ponudi do četiri puta veće brzine. Takođe omogućava smanjenje kašnjenja, povećanje kapaciteta i povećanje stabilnosti i efikasnosti. Kao i prethodni standardi, Wi-Fi 7 će posedovati kompatibilnost sa prethodnim Wi-Fi tehnologijama (*backward compatibility*). Da bi se iskoristile sve prednosti novih funkcija i poboljšanih performansi, uređaji moraju da zadovoljavaju Wi-Fi 7 karakteristike, a to znači kupovinu novih rutera i pristupnih tačaka, kao i novih pametnih telefona, laptopova, televizora i drugo [8]. Stariji uređaji moći će da se povežu na Wi-Fi 7 mreže, ali oni neće imati koristi od njenih viših performansi ili većine njenih novih funkcija.

Nadovezujući se na osnovne konstrukcije IEEE 802.11, Wi-Fi 7 unapređuje postojeće procese i tehnologije, a uvodi i nove [4], [5], [9]:

- Povećava se širina kanala za prenos – U cilju povećanja brzine, Wi-Fi 7 udvostručava maksimalnu širinu kanala sa 160 MHz kolika je bila u Wi-Fi 6E na 320 MHz. Što je veća širina kanala, više podataka se može preneti. Recimo, brzina se u odnosu na Wi-Fi 6E udvostručava. Omogućava se i veći broj istovremenih prenosa pri najbržim mogućim brzinama.
- 4K kvadraturno-amplitudna modulacija (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) – Ova modulacija omogućava da svaki signal spakuje 20% više podataka u kanal nego Wi-Fi 6/6E. Veća brzina prenosa omogućava veću efikasnost prenosa. Podržava striming 4K ili 8K video zapisa, igranje zahtevnih *online* igara bez zastoja ili striming sa kućnog računara u realnom vremenu.
- Potvrđivanje bloka od 512 komprimovanih MAC (*Medium Access Control*) ramova – Istovremeno potvrđivanje 512 MPDU-ova (*MAC Protocol Data Unit*) u jednom BA (*Block Ack*) ramu dodatno poboljšava efikasnost i štedi vreme koje je potrebno za prenošenje pojedinačnih potvrda, u poređenju sa do 256 MPDU-ova u slučaju Wi-Fi 6.
- *Multi-Link Operation* (MLO) – Ova funkcija omogućava uređajima da rašire veze na dva ili tri opsega (2,4 GHz, 5 GHz i 6 GHz), poboljšavajući brzinu i stabilnost. Ako je jedan opseg van dometa, uređaj se neprimetno prebacuje na drugi bez potrebe za ponovnim povezivanjem. Ovaj proces se naziva vezivanje (*bonding*) ili agregacija. Pre Wi-Fi 7, uređaji su koristili jednu vezu za prenos podataka ili podržavali više opsega, ali na neefikasan način. MLO omogućava uređajima da kombinuju različite kanale u frekventnim opsezima zajedno, omogućavajući istovremeni prenos i prijem podataka preko više veza. MLO omogućava efikasnije balansiranje opterećenja saobraćaja između linkova kako bi se zadovoljile potrebe korisnika, kao što je korišćenje 5 GHz ili 6 GHz za veću propusnost i 2,4 GHz za domet i izbor najrobusnije veze u prisustvu smetnji, što rezultira povećanom propusnošću, manjim kašnjenjem i poboljšanu pouzdanost za aplikacije kao što su VR/AR, *online* igre, računarstvo u oblaku i udaljene kancelarije. Dostupne su i funkcije upravljanja MLO-om.

- Unapređenje u pogledu kašnjenja – Integracija sva tri opsega smanjuje ograničenje vremena emitovanja, povećavajući verovatnoću trenutnog prenosa paketa podataka. Ovaj aspekt je posebno koristan za aplikacije koje zahtevaju malo kašnjenje, kao što su *online* igre i video konferencije.
- MU-MIMO (*Multi User – Multiple Input Multiple Output*) unapređenje – Wi-Fi 7 podržava do 16 prostornih tokova sa više korisnika (dvostruko više od Wi-Fi 6/6E), više ulaza i izlaza. Ovo omogućava ruterima da istovremeno komuniciraju sa više uređaja. Ova funkcija poboljšava efikasnost mreže, posebno u okruženjima sa puno korisnika. Svaki tok je u suštini multiplikator kada se kombinuje sa širinom kanala i vrstom modulacije koja se koristi.
- Višestruke jedinice resursa (M-RU – *Multi Resource Units*) – U Wi-Fi 6/6E i ranijim verzijama, kada deo kanala velike brzine koristi drugi uređaj, ceo kanal je nedostupan. U slučaju Wi-Fi 7, kanal se može deliti ako u njemu ima slobodnog prostora. Omogućava da se više RU-ova dodeli jednom korisniku i može kombinovati RU-ove za povećanu efikasnost prenosa. Značajno se poboljšava fleksibilnost za raspoređivanje resursa spektra i dodatno poboljšava spektralnu efikasnost.
- Trigerovani pristup uzlaznom toku (*Triggered uplink access*) – Optimizuje se Wi-Fi 6 definisano planiranje trigerovanog pristupa *uplink* vezi kako bi se prilagodili tokovi koji su osetljivi na kašnjenje uzlaznog toka.
- Komunikacioni servis za hitne slučajeve – Omogućava korisnicima servis za hitne slučajeve uz zadržavanje prioriteta i kvaliteta usluge u Wi-Fi mrežama. Podržava prebacivanje sa 5G na Wi-Fi pristup.
- Automatska koordinacija frekvencija (AFC – *Automated Frequency Coordination*). Za AP tačke koje rade u spoljnjem prostoru u opsegu od 6 GHz FCC (*Federal Communications Commission*) u SAD zahteva AFC kako bi se osiguralo da Wi-Fi AP ne ometaju trenutno licencirane korisnike opsega od 6 GHz. Lokacija AP tačaka se proverava u bazi podataka prioritarnih 6 GHz korisnika u lokalnom području radi koordinacije frekvencije.

Korišćenjem kanala od 320 MHz, 4096-QAM, *Multi-RU* i *Multi-Link* operacije Wi-Fi 7 teoretski može da ostvari brzine do 46 Gbit/s što je 4,8 puta brže od Wi-Fi 6 i 13 puta brže od Wi-Fi 5 [10]. Za istu radio konfiguraciju kao Wi-Fi 6, brzine će biti 2,4 puta veće. Maksimalne brzine sa tipičnim mobilnim telefonom sa Wi-Fi 7 mogu doseći i do 5 Gbit/s. Wi-Fi 7 je, recimo, spreman da podrži brzine od 10 Gbit/s u trenutku kada ove brzine budu omogućavali i provajderi internet servisa u domaćinstvima [11].

Tabela 1 daje poređenje Wi-Fi 7 i prethodnih tehnologija.

TABELA I. POREĐENJE KARAKTERISTIKA WI-FI 7 SA PRETHODNIM WI-FI GENERACIJAMA [3], [4], [5]

Wi-Fi	Wi-Fi 4	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6/6E	Wi-Fi 7	Wi-Fi 7 prednosti
IEEE standard	802.11n	802.11ac	802.11ax	802.11be	
Frekvensijski opseg	2,4 GHz 5 GHz	5 GHz	2,4 GHz 5 GHz 6 GHz	2,4 GHz 5 GHz 6 GHz	Projektovan u osnovi za 6 GHz, povećavajući kapacitet i podržavajući slučajeve upotrebe naredne generacije aplikacija.
Širina kanala	40 MHz 20 MHz	160 MHz 80 MHz 40 MHz 20 MHz	160 MHz 80 MHz 40 MHz 20 MHz	320 MHz 160 MHz 80 MHz 40 MHz 20 MHz	Udvostručuje veličinu najšireg Wi-Fi 6 kanala i čini 160 MHz obaveznim za podršku velikim brzinama.
Modulacija	64-QAM	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM	20% veća brzina od 1024-QAM u Wi-Fi 6, što omogućava veću efikasnost prenosa za bolji striming i malo kašnjenje u igrama.
<i>Multi-Link Operation</i>	Ne	Ne	Ne	Da	Povećana propusnost, manje kašnjenje, smanjena interferencija.
Maksimalna brzina	600 Mbit/s	3,5 Gbit/s	9,6 Gbit/s	46 Gbit/s	Do 4,8 puta veća brzina od Wi-Fi 6/6E
Maksimalan broj prostornih tokova	4	4	8	8	Opslužuje više uređaja istovremeno uz unapređenje efikasnosti.
Pristup <i>uplink</i> kanalu	EDCA (<i>Enhanced Distributed Channel Access</i>)	EDCA	EDCA trigerovani pristup	EDCA optimizovani trigerovani pristup	Predvidljivije kašnjenje sa manjim <i>overhead</i> -om.
Zahtevana sigurnost	WPA2	WPA2	WPA3	WPA3	

V. KLJUČNE WI-FI 7 TEHNOLOGIJE [4]

A. Kanal širine 320 MHz

U mnogim regulatornim domenima, rad kanala širine 320 MHz dozvoljen je u okviru nelicenciranog opsega od 6 GHz. Wi-Fi 7 omogućava rad na 320 MHz prema

protokolima definisanim u IEEE 802.11be Draft 3.0. Ovo povećava MCS (*Modulating Coding Scheme*) brzinu sa 2,409 Gbit/s u Wi-Fi 6 na 5,7648 Gbit/s, što omogućava veće brzine generalno. Takođe udvostručuje maksimalni broj RU-ova koji su dostupni AP-u za dodelu, čime se poboljšava efikasnost OFDMA pristupa (*Orthogonal Frequency-Division*

Multiple Access) u *uplink* i *downlink* tokovima, omogućavajući veći broj istovremenih prenosa pri najvećim brzinama.

B. Multi-link operation (MLO)

MLO u Wi-Fi 7 omogućava uređajima da imaju konektivnost na višestrukim linkovima, omogućavajući multilink stanicama da otkriju, da se autentifikuju, i uspostave više veza sa AP multilink tačkom. Svaka veza omogućava pristup kanalu i razmenu ramova između stanice i AP na osnovu podržanih mogućnosti koje se razmenjuju tokom uspostave veze. Wi-Fi 7 pomoću MLO omogućava veću brzinu, veću pouzdanost, manje kašnjenje i fleksibilnost stanice u smislu koegzistencije sa drugim tehnologijama.

Wi-Fi 7 podržava više režima rada: simultanu predaju i prijem, *Multilink Single Radio*, *Enhanced Multilink Single Radio* i rad uređaja koji podržava više veza na samo jednoj vezi. U slučaju simultane predaje i prijema, očekuje se da uređaji mogu nezavisno da prenose i primaju na svakoj od veza i da će postići maksimalne performanse.

Nakon uspostavljanja više veza između multilink AP tačke i multilink stanice, brzina se može povećati dva i više puta. Na primer, multilink AP tačka može da podrži tri radio linka i uspostavi tri veze sa multilink stanicom, jednu na 2,4 GHz sa kanalom širine 40 MHz i dva prostorna toka, jednu u 5 GHz sa kanalom širine 160 MHz i dva prostorna toka, i još jedan na 6 GHz sa propusnim opsegom od 320 MHz i dva prostorna toka. Ovo bi dovelo do ukupne maksimalne brzine prenosa podataka od 9,335 Gbit/s ($2 \times (344,1 \text{ Mbit/s} + 1.441,2 \text{ Mbit/s} + 2.882,4 \text{ Mbit/s})$).

MLO takođe omogućava da svaka od veza u multilink AP tački ili multilink stanici istovremeno pristupi medijumu, a to znači da se količina vremena koje bi paket proveo u redu za prenos na stanici može svesti na polovinu ili čak manje. Ovo će zauzvrat smanjiti kašnjenje i džiter u sistemu.

Kvalitet servisa QoS (*Quality of Service*) se takođe može poboljšati korišćenjem različitih veza za različit saobraćaj, kao i usmeravanjem saobraćaja ka svakoj od veza na osnovu metrike kao što su indikator jačine primljenog signala i odnos signal-šum.

Istovremena predaja i prijem omogućavaju velika poboljšanja u brzini i kašnjenju. U mnogim modernim aplikacijama (npr. AR/VR) kašnjenje je kritično čak i pri nižim protocima. Wi-Fi 7 omogućava manje kašnjenje pomoću *Enhanced Multilink Single Radio* režima rada. Ovaj režim bi trebalo da podržavaju i multilink AP tačka i multilink stanica. Stanica podržava dve radiofrekventne (RF) veze i samo jedan prostorni tok na svakoj od veza, ali se može prebaciti na jednu RF vezu sa podrškom za dva prostorna toka. Kada je u *Enhanced Multilink Single Radio* režimu, stanica će osluškiivati obe veze i čekati da joj AP tačka putem *Multi-User Request to Send* rama javi da može da uključi dva prostorna toka.

Wi-Fi 7 MLO takođe podržava *Multilink Single Radio* režim. Ovaj režim omogućava uređajima da rade na više veza, ali ne istovremeno, i omogućava uređaju da skače sa jedne veze na drugu. Ovo omogućava uređaju da može da radi na više tehnologija. Na primer, uređaj može da podržava i 5 GHz i 6 GHz, ali ne oba istovremeno. Uređaj može da postavi veze na

oba opsega, da signalizira AP tački da postavi stanicu na jednu od veza u režim uštede energije a da koristi drugu za prenos podataka, ali da bude spreman da se prebaci na drugi kanal ako se uslovi opterećenja promene. AP će možda morati da izvrši balansiranje opterećenja tako što će prebaciti uređaj da radi na drugom kanalu.

C. MLO upravljačke funkcije

Jedan od atributa MLO-a je da se stanice povezuju na više veza, ali su često budne na samo jednoj vezi kako bi se maksimalno produžilo trajanje baterije. Shodno tome, stanice nemaju optimalne informacije o nivoima saobraćaja preko linkova. Ista situacija se javlja u prethodnim Wi-Fi generacijama gde su AP tačke u poslovnom okruženju koristile mehanizme kao što je Wi-Fi *Agile Multiband* da bi omogućili stanicama da identifikuju najbolju vezu za svoj saobraćaj, posebno u okruženjima velike gustine i zagušenosti.

U Wi-Fi 7, AP tačke imaju modernizovane mehanizme za isporuku iste usluge putem protokola *Basic Load Balancing*. *Basic Load Balancing* pruža veću predvidljivost i sigurnost i predstavlja veliko poboljšanje u odnosu na prethodne Wi-Fi generacije u smislu odziva i upravljanja vezom, jer nije potrebno (ponovno) pridruživanje (*(Re)Association*).

MLO takođe može stanici da obezbedi trajnu neometanu konekciju čak i kada AP tačka na pojedinačnoj vezi ili opsegu obavlja operacije koje mogu biti ometajuće (kao što je nadogradnja softvera). Wi-Fi 7 nudi AP tački dva mehanizma za ovu svrhu: rekonfiguraciju AP tačke u *stateless* režim i *Advertised TID-to-Link Mapping* za *stateless* režim.

D. 4K QAM

Wi-Fi 7 uvodi 4K QAM, podižući brzine prenosa za 20% na kraćim dometima u odnosu na 1K QAM u Wi-Fi 6 bez ikakvog povećanja propusnog opsega ili broja antena. 4K QAM postiže veću brzinu prenosa pakovanjem četiri puta više tačaka konstelacije od 1K QAM.

Veća brzina prenosa omogućava veću efikasnost prenosa i poboljšava spektralnu efikasnost, čime se bolje koristi raspoloživi propusni opseg. 4K QAM pomaže u podršci besprekidnom strimovanju 4K/8K video zapisa, igranju zahtevnih *online* igrica bez kašnjenja ili strimingu u realnom vremenu sa kućnog računara. Poboljšana spektralna efikasnost je posebno korisna u gusto naseljenim oblastima, gde je propusni opseg često na prvom mestu. Veća brzina prenosa podataka omogućava uređajima da brže završe prenos, omogućavajući većem broju uređaja da efikasno dele i rade u istom spektru u gusto naseljenim oblastima.

E. Potvrđivanje bloka od 512 komprimovanih MAC ramova

Wi-Fi 7 uvodi potvrđivanje prijema bloka od 512 ramova, za razliku od 256 ramova koliko je bilo moguće u Wi-Fi 6. To omogućava predajniku da agregira 512 MPDU-ova u jedan ram, a prijemniku da potvrdi prijem tih 512 MPDU-ova u jednom BA (*Block Ack*) ramu, što smanjuje vreme za proces prenosa podataka (*protocol overhead*) i naročito dolazi do izražaja kada se prenos vrši velikim brzinama korišćenjem kanala širine 320 MHz.

F. Dodeljivanje višestrukih jedinica resursa jednoj stanici (M-RU – Multi Resource Units)

Wi-Fi 6 AP tačke dodeljuju resurse samo u susjednim RU-ovima, što znači da iako postoje resursi dostupni za prenos, ako RU-ovi ne mogu da budu u susjednom bloku, deo propusnog opsega će ostati neiskorišćen, što će rezultirati gubitkom određene efikasnosti. Wi-Fi 7 omogućava da se više RU-ova dodeli jednom korisniku, olakšavajući kombinovane RU-ove za povećanu efikasnost prenosa. Ovo omogućava povećanje fleksibilnosti prilagođavanja pri prenosu podataka, izbegavanje smetnji i poboljšanje spektralne efikasnosti.

G. Optimizacija pomoću trigerovanog pristupa uzlaznom toku

Wi-Fi 6 je uveo trigerovani pristup radi poboljšanja pouzdanosti i performansi pristupa uzlaznom kanalu, posebno u slučajevima kada postoje zagušenja. Ovaj vid pristupa bio je namenjen svim aplikacijama, od *best effort* do audio i video aplikacija sa prenosom u realnom vremenu. Wi-Fi 7 AP tačke dodatno su poboljšane kako bi podržale aplikacije koje zahtevaju malo kašnjenje koristeći servis usluge klasifikacije toka (SCS – *Stream Classification Service*), što je definisano u IEEE 802.11be D3.0. Za tokove osetljive na kašnjenje uzlazne veze SCS procedura omogućava klijentskim uređajima da, korišćenjem *QoS Characteristic* informacionog elementa, informišu AP o njihovom željenom trigerovanom intervalu pristupa uzlaznoj vezi, minimalnoj brzini podataka, ograničenju kašnjenja i drugim opcionim informacijama za vreme trajanja toka saobraćaja. Ovo daje mogućnost AP tački da efikasnije planira pristup uzlaznoj vezi i poboljša efikasnost spektra eliminisanjem prekomernog opterećenja pristupa kanalu sa više stanica. Pored toga, smanjuje *overhead* za slanje zahteva i odgovora za ispitivanje statusa bafera.

H. Komunikacioni servis za hitne slučajeve

U Wi-Fi 7 specificiran je komunikacioni servis za hitne slučajeve EPSC (*Emergency Preparedness Communication Service*) da bi se omogućio prioritetni pristup bežičnom medijumu za ovlašćene stanice koje podržavaju NSEP (*National Security Emergency Preparedness telecommunications services*) komunikacije u SAD. AP tačke sa EPCS mogućnošću oglašavaju mogućnosti prioritetnog pristupa putem *Beacon* i *Probe Response* ramova. Stanice sa EPCS mogućnošću povezuju se sa Wi-Fi 7 AP da bi dobili prioritetni pristup kanalu. I AP i stanica mogu omogućiti i onemogućiti prioritetni pristup putem sledećeg procesa:

- Pozivanje (*invocation*) prioritetnog pristupa EPCS – Koristeći poruku sa zahtevom, i AP i stanica mogu pozvati funkcije prioritetnog pristupa. Kada stanica šalje ovaj zahtev, AP mora da proveri informacije o autorizaciji stanice pre nego što odobri prioritetni pristup putem poruke odgovora na zahtev. Autorizacija se može izvršiti korišćenjem udaljenog servera povezanog sa AP preko eksternog interfejsa (npr. korišćenjem *Subscription Service Provider Network* interfejsa koji je povezan na *Authentication Authorization and Accounting* server). Ovo će osigurati da je prioritetna funkcionalnost ograničena na one stanice koje imaju potrebu za ove kritične funkcije.

- Opoziv (*revocation*) EPCS prioritetnog pristupa – Kada prioritetni tretman više nije potreban (npr. kada se zagušenje smanji), stanica ili AP mogu prekinuti EPCS prioritetni pristup slanjem odgovarajuće poruke.

Funkcije EPCS-a izgrađene su na konceptima Wi-Fi CERTIFIED Wi-Fi *Multimedia*TM (VMM®) koji se koriste za primenu odgovarajućeg relativnog prioriteta na različite vrste medija (npr. govor, video i *best effort* podaci). VMM definiše skup parametara za pristup kanalu za svaki tip medije odnosno kategoriju pristupa. EPCS omogućava AP tački da dodeli različite skupove parametara stanicama koje su ovlašćene da koriste EPCS funkciju prioritetnog pristupa i na taj način poveća verovatnoću pristupa bežičnom medijumu tim stanicama. Na ovaj način, EPCS prioritetni pristup zadržava prednosti VMM-a u omogućavanju multimedijalnih usluga, dok u isto vreme pruža prednost korisnicima sa NSEP odgovornostima kada su mreže zagušene.

I. Sigurnost

Wi-Fi 7 zahteva Wi-Fi CERTIFIED WPA3TM u cilju zaštite komunikacije između Wi-Fi 7 uređaja. Za Wi-Fi 7 uređaje WPA3 mehanizam se proširuje kako bi se obezbedilo snažnije upravljanje ključevima. Pored obavezne podrške za *Protected Management* ramove, Wi-Fi 7 uređaji su u obavezi da podrže i *beacon* zaštitu, mehanizam koji omogućava uređaju da kriptografski verifikuje sadržaj *beacon* rama koji emituje AP.

Wi-Fi 7 zahteva podršku za Wi-Fi CERTIFIED *Enhanced Open*TM između Wi-Fi 7 uređaja u otvorenim mrežama. Wi-Fi *Enhanced Open* mreže obezbeđuju korisnicima neautorizovano šifrovanje podataka, što je poboljšanje u odnosu na tradicionalne otvorene mreže bez ikakve zaštite. Ove zaštite su transparentne za korisnika.

VI. NAREDNA GENERACIJA Wi-Fi 8

Naredna Wi-Fi generacija bi trebalo da bude Wi-Fi 8, a ona bi trebalo da odgovara IEEE 802.11bn standardu čiji draft je najavljen za 2025. godinu, dok se konačno usvajanje ovog standarda očekuje u 2028. godini [12].

Teško je precizno reći kako bi Wi-Fi 8 mogao da izgleda, ali treba računati na nove i/ili poboljšane funkcije i bolju QAM, što bi trebalo da dovode do novih maksimalnih teoretskih brzina prenosa podataka. Takođe, za očekivati je da će Wi-Fi proizvodni postati skuplji [5].

Generalno gledano u skladu sa svim prethodnim Wi-Fi standardima, Wi-Fi 8 bi trebalo da ima za cilj da poboljša bežične performanse uopšte, zajedno sa uvođenjem novih i inovativnih funkcija za dalje unapređenje Wi-Fi tehnologije. Verovatno će ponuditi veće brzine, manje kašnjenje i bolje performanse od prethodnih Wi-Fi verzija. Trenutno nema zvaničnih detalja ili specifikacija za Wi-Fi 8, ali se mnogo spekulira o tome koje nove funkcije će ovaj standard podržavati. Očekuje se da će neki od tehničkih detalja za Wi-Fi 8 biti finalizovani do 2024.

Tokom svoje evolucije, Wi-Fi standardi igrali su ključnu ulogu u obezbeđivanju bežičnog povezivanja u domaćinstvima i kancelarijskim okruženjima. Međutim, uprkos svom uspehu, ovi standardi su se pokazali neadekvatnim kada je reč o

ispunjavanju stogih zahteva modernih industrija, uključujući industriju 4.0 (*Industry 4.0*) i industrijski IoT (IIoT – *Industrial Internet of Things*). Neka predviđanja jesu da bi Wi-Fi 8 mogao da odgovori na ove potrebe sa posebnim naglaskom na jedinstvene izazove koje postavljaju industrijske aplikacije.

Očekuje se da će Wi-Fi 8 ponuditi niz moćnih novih funkcija i mogućnosti projektovanih da obezbede visoku pouzdanost, ultra-nisko kašnjenje i podršku za izuzetno visoku gustinu uređaja. Neke od glavnih karakteristika koje se mogu očekivati od Wi-Fi 8 uključuju [13], [14]:

- Koordinacija i prenos sa više AP tačaka.
- Milimetarske talasne dužine radio signala (npr. između 42,5 i 71 GHz), pored podrške za 2,4/5/6 GHz.
- Malo kašnjenje.
- Unapređena QAM.
- Brzina prenosa reda 100 Gbit/s.
- Širina kanala iznad 1 GHz (npr. 1,28 GHz).

VII. ZAKLJUČAK

Wi-Fi 7 predstavlja najnoviju verziju Wi-Fi tehnologije. Proces sertifikacije Wi-Fi 7 započeo je 8. januara 2024. Wi-Fi 7 odgovara IEEE 802.11be standardu. Unapređenjem postojećih tehnologija omogućava maksimalnu brzinu od čak 46 Gbit/s. Najsavremenije mogućnosti Wi-Fi 7 omogućavaju širok spektar novih slučajeva upotrebe koji se svi oslanjaju na veću brzinu prenosa, veći propusni opseg i manje kašnjenje. Video servisi su posebno zahtevni i igraju veliku ulogu u mnogim od ovih slučajeva upotrebe, kao i obrada velikih količina podataka. Wi-Fi 7 omogućava da se ovi scenariji sa intenzivnim zahtevima obezbede bežičnim putem i omogućava bogata iskustva koja se traže u privatnim i poslovnim okruženjima.

Iako za narednu generaciju Wi-Fi 8 ne postoje definisane specifikacije, očekuje se da će zadovoljiti stroge zahteve industrije 4.0 i industrijskog IoT-a, a oni se prvenstveno ogledaju u ultra-niskom kašnjenju.

ZAHVALNICA

Ovaj rad podržan je od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru projekta pod nazivom „Unapređenje nastavnih i istraživačkih procesa primenom savremenih tehnoloških rešenja i metoda u energetici, elektronici i telekomunikacijama”.

LITERATURA

- [1] Lili Hervieu, “Wi-Fi 7 To Transform the Online User Experience”, cablelabs.com, September 13, 2023, <https://www.cablelabs.com/blog/internet-routing-security-framework>, pristupljeno Januar 2024.
- [2] Dejan Nemeć, „802.11 (Wi-Fi) bežične mreže”, NKT – Napredne komunikacione tehnologije, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.

- [3] Wikipedia, The Free Encyclopedia, “IEEE 802.11be”, en.wikipedia.org, https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11be, pristupljeno Januar 2024.
- [4] Technology Overview, “Wi-Fi Certified 7TM”, Wi-Fi Alliance, January 2024.
- [5] Lee Badman, “Definition Wi-Fi 7”, techtarget.com, <https://www.techtargget.com/searchnetworking/definition/Wi-Fi-7>, pristupljeno Januar 2024.
- [6] “Wi-Fi Alliance® Pre Certified Drivers and Testing”, intelligraphics.com, <https://intelligraphics.com/wi-fi-certified-drivers-and-testing/>, pristupljeno Januar 2024.
- [7] Wi-Fi Alliance, “Our Brands”, wi-fi.org, <https://www.wi-fi.org/who-we-are/our-brands>, pristupljeno Januar 2024.
- [8] Simon Hill, “What Is Wi-Fi 7? Here’s Everything You Need to Know”, wired.com, January 8, 2024, <https://www.wired.com/story/what-is-wi-fi-7/>, pristupljeno Januar 2024.
- [9] Steven Vaughan-Nichols, “Faster than ever: Wi-Fi 7 standard arrives”, zdnet.com, January 9, 2024, <https://www.zdnet.com/home-and-office/networking/faster-than-ever-wi-fi-7-standard-arrives/>, pristupljeno Januar 2024.
- [10] “Wi-Fi 7 – Wi-Fi Like Never Before”, tp-link.com, <https://www.tp-link.com/us/wifi7/>, pristupljeno Januar 2024.
- [11] Ravindra Bhilave, “Wi-Fi 7 Vs Wi-Fi 6. More Speed & Capacity”, netgear.com, <https://www.netgear.com/hub/technology/wifi-7-vs-wifi-6/>
- [12] “Official IEEE 802.11 Working Group Project Timelines”, ieee802.org, January 23, 2024, https://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm, pristupljeno Januar 2024.
- [13] Editorial Team Everything RF Newsletter, “What is Wi-Fi 8?”, everythingrf.com, March 25, 2023, <https://www.everythingrf.com/community/what-is-wi-fi-8>, pristupljeno Januar 2024.
- [14] Leonardo Lanante, “Wi-Fi 8: Ultra High Reliability in the Unlicensed Bands”, Whitepaper Ofinno Empowering Innovators, January 2023.

ABSTRACT

IEEE 802.11be is the latest standard in the IEEE 802.11 series of standards. The Wi-Fi Alliance has named it Wi-Fi 7, since it follows Wi-Fi 6/6E. Wi-Fi wireless technology, which was created at the end of the 90s of the 20th century, is still very often present in practice today. Over time, during 25 years, from a speed of 1 Mbps, it evolved to a technology that today allows a maximum of 46 Gbps. Such high speeds are possible by improving the technology that has been used so far and by introducing some new ones. The final IEEE 802.11be standard will be adopted in the coming months, while the Wi-Fi 7 certification process started on January 8, 2024 in order to enable the interoperability of devices from different manufacturers. Although there are no specifications, the next Wi-Fi 8 is already announced, a generation that should bring new improvements and is expected to meet the challenges of Industrial 4.0 and IIoT. This paper lists the features, i.e. technologies related to Wi-Fi 7, a comparison with previous technologies and improvements that Wi-Fi 7 brings, as well as predictions of the basic features of Wi-Fi 8 are presented.

Characteristics of Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) technology, improvements it brings and expectations of Wi-Fi 8
Dejan Nemeć