

WiMAX TEHNOLOGIJA

Režić, Zvonimir Sokol

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:540543>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Elektronike

ZVONIMIR SOKOL REŽIĆ

ZAVRŠNI RAD

WiMAX TEHNOLOGIJA

Split, srpanj 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Elektronike

Predmet: Osnove telekomunikacija

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: Zvonimir Sokol Režić

Naslov rada: WiMAX tehnologija

Mentor: Silvano Jenčić

Split, srpanj 2020.

SADRŽAJ

SAŽETAK	
SUMMARY	
1. UVOD	1
2. POVIJEST WiMAX TEHNOLOGIJE	2
2.1. WiMAX forum	3
3. WiMAX STANDARDI	5
3.1. IEEE 802.16a standard.....	5
3.2. IEEE 802.16d standard	5
3.3. IEEE 802.16e standard.....	6
3.4. IEEE 802.16m standard	6
4. NAČIN RADA WiMAX TEHNOLOGIJE	8
4.1. Fizički sloj WiMAX tehnologije	8
4.1.1. TDD, FDD, AAS, FCH i MAP poruke	9
4.1.2. Jedan nosioc (SC) na višim frekvencijama	11
4.1.3. Jedan nosioc (SCa) na nižim frekvencijama	14
4.1.4. OFDM fizički sloj	15
4.1.5. OFDMA fizički sloj	17
4.2. MAC sloj WiMAX tehnologije	20
4.3. Sigurnost WiMAX sustava	27
5. MREŽNA ARHITEKTURA WiMAX TEHNOLOGIJE	29
5.1. Način povezivanja unutar WiMAX mreže.....	34
5.2. PPP i PTMP protokoli.....	35
6. UPOTREBA WiMAX TEHNOLOGIJE U HRVATSKOJ	37
7. USPOREDBA WiFi I WiMAX TEHNOLOGIJE	38
8. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA	41
POPIS SLIKA	43
POPIS TABLICA	44

Sažetak

WiMAX tehnologija

WiMAX je širokopojasna bežična mreža koja se pojavila 2001. godine kao konkurent drugim tehnologijama. Nudila je bolje uvjete, brzinu i uslugu. Svojim radijusom od 50 km te brzinama od 24 Mbit/s, u svojim počecima, bila je ispred svog vremena te je bila ozbiljnija prijetnja ostalim tehnologijama. WiMAX forum bio je zadužen za promociju te reklamu navedene tehnologije, a cilj mu je bio da WiMAX postane većinski zastupljen u svijetu u odnosu na ostale konkurente. Standard na kojem se WiMAX bazirao (802.16) razvijao se godinama te je nudio stabilniju uslugu i veće brzine. No 2012. godine, WiMAX tehnologija doživjela je zastoje te se nije razvijala iz razloga što mrežni operatori nisu prepoznali njezin potencijal te nisu htjeli ulagati u nju.

Ključne riječi: WiMAX, bežična mreža, IEEE 802.16, bazne stanice, pretplatničke stanice

Summary

WiMAX technology

WiMAX is broadband wireless network which came through in 2001 year like a competitor for other technologies. It offered better conditions, speed and service. With its radius of 50 km and speed of 24 Mbps, at its start, it was ahead of its time and it was a serious threat to other technologies. WiMAX forum was in charge of promoting and advertising this technology. Its goal was that WiMAX becomes leading technology in world in comparison to other competitors. Standard on which WiMAX was based was 802.16 which was developed for years and offered better reliability and higher speeds. In 2012 WiMAX technology experienced a stalemate and did not develop because network providers did not recognize its potential and did not want to invest in it.

Key words: WiMAX, wireless network, IEEE 802.16, base stations, subscriber stations

1. UVOD

Zadatak ovog završnog rada je obrada WiMAX tehnologije koja omogućava bežični pristup internetu uz upotrebu radijskog frekvencijskog spektra od 3,5 GHz do 26 GHz. WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) tehnologija je često nazivana nasljednikom WiFi tehnologije, a stvarana je u svrhu pružanja veće brzine, povećanja opsega te omogućavanja stabilnije i pouzdanije veze. Svoj razvoj, započela je 1999. godine te je poznata pod nazivom IEEE 802.16. Omogućuje spajanje s fiksnim stanicama na udaljenostima do 50 km te mobilnim na udaljenostima do 15 km. Takav opseg potreban nam je u mjestima gdje je nemoguće dovesti fiksnu mrežu, što WiMAX čini idealnim za pokrivanje takvih mjesta. U ovom radu opisati ćemo povijest WiMAX mreže, njezin razvoj, topologiju baznih stanica, primjenu u Hrvatskoj, usporedbu s drugim bežičnim mrežama te njezine karakteristike. Na kraju ćemo vidjeti je li WiMAX standard u koraku s vremenom te u kojem se smjeru razvijao s godinama. Slika 1.1. predstavlja logo WiMAX tehnologije.



Slika 1.1. WiMAX logo [1]

2. POVIJEST WiMAX TEHNOLOGIJE

Razvoj tehnologije WiMAX započeo je 1999. godine, a standard IEEE 802.16 je po prvi put izašao na scenu 2001. godine, obećavajući brzinu i do 40 Mbit/s, što je za tadašnji standard bilo super brzo. Njegova prvotna ideja bila je da jedna fizička stanica bežičnom mrežom pokriva cijeli grad pa čak i državu. Također, bio je vrlo jeftin za realizaciju i održavanje, u odnosu na tadašnje mreže koje su bile na tržištu (3G, HSDPA, xDSL...). S pojavom WiMAX mreže pojavio se i WiMAX forum kojemu je svrha bila reklamirati navedenu mrežu te je upoznati s cijelim svijetom. WiMAX tehnologija je izmijenjena 2005. godine kada je sa svijetom upoznat standard 802.16e, kojeg su nazvali „WiBro“. 802.16e standard počeo se koristiti u Južnoj Koreji te je nudio brzinu od 25 Mbit/s, a koristio se i za HD prijenose, video konferencije i dr.

WiMAX je, u svijetu mreža, bio ozbiljan konkurent te je doživio najveću raširenost u Velikoj Britaniji i SAD-u. 2011. godine, WiMAX je dobio još jednu nadogradnju (802.16m) te je nudio brzinu i do 1 Gbit/s u fiksnim postajama. Namjena mu je bila da zamijeni tehnologije koje su tada koristili mobilni telefoni, a to su GSM i CDMA.

WiMAX nikada nije dosegao svoj puni kapacitet iako je bio raširen diljem svijeta te su ga mnoge tvrtke (Clearwire, Sprint, Freedom4 itd.) koristile. Svoj najveći poraz, WiMAX je doživio u utrci za četvrtu generaciju bežičnog prijenosa podataka (4G). U svom razvoju, između 2005. i 2010. godine, doživio je najveći porast u raširenosti mreže u svijetu. No početkom razvoja nove generacije mreže, tvrtke koje su tada koristile WiMAX, započele su ulagati u LTE mrežu. Razlog je bio vrlo jednostavan. Kod LTE mreže, s manjim ulaganjem moguće je dobiti veće prihode, u odnosu na ono što je nudio WiMAX. LTE mreža je bila nadogradnja na već postojeću mrežu, dok je WiMAX nudio potpuno novu tehnologiju.

Zadnja verzija WiMAX tehnologije je WiMAX 2+, brzi, unatrag-kompatibilni prijenos sa starijih WiMAX generacija, kompatibilan i s LTE mrežom.

2.1. WiMAX forum

WiMAX forum je vodeća neprofitna organizacija koja ima za zadatak promociju interoperabilnosti i kompatibilnosti širokopojasnih bežičnih mreža, koje se zasnivaju na IEEE 802.16 standardu. Glavni cilj foruma je ubrzati adaptaciju, izradu i širenje WiMAX mrežnog modela preko cijelog svijeta. S radom je započela u lipnju, 2001. godine, a osim WiMAX-a promovira WiGRID i AeroMACS mreže. Slika 2.1. predstavlja logo WiMAX foruma.



Slika 2.1. Logo WiMAX forum [1]

Vizija navedenog foruma je da ohrabri upotrebu AeroNACS, WiGRID i WiMAX tehnologije svugdje u svijetu, dok je misija izdavati certifikate koji postižu globalnu interoperabilnost, razvijati tehničke specifikacije temeljene na otvorenim standardima i promovirati viziju.

WiMAX forum si je od početka zadao strateške smjernice koje glase:

- Osigurati da WiMAX proces certifikacije bude cijenjen i poštivan od strane mrežnih operatora, telekomunikacijskih tvrtki te ostalih korisnika.
- Pravovremeno osigurati dostupnost testnih specifikacija i zahtjeva za certifikaciju.
- Provjeriti je li testna infrastruktura zadovoljila sve uvjete, koje mora ispuniti kako bi dobila WiMAX koncesiju.

- Objaviti visoko kvalitetne tehničke specifikacije za postizanje komercijalno održivog globalnog ekosustava za WiMAX.
- Omogućiti komunikaciju i rad WiMAX-a s ostalim bežičnim mrežama.
- Osigurati kompatibilnost WiMAX-a s ostalim bežičnim tehnologijama kako bi se dobio pristup drugim frekvencijskim spektrima.
- Promovirati ime i kvalitetu usluge kako bi WiMAX postao vodeći ponuđač širokopolasne bežične usluge u svijetu.

3. WiMAX STANDARDI

IEEE 802.16 je skupina *broadband* bežičnih standarda napisanih od strane instituta električnog i elektroničkog inženjstva (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). IEEE 1999. godine započinje s radom na razvoju standarda za širokopojasne bežične mreže. Familija 802.16 se još naziva i WiMAX po WiMAX forumu koji je zadužen za promoviranje i certificiranje proizvoda, koji se temelje na 802.16 standardu.

Prvi razvijeni model IEEE 802.16 došao je na tržište 2001. godine te je postrojenjima, zgradama i firmama omogućavao komunikaciju s baznom stanicom preko vanjske antene. Najveći problem bio je što su antena i bazna stanica trebale biti u optičkoj vidljivosti, odnosno bez ikakve prepreke između njih. Ovaj model, koristio je MAC sloj koji je mogao pružati različitu kvalitetu usluge. Komunikacija baznih stanica i korisnika moguća je pomoću topologije PtP ili PtM (poveznica na 5.2. poglavlje) te radi na frekvencijskom opsegu 10 – 66 GHz.

3.1. IEEE 802.16a standard

IEEE 802.16a stiže 2003. godine i omogućava komunikaciju bazne stanice i korisnika bez optičke vidljivosti. Radni opseg mu je bio između 2 – 11 GHz, pokrivenost radijusa 50 km, a brzina i do 75 Mbit/s. Jedna od novosti ovog standarda su mrežne operacije koje omogućavaju 15 korisnika na jednog korisnika komunikacije. 802.16a koristi MAC sloj, kao i 802.16 (2001), ali s različitim fizičkim slojem.

3.2. IEEE 802.16d standard

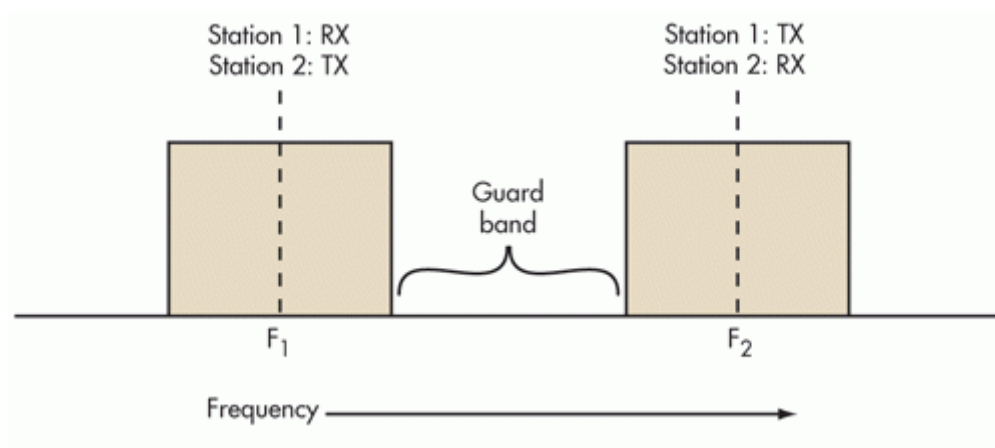
IEEE 802.16d stiže 2004. godine. Riječ je zapravo o spoju prijašnja dva standarda koji je, poput njih, obuhvaćao oba frekvencijska područja te je podržavao komunikaciju s optičkom vidljivosti i bez optičke vidljivosti. Napravljen je kao zamjena za DSL i nudio je iste karakteristike kao on, ali s bežičnim pristupom. Pružao je usluge telefonije te pristup internetu ondje gdje to nije bilo moguće. Na taj način se nadmetao s drugim poslužiteljima kojima nije bilo isplativo dovesti žičanu vezu u takva nepristupačna područja.

3.3. IEEE 802.16e standard

IEEE 802.16e je započeo s radom 2006. godine te je dobio naziv mobilni WiMAX. Radi na frekvencijama manjim od 6 GHz, a jedna od velikih novosti je prelazak mobilnih stanica s jedne bazne stanice na drugu, što nam omogućava bolju uslugu i pouzdanost. Također, donosi novosti i na MAC sloju, u vidu podrške za mobilnost, te koristi MIMO antenske sustave koji povećavaju brzinu i pokrivenost. Kada se mobilna stanica nađe u prostoru gdje je dostupno više baznih stanica tada ona ide u stanje mirovanja i šalje informaciju da se ne želi spojiti na određenu baznu stanicu. Stanje spavanja nastupa kada mobilna stanica šalje informaciju baznoj stanici da je nedostupna. U ovom standardu mobilna stanica ima 2 načina rada, stanje spavanja i mirovanja. Mobilni WiMAX je, u ovom slučaju, imao niska ulaganja u infrastrukturu, ali se pokazao nepouzdan jer je često dolazilo do prekida prijenosa podataka.

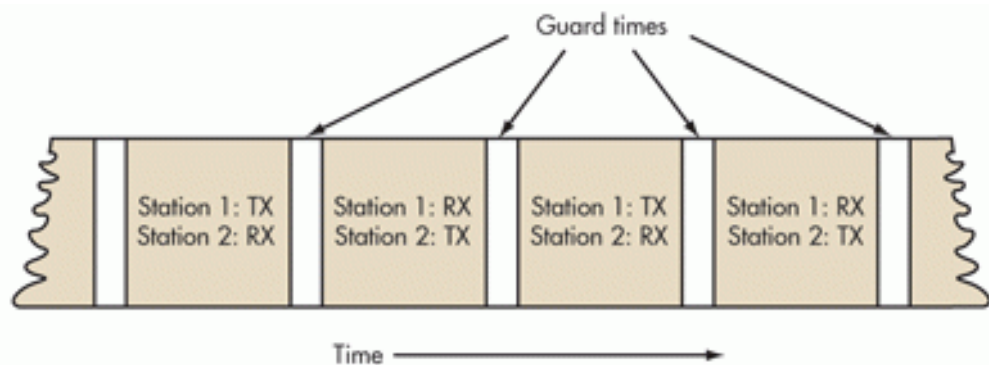
3.4. IEEE 802.16m standard

WiMAX-ov zadnji pravi pokušaj da postane konkurent za vodećeg davatelja mrežne usluge bio je 2013. godine kada je bio konkurent za 4G mrežu. Nudio je podršku svim licenciranim pojasevima ispod 6 GHz te je uključivao TDD, FDD i poludupleksni 18 FDD. Slika 3.1. nam prikazuje korištenje dvaju različitih frekvencijskih spektara za prijenos i prijem podataka.



Slika 3.1. FDD graf prijenosa podataka [3]

FDD (*Frequency Division Duplex*) radi na principu korištenja dvaju različitih frekvencijskih spektara za prijenos i prijem podataka. Potrebna je velika frekvencijska razlika između prijemnog i prijenosnog spektra kako ne bi došlo do smetnji (*Guard band*). Imamo i primjer primjene kod telefonije, gdje GSM sistem koristi 869 - 894 MHz za prijem podataka, a spektar 824 – 849 MHz za slanje podataka. Slika 3.2. nam prikazuje odvajanje prijema/prijema informacija u vremenska razdoblja.



Slika 3.2. TDD graf prijena podataka [3]

TDD koristi vremensko razdoblje za prijenos informacije. Slanje podataka imamo određeno vrijeme na nekom određenom frekvencijskom spektru, a kada slanje završi nastupa prijem podataka, koji isto traje određeno vrijeme (često budu ista vremenska razdoblja). Prednost u odnosu na FDD je ta što koristi jedan frekvencijski spektar ili kanal za prijenos informacije te, nakon završetka slanja istih, odmah prelazi na primanje i obrnuto (vremenska razdoblja ne moraju biti simetrična). Mana mu je pak ta što se mora paziti na sinkronizaciju slanja i primanja informacije kako ne bi došlo do preklapanja vremenskih razdoblja.

IEEE 802.16m ima veću brzinu i pokrivenost te veći kapacitet prijena podataka u odnosu na starije generacije WiMAX-a, što ga čini puno učinkovitijim za VoIP usluge.

Karakteristike standarda IEEE 802.16m su:

- Brzine do 100 Mbit/s za mobilne stanice, 1 Gbit/s za fiksne.
- MIMO koristi od 4 do 8 antena.
- Pokrivenost do 100 km.
- Podržava TDD i FDD.

4. NAČIN RADA WiMAX TEHNOLOGIJE

WiMAX tehnologija svoj rad temelji na MAC (*Medium Access Control*) i PHY (*Physical*) sloju. Kod MAC sloja definirano je nekoliko podslojeva od kojih prvi podsloj *service-specific* predstavlja adaptaciju IEEE 802.16 standarda prema postojećim paketskim protokolima, kao što su ATM, Ethernet, IP. MAC sloj također sadrži sigurnosni podsloj koji je obrađen u posebnom poglavlju 4.3. Podslojevi unutar fizičkog sloja se razlikuju u ovisnosti o metodama prijenosa podataka i frekvencijskom opsegu rada. Oni su definirani u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Podslojevi fizičkog sloja [13]

Oznaka	Frekvencijski spektar	Podržane značajke	<i>Duplexing</i> alternativa
WirelessMAN - SC	10-66 GHz	/	TDD, FDD
WirelessMAN - SCa	Ispod 11 GHz	AAS, ARQ, STC, mobile	TDD, FDD
WirelessMAN - OFDM	Ispod 11 GHz	AAS, ARQ, Mesh, STC, mobile	TDD, FDD
WirelessMAN - OFDMA	Ispod 11 GHz	AAS, ARQ, HARQ, STC, mobile	TDD, FDD

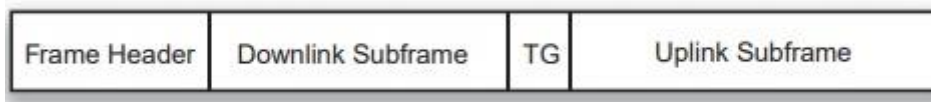
4.1. Fizički sloj WiMAX tehnologije

Kao što je naznačeno u tablici 4.1. fizički sloj koristi cijeli niz tehnologija prijenosa podataka kao što su OFDM, OFDMA, SC, SCa, TDD, FDD i AAS koje omogućavaju komunikaciju u vremenskoj, frekvencijskoj i prostornoj domeni istovremeno. WiMAX također podržava razne sheme modulacije i kodiranja koje se mogu izmjenjivati u odnosu na stanje kanala. Koristeći povratnu informaciju, mobilna stanica može dati informaciju baznoj stanici o kvaliteti silaznog kanala (*downlink*). Za stanje uzlaznog kanala (*uplink*), bazna stanica može dati informaciju u ovisnosti o kvaliteti primljenog signala. Fizički sloj je vrlo kompleksan jer praktički kombinira sve prethodno spomenute tehnologije prijenosa unutar istog prijenosnog ciklusa u skladu sa MAC slojem.

4.1.1. TDD, FDD, AAS, FCH i MAP poruke

U ovom podpoglavlju ćemo obraditi značajke koje se koriste u fizičkom sloju radi doprinosa kvalitete, brzine i sigurnosti prijenosa podataka.

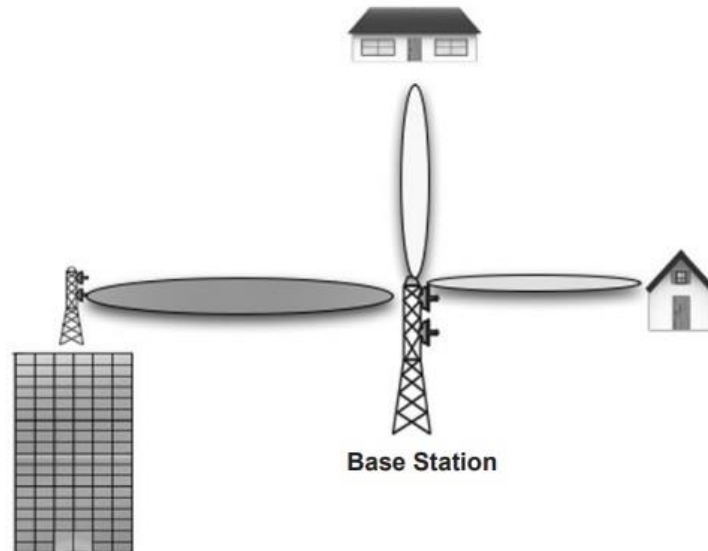
WiMAX podržava TDD (*Time division duplex*) i FDD (*Frequency division duplex*) metode prijenosa podataka. TDD je metoda u kojoj sistem odašilje i prima podatke preko istog frekvencijskog kanala, ali dodjeljuje različita vremenska razdoblja za emitiranje i primanje podataka. FDD zahtijeva različit frekvencijski spektar za emitiranje i primanje podataka. *Guard band* – zaštitni sloj koji se nalazi između dvaju frekvencijskih spektara (za emitiranje i odašiljanje) iznosi od 50 Hz do 100 MHz. TDD ima prednost dodjeljivanja spektra pomoću regulatora. Za TDD metodu *guard band* nije potreban, jer se primanje i emitiranje odvija preko istog kanala. Također transportni nizovi su asimetrični. Slika 4.1. nam prikazuje prijenos podataka preko istog frekvencijskog kanala.



Slika 4.1. Niz kod TDD metode prijenosa podataka [14]

FDD metoda ima različit frekvencijski kanal za uzlaznu i silaznu vezu, ali su im strukture slične. Ako je *half-duplex* (H-FDD) prisutan kod pretplatničke stanice, bazna stanica mora osigurati da pretplatnička stanica ne odašilje i prima podatke u isto vrijeme.

AAS (*Adaptive antenna system*) se koristi u WiMAX specifikacijama da bi se opisale tehnike formiranja snopa u kojima se koristi niz antena od strane bazne stanice, u svrhu da bi se pojačao signal prema pretplatničkim stanicama i tako smanjio utjecaj na i od ostalih pretplatničkih stanica. AAS može omogućiti *Spatial Division Multiple Access* (SDMA), tako da nekoliko pretplatničkih stanica koje su međusobno udaljene mogu primiti i emitirati preko istih podkanala u isto vrijeme. Korištenjem formiranja snopa, bazna stanica može usmjeriti signal prema drugoj pretplatničkoj stanici i razaznati ga bez miješanja sa signalima od ostalih stanica koje djeluju na istom podkanalu. Slika 4.2. prikazuje formiranje snopa prema željenoj pretplatničkoj stanici.



Slika 4.2. Formiranje snopa radi bolje iskoristivosti signala [14]

AAS operacija nam pomaže u boljoj iskoristivosti spektra, optimizirajući prijenos putem više antena ili inteligentnih antena. Ako je doseg veći, SNR (*signal to noise ratio*) omjer je veći, smetnje su manje te je moguće ponoviti optimizaciju frekvencijskog spektra. Postupci za zahtijevanje širine spektra i dosega pomalo se razlikuju, zbog činjenice da bazna stanica usmjerava svoj snop na drugi dio te se dio poruke o propusnosti može izgubiti. Kod AAS uzlazne veze moguće su situacije da nekoliko korisnika šalje nizove podataka baznoj stanici bez njenog odgovora i to je glavni razlog zašto imamo specifičnu signalizaciju za ovu vrstu operacije. Kod TDD metode imamo slanje više nizova podataka prema primateljima od kojih neki podržavaju AAS, a neki ne. U tom slučaju bi svakom nizu bilo potrebno vrlo kompleksno zaglavlje. Format poruke mora sadržavati niz bez ASS informacije, a iza njega sljede niz s omogućenim AAS-om.

Odjeljak između dva dijela u jednom okviru je opisan u zaglavlju okvira i on se naziva FCH (*Frame control header*).

Prvi niz u silaznoj vezi sadržava FCH. On je sastavljen od silazne MAP poruke, DCD (*Downlink channel description*) koji opisuje fizički sloj silaznog kanala, jednog ili više UCD-a (*Uplink channel description*) koji opisuju karakteristike uzlaznog kanala. Svaka stanica mora razumjeti i kreirati svoj FCH.

MAP poruke, pripadaju MAC sloju ali se poistovjećuju sa fizičkim slojem. Kontroliraju fizički sloj pomoću niza MAP poruka, kao što su:

- Kontrola napajanja, stanica može promijeniti snagu prijenosnog signala.
- Istodobni prijenos, nizovi se prenose u isto vrijeme tj. paralelno jedan sa drugim.
- AAS informacija, upozorenje stanici da prima nizove koji podržavaju AAS.
- UL-MAP poruka koji informira da se podaci šalju u uzlaznom kanalu ili u nizu podkanala za određenu vezu.
- Proširena MAP poruka koja označava kraj niza i početak novog, sljedeći niz može imati različite karakteristike nego prethodni.

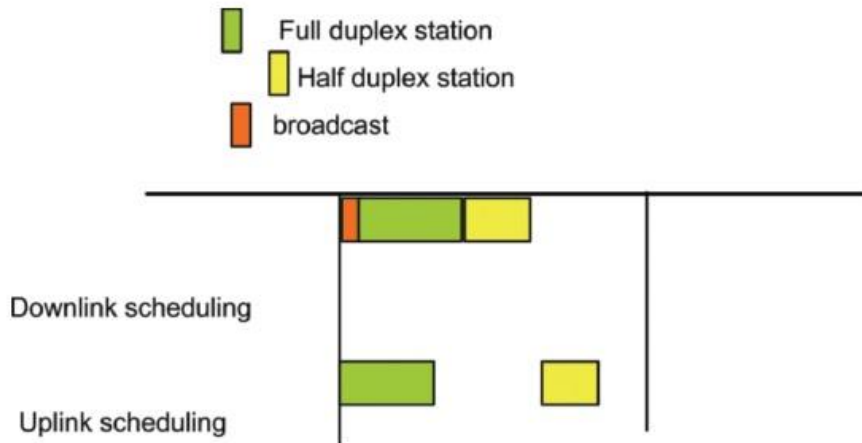
4.1.2. Jedan nosioc (SC) na višim frekvencijama (11 - 66 GHz)

Single carrier (SC) predstavlja prvi fizički sloj i koristi se za frekvencije veće od 11 GHz sa jednim nosiocem. Temelji se na *point to multipoint* arhitekturi, u kojoj bazna stanica odašilje TDD signal, sa serijsko dodijeljenim vremenskim razdobljem svakoj pretplatničkoj stanici. Jedna od velikih prednosti 802.16 standarda je ta da se svaki okvir kodira i modulira u ovisnosti o kvaliteti kanala. Okvir se koristi za primanje i slanje podataka na jednoj strani. Na primjer, okvir se putem TDD metode razdvoji na silazni i uzlazni podokvir, a kod FDD metode oni su multipleksirani na različite frekvencije i mogu se emitirati u isto vrijeme. Dužina okvira može biti od 0.5, 1, 2 milisekunde (ms). Također možemo slati *half-duplex* ili *full-duplex* podokvire.

Kod TDD metode imamo dva obavezna prazna perioda koji služe da bi se radio - frekvencijski uređaji prebacili iz moda primanja u slanje ili obrnuto. Najmanja jedinica koja se može prepoznati je drugačija u uzlaznom i silaznom podokviru. Navedena jedinica naziva se PS (*physical slot*) u silaznom podokviru i MS (*mini slot*) u uzlaznom podokviru. MS je jednaka 2^m PS, dok m varira od 0 do 7.

Silazni podokvir je dio okvira koji putuje od bazne stanice do pretplatničke stanice. Sastoji se od preambule koja je kodirana u QPSK formatu i strukture podataka koja sadrži pokazivače za nizove podataka koji slijede u podokviru. Silazna jedinica sluša svoje zaglavlje i pronalazi sljedeći niz podataka gdje se nalazi novo zaglavlje koje sadrži određenu MAC adresu. Ako se podudara adresa silazne jedinice, uzima se i dekodira, ako ne, zanemaruje se.

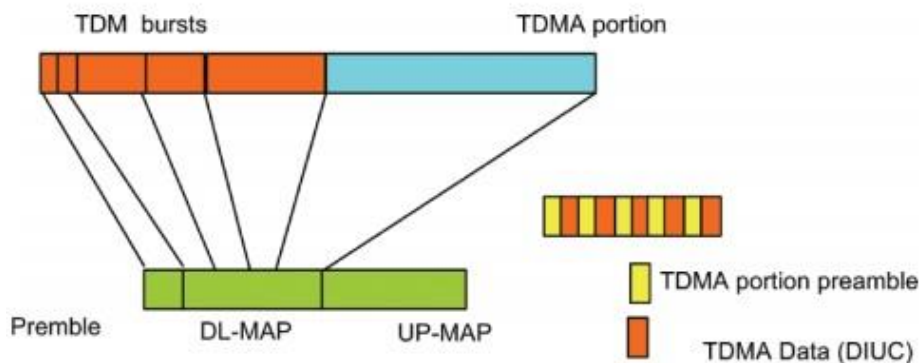
FDD *downlink* je jako sličan TDD metodi, ali sadrži dio za *half-duplex* stanice u kojima je raspored za podokvir (n) određen u podokviru (n-1), koji je prethodio njemu. Na slici 4.3. vidimo uzlazni i silazni kanal kod FDD prijenosa podataka.



Slika 4.3. FDD prijenos podataka [13]

Silazna MAP poruka jedinstvena je za svaki niz podataka. Sadrži neke od informacija kao što su tip modulacije, CID (*channel identification*), FEC (*forward error correction*) i što je najvažnije početak niza podataka u podokviru. Također veličina niza podataka izražena u PS-u je kalkilirana u poruci. Iznos u PS-u varira zbog različitih oblika modulacije i kvalitete signala.

Kod TDD prijenosa podataka nizovi se razdvoje u određen broj fizičkih pozicija kao što vidimo na slici 4.4.



Slika 4.4. TDD prijenos podataka [13]

Broj pozicija varira ovisno o shemi modulacije i kvaliteti signala.

FEC (*forward error correction*), baziran je većinom na Reed Solomon kodovima. Sadrži četiri verzije od koje su prve tri temeljene na Reed Solomon kodiranju dok je četvrta Turbo kod tip. Prva verzija je Reed Solomon sa promjenjivom zaštitom. Preporučena je za brza kodiranja podataka. Druga je također Reed Solomon, ali s konvolucijskim kodovima. Koristi se kod manjih brzina prijenosa podataka, te nudi višu razinu zaštite podataka. Treća također Reed Solomon, dodaje provjeru pariteta. Koristi se na srednjim i brzim prijenosima podataka. Paritet se koristi za detektiranje greške i njezinu ispravku. Zadnja verzija je turbo kod, koristi se kada je CIRC (omjer nosioca i smetnji) omjer loš.

Modulacija silaznog kanala u fizičkom sloju je promjenjiva i adaptivna. Modulacijske tehnike koje su podržane su QPSK, 16-QAM i 64-QAM. Niz je jedinica koja određuje pojedinačnu modulacijsku tehniku. Nakon izmjerene kvalitete signala, odašiljač može promijeniti modulacijsku tehniku ili snagu odašiljanja.

Tablica 4.2. prikazuje razne vrste modulacije i kodiranja podržane od strane WiMAX-a.

Tablica 4.2. Sheme kodiranja i modulacije u fizičkom sloju [13]

	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Modulacija	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM; BPSK neobavezan za OFDMA-PHY	BPSK, QPSK, 16 QAM; 64 QAM neobavezan
Kodiranje	Obavezan: konvolucijski kodovi po stopi 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Neobavezan: konvolucijski turbo kodovi po stopi 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; kodovi ponavljanja po stopi 1/2, 1/3, 1/6, LDPC, RS-kodovi za OFDM-PHY	Obavezan: konvolucijski kodovi po stopi 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Neobavezan: konvolucijski turbo kodovi po stopi 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; kodovi ponavljanja po stopi 1/2, 1/3, 1/6, LDPC

Kod uzlaznog kanala dozvoljene su tri vrste niza podataka. Prvi ima zadatak uspostaviti vezu tj. izmjeriti i prilagoditi parametre odašiljača i primatelja. Drugi ima zadatak potvrditi uspostavljenu vezu dok je treći klasičan prijenos podataka.

Nizovi imaju strukturu kao u silaznom slučaju, te imaju zaštitno vrijeme (SSTG) koje pomaže primatelju signala da razazna nizove koji dolaze od različitih pretplatničkih stanica. Niz se sastoji od preambule, kontrolne strukture zvane uzlazna MAP poruka koja sadrži CID i kodirane poruke (sadrži opseg, kraj MAP-a, autorizaciju...).

4.1.3. Jedan nosioc (SCa) kod nižih frekvencija (2 – 11 GHz)

Single carrier in lower bands (SCa) je sličan kao SC, SCa te također podržava FDD i TDD operacije. Također ima još nekoliko FEC metoda za osiguranje većih prijenosa ali i ne-FEC mehanizam koji se kombinira sa ARQ (*automatic repeat request option*), mogućim automatskim ponavljanjem zahtjeva. *Space time coding* i AAS su također dostupni.

Space time coding mehanizam s dvije antene, koristi se za slanje dva bloka istog podatkovnog niza preko dvije odašiljačke antene. Na kraju, blokovi se primaju na dvije različite prijemne antene.

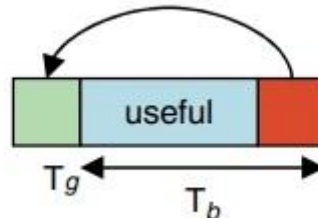
Prijenos podataka prilikom korištenja više podkanala vrši se metodom razdvajanja podataka prilikom slanja, te ponovnog sastavljanja nakon primitka:

- Dodaje se osnovni okvir uvoda teretu.
- Podaci se razdvajaju u male blokove. Svaki blok serijski se šalje preko podkanala.
- Bloku dodajemo jedinstvenu riječ na njegov kraj.
- Stvaraju se segmenti ponavljanja za FEC.
- Uzima se svaki segment i formira se niz segmenata dodavanjem dvaju parametara na početak niza.
- Segmenti se povezuju te formiraju niz koji se prenosi preko podkanala.

256-QAM shema i BPSK također se dodaju fizičkom sloju. Podaci se moduliraju i kodiraju u svakom praskovitom modu. Niz se sastoji od preambule i *ramp-down* perioda, koji omogućuje stanicama vrijeme da se prebace na ostale prijavnike. Pilotske riječi se kontinuirano šalju na drugi kraj u svrhu sinkronizacije. Razmak odašiljača i prijemnika definiramo ovisno o vremenskom periodu putanje riječi, od jednog do drugog sistema.

4.1.4. OFDM fizički sloj (2 – 11 GHz)

OFDM fizički sloj je opcija koja se provodi na frekvencijama nižim od 11 GHz, kod prijenosa informacija bez optičke vidljivosti. OFDM se temelji na ortogonalnim simbolima i koristi inverznu Fourierovu transformaciju. Struktura simbola prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.5. Vremenska struktura simbola [13]

- T_g - korisno vrijeme simbola za slanje danih podataka.
- T_h - period korišten za izvođenje višestrukih mjerenja kod višestrukog prostiranja radi održavanja ortogonalnosti između simbola.

Period za izvođenje mjerenja CP (*collect period*) se koristi od strane odašiljača i uvijek je iste vrijednosti. Uloga prijemnika na početku je da pogodi CP period na osnovu danih vrijednosti i nakon što je nađen, prijemnik se sinkronizira u vremenskoj domeni.

U frekvencijskoj domeni OFDM simbol temelji se na podnosiocima. Broj podnosioca je definiran veličinom Fourierove matrice. Imamo 3 vrste podnosioca:

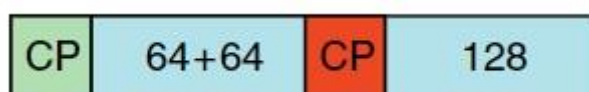
- Podatkovni podnosioci.
- Pilotski podnosioci, korišteni u svrhu mjerenja.
- Nulti podnosioci, za čuvanje pojasa i sinkronizaciju.

Parametri OFDM sloja su:

- Širina kanala.
- Broj podkanala je jednak 200, a FFT (*Full Fourier transform*) veličina je 256.
- Faktor uzorkovanja, koji nam daje udaljenost između podkanala i stoga trajanje simbola, općenito iznosi 8/7.
- Omjer CP-a i korisnog vremena.

Kodiranje kanala se izvodi kao i u SC i SCa fizičkim specifikacijama. FEC koristi *Reed Solomon* metodu i dvije turbo metode kao opcije. Prepletanje se događa pomoću dvije promjene (permutacije). Jedna promjena dijeli susjedne bitove na različite podnosiocice dok druga susjedne bitove mijenja u manje važnije bitove, radi smanjivanja mogućih grešaka.

OFDM podržava QPSK, 16-QAM, 64-QAM modulaciju. Silazni kanal je adaptivan i radi na principu objašnjenom u prethodnom dijelu rada. Uzlazni kanal je manje otvoren da bi se podržale stanice jednostavnije izvedbe. Preambula se šalje u silaznim podkanalima, a preambula u uzlaznom podokviru je dugačka 64 uzorka i šalje se preko parnih podnosioca. Okvir baze OFDM prijenosa se šalje u TDD i FDD metodi. Okviri su podjeljeni u uzlazne i silazne podokvire. Uzlazni podokvir se koristi za zahtjev za opsegom, širinom pojasa i za PDU prijenos iz različitih stanica. PDU ima svoju preambulu iza koje slijedi FCH i silazne MAP poruke. Prijenos nizova se događa u cjelobrojnoj vrijednosti OFDM simbola, što znači da je potrebno ispuniti cijelu vrijednost prije prijenosa u dekodir. AAS je podržan od strane OFDM metode. Na slici 4.6. vidimo strukturu preambule OFDM-a, koja se temelji na prijenosu 128 uzoraka.



Slika 4.6. Struktura preambule OFDM-a [13]

Kod OFDM-a imamo dvije vrste određivanja opsega, prvi se pojavljuje prilikom prve konekcije sa baznom stanicom dok su drugi periodični. Prvo mjerenje zahtjeva nekoliko perioda i razmjena da bi bazna stanica prihvatila parametre. Traženje opsega može se događati na OFDM podkanalima ili na AAS podržanim sistemima. OFDM se može kombinirati s *space time coding* metodom sa dvije antene.

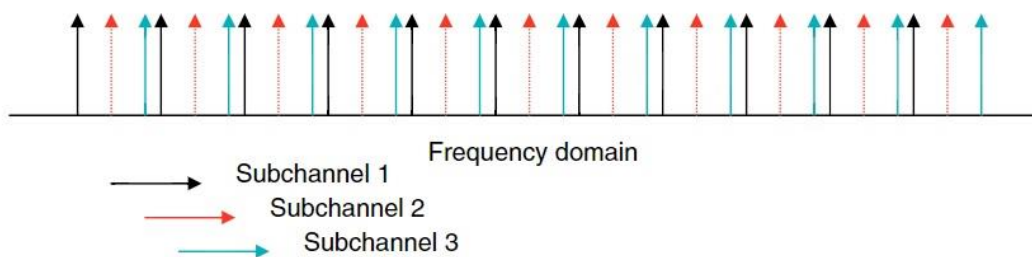
4.1.5. OFDMA fizički sloj (2 – 11 GHz)

OFDMA fizički sloj se temelji na radu OFDM na nižim frekvencijama ispod 11 GHz, bez optičke vidljivosti. OFDMA se od OFDM razlikuje po tome što su podnosioci smješteni u grupe, pri čemu svaka grupa podnosioca zvana podkanal može biti dodjeljena u silaznom kanalu prijemnika ili u uzlaznom kanalu odašiljača.

Parametri u OFDMA su:

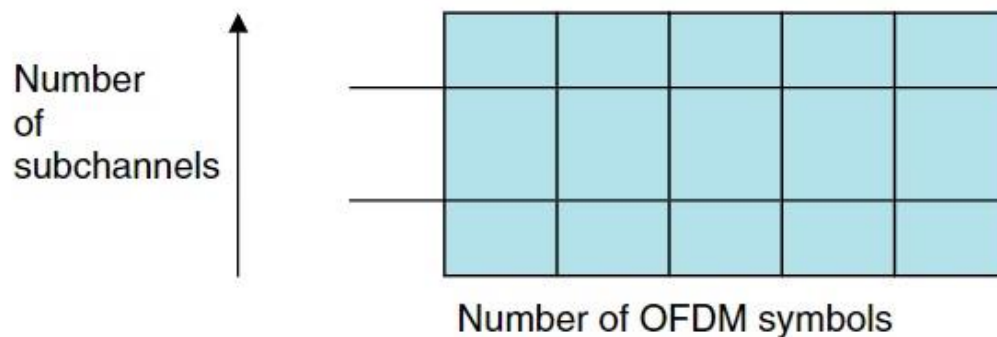
- Širina pojasa.
- Broj podnosioca, FFT je 2048 umjesto 256.
- Faktor uzorkovanja.
- Omjer CP i korisnog vremena (G omjer).

Struktura simbola u OFDMA je sastavljena od podatkovnih pilotskih i nultih podnosioca. Broj podnosioca ovisi o MAP-u. Slika 4.7. prikazuje podnosiocce grupirane u tri podkanala.



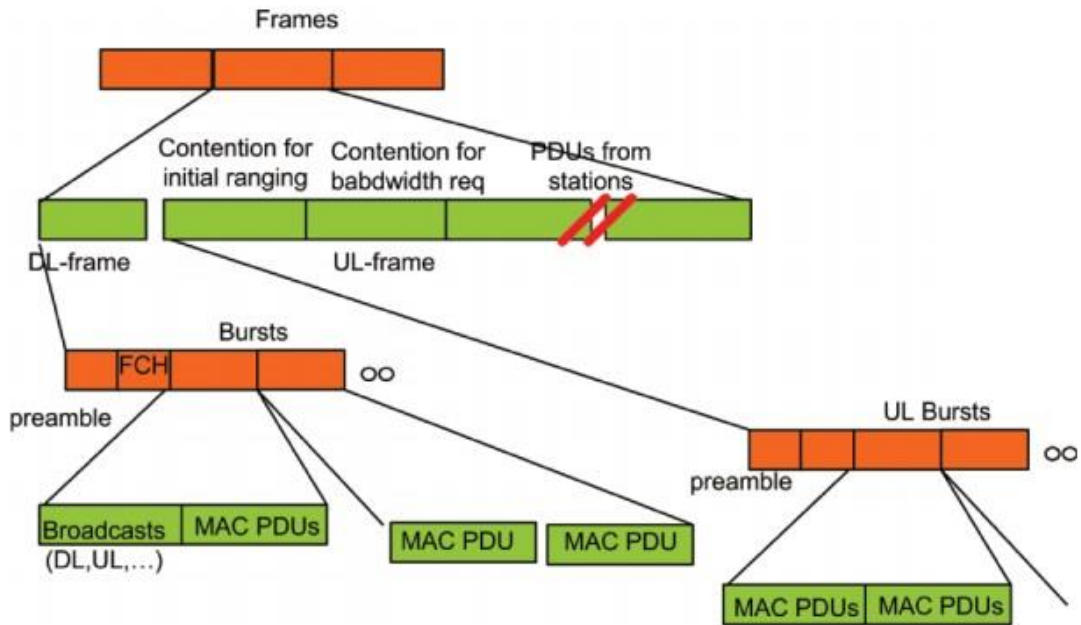
Slika 4.7. OFDMA sa tri podkanala [13]

Slika 4.8. nam prikazuje dodijeljenu „regiju“ za paket u OFDMA prijenosu.



Slika 4.8. Regija dodijeljena paketu [13]

Termin segment je grupa podkanala korištenih po MAC konekciji. Slika 4.8. pokazuje nam matricu kako je MAC okvir smješten u OFDMA odsječke. Prvo se „ureže“ u odsječke a nakon toga se mapira na podkanale koji pripadaju toj vezi. Podkanali se dijele na 6 grupa koje nam prikazuje slika 4.9.



Slika 4.9. Struktura podataka za uzlazne i silazne okvire [13]

Odsječci u OFDMA su definirani u vremenu i podkanalu:

- U silaznom okviru u punoj iskoristivosti, imamo jedan odsječak na jednom podkanalu koristeći jedan OFDMA simbol.
- U poluiskorištenim podnosiocima, jedan odsječak koristi dva OFDMA simbola i jedan podkanal.
- U uzlaznom okviru imamo poluiskoristivost podnosioca, jedan odsječak koristi jedan podkanal i tri simbola.

FDD i TDD su podržani od strane OFDMA ali ne istodobno. Struktura okvira je uobičajena, počinje sa preambulom iza koje slijedi uzlazni i silazni period.

Okviri u OFDMA su dužine od 2 do 20 milisekundi (ms) u TDD i FDD. MAP poruke korištene u fizičkom sloju definiraju veličinu nizova (broj podkanala, simbola...) i AAS parametre (broj antena). STC u ovom slučaju podržava 4 antene umjesto dvije u

prethodnim fizičkim verzijama. OFDMA koristi konvolucijsko kodiranje i turbo kodiranje po potrebi.

Zbog svog fizičkog sloja WiMAX tehnologija je vrlo fleksibilna, brzina prijenosa varira u odnosu na operacijske parametre. Parametri koji imaju utjecaj na fizički sloj su širina kanala, vrsta korištene sheme modulacije i kodiranja, broj podkanala i stopa uzorkovanja. U tablici 4.3. možemo vidjeti brzinu prijenosa u odnosu na širinu kanala i korištene vrste modulacije i kodiranja.

Tablica 4.3. Brzina prijenosa u ovisnosti o shemi modulacije i kodiranja [14]

Širina kanala	3.5 MHz		1.25 MHz		5 MHz		10 MHz	
PHY mod	256 OFDM		128 OFDM		512 OFDM		1024 OFDM	
Uzorkovanje	8/7		28/25		28/25		28/25	
Brzina modulacije i kodiranja	Brzina u fizičkom sloju (kbit/s)							
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	Nije primjenjivo					
QPSK, 1/2	1,882	653	504	154	2,520	653	5,040	1,344
QPSK, 3/4	2,822	979	756	230	3,780	979	7,560	2,016
16 QAM, 1/2	3,763	1,306	1,008	307	5,040	1,306	10,080	2,688
16 QAM, 3/4	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032
64 QAM, 1/2	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032
64 QAM, 2/3	7,526	2,611	2,016	614	10,080	2,611	20,160	5,376
64 QAM 3/4	8,467	2,938	2,268	691	11,340	2,938	22,680	6,048
64 QAM, 5/6	9,408	3,264	2,520	768	12,600	3,264	25,200	6,720

U fizičkom sloju koristimo:

- QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), digitalna fazna modulacija je modulacija u kojoj su dva informacijska bita, koja zajedno čine jedan simbol, modulirana u isto vrijeme, birajući jedno od četiri moguća fazna stanja.
- QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), kvadratna amplitudna modulacija je postupak u kojem se moduliraju amplitude dvaju nosioca, koji su međusobno

fazno pomaknuti za 90°. Korištenjem 64 QAM modulacije moguće je ostvariti brzinu od 25 Mbit/s.

- BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), binarna modulacija faze koja modulira fazu na način da pomiče sinusni val nosioca za 180 ° za svaku promjenu binarnog stanja.

4.2. MAC sloj WiMAX tehnologije

MAC sloj je dizajniran za *point-to-multipoint* širokopojasni bežični pristup aplikacijama. Glavni zadatak MAC sloja je da uspostavi vezu između fizičkog sloja i viših prijenosnih slojeva. MAC sloj uzima pakete s viših slojeva koji se nazivaju MSDUs (*MAC service data units*/MAC podatkovne jedinice usluga) te ih organizira u MPDUs (*MAC protocol data units*) podatkovne jedinice protokola ili obrnuto, ukoliko pakete šalje u više slojeve. MAC sloj je u standardu 802.16e sadržavao podsloj koji je mogao komunicirati s nizom viših protokola, kao što su Ethernet, IP itd. MAC sloj sa fizičkim slojem čini „mozak“ operacije u WiMAX tehnologiji. Najveća vrijednost MAC sloja je što svojom dinamičkom raspodjelom propusnosti smanjuje kašnjenje i odstupanje signala. Za razliku od WiFi tehnologije WiMAX pomoću svojih algoritama pristupa i raspodjele frekvencije smješta stotine terminala po kanalu. WiMAX odvija komunikaciju od bazne stanice prema korisnicima *point to multipoint* metodom.

MAC sloj počinje s registracijom pretplatničke stanice u baznoj stanici, zatim dolazi do dogovaranja parametara fizičkog sloja, nakon čega počinje komunikacije i razmjena podataka u oba smjera.

ARQ (*Automatic repeat request*) je također podržan od strane MAC sloja. On nam omogućuje da nakon svakog poslanog paketa pošiljatelj dobije potvrdu tj. poruku da je paket uspješno stigao na odredište. Pošiljatelj čeka određeno vrijeme na potvrdu primitka paketa od strane primatelja (*timeout*). Ako je navedeno vrijeme prošlo pošiljatelj ponovno šalje paket sve dok ne dobije potvrdu unutar *timeout* vremena. ARQ smanjuje moguće gubitke podataka u prijenosu. Podaci se prilikom prijenosa dijele na blokove, a njihova veličina se definira na početku prijenosa. Blokovi koji nisu došli na odredište unutar *timeout* vremena smatraju se izgubljenim i šalje se zahtjev za ponovno slanje bloka.

Blokovi mogu biti u četiri stanja:

- Blok nije poslan.
- Izvanredan, blok je poslan i čeka se potvrda da je stigao na odredište.
- Prihvaćen ili odbačen, ako je prihvaćen slanje je uspješno, ako je odbačen ide na sljedeće stanje.
- Čekanje na ponovno slanje.

Iza svakog poslanog bloka moramo dobiti potvrdu da je stigao na odredište.

MAC sloj podržava nekoliko povratnih zahtjeva, kao što su ATM i paketni protokoli. Konvergencijski podslojevi zajedno s MAC slojem rade zajedno koristeći zaglavlje, pakiranje i fragmentaciju za učinkovitiji transport nego izvorni transportni mehanizam. MAC sloj na svaku uspostavljenu vezu veže 16-bitni indentifikator veze (CID) i na njihov zahtjev mogu zatražiti stalni frekvencijski pojas ili pojas po potrebi. CID indentifikatori koriste se za razlikovanje više uzlaznih (*uplink*) kanala koji su povezani s jednim silaznim (*downlink*) kanalom. Korisničke stanice provjeravaju CID indentifikatore u primljenim PDU-ovima i zadržavaju samo one PDU-ove koji su im upućeni. MAC PDU je podatkovna jedinica koja se razmjenjuje između MAC slojeva baznih i korisničkih stanica. Ona je generirana na sljedećem nižem sloju i primljena je od prethodnog nižeg sloja. Svaka korisnička stanica ima 48-bitnu MAC adresu. Prilikom ulaska u mrežu korisnička stanica ima uspostavljene tri upravljačke veze u svakom smjeru. Tri upravljačke veze odražavaju tri različita QoS (*Quality of Service*) zahtjeva korištena na različitim razinama upravljanja:

- Osnovna veza (*Basic connection*) – Prenosi kratke, vremenski ovisne MAC i RLC (*radio link control*) poruke.
- Primarna upravljačka veza (*Primary management connection*) – Prenosi duže, neovisne o odgodi poruke, kao što su poruke za autorizaciju i postavljanje veze. Sekundarne upravljačke veze prenose upravljačke poruke temeljene na standardima kao što su DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) protokol, TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*) protokol, SNMP (*Simple Network Management Protocol*) protokol. Uz ove upravljačke veze sa korisničkim stanicama su uspostavljene transportne veze za ugovorene usluge.

- Transportne veze (*Transport connections*) – Jednosmjerne veze za jednostavnije korištenje uzlaznih kanala, silaznih kanala i QoS prijenosnih parametara.

Korisničke stanice dijele uzlazne kanale sa baznim stanicama na njihov zahtjev. Ovisno o klasi korištene usluge korisnička stanica može izdati pravo na prijenos podataka ili ga bazna stanica može odobriti ukoliko ga dobije od strane korisnika.

MAC sloj uključuje nekoliko značajki pogodnih za širok raspon aplikacija, kao što su:

- PKM je podsloj zadužen za sigurnost prijenosa podataka, detaljno obrađen u poglavlju 4.3.
- Podrška za emitiranje (*broadcast* i *multicast*).
- Brza primopredaja podataka.
- Tri načina rada (*normal*, *sleep*, *idle*).
- Smanjivanje, fragmentacija i pakiranje zaglavlja radi bolje iskoristivosti spektra.
- 5 različitih klasa usluga: UGS (*Unsolicited Grant Service*) u kojem prijenosni sustav automatski i periodično dodjeljuje definirani broj vremenskih intervala i fiksnu veličinu paketa koje koristi određeni prijamnik; rtPS/nrtPS (*real-time polling service / non real-time polling service*) algoritmi koji podržavaju prijenos podataka u realnom vremenu ili prijenos podataka uz određenu odgodu; BE (*Best Effort*) odnosi se na mrežnu uslugu koja pokušava prenijeti podatak do destinacije, ali bez ikakvog upozorenja ili pokušaja povratka podatka ako se on izgubi; ERT-VR (*Extended real-time variable rate*) usluga koja podržava aplikacije u realnom vremenu s promjenjivom brzinom te koje zahtijevaju sigurnost prijenosa podataka, poput VoIP-a (*voice over internet*).

Značajke MAC sloja, uključujući OFDM metodu, prikladne su za brzi prijenos podataka i IP multimedijske aplikacije.

WiMAX standard definira dva servisna konverzijska podsloja za mapiranje usluga iz/u MAC sloj.

- ATM konverzijski podsloj je za ATM usluge.
- Podsloj konverzije paketa koji je definiran za mapiranje paketnih usluga kao što su IPv4, IPv6, Ethernet i VLAN.

Zadatak podslojeva je klasificirati podatkovne jedinice (SDU) na odgovarajuću MAC vezu, omogućiti ili onemogućiti QoS i omogućiti dodjelu pojasa. SDU su jedinice koje se razmjenjuju između dvaju susjednih slojeva protokola. One su podatkovne jedinice primljene u smjeru prema dolje od prethodnog višeg sloja i podatkovne jedinice koje su poslone u smjeru prema gore do sljedećeg višeg sloja. Uz ove osnovne funkcije podslojevi izvode niz radnji kao što su smanjivanje i rekonstrukcija zaglavlja kako bi se povećala učinkovitost veze.

PDU MAC podatkovne jedinice se razlikuju u svom zaglavlju. Tip zaglavlja može biti 1 ili 0. Ako je 1 sadrži okvire koji zahtjevaju spektar dok 0 sadrži izvorne okvire. Tablica 4.4. nam pokazuje podtipove zaglavlja te njihovo kodiranje.

Tablica 4.4. Podtipovi zaglavlja, njihova imena i kodovi [13]

Kod za tip zaglavlja	Ime naredbe	Objašnjenje
000	<i>BR incremental</i>	Dodatni podaci zatraženi u bajtovima.
001	<i>BR aggregate</i>	Novi zahtjev u bitovima.
010	<i>PHY channel report</i>	Poslati UL koji sadrži informacije o jačini signala.
011	<i>BR with UL Tx Power Report</i>	Kombinacija dvije poruke.
100	<i>Bandwidth request and CINR report</i>	BR i CINR (ovisnost nosioca o smetnjama), odražava <i>minislot</i> jedinicu kao vrijednost od -16 dB do 47 dB.
101	<i>BR with UL sleep control</i>	Kombinira BR i mod za uštedu energije stanice.
110	<i>SN Report</i>	Broj sekvence za selektivnu potvrđnu kontrolu.
111	<i>CQICH allocation request</i>	Podaci o kontroli kvalitete kanala je odvojen kanal za nadziranje kvalitete.

Tablica 4.5. Izgled izvornog zaglavlja [13]

HT	EC	Type	RSV	CI	EKS	RSV	Length
Length			CID				
CID			HCS				

Tablica 4.5. nam prikazuje izgled izvornog zaglavlja, u nastavku je objašnjen njegov sadržaj:

- HT, razlikuje izvorno zaglavlje (1) i okvir za zahtjev spektra (0).
- EC, da li je teret kodiran ili ne.
- Type, različiti podtipovi zaglavlja (mesh, ARQ, prošireno zaglavlje...)
- CI, daje nam do znanja da li koristimo CRC (*cyclic redundancy check* - metoda za detektiranje errora) ili ne.
- EKS, sigurno ključanje.
- Length, dužina paketa u bitovima (uključujući MAC zaglavlje i CRC ako je prisutan)

Tablica 4.6. Izgled „zahtjev za spektrom“ tipa zaglavlja [13]

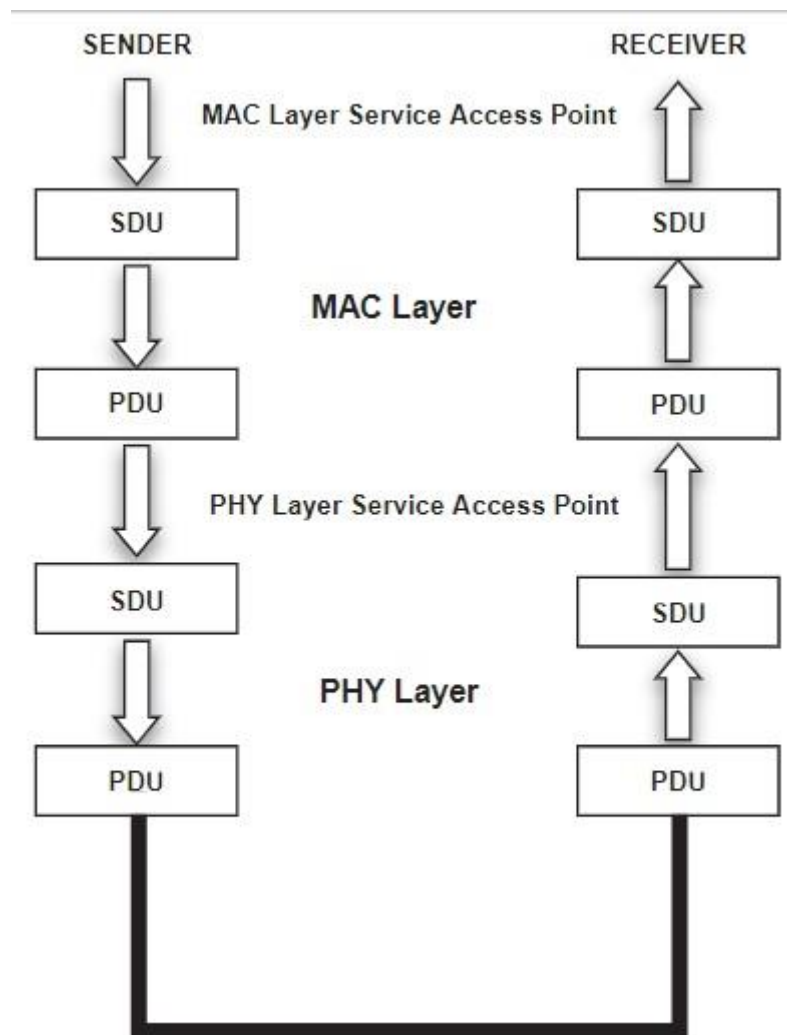
HT	EC	Type	Zahtjev za spektrom MSB (11 bit)
BR LSB		CID	
CID		HCS	

U prethodnoj tablici 4.6. nam je prikazan izgled zaglavlja „zahtjev za spektrom“ tipa, u nastavku je objašnjen njegov sadržaj:

- CID, odnosi se na uzlazni kanal.
- BR, odnosi se na zatraženi broj bitova.
- HCS, sekvenca za provjeravanje zaglavlja.

Prijenos SDU i PDU podatkovnih jedinica se odvija po sljedećem formatu. Dolazni MAC SDU-ovi iz odgovarajućih konvergencijskih slojeva formatiraju se po MAC PDU formatu, s fragmentacijom i/ili pakiranjem, prije prijenosa preko jedne ili više veza u skladu s MAC protokolima. Nakon prolaska zračne veze, MAC PDU-ovi se rekonstruiraju u izvorne

MAC SDU-ove tako da su promjene formata koje provodi protokol MAC sloja transparentne za prijemni entitet. Slika 4.10. nam prikazuje prijenos SDU i PDU podatkovnih jedinica između fizičkog i MAC sloja.



Slika 4.10. Prijenos SDU i PDU podatkovnih jedinica [13]

MAC sloj koristi prednosti procesa fragmentacije i pakiranja da bi dobio veću efikasnost i fleksibilnost. Fragmentacija je proces u kojem MAC SDU podatkovnu jedinicu podjelimo u jedan ili više MAC SDU fragmenta. Pakiranje je proces u kojem se više MAC SDU podatkovnih jedinica pakira u jednu MAC PDU podatkovnu jedinicu. Jedan ili oba procesa može pokrenuti bazna stanica kod silazne konekcije ili korisnička stanica kod uzlazne konekcije. WiMAX sustav koristi simultano korištenje fragmentacije i pakiranja radi bolje iskoristivosti pojasa.

MAC zaglavlje sadrži nekoliko važnih poruka koje ćemo obraditi u nastavku:

- *Downlink Channel Descriptor Message*, poruka koja se šalje periodično da bi definirali parametre fizičkog sloja za silazni kanal. Navedena poruka se šalje preko uzlaznog kanala. Također sadrži strukturu zvanu *burst profile* koja definira tip modulacije, kodiranja...
- *Uplink Channel Descriptor Message*, poruka poslana od strane bazne stanice periodično. Definira karakteristike uzlaznog kanala izmjerene od strane bazne stanice.
- *Downlink Map Message*, poruka bitna za organizaciju okvira i pristup silaznom kanalu. Pretplatnička stanica dobije poruku od bazne stanice koja sadrži mjesto gdje se u okviru nalaze njezini podaci. Silazna MAP poruka sadrži pokazivače nizova u podokviru, gdje svaki niz može biti dodjeljen različitoj pretplatničkoj postaji.
- *Uplink Map Message*, uzlazna MAP poruka dodjeljuje pristup silaznoj vezi. Poslana je od strane bazne stanice. Sadrži informacije kako određena postaja može poslati podatke preko određenog kanala.
- *Ranging Request*, poruka koja je poslana od strane stanice da bi se izmjerila odgoda. Ona nam daje informacije koju vrstu fizičkog sloja odabiremo na temelju danog stanja. Ako se koristi OFDM, *Ranging Request* se šalje prema jednom ili više OFDM podnosioca.
- *Registration Request*, poslana je od strane pretplatničke stanice u toku postavljanja veze. Koristi informacije o autorizaciji i neke od parametara viših slojeva kao što su: IP verzija, mogućnosti dekodiranja stanice, ARQ parametre, parametri konverzijskih podslojeva, informacije o prodavaču.
- *Privacy Key Management Messages*, PKM poruka je serija više zahtjeva i odgovora na iste u svrhu dodjeljivanja pristupnog ključa (*session key*) pretplatničkoj stanici od strane bazne stanice.
- *Dynamic Service Addition Messages*, odnosi se na QoS parametre, koji su dogovoreni kroz DSA-req/DSA-res poruke.

Prijenosni konvergenijski (*Transmission Convergence*) sloj se nalazi između MAC i fizičkog sloja. Ovaj sloj pretvara promjenjive dužine MAC PDU podatkovne jedinice u FEC blokove fiksne dužine. TC sloj ima zadatak podatkovnu jedinicu PDU smjestiti u FEC blok. Blok počinje s pokazivačem gdje će se sljedeća MAC PDU jedinica smjestiti.

4.3. Sigurnost WiMAX sustava

WiMAX sustavi dizajnirani su kako bi sadržavali visoku razinu sigurnosti. Sustav koristi najsvremenije metode da bi svojim korisnicima omogućio privatnost, zaštitu podataka i neovlašten pristup njihovim informacijama i podacima. Zaštita se odvija u podpojasu MAC sloja. Korisnički podaci su šifrirani pomoću kriptografskih shema kao što su AES i 3DES. AES (*Advanced Encryption Standard*) je naziv za američki državni standard za šifriranje te pripada porodici blok šifri i koristi substitucijsku-permutacijsku mrežu. Putem AES metode dobivamo 128-bitni ili 256-bitni ključ koji se koristi za dobivanje šifre, a generira se tijekom faze provjere autentičnosti te se povremeno osvježava zbog povećanja sigurnosti.

WiMAX pruža fleksibilnost za autorizaciju pretplatničkih postaja i korisnika kako bi spriječio neovlašteni pristup. Njegovi uređaji dolaze s ugrađenim X.509 digitalnim certifikatom koji sadrži javni ključ i MAC adresu. WiMAX korisnici mogu koristiti certifikate za autorizaciju uređaja te vlastite *username/password* autorizacije ili pametne kartice za dodatnu sigurnost.

Za prijenos podataka između bazne stanice i korisnika, WiMAX tehnologija koristi PKMv2 protokol zaštite podataka. PKMv2 protokol želi dodijeliti autorizacijski ključ pretplatničkoj/korisničkoj stanici. Proces autorizacije je razmjena poruka između bazne i pretplatničke stanice u 3 dijela. Prve dvije poruke šalje pretplatnička stanica prema baznoj stanici te, ako su uspješne, bazna stanica šalje ključ za autorizaciju pretplatničkoj stanici. Prva poruka u smjeru pretplatnik-bazna stanica sadrži X.509 certifikat koji baznoj stanici otkriva proizvođača pretplatničke stanice. Pretplatnička stanica šalje drugu poruku kao zahtjev autorizacije te sadrži X.509 certifikat s javnim ključem kao i sigurnosne mogućnosti pretplatničke stanice tj. algoritme autorizacije i enkripcije koje ta pretplatnička

stanica sadrži. Također šalje SAID (*security association identity*) koji je identifikacija sigurne veze između pretplatničke i bazne stanice. Bazna stanica je ta koja odlučuje hoće li dati autorizaciju pretplatničkoj postaji. Ukoliko je odgovor pozitivan, bazna stanica šalje treću poruku pretplatničkoj stanici u kojoj se nalazi ključ autorizacije, stvoren na temelju javnog ključa pretplatničke stanice. Autorizacijski ključ nije javan, već ga posjeduju samo bazna i pretplatnička stanica, a nakon prestanka veze potrebna je ponovna autorizacija za uspostavljanje nove. Takav način autorizacije naziva se *three-way handshake*.

WiMAX također podržava brzi prijenos (*Fast Handover*) koji nam omogućuje prijenos podataka prema određenoj baznoj stanici uz proces *pre-authentication*. U tom slučaju koristimo autorizaciju (AK) koja je dana u prošlom prijenosu podataka, na način da ponovna autorizacija nije potrebna, što nam ubrzava cijeli proces, ali nas i štiti od krađe podataka.

Navedeni procesi autorizacije, zaštite, formiranja pristupnih ključeva smanjili su ranjivost WiMAX mreže. U usporedbi sa WiFi tehnologijom i ostalim bežičnim tehnologijama WiMAX je imao najvišu razinu zaštite.

5. MREŽNA ARHITEKTURA WiMAX TEHNOLOGIJE

WiMAX tehnologija vrlo je slična WiFi tehnologiji, iz razloga što obje dopuštaju pristup internetu bez žica. Ono u čemu se razlikuju jest što WiFi može pokriti mali prostor kao što je kućanstvo, dio ulice ili zgradu, dok WiMAX pokriva prostor u krugu od 50 km. WiMAX-ov glavni cilj bio je omogućiti dostupnost interneta, odlične brzine, svugdje, a ne samo u kući, lokalnom kafiću ili hotelu. WiMAX tehnologija ima dvije osnovne komponente. Prva komponenta je WiMAX toranj, a druga je WiMAX primatelj. WiMAX tornjevi mogu se međusobno povezati, čineći tako veći radijus pokrivenosti. WiMAX toranj može pokriti radijus od 50 km, dok WiMAX predajnik može pokriti radijus od 30 metara.

Arhitektura WiMAX tehnologije sastoji se od bazne stanice i pretplatničkih stanica (jedne ili više njih). Bazne stanice mogu raditi na principu PPP (*Point to point* protocol) ili PTMP (*Point to multipoint* protocol) te sadrže odašiljačku/prijemnu opremu za spajanje s korisničkom opremom i uređaje koji omogućuju spajanje na javne mrežne operatore. Na baznu stanicu mogu se spojiti kućanstva, zgrade, poduzeća, pogoni te pojedinačni mali potrošači kao što su mobilni uređaji, igrače konzole, laptopi itd.

Bazna stanica je WiMAX toranj, fiksna stanica smještena blizu centra područja koje pokriva. Doseg mu je do 50 km, a sa standardom 802.16d između baznih stanica podržava komunikaciju bez optičke vidljivosti, olakšavajući tako povezanost baznih stanica s korisnicima. Povezivanje bazne stanice na internet provodi se pomoću visoko propusne žične linije, kao što je npr. T3 linija. WiMAX bazna stanica nije morala biti samostalni objekt u inačici tornja, već je često postavljana na visoke zgrade, tvornice i nebodere, što je uvelike olakšalo pronalazak mjesta postavljanja u urbanijim područjima, kao što vidimo na slici 5.1.



Slika 5.1. Izgled WiMAX bazne stanice na stambenoj zgradi [8]

WiMAX toranj, koji je bio postavljen samostalno, financijski je mnogo koštao jer se, uz baznu stanicu, morala izraditi i struktura koja je trebala izdignuti antene u visinu radi bolje optičke vidljivosti i manjih smetnji. Slika 5.2. prikazuje WiMAX toranj.



Slika 5.2. Izgled WiMAX tornja [9]

Antene koje su se koristile kod WiMAX tehnologije bazirane su na MIMO tehnologiji (više ulazno-izlaznih komunikacija), što znači da se na baznoj stanici nalazilo više antena, kao i na strani mobilnih uređaja.

Implementacija MIMO tehnologije u WiMAX, unaprijedila je prijem signala, brzinu prijenosa i veći doseg. Standard 802.16 definirao je MIMO konfiguraciju na način da se

komunikacija između svake pojedine bazne i mobilne stanice odvija dinamično. Također, standard 802.16 omogućio je pristup mobilnim stanicama s različitim MIMO sposobnostima, što povećava kompatibilnost sustava. 802.16 kod prijenosa, preko MIMO tehnologije, koristi *Spatial Multiplexing* metodu. Princip rada ove metode je simultano odašiljanje jednog bita podatka sa svake antene, što znači da se prvi bit šalje preko prve antene, a drugi bit sa druge antene, i tako u krug. Valja napomenuti da je ova metoda podržana samo u komunikaciji s dva prijemnika na prijemnoj strani, što nam povećava troškove, ali i brzinu prijenosa podataka. Standard 802.16 također podržava MISO tehnologiju u kojoj ima više odašiljačkih antena, dok je prijemna samo jedna, što se odnosi na prijenos informacija putem *Space-time code* metode. *Space-time code* metoda korištena je kako bi se unaprijedila pouzdanost prijenosa podataka u bežičnim komunikacijskim sistemima, korištenjem dviju ili više odašiljačkih antena. Kako bi se obavilo pouzdano dekodiranje, STC metoda se oslanja na odašiljanje više kopija podataka prema prijemniku, u nadi da će barem jedna kopija doći u dobrom stanju.

WiMAX podržava korištenje 4 antene kod prijenosa podataka putem MISO/MIMO metoda. Postoje tri načina upotrebe:

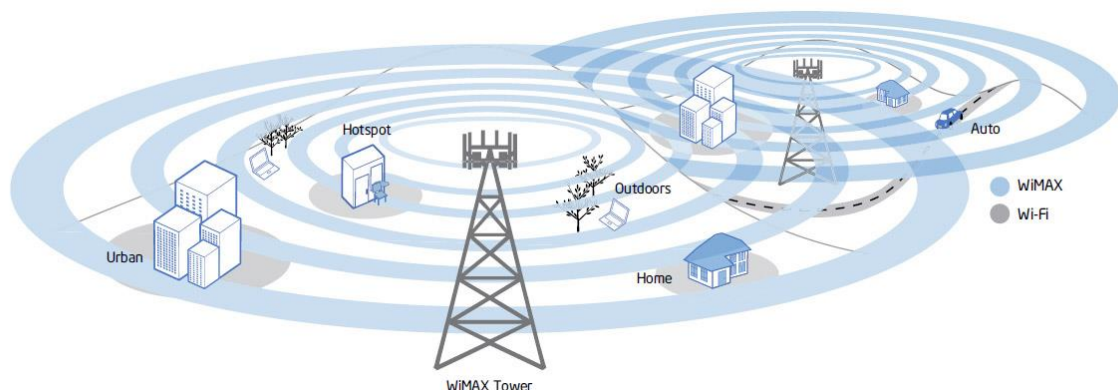
- Brzina 1 bit koristeći 4 antene; podaci se prenose 4 puta po simbolu pri čemu se podaci svaki put konjugiraju i/ili preokreću. Ovaj način ne povećava brzinu prijenosa, ali smanjuje razinu stope pogreške.
- Brzina 2 bita koristeći 4 antene; brzina je duplo veća jer se isti podaci prenose 2 puta.
- Brzina 4 bita koristeći 4 antene; svaka antena prenosi različiti bit po simbolu, što nam daje 4 puta veću brzinu ali nam je stopa greške veća.

Povezivanje na WiMAX mrežu vrši se preko takozvanih SS (*Subscriber Station*) prijenosnih uređaja koji mogu biti PC kartice. USB uređaji, mobilni setovi ili integrirane kartice konzolama, MP3 playerima i laptopima omogućuju pristup internetu. Mobilni WiMAX *hotspot* prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3. Mobilni WiMAX *hotspot* tvrtke CLEAR [10]

WiMAX forum sadrži popis certificiranih uređaja koje podržavaju WiMAX platformu. Također, pristupne jedinice mogu biti unutarnje i vanjske te su u izradi kod nekoliko proizvođača kao što su CLEAR, Motorola, Huawei i Airspan. Unutarnje jedinice su mnogo manje od vanjskih, imaju manji doomet te se koriste u zgradama, postrojenjima ili manjim tvrtkama, dok su vanjske jedinice veće (veličine današnjeg prijenosnog računala), a ugrađuju se na vrhove zgrada ili tvornica te imaju manju mobilnost, ali veći doomet nego unutarnje jedinice. Kao primjer unutarnje jedinice imamo WiMAX USB koji je nudio WiMAX hotspot i koristio 802.16e standard. Morao je biti postavljen na mjestu gdje je bila dobra pokrivenost signalom jer je imao problem povezivanja s baznom stanicom. Na slici 5.4. vidimo pokrivenost prijenosnih uređaja od strane bazne stanice.



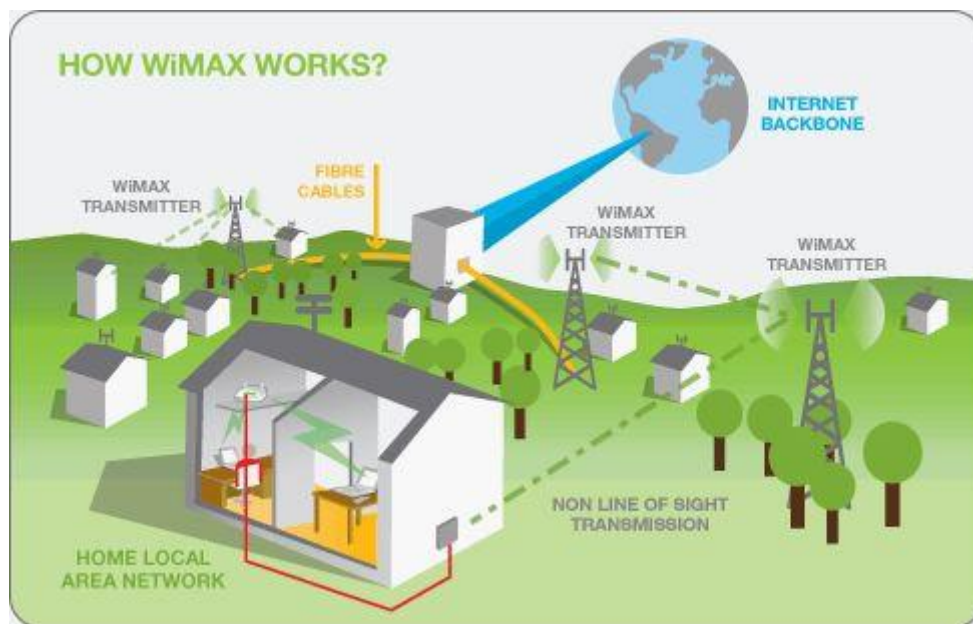
Slika 5.4. Povezanost baznih stanica sa prijenosnim uređajima [11]

Na prethodnoj slici prikazan je WiMAX toranj koji pokriva radijus od 50 km te različite unutarne i vanjske jedinice, koje su povezane na njega kao što su antene, laptopi i mobilni hot-spotovi.

WiMAX je 2008. započeo suradnju s HTC-om, tvrtkom za izradu mobilne telefonije, te su zajedno predstavili prvi WiMAX mobilni telefon nazvan „Max 4G“. Dostupan je bio u Rusiji, na Yota mreži, jer ga je većina kompanija odbila. Pokušaji WiMAX-a da iznenadi tržište prestali su 2012. godine na CES (globalni elektronički sajam) sajmu, kada je Sprint Nextel objavio da neće više koristiti uređaje s WiMAX tehnologijom zbog financijskih okolnosti.

5.1. Način povezivanja unutar WiMAX mreže

Slika 5.5. prikazuje način povezivanja korisnika unutar WiMAX mreže.



Slika 5.5. Povezanost WiMAX sustava [6]

Radijski dio WiMAX tehnologije temelji se na, već poznatoj, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnologiji. Informacija koja se prenosi rastavi se na 256 članova (nosilaca) te se šalje putem radijskog signala, koji na svom cilju sastavlja nosioce u izvornu informaciju. Sustav radi na radijskoj frekvenciji od 3,5 GHz te nije potrebna optička vidljivost između korisničkog terminala i bazne stanice. Informacija se na

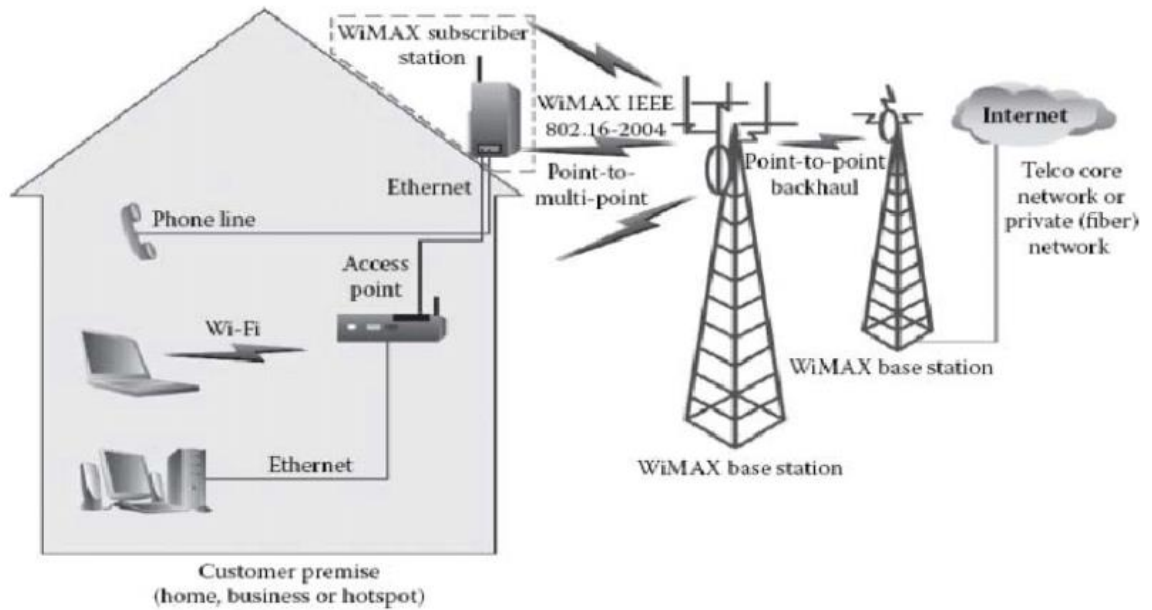
cilju rekonstruira pomoću raspršenih i reflektirajućih elektromagnetskih valova koji daju izvornu informaciju.

5.2. PPP i PTMP protokoli

PPP je protokol koji se koristi za izravnu komunikaciju između dva WiMAX tornja. WiMAX tornjevi prenose informaciju preko bežične veze, a PPP protokol omogućuje povezivanje dvaju ravnopravnih korisnika dvosmjernom vezom radi prijenosa podataka. Podaci se prenose simultano i u redosljedu kojim su poslani. PPP protokol ima funkcije upravljanja vezom, interakcije s mrežnim slojem i podesivost. Pri uspostavljanju veze postoji redosljed koji se mora odraditi prije međusobne interakcije:

- Uspostavljanje veze
- Autorizacija
- Mrežna faza
- Prekid veze

PTMP razlikuje se od PPP protokola jer nam omogućuje povezivanje jedne točke s više njih, u ovom slučaju interakcija WiMAX tornja s njegovim prijenosnim jedinicama [Poglavlje 3.3]. Sa svakom prijenosnom jedinicom toranj uspostavlja „kanal“ preko kojeg se razmjenjuju podaci. Kanal radi na principu TDD [Poglavlje 3.2] te se dio vremena koristi za slanje podataka, a drugi dio za primanje. Važno je da ne dođe do preklapanja tih vremena jer bi, u tom slučaju, došlo do pogreške pri prijenosu. Na slici 5.6. vidimo topologiju WiMAX mrežnog sustava.



Slika 5.6. Topologija WiMAX mrežnog sustava [12]

WiMAX sustav dijeli se na mrežnu i korisničku opremu. Bazna stanica šalje uslugu korisnicima preko unutrašnjeg primopredajnika ili WiMAX tornja. Primopredajnik se sastoji od nekoliko modularnih jedinica (jedinica za napajanje, procesuiranje i pristupna jedinica). Podaci između bazne stanice i korisničke opreme mogu se prenositi bez obzira na optičku vidljivost. Korisničku opremu čine standardni kućanski prijemnici, antene, USB ili kartice preko kojih prijenosni uređaji dobivaju signal.

6. UPOTREBA WiMAX TEHNOLOGIJE U HRVATSKOJ

Upotreba WiMAX tehnologije u Hrvatskoj započinje početkom 2006. godine, kada je, kao glavni konkurent T-com-u, Novi-net zadovoljio sve tehničke uvjete za nuđenje telekomunikacijskih usluga preko WiMAX tehnologije.

Brži i jeftiniji pristup internetu (20 Mbit/s brzina) bez parica, koje je koristio T-com, uz pouzdanu vezu i mogućnost VoIP-a (internet telefoniranje), mogućnosti su koje je tada nudio WiMAX. Velika prednost WiMAX usluge, u odnosu na T-com uslugu, je cijena, jer je WiMAX koristio bežični pristup internetu i uvelike smanjio ulaganja koja su bila potrebna da se internet veza dovede do vašeg doma. U odnosu na konkurente, usluge su bile čak nekoliko puta jeftinije (flat-rate ADSL za 99 kn/mjesečno).

Testno područje za WiMAX tehnologiju u Hrvatskoj je Međimurska županija, gdje su tvrtke Novi-net, Optima telekom i T-HT imale koncesiju na WiMAX. Tvrtke su imale i velika očekivanja za WiMAX, koji je tada samo za Optimu telekom imao 2000 zainteresiranih korisnika, među kojima se nalaze privatni korisnici, male i velike tvrtke. Infrastruktura mu je bila potpuno neovisna o T-com-u, a u Međimurskoj županiji su se nalazile dvije bazne stanice koje su pokrivale 90% navedene županije. Bazne stanice su bile povezane i sa slovenskim mjestom Lendava, koji je optičkim kabelom bio povezan s Frankfurtom, jednim od najvećih središta telekomunikacije u Europi. Međimurska županija je bila odlična za razvoj i reklamu WiMAX tehnologije, upravo radi svog terena i mnogo manjih, odvojenih sredina u kojima su se nalazile zainteresirane tvrtke. Povezati žičanim ADSL-om sve te manje sredine na „teškom“ terenu, za konkurente je značilo mnogo veću cijenu usluge, jer je ulaganje u žičanu povezanost bilo puno veće. Novi-net je jedina tvrtka koja je uspješno nudila uslugu na području Hrvatske, dok su se drugi pravdali da ne mogu složiti isplativ poslovni model na WiMAX mreži. Nekoliko godina kasnije, WiMAX se još aktivno nudio na tržištu, no tvrtke koje su imale koncesiju krive nezainteresiranost potencijalnih korisnika za propast ove tehnologije u Hrvatskoj. Stoga, WiMAX nikada nije iskoristio svoj potencijal u Hrvatskoj.

7. USPOREDBA WiFi I WiMAX TEHNOLOGIJE

Zbog česte usporedbe ovih dviju navedenih tehnologija, napravljena je usporedba brzine kvalitete, pokrivenosti, usluge i prihoda. WiMAX i WiFi tehnologija dijele mnogo toga zajedničkog, no treba istaknuti razliku u dometu i brzini. U tom segmentu, WiMAX ima prednost jer ima domet do 50 km i brzinu do 75 Mbit/s dok WiFi ima domet od 100 m i brzine do 50 Mbit/s. Valja napomenuti da WiFi koristi žičane parice kako bi došao do korisnika, dok WiMAX tehnologija nudi bežično povezivanje na WiMAX toranj, ukoliko je to područje pokriveno istim. Kvaliteta usluge je na strani WiMAX tehnologije jer bežičnim prijenosom informacije i zauzećem frekvencijskog spektra, za koji je potrebna licenca, signal čini pouzdanijim za usluge prijenosa podataka, videa i zvučnog zapisa preko interneta te VoIP-a. WiFi tehnologija se žičanim prijenosom informacije izlaže vanjskim utjecajima koji mogu prekinuti ili smetati navedenoj vezi. WiFi koristi frekvencijski spektar za koji ne treba dozvola te se izlaže raznim smetnjama zbog zauzetosti spektra. Jedna od razlika je i u vrsti MAC adrese. WiFi se temelji na tome da svi korisnici koriste istu pristupnu točku, dok WiMAX, za raspoređivanje algoritama, koristi MAC koji osigurava da svaki klijent, u danom vremenskom periodu, dobije komunikaciju sa pristupnom točkom, dok kod WiFi-a prioritet imaju stanice najbliže korisniku. Pojavom WLAN-a, WiMAX dobiva pravog konkurenta jer je WLAN financijski pristupačniji. No mogućnosti WiMAX-a ipak su veće jer može doći ondje gdje WLAN ne može. Danas svugdje možemo vidjeti upotrebu WLAN-a. Svaka urbanija mjesta, bilo da se radi o otvorenim (parkovi, šetališta, plaže...) ili zatvorenim lokacijama (kafići, restorani, banke...), imaju ponuđenu uslugu WiFi-a. Tablica 7.1. će prikazati usporedbu usluge WiMAX-a i WiFi-a koja se razvijala s vremenom.

Tablica 7.1. Razvoj brzine WiFi-a od 1999 godine [5]

Wi-Fi Standard	Frekvencija	Brzina	Radijus pokrivenosti
802.11a (1999)	5 GHz	54 Mbit/s	120 m
802.11b (1999)	2.4 GHz	11 Mbit/s	140 m
802.11g (2003)	2.4 GHz	54 Mbit/s	140 m
802.11n (2009)	2.4 / 5 GHz	300 Mbit/s – 900 Mbit/s	250 m (2.4 GHz) / 140 m (5 GHz)
802.11ac (2012)	5 GHz	433 Mbit/s – 1733 Mbit/s	250 m

WiFi se godinama razvijao te danas u razvijenim zemljama nudi brzinu do 1 Gbit/s, dok WiMAX i dalje nudi brzinu do 70 Mbit/s, ali pokrivenost je i dalje na njegovoj strani.

8. ZAKLJUČAK

Obradom teme WiMAX tehnologije, njezinih karakteristika, zastupljenosti, topologije mreže te razvojem, zaključujemo kako se radi o tehnologiji koja je trebala omogućiti povećanje prihoda, veću konkurentnost na tržištu te ispuniti velika očekivanja korisnika. WiMAX tehnologija najviše je bila zastupljena u Velikoj Britaniji i Sjedinjenim Američkim Državama., no nažalost, nikada nije u potpunosti zaživjela. Jedan od glavnih ciljeva ove mreže jest da ruralna područja, gdje internet nije bio dostupan, pokrije svojim širokopojsnim bežičnim internetom i to uz manje troškove nego što je nudila konkurencija. WiMAX forum je uspješno promovirao navedenu mrežu te se zainteresiranost povećala. Prvi projekti i realizacija prve WiMAX mreže u Hrvatskoj započeli su u Međimurskoj županiji, gdje su jedino i zaživjeli. Kada su u pitanju prijenosi podataka većih količina u kratkom vremenskom razdoblju, WiMAX projekt nudio je veliku fleksibilnost i velike brzine prijenosa. Valja napomenuti da je WiMAX simultano prenosio *voice over internet* (VoIP), video i internet podatke. Jedan od načina na koji bi WiMAX mreža zaživjela u svijetu je njezina provedba u nerazvijenim područjima, u kojima je, zbog lošeg financijskog statusa, nemoguće dovesti žičanu infrastrukturu. S mog stajališta, kada usporedimo WiMAX tehnologiju sa zastupljenijim tehnologijama uočavamo jak potencijal, koji se mogao razviti i ponuditi mnogo bolju uslugu nego konkurenti. Naravno, WiMAX tehnologija je bila razvijena od samog početka te je zahtijevala velika ulaganja u testiranje i daljnje razvijanje mreže, što je mrežnim operatorima, uz već postojeće tehnologije, bilo neprihvatljivo. Po mom mišljenju, upravo to je razlog stagniranja WiMAX mreže u odnosu na ostale.

LITERATURA

- [1] WiMAX Forum®, osnovan u lipnju 2001 godine,
<http://wimaxforum.org/Page/About/vision-and-mission> [17.05.2020]
- [2] Jewitt, J.T., *Tales In Tech History: WiMax*, Silicon.co.uk, 2. veljače 2018,
<https://www.silicon.co.uk/networks/tales-tech-history-wimax-227889> [19.05.2020]
- [3] CableFree, *Frequency Division vs. Time Division Duplexing in Wireless Communications*, Oxford Science Park, Oxford, OX4 4GA. UK,
<https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/fdd-vs-tdd/> [25.05.2020]
- [4] WIKIPEDIA®, WiMAX MIMO, 13.9.2018,
https://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX_MIMO [28.05.2020]
- [5] TUTORIALS POINT, osnovan 2006 godine, *LEARN WiMAX*,
<https://www.tutorialspoint.com/wimax/index.htm> [28.05.2020]
- [6] IT & TELECOM REVIEWS, objavljeno 2015, *WiMAX Networks Still Thrive In Russia – For Now At Least*
<https://iteleviews.wordpress.com/2015/11/30/wimax-networks-still-thrive-in-russia-for-now-at-least/>
- [7] DIGITALNATV, osnovano 2009, OFDM,
<http://digitalnatv.site90.net/dtv/ofdm.html> [29.05.2020]
- [8] RESEARCH GATE, *One of INEA's WiMAX base station*, 2016,
https://www.researchgate.net/figure/One-of-INEAs-WiMAX-base-station_fig1_266557964 [22.05.2020]
- [9] WIRELESS COMMUNICATION, *WiMAX Categories: networking, technology*, 2009, <http://wirelesscommunicationdevice.blogspot.com/> [29.05.2020]
- [10] ENGADGET, *Clearwire unveils \$99 Clear Hub Express and \$129 Clear Spot Voyager hotspots*, 2012, <https://www.engadget.com/2012-01-30-clearwire-unveils-99-clear-hub-express-and-129-clear-spot-voya.html?guccounter=1> [29.05.2020]
- [11] HiteknoFal Solutions, osnovan 1997, *Wireless BB*,
<http://www.hiteknoFal.com/in/Solutions-and-Sevices/Networking-Solutions/Wireless-BB/>
[30.05.2020]

- [12] RESEARCH GATE, *WiMAX network topology*, 2012,
https://www.researchgate.net/figure/WiMAX-network-topology-7_fig4_259445200
[22.05.2020]
- [13] Houda Labiod, H.L., Hossam Afifi, H.A., Constantino De Santis, C.D.S., *WI-FI, BLUETOOTH, ZIGBEE AND WIMAX*, izdao Springer, 2007, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands.
<https://oblak.oss.unist.hr/index.php/s/iRjHR00KbwcBkSO#pdfviewer>
- [14] Frank Ohrtman, F.O., *WiMAX HANDBOOK: Building 802.16 Wireless Networks*, izdao The McGraw-Hill Companies, 2005, United States of America,
<https://oblak.oss.unist.hr/index.php/s/iRjHR00KbwcBkSO#pdfviewer>

POPIS SLIKA

Slika 1.1. WiMAX logo	1
Slika 2.1. Logo WiMAX foruma	3
Slika 3.1. FDD graf prijenosa podataka	6
Slika 3.2. TDD graf prijenosa podataka	7
Slika 4.1. Niz kod TDD metode prijenosa podataka	9
Slika 4.2. Formiranje snopa radi bolje iskoristivosti signala	10
Slika 4.3. FDD prijenos podataka	12
Slika 4.4. TDD prijenos podataka	12
Slika 4.5. Vremenska struktura simbola	15
Slika 4.6. Struktura preambule OFDM-a	15
Slika 4.7. OFDMA sa tri podkanala	17
Slika 4.8. Regija dodjeljena paketu	17
Slika 4.9. Struktura podataka za UL i DL okvire.	18
Slika 4.10. Prijenos SDU I PDU podatkovnih jedinica.	25
Slika 5.1. Izgled WiMAX bazne stanice na stambenoj zgradi	30
Slika 5.2. Izgled WiMAX tornja.....	31
Slika 5.3. Mobilni WiMAX <i>hotspot</i> tvrtke CLEAR.	33
Slika 5.4. Povezanost baznih stanica sa prijenosnim uređajima.....	33
Slika 5.5. Povezanost WiMAX sustava.	34
Slika 5.6. Topologija WiMAX mrežnog sustava.....	36

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Podslojevi fizičkog sloja	8
Tablica 4.2. Sheme kodiranja i modulacije u fizičkom sloju	13
Tablica 4.3. Brzina prijenosa u ovisnosti o shemi modulacije i kodiranja	19
Tablica 4.4. Podtipovi zaglavlja, njihova imena i kodovi.....	23
Tablica 4.5. Izgled izvornog zaglavlja	24
Tablica 4.6. Izgled “zahtjev za spektrom” tipa zaglavlja.....	24
Tablica 7.1. Razvoj brzine WiFi-a od 1999 godine.....	34