

# Arhitektura i razvoj IEEE 802.11ax mreže

---

**Medur, Kristijan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:404673>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Kristijan Medur**

**ARHITEKTURA I RAZVOJ IEEE 802.11AX MREŽE**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2019.**

Zagreb, 11. travnja 2019.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**  
Predmet: **Arhitektura telekomunikacijske mreže**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 5212

Pristupnik: **Kristijan Medur (0119031276)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Arhitektura i razvoj IEEE 802.11ax mreže**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati osnove funkcioniranja WLAN mreže. Navesti IEEE 802.11 standarde sa osvrtom na potrebu razvoja IEEE 802.11ax standarda. Analizirati arhitekturu IEEE 802.11ax standarda i navesti njegove prednosti. Pružiti uvid u budućnost razvoja WLAN mreža.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

dr. sc. Ivan Forenbacher

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

# **ARHITEKTURA I RAZVOJ IEEE 802.11AX MREŽE**

## **ARCHITECTURE AND DEVELOPMENT OF IEEE 802.11AX NETWORK**

Mentor: dr. sc. Ivan Forenbacher

Student: Kristijan Medur

JMBAG: 0119031276

Zagreb, rujan 2019.

## SAŽETAK

U današnjem svijetu, bežične mreže su neizostavni dio modernog života. Nprestano se razvijaju, unaprjeđujući načine komunikacije te konzumaciju multimedijskog sadržaja. Kako se razvijaju nove tehnologije koje omogućuju stvaranje multimedijskog sadržaja, ali i tehnologije Interneta stvari, tako se razvija i sve veća potreba za tehnologijom koja će omogućiti konzumaciju tog sadržaja na daljinu te omogućiti komunikaciju u stvarnom vremenu između uređaja te njihovih korisnika. Upravo zbog toga je razvijen najnoviji standard Wi-Fi-ja, IEEE 802.11ax. U ovom radu bit će objašnjeno kako općenito funkcioniraju WLAN mreže, a zatim u detalje opisano kako funkcionira 802.11ax mreža, kakva je njena arhitektura, te što je omogućilo postizanje prednosti koje ima nad starijim tehnologijama.

**KLJUČNE RIJEČI:** bežična mreža, Wi-Fi, IEEE 802.11ax, arhitektura

## SUMMARY

In today's world, wireless networks are an unavoidable part of modern life. They are constantly evolving, improving ways of communication and the consummation of multimedia content. As new technologies are developing, such as the Internet of things and technologies which enable creation of multimedia content, along with them grows the need for a technology which will enable consummation of that very content remotely and enable realtime communication between the devices and their users. Because of that a new Wi-Fi standard was developed, the IEEE 802.11ax. This paper will explain how WLAN networks generally function, and then in details describe how 802.11ax network works, how its architecture looks, and what enabled it to achieve the advantages it has over the older technologies.

**KEYWORDS:** wireless network, Wi-Fi, IEEE 802.11ax, architecture

# SADRŽAJ

1.	Uvod .....	1
2.	Osnove funkcioniranja WLAN mreža .....	3
2.1.	Sloj upravljanja pristupom .....	4
2.2.	Fizički sloj .....	5
2.2.1.	FHSS metoda.....	6
2.2.2.	DSSS metoda.....	7
2.3.	Osnovne komponente WLAN mreže .....	7
3.	IEEE 802.11 mreža i nastanak 802.11ax standarda.....	10
3.1.	Značajke IEEE 802.11a.....	10
3.2.	Značajke IEEE 802.11b .....	11
3.3.	Značajke IEEE 802.11g.....	12
3.4.	Značajke IEEE 802.11n .....	12
3.5.	Značajke IEEE 802.11ac.....	13
3.6.	802.11ax i njegov nastanak.....	14
4.	Arhitektura 802.11ax mreže .....	16
4.1.	Glavne promjene i značajke u arhitekturi 802.11ax mreže .....	18
4.2.	Promjene na fizičkom sloju .....	21
4.2.1.	Modulacija .....	21
4.2.2.	Oblik okvira fizičkog sloja .....	22
4.3.	Promjene na MAC sloju.....	23
5.	Prednosti 802.11ax standarda .....	26
6.	Budućnost razvoja 802.11ax mreže i Li-Fi.....	30
6.1.	Razvoj novog standarda – 802.11be.....	30

6.2. Li-Fi.....	31
7. Zaključak.....	32

# 1. Uvod

U današnjem svijetu, tehnologija bežičnih lokalnih mreža sve više napreduje, te je jedan od glavnih načina povezivanja terminalnih uređaja u mrežama. Zbog svog velikog značaja, WLAN mreže prolaze kroz razdoblje ubrzanog razvoja, te se svakim danom sve više napreduje u pogledu brzina prijenosa podataka, dometa signala, ali i ostalih značajki WLAN mreža. Danas je Wi-Fi praktički sinonim za WLAN mrežu, te s obzirom na njegov nagli uspon od kraja 90-ih godina do danas, neizostavan je dio svake bežične lokalne mreže. Bez Wi-Fi-ja moderan život bi bio gotovo nezamisliv, jer gotovo svi terminalni uređaji koriste Wi-Fi za spajanje na Internet, a može se reći i da terminalni uređaji poput pametnih telefona i pametnih satova nemaju smisla bez Wi-Fi tehnologije. Standard IEEE 802.11 potpuno je promijenio svijet bežičnih lokalnih mreža, a dolaskom najnovijeg 802.11ax standarda još više se ubrzava način bežične komunikacije između uređaja, te se u svim područjima poboljšava način komunikacije putem Wi-Fi mreže.

Glavna zadaća ovog rada je opisati kako funkcionira bežična mreža temeljena na standardu 802.11ax, kako izgleda arhitektura takvih mreža, te koje su njihove glavne značajke, kao i prednosti nad ostalim WLAN mrežama koje su temeljene na starijim 802.11 standardima. Upravo 802.11ax mreža donijela je brojna poboljšanja u radu WLAN mreža i bežične komunikacije, te predstavlja još jednu prekretnicu u razvoju IEEE 802.11 standarda. Rad je sastavljen od sljedećih cjelina:

1. Uvod
2. Osnove funkcioniranja WLAN mreža
3. IEEE 802.11 mreža i nastanak 802.11ax standarda
4. Arhitektura 802.11ax mreže
5. Prednosti 802.11ax standarda
6. Budućnost razvoja 802.11ax mreže i Li-Fi
7. Zaključak

U drugom poglavlju ukratko su opisane osnove funkcioniranja svih bežičnih lokalnih mreža, kako one u suštini rade, te od kojih se elemenata sastoje.



U trećem poglavlju bit će riječi o IEEE 802.11 standardu, te će se opisati značajke svakog od najvažnijih standarda grupe 802.11, što je svaki od njih donio novoga, kako je tekao razvoj standarda sve do pojave 802.11ax, te motivacija za razvoj 802.11ax standarda.

Četvrto poglavlje prikazat će i opisati arhitekturu mreže temeljene na 802.11ax standardu, te pojasniti načine funkcioniranja protokola, metoda i uređaja koji se koriste u 802.11ax mrežama. Također će biti riječi o svim novim tehnologijama koje se koriste kod 802.11ax mreža.

Peto poglavlje će ukratko opisati sve prednosti 802.11ax standarda, te kako su se ostvarile te prednosti pomoću novih tehnoloških rješenja.

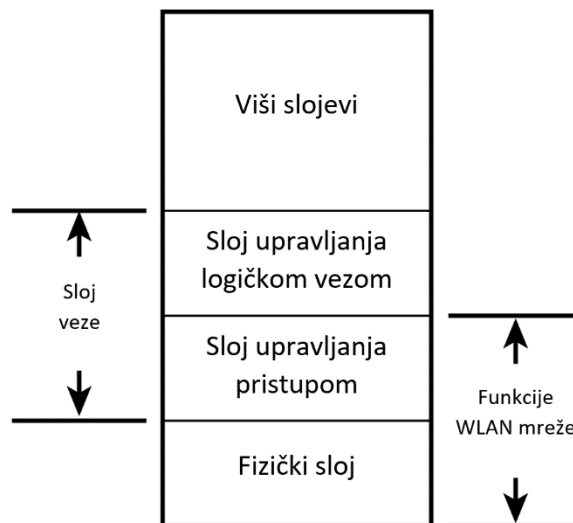
Šesto poglavlje će se fokusirati na budućnost razvoja 802.11ax mreže, te uvođenje nove vrste bežičnih lokalnih mreža, Li-Fi, kao i način funkcioniranja Li-Fi mreža.

## 2. Osnove funkcioniranja WLAN mreža

WLAN mreža funkcionira slično kao i žične LAN mreže – prema [1], za prijenos podataka od izvora do odredišta, mreža obavlja sljedeće funkcije:

1. Prijenosni medij osigurava kanal kojim će teći podaci.
2. Tehnike pristupa mediju olakšavaju korištenje kanala različitim uređajima.
3. Mehanizmi sinkronizacije i kontrole pogrešaka osiguravaju da svaki *link* u mreži prenosi podatak netaknut.
4. Mehanizmi usmjeravanja prenose podatak od izvorišnog uređaja kroz prijenosne puteve do njegovog odredišta.
5. Softver na terminalnom uređaju komunicira sa softverom na serveru ili nekom drugom uređaju na drugom kraju mreže.

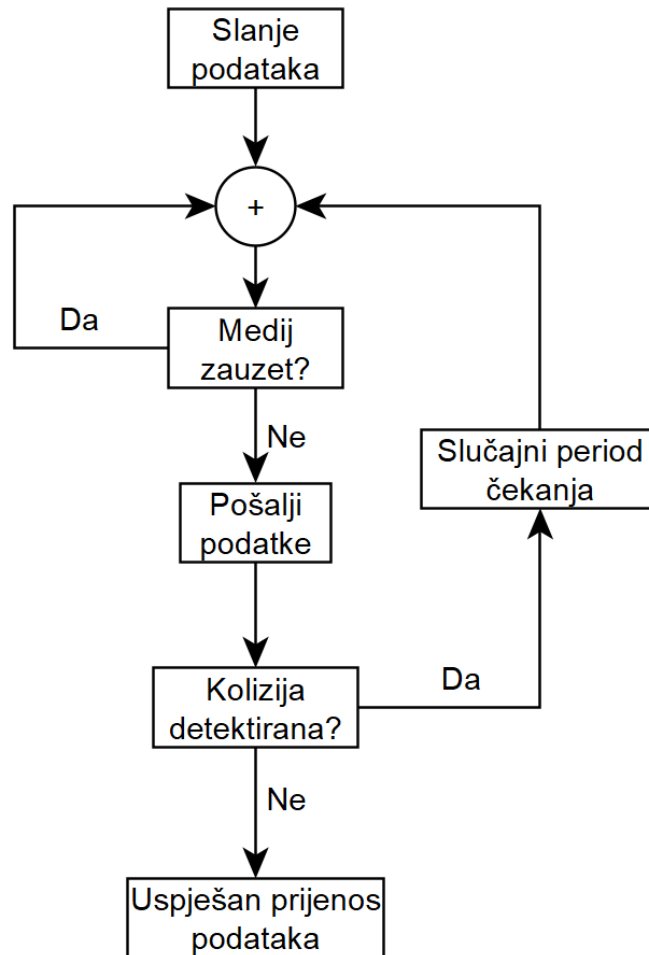
Na slici 1. prikazana je logička arhitektura WLAN mreže, te je prikazano kojim slojevima referentnog modela za otvoreno povezivanje sustava (Open Systems Interconnection model – OSI model) pripadaju funkcionalnosti WLAN mreže.



**Slika 1.** Logička arhitektura WLAN mreže  
Izvor: [1]

## 2.1. Sloj upravljanja pristupom

Sloj upravljanja pristupom (Medium Access Control – MAC) dio je sloja veze u OSI modelu. MAC sloj omogućuje uređajima da dijele zajednički prijenosni medij, to jest zajedničku frekvenciju radiovala i prostor kojim se šalju podaci. Ovo je vrlo važna zadaća jer je prijenosni medij odnosno tehnologija prijenosa kod WLAN-a vrlo sklona smetnjama. Za tu zadaću se u WLAN mrežama koristi protokol višestrukog pristupa opažanjem nositelja (Carrier Sense Multiple Access – CSMA), koji osluškuje ima li aktivnosti u mreži, te ako ima, čeka slobodan trenutak da pošalje informaciju. Shema funkcioniranja ovakvog protokola prikazana je na slici 2.



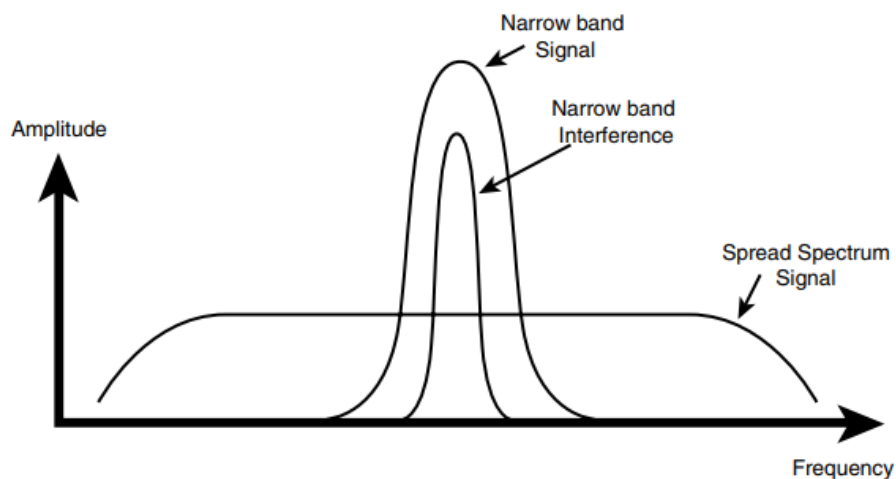
**Slika 2.** Prikaz funkcioniranja CSMA protokola  
Izvor: [1]

Greške u transmisiji se popravljaju tako što uređaji na koje stižu podaci provjeravaju ima li u pristiglim podacima promijenjenih bitova. Ako uređaj ne detektira grešku, šalje poruku o tome uređaju s kojeg je stigao podatak. Ako detektira grešku, protokol podatkovne veze osigurava da se podatkovni paket ponovo pošalje, [1].

Zbog kašnjenja u pristizanju signala, moguće je i da dva uređaja u mreži u istom trenutku pomisle da je mreža slobodna, te istovremenu počnu slati podatke. U tom slučaju događa se kolizija, uređaji će prestati slati podatke, te ponovo poslati podatak kasnije, kada mreža opet bude slobodna.

## 2.2. Fizički sloj

Fizički sloj mreže omogućuje prijenos podataka u smislu da definira električne, mehaničke, te proceduralne specifikacije prijenosa. Jedna od osnovnih zadaća fizičkog sloja je modulacija signala. To je proces u kojem se digitalni signal priprema za odašiljanje putem radiovalova. Tehnika proširenog spektra tako širi signal preko šireg spektra frekvencija, te se time žrtvuje kapacitet prijenosa da bi se dobilo na omjeru signal/šum. Korištenjem ove tehnike postiže se to da je signal mnogo otporniji na smetnje, i to otporniji nego kad se upotrebljavaju konvencionalne tehnike modulacije. Tako će ostali šumovi u prijenosnom kanalu, koji su obično mnogo užeg frekventnog opsega, imati mnogo manji utjecaj na signal koji se želi prenijeti, [1]. Na slici 3



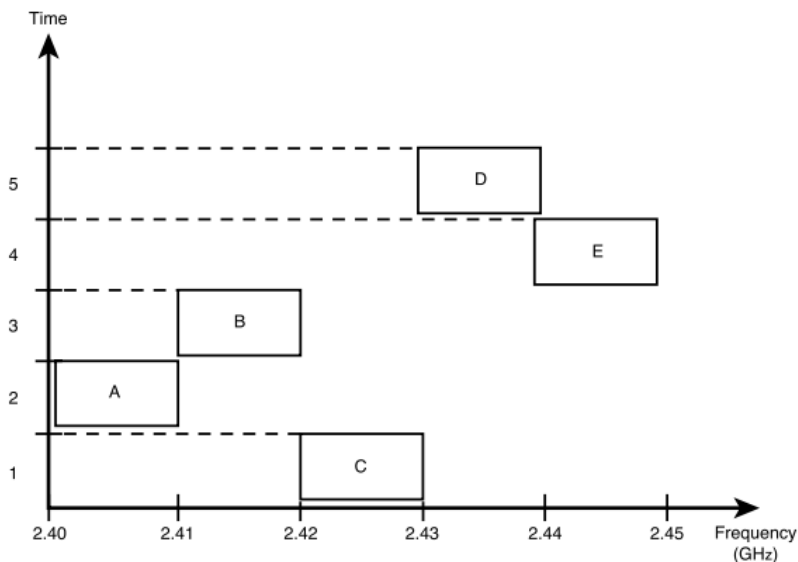
**Slika 3.** Prikaz prijenosnog signala i interferencija u frekventnom spektru, [1]

prikazano je kako izgleda frekventni opseg frekvencija prijenosnog signala i interferencija, odnosno ostalih signala i šumova u prijenosnom kanalu.

U tehnike proširenog spektra spadaju dvije metode proširivanja spektra, a to su frekvencijsko preskakanje proširenog spektra (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS), te direktna sekvenca proširenog spektra (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS).

### 2.2.1. FHSS metoda

Ova metoda funkcionira tako što prijenosni signal, s kojim je moduliran podatkovni signal, skače sa frekvencije na frekvenciju preko širokog spektra frekvencija. Kod preskakanja, ili *hopping code*, određuje frekvencije na kojima će se odašiljati signal i kojim će se to redoslijedom obavljati. Naravno, da bi se signal ispravno primio, oba uređaja moraju funkcionirati pomoću istog koda preskakanja, dakle prijemnik mora slušati signal u pravo vrijeme na pravoj frekvenciji. Ako odašiljač primijeti interferenciju na jednoj frekvenciji, u idućem trenutku slat će signal na drugoj, unaprijed određenoj idućoj frekvenciji. Primjerice, ako je određen uzorak preskakanja frekvencija tako da označimo različite frekvencije slovima C A B E D, na slici 4 je vidljivo kako će izgledati preskakanje signala:



**Slika 4.** Prikaz preskakanja frekvencija prema uzorku C A B E D, [1]

Kod FHSS metode interferencija je uvelike smanjena zato što će interferencijski signali, koji su užeg frekvencijskog spektra, utjecati na prijenosni signal samo ako su odaslani u isto vrijeme na istoj frekvenciji, za što je vjerojatnost prilično mala. Zato će ukupna interferencija biti vrlo mala, te rezultirati sa vrlo malim brojem krivo prenesenih bitova. Također je moguće koristiti različite uređaje koji koriste ovu tehniku na istom spektru frekvencija, ali sa drugačijim uzorkom preskakanja, tako da neće interferirati jedan sa drugim. Takav set kodova preskakanja koji nikad ne koriste istu frekvenciju u isto vrijeme zove se ortogonalni, [1].

### 2.2.2. DSSS metoda

Ova metoda modulacije kombinira podatkovni signal sa slučajnim nizom bitova više frekvencije, a koji se još zove i *chipping code*. Ovaj niz bitova se pridružuje bitu 0, a zatim se drugi niz bitova pridružuje bitu 1, pa se tako niz bitova npr. 11101100011 koristi za vrijednost 0, a 00010011100 za vrijednost 1. ako zatim prenosimo podatak 101, zapravo ćemo prenositi 00010011100 11101100011 00010011100 [1].

U slučajevima kada je brzina veze do 2 Mbps najisplativija opcija je korištenje FDSS metode, ali kada su potrebne veće brzine prijenosa podataka koristi se DSSS metoda.

## 2.3. Osnovne komponente WLAN mreže

Svaka WLAN mreža sastoji se od određenih komponenata, tj. uređaja, bez kojih ne bi mogla funkcionirati – oni su osnovni sastavni dio mreže. U WLAN mrežama ove komponente su nešto različite nego kod tipičnih, žičnih LAN mreža – to su: terminalni uređaji, mrežna programska podrška, odnosno softver, mrežna sučelja uređaja, odnosno mrežne kartice, mrežni prenosnici, antene uređaja, te komunikacijski kanal.

Terminalni uređaji služe kao prvi uređaj između korisnika i mreže. Kao u svakoj mreži, mora postojati uređaj koji će biti sučelje prema korisniku, a to su upravo terminalni uređaji, te osim klasičnih uređaja poput pametnih telefona i računala, oni danas mogu biti i pametni satovi, pametne naočale, te svi ostali uređaji preko kojih korisnik komunicira sa mrežom.

Mrežna programska podrška je ono što postoji na svakom uređaju u mreži, te omogućuje samom uređaju da komunicira sa mrežnim sučeljem, odnosno mrežnom karticom, a dalje preko mrežnog sučelja sa mrežom. Na terminalnim uređajima ali i ostalim uređajima poput servera, pod mrežnu programsku podršku spada ponajprije upravljački program za mrežnu karticu ili sučelje, ali tu se može uvrstiti i operativni sustav uređaja koji omogućuje korisniku da preko upravljačkog programa koristi mrežno sučelje.

Mrežno sučelje, odnosno mrežna kartica, koja u današnjim terminalnim uređajima postoji tek u obliku čipa na matičnoj ploči uređaja, priprema podatke sa uređaja za prijenos kroz mrežu. Kod WLAN mreža to obuhvaća i modulaciju signala, odnosno pripremu digitalnog signala za odašiljanje preko antene ili primanje signala koji stiže sa antene uređaja.

Mrežni prenosnici međusobno povezuju lokalne mreže, i to na sloju mrežnog pristupa, kako bi se stvorila logička lokalna mreža. Dana ulogu mrežnih prenosnika obavljaju preklopnici, ali i neki drugi uređaji u mreži, poput usmjernika, a osim glavne zadaće prenosnika koja je povezivanje manjih mreža u jednu, oni također osiguravaju da svaki paket stigne na svoje odredište, te da se ne šalju bespotrebno u ostale dijelove mreže. Ovaj proces se zove i segmentacija, te se time osigurava bolja propusnost i povećavaju se performanse mreže.

Antene su ključni dio WLAN mreže, jer pomoću njih upravo odašiljemo signal na daljinu bez žice. Postoje mnogi tipovi antena, ovisno o potrebama mreže u kojoj se koriste, a prema [1] njihove osnovne karakteristike su:

- Način širenja signala
- Pojačanje
- Snaga odašiljanja
- Propusnost

Način širenja signala definira prostor koji će biti pokriven signalom. Idealna omnidirekionalna antena jednako će odašiljati signal u svim smjerovima, u obliku kruga oko antene. Nasuprot tome, direkionalna odnosno usmjerena antena odašiljat će signal samo u jednom smjeru, i to u obliku latice. Pojačanje će biti jače kod usmjerene antene jer takva antena

sav signal koji je doveden u nju usmjerava u jednom smjeru. Pojačanje u kombinaciji sa snagom odašiljanja određuje je doseg antene, pa prema tome trebamo veću snagu odašiljanja i usmjerenu antenu ako želimo da signal doseže do relativno udaljenog mjesta prijema. Propusnost antene je definirana širinom frekvencijskog spektra kojim antena može odašiljati.

Kod bežičnih mreža, komunikacijski medij u komunikacijskom kanalu je zrak. Prema tome, na kvalitetu prijema signala utjecat će vremenske prilike. Prilikom kiše, magle ili snijega količina vlage u zraku će se povećati, a to može prouzročiti značajno prigušivanje signala. Uz to, prepreke u komunikacijskom mediju poput drveća, sitnih čestica i ostalih objekata u zraku dodatno narušavaju prijem signala, pa treba misliti na takve pojave prilikom projektiranja WLAN mreže.



### 3. IEEE 802.11 mreža i nastanak 802.11ax standarda

Odbor za standarde IEEE 802 1997. godine izdao je prvi 802.11 standard bežičnih mreža. Formiranje tog standarda teklo je tako što je formirana Radna grupa 11, koja je razvila skupinu specifikacija za bežični prijenos podataka u lokalnoj (Local Area Network – LAN) i gradskoj (Metropolitan Area Network – MAN) mreži. Tako je nastala skupina standarda u koje su bili uključeni standardi za prijenos podataka infracrvenom tehnologijom (infrared radiation – IR) i radio valovima (radio frequency – RF). RF standardi obuhvaćali su ISM frekvenzijski spektar na frekvencijama od 2.4 GHz i 5 GHz, te su nudili teoretski kapacitet prijenosa podataka do 54 Mbps. Tako je izdan prvi 802.11 standard 1997. godine i podržavao je prijenos podataka brzinom 2 Mbps, na frekvenciji od 2.4 GHz. Nažalost, kod ovog standarda međusobna funkcionalnost odnosno kompatibilnost rada uređaja bila je teško izvediva, te nije bilo njegovog značajnog korištenja na tržištu, [2]. U nastavku bit će opisane ukratko sve važnije verzije 802.11 standarda.

#### 3.1. Značajke IEEE 802.11a

Standard 802.11a, poznat i kao Wi-Fi5, skraćeno od Wireless Fidelity 5 GHz, koristi kanal širine 300 MHz na frekvenciji od 5 GHz, a teoretska maksimalna brzina prijenosa je 54 Mbps. Od tih 300 MHz, 200MHz je osigurano za unutarnje prostore te je alocirano na frekvencijama između 5.15 i 5.35 MHz, a 100 MHz je osigurano za vanjsku uporabu i alocirano je između 5.725 i 5.825 MHz.

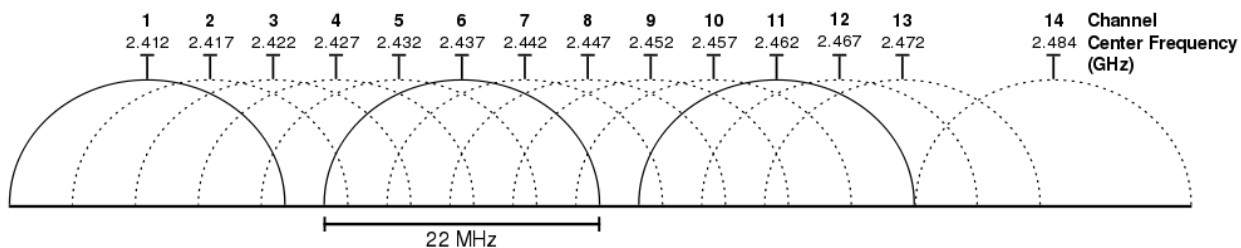
802.11a koristi tehnologiju kodiranog ortogonalnog multipleksiranja podjelom frekvencije (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing – COFDM), kod koje se signal multipleksira tako što se frekvenzijski multipleksiraju ortogonalni nositelji signala. Korišteni su kanali nositelji širine 20 MHz, a podijeljeni su na još 52 kanala od kojih je svaki širok 300 kHz. Nadalje, od tih 52 kanala, 48 se koristi za prijenos podataka, a ostala 4 za kontrolu pogrešaka. Kod ovog standarda tehnike modulacije su: binarno kodiranje mijenjanjem faze (Binary Phase Shift Keying – BPSK), kvadraturno kodiranje mijenjanjem faze (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK), 16 razinsko kvadraturno kodiranje mijenjanjem faze (16-level Quadrature Amplitude Modulation – 16QAM),

te 64 razinsko kvadraturno kodiranje mijenjanjem faze (64-level Quadrature Amplitude Modulation – 64-QAM).

### 3.2. Značajke IEEE 802.11b

802.11b standard je, uz b, g i n standarde, danas jedan od najrasprostranjenijih 802.11 standarda, a podržava ga praktički sva bežična računalna oprema koja radi u Wi-Fi mreži. Postao je vrlo rasprostranjen i zato što koristi 2.4 GHz frekvencijski spektar, čiji signal se u odnosu na 5 GHz spektar lakše širi prostorom. Također, izdan je prije 802.11a standarda, iako je razvoj 802.11b započeo kasnije, jer je razvoj 802.11a standarda naišao na određene prepreke prije nego je mogao biti objavljen.

Broj kanala koji se koriste prema 802.11b standardu je 14, od kojih svaki ima širinu od 25 MHz. U SAD-u FCC dopušta korištenje 11 kanala, u Francuskoj je dopušteno koristiti 4 kanala, u ostatku Europe 13, te u Japanu samo jedan. Također, postoji preklapanje između susjednih kanala, s obzirom na to da svaki kanal ima širinu od 22 MHz, a svih 14 dijele frekvencijski spektar širine svega 83 MHz, od 2.4 do 2.483 GHz. To se najbolje može vidjeti na slici 5., gdje je prikazano svih 14 kanala koje koristi 802.11b standard, ali isto tako i kasniji standardi. Zbog toga, performanse sustava su dodatno narušene kad se u istom prostoru koriste susjedni kanali. Zato se za što bolju kvalitetu signala moraju prostorno bliske mreže što više odvojiti prema broju kanala, tj. rasporediti pravilno po kanalima tako da ne dođe do interferencije. To je još jedan od izazova kod projektiranja mreža, jer primjerice, od 13 kanala dostupnih u Europi (pa tako i u Hrvatskoj) potpuno su razdvojena samo 3 kanala, [2].



Slika 5. Prikaz kanala u Wi-Fi mreži, [3]

Prema 802.11b standardu, definirana su i dva sigurnosna mehanizma. Jedan od njih zove se identifikator servisnog seta (Service Set Identifier – SSID), a funkcionira kao identifikator kojeg podešava administrator sustava, i bez kojeg se nemoguće spojiti na pojedinu mrežu. Drugi sigurnosni mehanizam zove se *Wired Equivalent Privacy* (WEP), a to je šifra koja se unosi prilikom spajanja na bežičnu mrežu te koristi 40-bitnu ili 128-bitnu enkripciju za zaštitu podataka koji se prenose. S vremenom je WEP zamijenio *Wi-Fi Protected Access* (WPA), a danas se u svim Wi-Fi mrežama koristi *Wi-Fi Protected Access 2* (WPA2) koji je dodatno poboljšan u odnosu na WPA.

### 3.3. Značajke IEEE 802.11g

Standard 802.11g objavljen je 2003. godine, a najveća novost je kod ovog standarda je da se maksimalna teoretska brzina prijenosa povećala na 54 Mbps. Kompatibilan je sa 802.11b, ali ta kompatibilnost se postigla poprilično teško – dosta vremena prilikom rada na 802.11g standardu utrošeno je na uspostavljanje kompatibilnosti između standarda, a kod rada mreže u prisutnosti uređaja koji koristi 802.11b brzina sustava se drastično smanjuje. Koristi se ortogonalno multipleksiranje podjelom frekvencije (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM), ali zbog kompatibilnosti koriste se i ostale tehnologije.

### 3.4. Značajke IEEE 802.11n

802.11n uvelike je povećao brzinu prijenosa podataka u mreži, pa je sad teoretska najveća brzina prijenosa čak 600 Mbps, koriste se 2.4 GHz ali i 5 GHz frekvencijski spektar, a osim toga n standard donio je još mnogo novih značajki, kao što su:

- promjene u implementaciji OFDM-a

- uvođenje tehnologije višestrukih ulaza i višestrukih izlaza (Multiple-Input and Multiple-Output – MIMO)
- tehnologija za štednju energije MIMO sustava
- veća širina kanala - 40 MHz, uz postojeće kanale širine 20 MHz
- bolja tehnologija korištenja antena
- smanjena kompatibilnost sa starijim standardima pod posebnim okolnostima kako bi se povećale performanse sustava

Iako je svaka od ovih inovacija dodala kompleksnost sustavu, većina ih se mogla implementirati u čipset mrežnog uređaja, pa su se povećani troškovi amortizirali kroz jeftinu masovnu proizvodnju uređaja, [4]. Najveća novost je uvođenje MIMO tehnologije, pomoću koje uređaji mogu komunicirati sa više antena u isto vrijeme.

### 3.5. Značajke IEEE 802.11ac

802.11ac standard razvijen je kako bi se podigle brzine prijenosa podataka barem do gigabitne razine, a teoretski su moguće brzine i do 7Gbps. I dalje se koristi tehnologija OFDM koja se koristila i u prijašnjim standardima.

Osim MIMO koristi se i tehnologija MIMO višestrukih korisnika (Multi-User MIMO – MU MIMO) koja omogućuje istovremeni prijenos različitih podatkovnih okvira različitim klijentima. U ac standardu uveo se i sustav koda ispravljanja pogrešaka (Error Correction Coding – ECC), jer je napredak tehnologije izrade čipova doveo do toga da se dodatna procesorska snaga hardvera može iskoristiti u neke druge svrhe, poput obrađivanja podataka u svrhu ECC tehnologije, te je tako omogućeno ispravljanje pogrešaka koje nastanu u prijenosu podataka. Širina kanala još jednom se udvostručila, pa je širina skočila sa 40 MHz u n standardu na 80 MHz, uz opcionalnu širinu kanala od 160 MHz ili 2 bloka od po 80 MHz svaki. Uz modulacijske tehnike BPSK, QPSK, 16-QAM i 64-QAM, opcionalno se pojavilo i 256 razinsko kvadraturno kodiranje mijenjanjem faze (256-level Quadrature Amplitude Modulation – 256-QAM), [5].

### 3.6. 802.11ax i njegov nastanak

802.11ax standard najnoviji je standard grupe 802.11, a smatra se nasljednikom standarda 802.11ac. Kao što je i očekivano, novi standard donosi mnogo veće brzine prijenosa podataka, teoretski do 4.8Gbps, bolju kvalitetu prijema pri niskim razinama signala, ali i ostala poboljšanja u odnosu na ac standard. Razvoj standarda potaknut je sve većim potrebama za kapacitetom mreže, odnosno za sve većim brzinama prijenosa podataka i sve većom količinom prenesenih podataka – dolaskom 4K i 8K video sadržaja, Interneta stvari (Internet of Things – IoT), te sadržaja virtualne i proširene stvarnosti, količina prenesenih podataka u bežičnim mrežama raste vrlo brzo.

Prema [6], IEEE 802.11ax utemeljen je na prednostima prethodno spomenutog standarda 802.11ac, uz to dodajući fleksibilnost i skalabilnost koje omogućuju novim, ali i postojećim mrežama da rade sa aplikacijama nove generacije – kod novog standarda kombiniraju se sloboda i brzina gigabitnih bežičnih mreža sa predvidljivosti koju nalazimo u tehnologiji mobilne mreže četvrte generacije.

Novi standard također omogućava poslovnim subjektima i davateljima usluga podržavanje novih aplikacija koje će koristiti WLAN infrastrukturu, dok i dalje mogu davati višu kvalitetu usluge starijim aplikacijama. Osim svega navedenoga, zbog 802.11ax AP-ovi će moći podržavati više klijenata u gustim okruženjima, ali i davati bolje iskustvo korištenja u uobičajenim WLAN mrežama, a uz to će davati performanse mreže koje su potrebne za napredne aplikacije poput 4K i 8K videa, usluga bežičnog ureda, te IoT-a. Zbog fleksibilnog vremena buđenja iz *standby* moda uređaji će moći biti u *standby* modu puno duže nego što je to slučaj kod 802.11ac standarda, te će zato trošiti manje energije, a baterije će im moći trajati mnogo duže, što je osobito važno kod pametnih mobitela, ali i svih ostalih IoT uređaja. Prvi službeni nacrt standarda odobren je u rujnu 2017., a finalna ratifikacija standarda planirana je za kraj 2019. godine, dok su prvi uređaji koji podržavaju novi standard već počeli izlaziti na tržište, poput Samsungovog smartphona Galaxy S10.

Wi-Fi Alliance, američka neprofitna organizacija koja se bavi promoviranjem Wi-Fi tehnologije i certifikacijom uređaja koji koriste Wi-Fi, novi standard reklamira kao Wi-Fi 6 – uvodi se novi sustav marketinškog označavanja Wi-Fi standarda, pri čemu će Wi-Fi 4 označavati

standard 802.11n, Wi-Fi 5 će biti 802.11ac, a Wi-Fi 6 će, kao što je navedeno, predstavljati 802.11ax. Wi-Fi 6 će se također reklamirati pod imenom *High Efficiency Wireless*.

Sva poboljšanja postignuta su kroz najnovije tehnologije koje su proizašle iz nadogradnje tehnologija korištenih u ac standardu. Modulacija je iz 256-QAM prešla u 1024 razinsko kvadraturno kodiranje mijenjanjem faze (1024-level Quadrature Amplitude Modulation – 1024-QAM), poboljšana je MIMO tehnologija te uvedena nova tehnologija ortogonalnog multipleksiranja podjelom frekvencije višestrukog pristupa (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA), te je poboljšana sigurnost mreže uvođenjem *Wi-Fi Protected Access 3* (WPA3) tehnologije. Osim toga, uvelike je smanjena potrošnja energije uređaja, što je omogućeno novim tehnologijama koje omogućuju uređaju da više vremena provede u *standby* modu.

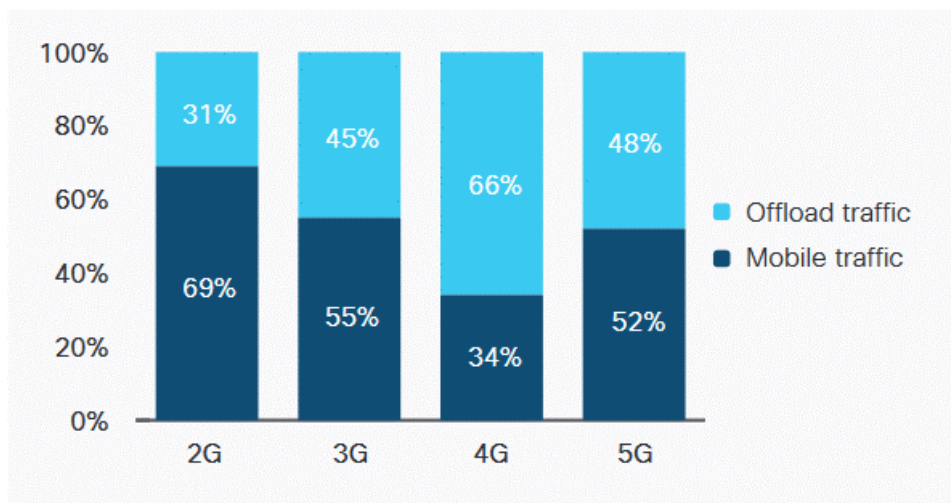
## 4. Arhitektura 802.11ax mreže

Slično kao i prethodni standardi, 802.11ax sadržava novi protokol na fizičkom sloju, sa jačom modulacijom signala i shemama kodiranja. U kontrastu sa 802.11ac, 802.11ax ne povećava broj MIMO prostornih tokova signala te ne proširuje kanal, te je zato najveća nominalna brzina 9.6 Gbps, što je samo 37% više od brzine 802.11ac. Željeno povećanje propusnosti po korisniku je zato postignuto pomoću efikasnijeg iskorištenja frekvencijskog spektra, [7].

Najvažniji razlozi tog povećanja propusnosti po korisniku leže u tome što se ubrzano uvode nove tehnologije koje koriste Wi-Fi mrežu, a koje stvaraju mnogo veći promet nego starije tehnologije. To su ponajprije novi standardi video sadržaja, poput 4K i 8K videa, ali i virtualna te proširena stvarnost. Tome svemu dodatno potpomaže činjenica da broj uređaja po korisniku konstantno raste, te trenutno iznosi otprilike 4 uređaja po korisniku. Prema [6], proučavanje mreža baziranih na prethodnim 802.11 standardima pokazuje da je svaka nova generacija Wi-Fi mreže donijela povećanu propusnost te pokrivenost korisnicima kako bi se podržalo širenje i povećana gustoća uređaja u mrežama.

Ubuduće mreže ne samo da će morati podržati širenje i povećanu gustoću uređaja, već će morati i nuditi veći nivo usluge u postojećim mrežama. Kao što je već spomenuto, nove tehnologije poput 4K i 8K videa, proširene i virtualne stvarnosti, te IoT-a, kao i ekspanzija mobilnih jezgrenih usluga poput govorne komunikacije, zahtijevaju veći stupanj determinističkog, predvidljivog ponašanja mreže, to jest zahtijevaju veću stabilnost, sigurnost te nivo usluge Wi-Fi mreže.

Uz sve navedeno, povijest je pokazala da je svaka nova generacija mobilnih mreža prenosila sve više podatkovnog prometa sa mobilne mreže na Wi-Fi, uključujući i poslovne mreže. Ta pojava zove se *offload*, a kako dolazi 5G mreža, bit će opet potreban još veći kapacitet Wi-Fi mreže kako bi mreža podnijela taj novi *offload*, odnosno skok u povećanju podatkovnog prometa. Na slici 6. vidi se trend *offloada* prometa sa mobilne mreže na Wi-Fi.

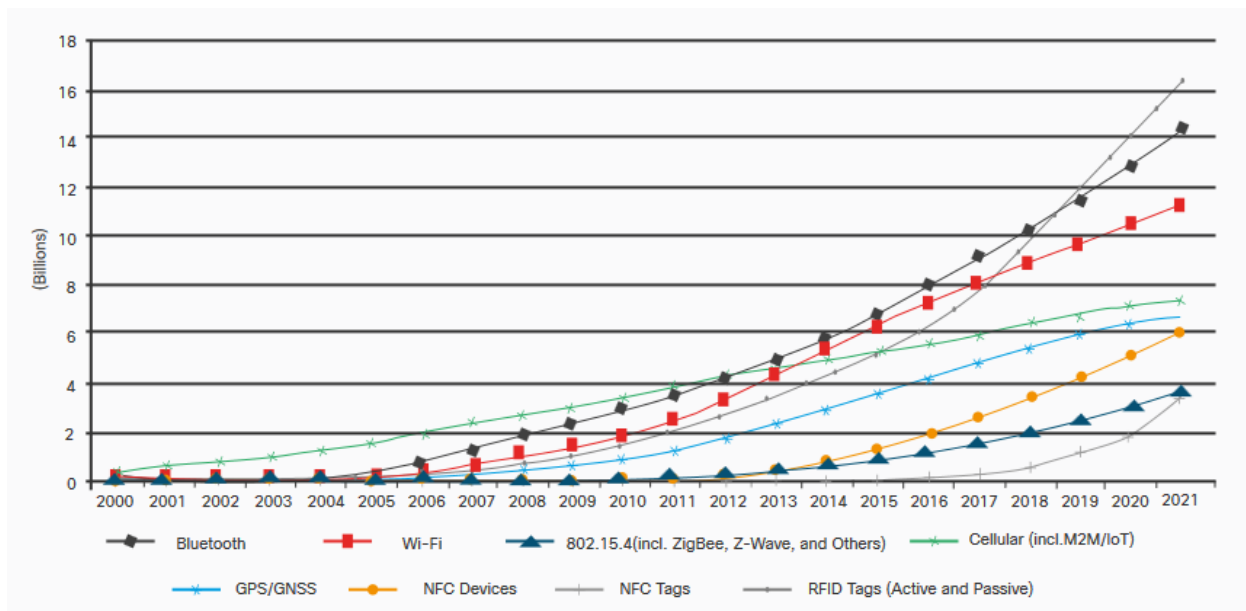


**Slika 6.** Trend *offloada* podatkovnog prometa sa mobilne mreže na Wi-Fi, [6]

Također je važno napomenuti da se tehnologije virtualne i proširene stvarnosti ubrzano razvijaju, a za te aplikacije potrebna je relativno velika propusnost, iznad 1 Gbps, te niska latencija, manje od 10 ms, što će omogućiti 802.11ax, da bi se mogla postići potrebna razina kvalitete usluge. Prema predviđanjima, podatkovni promet koji će stvoriti proširena stvarnost povećati će se sedmerostruko od 2016. do 2021. godine: sa 3 PB na čak 20 PB na mjesec, a promet koji će stvoriti virtualna stvarnost povećat će se 11 puta: sa 13 PB na 140 PB na mjesec, [6].

IoT tehnologija još je jedno važno područje primjene 802.11ax standarda, ponajprije opet zbog toga što se ubrzano povećava broj IoT uređaja koji trebaju biti spojeni na mrežu. Takvi uređaji po komunikaciji s ostatkom mreže nisu slični tradicionalnim uređajima poput laptopa ili mobilnih telefona, već zahtijevaju determinističku bežičnu uslugu, u smislu da im treba komunicirati *poll* signal svakih 5 ms da se ne ugase, ili uslugu koja zahtijeva vrlo malu količinu energije, u smislu da ne komuniciraju ako nije prijeko potrebno. Dosad su se takvi zahtjevi ispunjavali određenim posebno razvijenim tehnologijama za tu namjenu, ali odsad će te zahtjeve ispunjavati sama mreža bazirana na 802.11ax standardu zahvaljujući novim mogućnostima tog standarda. Na slici 7. vidi se trend rasta broja uređaja spojenih na mrežu, čemu uvelike doprinosi IoT tehnologija, te će upravo IoT zbog toga profitirati dolaskom novog standarda.





Slika 7. Trend rasta broja uređaja spojenih na mreže različitih tehnologija, [6]

## 4.1. Glavne promjene i značajke u arhitekturi 802.11ax mreže

U tablici 1. vide se glavne razlike između standarda 802.11ac te 802.11ax, te je u nastavku pojašnjeno kako su novosti kod 802.11ax pomogle pri poboljšavanju prijenosa informacija u mreži.

Tablica 1. Razlike između 802.11ac i 802.11ax

	802.11ac	802.11ax
Frekvencijski pojas	5 GHz	2.4 GHz i 5 GHz
Širina frekvencijskog pojasa	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz
Broj podnosilaca brze fourierove transformacije (Fast Fourier Transform – FFT)	64, 128, 256, 512	256, 512, 1024, 2048
Razmak između podkanala	312.5 kHz	78.125 kHz
Trajanje OFDM simbola	3.2 $\mu$ s + 0.8/0.4 $\mu$ s zaštitni interval	12.8 $\mu$ s + 0.8/1.6/3.2 $\mu$ s zaštitni interval

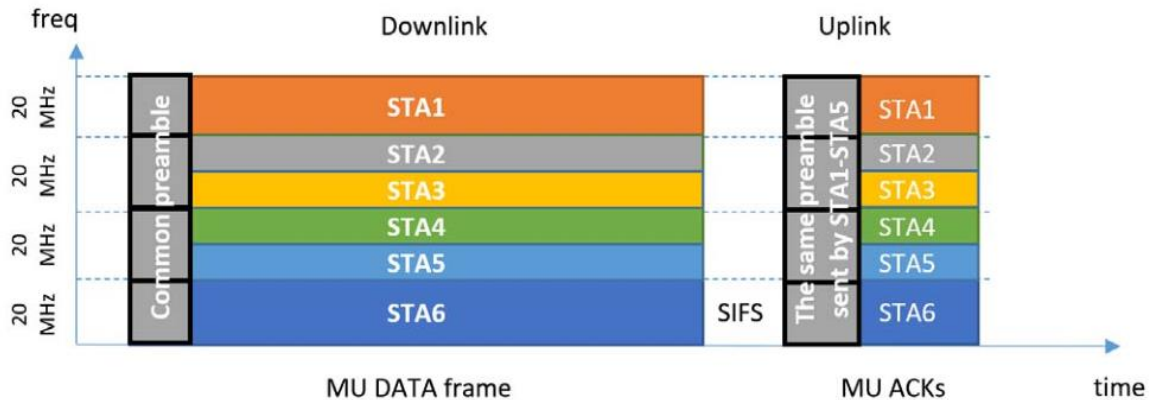
Najveća modulacija	256-QAM	1024-QAM
Najveća brzina protoka podataka	6933 Mbps	9607.8 Mbps

Izvor: [8]

Ključno svojstvo 802.11ax standarda je prihvaćanje OFDMA pristupa, koji se uvelike koristi u mobilnim mrežama, ali se tek nedavno počeo koristiti u Wi-Fi mrežama. Razlog tomu je što vrlo široki kanali (80 MHz, 80+80 MHz i 160 MHz) koji su se uveli kroz 802.11ac pate od frekvencijski selektivne interferencije, što značajno pogoršava brzine koje se mogu dostići u mreži. Sa OFDMA, susjedni podnosioci se grupiraju zajedno u resursne jedinice (resource unit – RU), te pošiljalatelj može izabrati najbolju RU za svakog pojedinačnog primatelja, što rezultira u većem omjeru signal/interferencija+šum (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – SINR), te većoj propusnosti. Također, kako efikasnost visoke brzine prijenosa podataka opada kad pošiljalatelj, odnosno stanica ima malo podataka za prenijeti, napredne agregacijske tehnike koje smanjuju pristup kanalu, poruke potvrde (acknowledgement – ACK) i sl. postaju beskorisne. Za takve situacije, rješenje je alociranje uskih RU za takve stanice, [7].

OFDMA stvara Wi-Fi pristup mreži sličniji pristupu mreži u LTE mreži, no u suprotnosti s LTE, OFDMA radi iznad distribuirane koordinatne funkcije (Distributed coordination function – DCF), te je koordiniran od strane pristupne točke (Access Point – AP). DCF je tehnologija koja se koristi za pristup mreži koja funkcionira tako da kada stanica želi odašiljati signal, prvo mora slušati i paziti na status kanala za vrijeme određenog intervala. Ako je za vrijeme tog intervala kanal zauzet, odašiljanje signala se odgađa. Dodatno, ako nekoliko stanica istovremeno želi pristupiti kanalu, te sve stanice vide kanal kao zauzet i ne obave transmisiju, to znači da će opet istovremeno saznati kada je kanal slobodan te obaviti transmisiju, što bi moglo uzrokovati koliziju. Da bi se to spriječilo, koristi se nasumični period vremena za vrijeme kojeg stanica ne odašilje signal nakon što primijeti da je kanal slobodan za transmisiju. Sve navedeno znači da kad AP pristupa kanalu, odmah može započeti višekorisnički (Multi User – MU) prijenos podataka. U LTE-u, OFDMA je baziran na vremenu, a to znači da različite frekvencije odgovaraju različitim korisnicima za vrijeme jednog vremenskog intervala transmisije (Transmission Time Interval – TTI), a u 802.11ax OFDMA je baziran na okvirima, dakle MU okvir sadrži podatke za različite korisnike, te su različite

frekvencije pridružene korisnicima za vrijeme cijelog trajanja okvira, [7]. To se može najbolje vidjeti na slici 8.



**Slika 8.** Prikaz OFDMA prijensa u 802.11ax, [7]

Za MU prijenos u *download* smjeru, preambula u fizičkom sloju određuje trajanje okvira i mapiranje frekvencije između stanica. Suprotno tome, za MU prijenos u *upload* smjeru, trajanje okvira i mapiranje frekvencije se specificiraju u prethodnom okviru, koji može biti ili okvir okidač, koji je kontrolni okvir za alociranje kanala za *upload* MU prijenos, ili podatkovni okvir, čije zaglavlje sadrži potrebne informacije. Potonje je posebno korisno za potvrđivanje *download* MU transmisija. *Upload* MU transmisija započinje točno jedno kratko međuokvirno razdoblje (Short InterFrame Space – SIFS) nakon *download* okvira koji sadrži potrebne informacije. To omogućuje da se stanice koje sudjeluju u *upload* MU prijenosu sinkroniziraju o tome koje tehnike će se koristiti u prijenosu: OFDMA, MU-MIMO, ili oboje, [7].

Uvođenje OFDMA u Wi-Fi utječe na druge funkcionalnosti u fizičkom sloju i MAC sloju. Kao prvo, promijenjeni su OFDM parametri da bi se unaprijedila fleksibilnost i efikasnost OFDMA funkcionalnosti. Nadalje, promijenjen je oblik okvira na fizičkom sloju da bi sadržao OFDMA informacije u preambuli, zatim je nastavljeno s pomicanjem informacija MAC sloja u preambulu okvira fizičkog sloja, jer se ponekad preambula može dekodirati čak i ako je cijeli okvir oštećen. Osim toga, OFDMA je uzrokovao brojne promjene na MAC sloju koje su povezane za MU operacijama i pravednosti, odnosno jednakosti između uređaja različitih generacija. Osim OFDMA, napori su usmjereni i k tome da se poboljša propusnost i smanji potrošnja energije u

preklapajućim i gustim mrežama. Prema [7], lista tih novih značajki, između ostalog, uključuje sljedeće:

- Bojanje osnovnog seta usluga (Basic Service Set – BSS): preuzeto i unaprijeđeno od 802.11ac i 802.11ah, omogućuje da se razlikuju *inter-* i *intra-* BSS okviri prema njihovim preambulama čak i ako su informacije okvira uništene u kolizijama;
- Nekoliko modifikacija virtualnog prepoznavanja podnosioca, poznatog kao mrežni alokacijski vektor (Network Allocation Vector – NAV);
- Virtualizacija;
- *Microsleep* način rada, koji omogućuje da uređaj isključi radio-sklop samo za vrijeme nepoznatog okvira;
- Redizajnirano ciljno vrijeme buđenja (*Target Wake Time*), prvotno uvedeno u 802.11ah;
- Oportunistička štednja energije

Osim toga, značajna količina posla je obavljena kako bi se poboljšala prostorna korisnost u gusto smještenim mrežama pomoću mijenjanja praga osjetljivosti i snage odašiljanja. Ovo je zapravo još uvijek tema o kojoj se najviše raspravlja u aktivnostima radne skupine za razvoj standarda 802.11ax (Task Group ax – TGax), jer bi to moglo znatnije utjecati na pravednost, odnosno jednakost uređaja u mreži, te smanjiti performanse starijih uređaja,[7].

## 4.2. Promjene na fizičkom sloju

802.11ax je naslijedio neke značajke fizičkog sloja od prethodnog standarda, 802.11ac. Kao i prethodni standard, i ovaj se bazira na OFDM tehnologiji, te podržava rad u frekvencijskom rasponu od 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, te 160 MHz.

### 4.2.1. Modulacija

Da bi se povećao broj podnosioca, što je poželjno kod OFDMA tehnologije, učeterostručilo se trajanje OFDM simbola do 12.8  $\mu$ s. Tako dugački OFDM simboli su otporniji na među-korisnički *jitter*, što je vrlo važno za *upload* MU transmisiju koja se može istovremeno obavljati od strane nekoliko korisnika. Također, duže trajanje simbola omogućava da se smanji

*overhead*, zbog zaštitnih intervala. Ovisno o stanju kanala, 802.11ax uređaj može razdvojiti OFDM simbole prema zaštitnom intervalu izabranom između vrijednosti od 0.8  $\mu$ s, 1.6  $\mu$ s i 3.2  $\mu$ s, što omogućava smanjenje *overheada* do 6%, u odnosu na 12-25% kod 802.11ac standarda, [7].

802.11ax standard također uvodi nove modulacijske tehnike uz već postojeće BPSK, 16-QAM, 64-QAM, te 256-QAM. Prva je opcionalni 1024-QAM, koji se koristi u unutarnjim prostorima sa jako dobrim stanjem kanala. Zajedno sa kodovima za ispravljanje grešaka prilikom slanja (Forward Error Correction Codes – FECC), koji imaju učinkovitost kodiranja od 1/2, 2/3, 3/4, te 5/6, ove modulacijske tehnike generiraju cijelu paletu brzina prijenosa sa maksimalnom brzinom od 9.6 Gbps. Tako visoke brzine se postižu kada se podaci prenose sa shemom učinkovitosti kodiranja 5/6 u 160 MHz ili 80+80MHz kanalima sa 80 prostornih prijenosa, te zaštitnim intervalima od 0.8  $\mu$ s, [7].

Uz to, 802.11ax opisuje i opcionalnu modulaciju dvaju nosioca (Dual Carrier Modulation – DCM). DCM unaprjeđuje transmisijsku robusnost alocirajući isti signal na par podnosioca, koji su vrlo razdvojeni u frekvencijskoj domeni. Prema preliminarnim istraživanjima koje su obavili članovi TGax, takva tehnika pomaže kod unutar-spektralne interferencije te daje više nego 2 dB dobitka kod performansi odnosa paket/greška (Packet Error Ratio – PER) potrebno je navesti i da se zbog dupliciranja podataka korištenjem DCM tehnike dvostruko smanjuje brzina prijenosa, pa je DCM dopušten za korištenje samo kod relativno robusnih modulacijsko-kodnih shema: MCS0, MCS1, MCS3, te MCS4, [7].

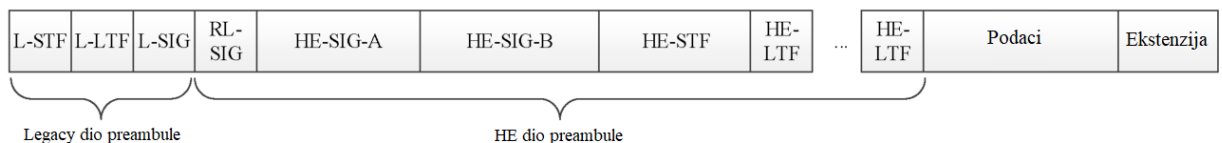
#### 4.2.2. Oblik okvira fizičkog sloja

TGax definira 4 tipa fizičkih okvira, koji se nazivaju još i fizičke protokolne jedinice podataka (PHY Protocol Data Unit – PPDU): za jednokorisnički (Single User – SU) prijenos, za SU prijenos proširenog dometa, za MU prijenos u *download* smjeru, te za MU prijenos u *upload* smjeru. Ta četiri različita tipa okvira poboljšavaju baznu strukturu okvira proširujući ju sa određenim poljima specijaliziranim za različiti tip okvira. Glavna značajka MU prijenosa u *download* smjeru je da okvir sadrži zajedničku preambulu koja opisuje koje podnosiocima određeni prijemnik treba dekodirati da bi dobio svoj dio polja za podatke. Slično tome, kod MU prijenosa u

*upload* smjeru, preambula okvira je zajednička, te se emitira od strane svake stanice. Zatim svaka stanica šalje svoj dio podatkovnog polja koristeći predefimirani set podnosioca.

Za sve tipove okvira, preambula je duplicirana u svakom podkanalu od 20 MHz unutar prijenosnog pojasa te se sastoji od dva dijela: *legacy* dijela, te HE dijela. Kad je uključen i prvi, *legacy* dio, za kompatibilnost sa starijim standardima, drugi dio signalizira novu 802.11ax funkcionalnost te se može dekodirati jedino od strane 802.11ax uređaja. *Legacy* dio preambule sadržava polja koja sinkroniziraju odašiljač i prijemnik, te *legacy* signalno polje, koje opisuje parametre ostatka okvira, tj. omogućava izračunavanje duljine okvira. Iako stariji uređaji dekodiraju ostatak okvira bez greške, oni vide kanal kao zauzet, čak i ako je jačina signala premala.

Da bi se pojednostavila detekcija 802.11ax okvira u slučaju visoke interferencije, HE dio preambule počinje sa ponavljanjem *legacy* signalnog polja, iza kojeg slijedi obavezno HE-SIG-A polje, zatim opcionalno HE-SIG-B polje, te polja HE-STF i HE-LTF potrebna za podešavanje MIMO tehnike. Struktura 802.11ax okvira vidi se na slici 9., gdje je prikazano gdje je koje polje te koji je *legacy* dio preambule, a koji je HE dio preambule.



**Slika 9.** Struktura 802.11ax okvira na fizičkom sloju  
Izvor: [7]

### 4.3. Promjene na MAC sloju

Prema [9], na MAC sloju uvelo se također mnogo poboljšanja u odnosu na starije standarde 802.11. Većina ih se usredotočuje na poboljšanje prostorne učinkovitosti signala.

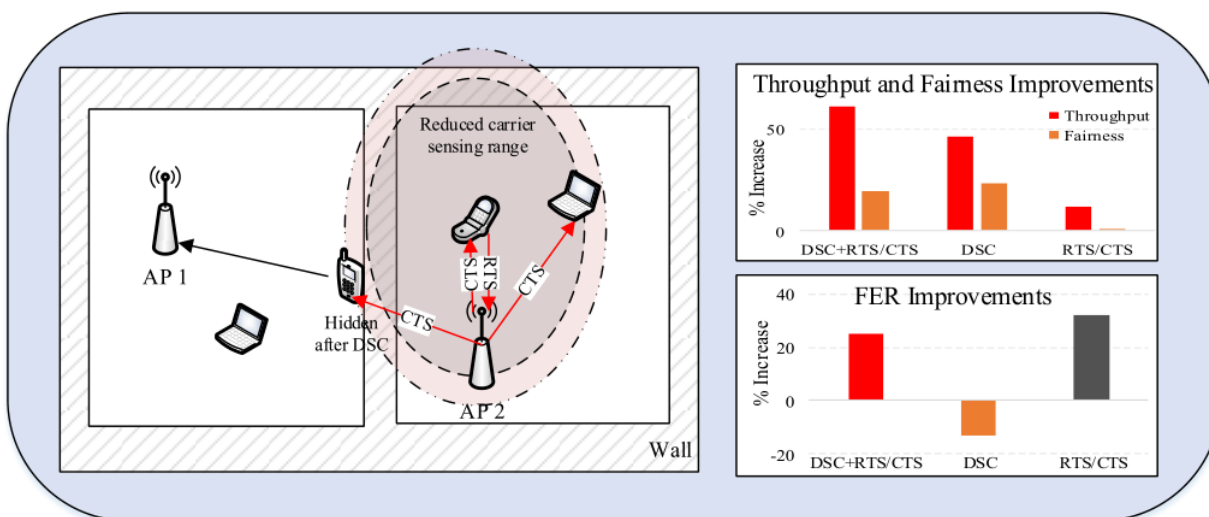
Stariji 802.11 standardi koriste module za fizičko procjenjivanje čistog kanala (Physical Clear Channel Assessment – PHYCCA) kako bi uređaj osjetio kakvo je stanje pojedinog kanala, npr. je li slobodan ili zauzet i koliko, pomoću mjerenja zaprimljene snage signala. 802.11ax trebao bi u potpunosti iskoristiti dinamičke modifikacije PHYCCA. Te nove metode dozvoljavaju višestruke istovremene transmisije signala, te se time povećava prostorna učinkovitost. Princip prema kojem

bi takva promjena trebala donijeti bolju vezu je taj da u prostorima sa gusto raspoređenim uređajima, uređaji mogu upasti u stanje u kojem stalno pretpostavljaju da je neki kanal zauzet, iako su višestruke transmisije signala u tom kanalu i dalje moguće. Jedan od novih algoritama koji se koristi kao modifikacija PHYCCA u 802.11ax standardu je dinamička kontrola osjetljivosti (Dynamic Sensitivity Control – DSC), čija osnovna ideja je da optimizira postojeće signale, tj. veze tako da odgovarajuće podesi prag osjetljivosti nosioca (Carrier Sense Threshold – CST) svakog čvora. DSC pokušava ograničiti povećanje ili smanjenje CST-a za svaku stanicu u tom području tako da se izbjegnu preagresivno ili prekonzervativno odašiljanje signala, [9].

Također se za poboljšavanje prostorne učinkovitosti upotrebljava takozvano BSS bojanje, inovativna tehnika kod koje se svakom BSS-u dodjeljuje određena boja, u skladu sa bitovima koji se nalaze u L-SIG polju fizičkog zaglavlja. Tako prilikom primanja okvira od susjednog BSS-a, svaka stanica može napustiti proces primitka okvira od susjednog BSS-a, tako čineći kanal slobodnim tijekom te transmisije i zapravo povećavajući mogućnost transmisije ostalim uređajima, [9].

Još jedan način poboljšavanja prostorne učinkovitosti je sljedeći: kod starijih standarda, virtualno očitavanje nosioca (Virtual Carrier Sensing – VCS) se koristi da bi se riješio problem kolizije povezan sa skrivenim čvorovima. Ta tehnika radi tako da se bežični kanal rezervira pomoću rukovanja zatraži-za-slanje/slobodno-za-slanje (Request-to-send/Clear-to-send – RTS/CTS). Tako susjedne stanice koje to čuju, prilikom primitka RTS/CTS paketa postavljaju *timer* nazvan vektor alokacije mreže (Network Allocation Vector – NAV) koji im blokira transmisiju na određeno vrijeme. Kod 802.11ax standarda, trebaju se koristiti dva NAV *timera* za svaku stanicu, gdje se jedan identificira kao Intra-BSS NAV, a drugi je standardni NAV, te se Intra-BSS NAV resetira ili povećava jedino pomoću okvira od tog BSS-a. Tako se prostorna učinkovitost može povećati omogućujući stanici da ignorira RTS/CTS prenesene od preklapajućih BSS-ova, [9].

Prema [9], u 802.11ax standardu pokušava se inteligentno koristiti RTS/CTS metoda bazirana na zamijećenim uvjetima na svakom kanalu koja funkcionira na svakom čvoru pojedinačno, tj. svaka pristupna točka može koristiti mehanizme za daljinsko uključivanje tehnike RTS/CTS za bilo koju od stanica s kojima je povezana. Ako su transmisije otežane zbog mogućeg postojanja skrivenih čvorova (npr. zbog korištenja mehanizama poput DSC-a), stanice mogu odlučiti koristiti ranije spomenutu metodu. Na slici 10. prikazano je kako ovo sve funkcionira u simulaciji mreže koja koristi DSC i RTS/CTS mehanizme: postoje značajna poboljšanja u radu mreže kada je uključen DSC – oko 40% poboljšanja u propusnosti, te se dobiva 60% poboljšanja u propusnosti kada se koristi DSC sa inteligentnim 4-smjernim *handshake* mehanizmom.



Slika 10. Simulacija mreže sa uključenim DSC odnosno RTS/CTS mehanizmima, [9]

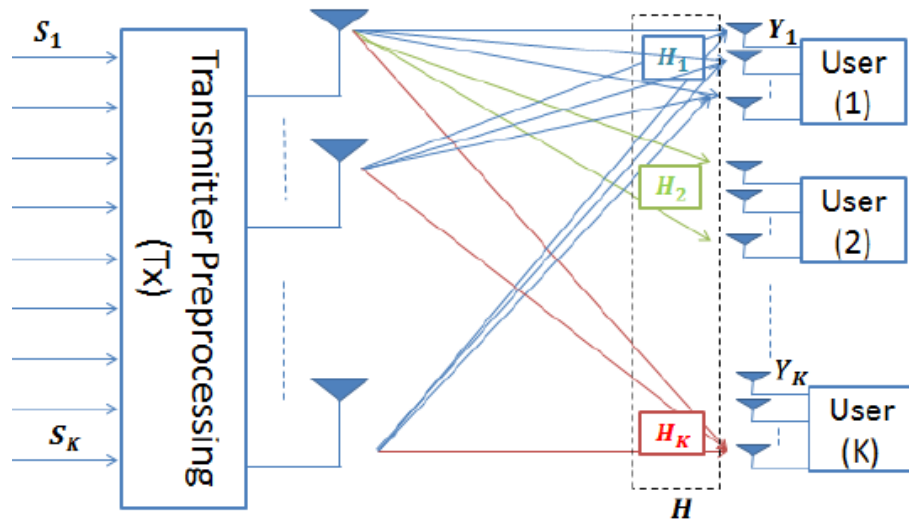


## 5. Prednosti 802.11ax standarda

802.11ax donosi mnoge prednosti, što je, naravno, glavna motivacija za razvoj svake nove tehnologije, pa tako i novog standarda Wi-Fi mreže. Najveća prednost novog standarda, kao i svih njegovih prethodnika kada su tek došli u uporabu, je brzina: uređaji koji podržavaju 802.11ax moći će postizati teoretske brzine do 9.6 Gbps. No, tu ne staju prednosti novog standarda, već ih ima mnogo više, [10].

Kod prethodnih generacija Wi-Fi-ja, samo jedan uređaj može prenositi podatke istovremeno preko cijelog frekvencijskog spektra, te taj uređaj jedini pristupa mediju u vrijeme slanja signala. Ali kod OFDMA tehnike, različiti uređaji mogu prenositi podatke na različite destinacije za vrijeme istog vremenskog intervala. 802.11ax AP može posluživati nekoliko klijenata istovremeno. OFDMA može omogućiti triput veći kapacitet mreže za kratke pakete, poput glasovnih ili e-mail paketa, ili olakšati podršku za mnogo veći broj klijenata, što će biti potrebno za IoT, [10].

MU-MIMO je još jedna od novijih tehnologija, a koja se također koristi u 802.11ax, te omogućava AP-u da efikasnije grupira klijente, što smanjuje *overhead* i rezultira u dvostruko većem kapacitetu od 802.11ac. AP koji koristi MU-MIMO tehnologiju može prenositi i do 8 prostornih tokova signala istovremeno. Također, AP može koristiti OFDMA ili MU-MIMO, ali će sam odlučiti o tome koju od tehnologija će koristiti: ako prima mnogo kratkih paketa, poput paketa sa Skypea ili e-maila, ili ako ima vrlo velik broj klijenata spojenih na njega, OFDMA je najefikasnija metoda. Ali ako se promet sastoji od velikih paketa kao što je slučaj kod Netflix usluge, MU-MIMO će biti bolji izbor, [10]. Prikaz rada ove tehnologije vidi se na slici 11., gdje je vidljivo kako se podaci šalju različitim korisnicima upotrebom nekoliko antena istovremeno.



Slika 11. Prikaz rada MU-MIMO tehnologije, [11]

Uvođenje BSS bojanja još je jedna od novosti 802.11ax standarda. Dugo vremena je glavni problem kod Wi-Fi mreža bio taj da ako signal ode predaleko, doći će do interferencije. BSS bojanje uklanja taj problem, povećava kapacitet za zagušene mreže gdje postoje AP-ovi koji se preklapaju. Uvođenjem BSS bojanja, različiti paketi od različitih uređaja sada mogu biti na istom kanalu u isto vrijeme. Više ne moraju čekati jedan drugoga da završe, što opet znači da se više bitova može prenijeti u isto vrijeme, [10].

Kod BSS bojanja, svaka stanica i AP imaju svoju zadanu boju, te je njihovo ponašanje različito ovisno o tome ima li AP istu ili različitu boju od klijenta. Ako boje nisu iste, koriste se standardne postavke energije, ali ako se boje poklapaju, može se koristiti veća energija za prijenos signala, tako da se podaci mogu prenositi iznad drugih klijenata, [10].

Pomoću još jačeg modulacijskog postupka, povećava se brzina prijenosa podataka: 802.11ax koristi 1024-QAM modulaciju, što znači da kod 802.11ax standarda signal jednostavno prenosi više bitova u istom vremenu nego prije.

Uz sve navedeno, 802.11ax je i mnogo učinkovitiji što se tiče potrošnje električne energije. To se postiže na dva načina: ciljnim vremenom čekanja (Target Wait Time – TWT), te dopuštanjem klijenata koji koriste samo 20 MHz pojas. TWT je potpuno novi način omogućavanja klijentima da budu u *standby* modu duže vremena, što je od kritične važnosti za nosive uređaje ili IoT uređaje, gdje je uređaj teže napuniti, odnosno gdje uređaj radi na baterije. Kod prethodnih standarda,

klijent je mogao biti u *standby* načinu za vrijeme nekoliko *beacon* intervala, što je nekoliko stotina milisekundi, ali se morao stalno buditi da provjeri jesu li pristigli novi podaci. Za IoT i slične uređaje, ovo može predstavljati problem. Ali sa TWT-om, klijent može biti u *standby* modu satima ili danima, [10].

Kod 802.11ax, mnogo je veća i udaljenost kod koje se signal može slati i primati. To je postignuto pomoću posebne preambule za komunikaciju na veće udaljenosti, te se time postiže komunikacija na do dvostruko većim udaljenostima nego kod 802.11ac. Osim toga, duži zaštitni interval povećava udaljenost za vanjske *point-to-point* linkove, te omogućava jednokilometarsku razliku u višestaznoj propagaciji bez interferencije, naspram 250 metara udaljenosti kod 802.11ac standarda, [10].

Uz sve navedeno, kod 802.11ax standarda prednosti leže i u tehničkim karakteristikama prijenosa podataka te pristupa kanalu za komunikaciju, kao što je i prethodno opisano te objašnjeno. U tablici 2. vide se sve tehničke karakteristike pristupa kanalu kod 802.11ax standarda u usporedbi sa starijim standardima zbog kojih je moguće postići te prednosti.

**Tablica 2.** Tehničke karakteristike standarda 802.11ax

	Stariji standardi	802.11ax
Osnovni pristup kanalu	CSMA/CA	OFDMA povrh CSMA/CA
Nasumični pristup kanalu	DCF, poboljšani distribuirani pristup kanalu (Enhanced Distributed Channel Access – EDCA)	UL OFDMA nasumični pristup povrh CSMA/CA
Pristup bez potvrde za odašiljanje	Funkcija koordiniranja pristupne točke (Point Coordination Function – PCF), HCF-kontrolirani pristup kanalu (Hybrid Coordination	UL OFDMA baziran na <i>triggeranju</i>

	Function-Controlled Channel Access – HCCA)	
MU tehnologija	MU-MIMO	MU-MIMO, OFDMA
MU smjer transmisije	<i>Download</i>	<i>Download i upload</i>
Fragmentacija	Statička	Fleksibilna
Agregacija	Agregacija MAC uslužne podatkovne jedinice (Aggregate MAC Service Data Unit – A-MSDU), agregacija MAC protokolne podatkovne jedinice (Aggregate MAC Protocol Data Unit – A-MPDU) bez fragmentacije	A-MPDU, A-MSDU s fragmentacijom
Upravljanje preklapajućim BSS-ovima		
Smanjenje interferencije	NAV, RTS/CTS, HCCA TXOP pregovor	Dva NAV-a, period neodašiljanja
Prostorna iskoristivost	Sektorizacija (kod 802.11ah)	Adaptivni pragovi snage odašiljanja te osjetljivosti, bojanje
Kontrola snage		
Kontrola snage odašiljanja	Mnogo različitih tehnika	Poboljšani TWT, poboljšani <i>microsleep</i>

Izvor: [7]

## 6. Budućnost razvoja 802.11ax mreže i Li-Fi

Iako je IEEE 802.11ax tek započeo svoj životni vijek, već postoji radna skupina koja radi na novom standardu, koji će zamijeniti 802.11ax. Iako je možda na prvi pogled nepotrebno već sad razmišljati o novom standardu, kada se situacija sagleda iz svake perspektive, postaje jasno da će i noviji, sposobniji standardi od 802.11ax ubrzo biti potrebni. Poznato je da kada se korisnicima daje što je moguće više kapaciteta, uvijek će postojati velik broj njih koji će iskoristiti sav taj kapacitet, a onda tražiti još – dakle, korisnici su uvijek nezasićeni, a pogotovo kada se uzme u obzir razvoj novih multimedijских tehnologija poput 4K i 8K videa, te virtualne i proširene stvarnosti. Ovdje u priču ulazi standard 802.11be, koji će biti nasljednik ax standarda.

### 6.1. Razvoj novog standarda – 802.11be

Uz sve prednosti koje nudi 802.11ax, postoji nešto zbog čega će i on relativno brzo biti zamijenjen. Jedan od razloga leži u tome što taj standard nije prvotno zamišljen da bi se povećala količina prenesenih podataka, već da bi se unaprijedila efikasnost WLAN mreže. Zbog toga je pokrenuta radna grupa pod nazivom Extremely High Throughput Study Group (EHT SG), koja će započeti rad na novom standardu.

Prema [12], u srpnju 2018. godine izvršni odbor IEEE 802.11 je odobrio zahtjev radne grupe 802.11 da se formira EHT radna grupa. Na EHT se može gledati kao Wi-Fi iduće generacije, odnosno nasljednik 802.11ax, a jedan od ciljeva je postizanje barem četverostruko većeg kapaciteta i propusnosti u odnosu na 802.11ax. Ono što će novi standard obuhvaćati uključuje kanale širine 320 MHz, *multiband* agregaciju, te do 16 istovremenih prostornih tokova podataka. Koristili bi se frekvencijski pojasevi između 1 i 7.125 GHz. Aplikacije koje bi prema planu trebale iskoristiti novi standard Wi-Fi-ja uključuju *video-over-WLAN*, proširenu stvarnost, te virtualnu stvarnost.

## 6.2. Li-Fi

*Light fidelity* (Li-Fi) tehnologija počela se razvijati u posljednjih nekoliko godina kao alternativa klasičnom Wi-Fi-ju, te za razliku od njega, koristi vidljivo svjetlo za komunikaciju između uređaja. Prema [13], ime Li-Fi skovao je 2011. godine Harald Haas, profesor na Sveučilištu u Edinburghu, a predviđao je žarulje koje bi se ponašale kao usmjerivači. U sljedećim godinama Li-Fi mrežama se predviđa ubrzan razvoj, ponajprije zbog toga što su u mogućnosti postići iznimno velike brzine prijenosa podataka – do 224Gbps.

Li-Fi funkcionira tako što svaka žarulja funkcionira kao antena, generirajući svjetlo koje svojim treptanjem emitira signal koji se odašilje prema uređajima. To je moguće zato što današnje žarulje sa svjetlećim diodama (Light Emitting Diode – LED) mogu treptati vrlo visokom frekvencijom, a tako je moguće ostvariti brzinu treptanja koju čovjek ne može zamijetiti. Podaci za slanje se tako šalju u LED žarulju, koja emitira signal, a koji prima foto-dioda na prijemu, te se u prijemu taj signal pretvara u podatke, [13].

Prednost Li-Fi tehnologije je u tome što je relativno jeftina za implementaciju, što je vrlo velika prednost kod implementacije IoT tehnologije. Vrlo velike brzine prijenosa su također velika prednost, jer u današnjem svijetu potreba za prijenosom podataka neprestano raste. S druge strane, ova tehnologija ima i svoje mane, pa tako zbog prirode vidljivog svjetla, odašiljač odnosno žarulja mora biti instalirana u svakoj prostoriji; ali to ne predstavlja osobiti problem jer u svakom slučaju u svakoj prostoriji postoji izvor svjetla, koji će se jednostavno zamijeniti sa Li-Fi LED žaruljom. Zato što su prednosti ove tehnologije vrlo brojne, predviđa se njen ubrzani rast i razvoj, a možda i potpuno istiskivanje Wi-Fi tehnologije u lokalnim mrežama na kratkim udaljenostima.

## 7. Zaključak

WLAN mreže izuzetno su važan dio modernog svijeta, pa se samim time može reći i da su neizostavan dio modernog života. Moderne mreže i terminalni uređaji ne bi mogli funkcionirati bez WLAN mreža, a IEEE 802.11ax standard ključan je faktor u poboljšavanju rada WLAN mreža. Sve prednosti koje donosi 802.11ax vrlo su važne za nastavak razvoja bežičnih lokalnih mreža, te su nova tehnološka rješenja koja je donio novi standard bitan dio budućeg razvoja ovih mreža.

Dolaskom novih tehnologija koje iskorištavaju Wi-Fi mreže do maksimuma, u koje se ubrajaju proširena i virtualna stvarnost, 4K i 8K video sadržaji, te IoT tehnologije, postalo je jasno da postojeće mreže bazirane na starijim 802.11 standardima neće moći izdržati povećanje zahtjeva za kapacitetom.

Osim toga, *offload* podatkovnog prometa sa mobilnih mreža na Wi-Fi ovdje također igra veliku ulogu, a kako je uvođenje 5G mobilne mreže već počelo, za očekivati je da će se vrlo skoro *offload* prometa na Wi-Fi mreže još jednom povećati. Uz to, važno je osigurati dovoljno dobru konekciju brojnim novim uređajima koji dolaze zbog Interneta stvari, poput pametnih kućanskih uređaja, pametnih žarulja, mnogobrojnih senzora itd. Novi standard zato dolazi u pravo vrijeme, kako bi se olakšalo uvođenje IoT uređaja i cjelokupne infrastrukture, ali i povećala kvaliteta usluge postojećih mreža koje će se unaprijediti prelaskom na 802.11ax.

Novi standard uspijeva postići sve navedeno zahvaljujući brojnim poboljšanjima u odnosu na starije standarde, kao što su OFDMA tehnologija, koja omogućuje da više uređaja prenosi podatke na različite destinacije u isto vrijeme, a zatim i MU-MIMO, koja omogućuje AP-u da efikasnije grupira klijente, što na kraju dovodi do povećanja kapaciteta i boljim radom mreže.

Nadalje, uvelo se i BSS bojanje, zahvaljujući kojem se smanjuju problemi i povećava kapacitet u zagušenim mrežama gdje postoje AP-ovi koji se preklapaju. Jači modulacijski postupak, 1024-QAM, povećava brzinu prijenosa podataka, a naizgled jednostavnim poboljšanjima kao što je efikasnije korištenje električne energije, što se postiglo uvođenjem TWT tehnologije, a što je od vrlo velike važnosti za IoT uređaje, uvelike se unaprijedilo funkcioniranje modernih IoT mreža te rad IoT uređaja.

Iz razloga što IEEE 802.11ax donosi brojna poboljšanja od kojih su neka iznimno važna, poput veće brzine prijenosa podataka, itekako se isplati prijelaz na 802.11ax mrežu te kupovina uređaja koji podržavaju novi standard. Kako ubrzano rastu apetiti svake lokalne mreže, a pogotovo kućnih multimedijalnih mreža, te se svakim danom povećava broj uređaja spojenih na mrežu, potpuno je razumljivo da se 802.11ax treba što prije uvesti, a u tome uvelike pomaže potpuna kompatibilnost standarda 802.11ax i uređaja koji ga podržavaju sa starijim uređajima, koji rade u skladu sa starijim 802.11 standardima.



# Popis literature

[1] Geier J. Wireless LANs, Second Edition. Indianapolis, Indiana: Sams Publishing; 2002.

[1] THE ALOHA SYSTEM - Another alternative for computer communications, dostupno na: <https://people.eecs.berkeley.edu/~pister/290Q/Papers/MAC%20protocols/ALOHA%20abramson%201970.pdf> [Pristupljeno: listopad 2018.]

[2] Horak R. Telecommunications and Data Communications Handbook. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2007.

[3] How to Boost Your Wi-Fi Speed by Choosing the Right Channel, dostupno na: <https://www.extremetech.com/computing/179344-how-to-boost-your-wifi-speed-by-choosing-the-right-channel> [Pristupljeno: studeni 2018.]

[4] IEEE 802.11n Standard, dostupno na: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11n.php> [Pristupljeno: listopad 2018.]

[5] IEEE 802.11ac Gigabit Wi-Fi, dostupno na: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ac-gigabit.php> [Pristupljeno: listopad 2018.]

[6] IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi, dostupno na: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.pdf> [Pristupljeno: studeni 2018.]

[7] Khorov E, Kiryanov A, Lyakhov A, Bianchi G. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. 2019;21(1): 197-216, dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8468986> [Pristupljeno: lipanj 2019.]

[8] IEEE 802.11ax, dostupno na: <https://devopedia.org/ieee-802-11ax> [Pristupljeno: srpanj 2019.]

[9] IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency WiFi, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/308171656\\_IEEE\\_80211ax\\_Challenges\\_and\\_Requirements\\_for\\_Future\\_High\\_Efficiency\\_WiFi](https://www.researchgate.net/publication/308171656_IEEE_80211ax_Challenges_and_Requirements_for_Future_High_Efficiency_WiFi) [Pristupljeno: srpanj 2019.]

[10] 6 Ways 802.11ax Gives You Better Wi-Fi Experience, dostupno na: <https://www.networkworld.com/article/3337236/6-ways-802-11ax-gives-you-better-wi-fi-experience.html> [Pristupljeno: srpanj 2019.]

[11] Diagram of MU-MIMO system, dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-MU-MIMO-system\\_fig1\\_275966402](https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-MU-MIMO-system_fig1_275966402) [Pristupljeno: kolovoz 2019.]

[12] IEEE 802.11 working on successor to 802.11ax, dostupno na: <http://stevencrowley.com/2018/07/16/ieee-802-11-working-toward-successor-to-802-11ax/> [Pristupljeno: kolovoz 2019.]

[13] What is Li-Fi? Everything you need to know, dostupno na: <https://www.techworld.com/data/how-startups-are-preparing-for-gdpr-3668896/> [Pristupljeno: studeni 2018.]

# Popis ilustracija

## Popis slika

<b>Slika 1.</b> Logička arhitektura WLAN mreže .....	3
<b>Slika 2.</b> Prikaz funkcioniranja CSMA protokola .....	4
<b>Slika 3.</b> Prikaz prijenosnog signala i interferencija u frekvencijskom spektru .....	5
<b>Slika 4.</b> Prikaz preskakanja frekvencija prema uzorku C A B E D .....	6
<b>Slika 5.</b> Prikaz kanala u Wi-Fi mreži.....	12
<b>Slika 6.</b> Trend offloada podatkovnog prometa sa mobilne mreže na Wi-Fi .....	17
<b>Slika 7.</b> Trend rasta broja uređaja spojenih na mreže različitih tehnologija .....	18
<b>Slika 8.</b> Prikaz OFDMA prijenosa u 802.11ax .....	20
<b>Slika 9.</b> Struktura 802.11ax okvira na fizičkom sloju.....	23
<b>Slika 10.</b> Simulacija mreže sa uključenim DSC odnosno RTS/CTS mehanizmima .....	25
<b>Slika 11.</b> Prikaz rada MU-MIMO tehnologije .....	27

## Popis tablica

<b>Tablica 1.</b> Razlike između 802.11ac i 802.11ax.....	18
<b>Tablica 2.</b> Tehničke karakteristike standarda 802.11ax.....	28



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom **Arhitektura i razvoj IEEE 802.11ax mreže**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 3.9.2019

Student/ica:

(potpis)