

Analiza performansi VoIP-a korištenjem mobilnih mreža WiMAX, LTE i WLAN

Marjanović, Stjepan

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:203061>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Stjepan Marjanović

ANALIZA PERFORMANSI VOIP-A KORIŠTENJEM
MOBILNIH MREŽA WIMAX, LTE I WLAN

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA PERFORMANSI VOIP-A KORIŠTENJEM MOBILNIH MREŽA WIMAX, LTE I WLAN PERFORMANCE ANALYSIS OF VOIP IN WIMAX, LTE AND WLAN MOBILE NETWORKS

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Grgurević

Student:

Stjepan Marjanović,

0135235482

Zagreb, kolovoz 2016.

ANALIZA PERFORMANSI VOIP-A KORIŠTENJEM MOBILNIH MREŽA WIMAX, LTE I WLAN

SAŽETAK:

Prijenos govora preko Internet protokola je usluga koja ima sve veću primjenu kod korisnika. Kako je govor usluga koja se odvija u stvarnom vremenu njena kvaliteta je izrazito važna. Kritični parametri kvalitete ove usluge su: kašnjenje, jitter, gubitak paketa i propusnost.

Ovisno o vrsti mreže koja se koristi za prijenos govora variraju iznosi ovih parametara odnosno kvaliteta usluge. Analizirani su kritični parametri kvalitete usluge VoIP (*jitter*, kašnjenje, gubitak paketa) za tri različite mreže: WLAN, LTE i WiMAX, te su utvrđene performanse ove usluge za te mreže.

KLJUČNE RIJEČI: VoIP, kašnjenje, jitter, gubitak paketa, kvaliteta usluge, WLAN, LTE, WiMAX.

PERFORMANCE ANALYSIS OF VOIP IN WIMAX, LTE AND WLAN MOBILE NETWORKS

SUMMARY:

Voice over Internet protocol is a service that has been increasingly used by the user. As speech being a real-time service it's quality is extremely important. Critical parameters of the quality of service are: delay, jitter, packet loss and throughput.

Depending on the type of network used for voice transmission the amount of these parameters varies that is the quality of service varies. Critical parameters of quality of service for VoIP (*jitter*, delay, packet loss) were analyzed in three different networks: WLAN, LTE and WiMAX, and the performance of the service for these networks is determined.

KEYWORDS: VoIP, delay, jitter, packet loss, quality of service, WLAN, LTE, WiMAX.

SADRŽAJ:

SADRŽAJ:	1
1 Uvod	1
2 Pregled dosadašnjih istraživanja	3
3 Značajke i analiza mobilnih mreža	5
3.1 WLAN	5
3.1.1 WLAN standardi	5
3.1.2 Područje definiranja WLAN standarda.....	11
3.1.3 Arhitektura WLAN tehnologije	17
3.1.4 WLAN topologije	18
3.1.5 Pokretljivost.....	20
3.1.6 Rad pristupne točke	20
3.1.7 Skup usluga 802.11 arhitekture	21
3.1.8 Pristup mediju	22
3.1.9 Centralizirana i distribuirana arhitektura.....	23
3.2 WiMAX	25
3.2.1 WiMAX standardi	25
3.2.2 Arhitektura WiMAX tehnologije	27
3.3 LTE	34
3.3.1 Arhitektura EPS sustava	36
3.3.2 Protokolni složaj.....	40
3.3.3 Raspoređivanje resursa	40
3.3.4 Tehnike koje omogućuju LTE.....	41
3.3.5 Usporedba performansi	42
4 Osnovne značajke i razvoj VoIP-a	44

4.1	Standardi i protokoli.....	45
4.1.1	H.323	46
4.1.2	SIP.....	49
4.2	Mrežna arhitektura.....	51
4.3	VOIP aplikacije	52
5	Identifikacija relevantnih parametara VoIP-A	54
5.1	QOS parametri	54
5.1.1	Kašnjenje.....	55
5.1.2	Jitter.....	59
5.1.3	Gubitak paketa	60
5.2	Sigurnosni aspekti VOIP tehnologije	61
6	Analiza performansi VoIP-a korištenjem mobilnih mreža WiMAX, LTE i WLAN	64
6.1	WiMAX - WLAN	64
6.2	LTE.....	73
7	Zaključak.....	84
	LITERATURA	86
	POPIS KRATICA	90
	POPIS SLIKA	94
	POPIS TABLICA.....	97

1 UVOD

Voice over Internet Protocol (kratica VoIP) predstavlja komunikacijsku tehnologiju koja omogućava prijenos zvučne i podatkovne komunikacije preko internetske mreže korištenjem Internet protokola. VoIP je jedna od najbrže rastućih Internet aplikacija današnjice, a brojni parametri utječu na njezine performanse i kvalitetu usluge. Prema tvrtki Ericsson Nikola Tesla sustav VoIP primjenjuje umrežavanje komutacije paketa, gdje je govorni signal digitaliziran, komprimiran i paketiziran. Takva komprimirana digitalna poruka ne zahtijeva govorni kanal. Umjesto toga, poruka može biti poslana preko istih podatkovnih linija koje se koriste za potrebe Intraneta ili Interneta te predodređeni kanal više nije potreban.

Modeliranje i analiza performansi ima važnu ulogu u dizajniranju računalnih komunikacijskih sustava i mreža. Korištenjem dostupnih mobilnih mreža analizom je moguće utvrditi brojne različite performanse VoIP-a. Performanse VoIP-a koje se najčešće analiziraju su kapacitet (engl. *capacity*), propusnost (engl. *throughput*), kašnjenje (engl. *delay*, *latency*), gubitak paketa (engl. *packet loss*), *jitter*, pokrivenost (engl. *coverage*) i drugi. Također, moguće je promatrati različite pokazatelje koji se odnose na VoIP telefoniju, kao što su broj instaliranih VoIP mreža, broj korisnika VoIP usluga, financijska sredstva utrošena na VoIP proizvode ili kapacitet i mogućnosti VoIP proizvoda. Kao kritični parametri važni za kvalitetu usluge u literaturi se identificiraju kašnjenje, *jitter* i gubitak paketa.

Mobilne mreže koje se najčešće uzimaju u obzir kod provedbe analiza performansi VoIP-a jesu WiMAX, LTE i WLAN.

Predmetno istraživanje usmjereno je na analizu performansi VoIP-a korištenjem različitih mobilnih mreža te identifikaciju kriterija pri odabiru određene mobilne mreže (prvenstveno za potrebe usluge VoIP). Analiza performansi najčešće se provodi pomoću odgovarajuće programske podrške odnosno mrežnih simulatora. Trenutno postoji veći broj različitih mrežnih simulatora koji se razlikuju u dizajnu sučelja i načinu izvedbe, odnosno specifičnosti namjene. Korištenjem mrežnih simulatora grafičkog tipa vrlo se lako može u kratkom vremenskom periodu napraviti simulacija VoIP-a te izvesti razna popratna testiranja temeljena na mjerljivim parametrima VoIP-a, *QoS* klasama usluga i parametrima promatranih mobilnih mreža.

Svrha diplomskog rada je pregled različitih performansi VoIP-a važnih za planiranje različitih mobilnih mreža i ostvarivanje potrebne kvalitete usluga.

Cilj diplomskog rada je na temelju dostupne relevantne literature provesti analizu performansi VoIP-a primjenom različitih mobilnih mreža.

Rad je podijeljen na 7 poglavlja, kako slijedi:

1. Uvod,
2. Pregled dosadašnjih istraživanja,
3. Značajke i analiza mobilnih mreža,
4. Osnovne značajke i razvoj VoIP-a,
5. Identifikacija relevantnih parametara VoIP-a,

6. Analiza performansi VoIP-a korištenjem mobilnih mreža WiMAX, LTE i WLAN, i
7. Zaključak.

Uvodno poglavlje daje osnovnu sliku o radu te definira cilj i strukturu rada.

U drugom poglavlju dan je kratak pregled objavljenih istraživanja i radova koji su korišteni u ovom radu, kako bi se naglasila njihova nepovezanost u pogledu teme VoIP- a i najboljeg načina njegove implementacije. Proučavanjem dostupne literature uočeno je da postoji velik broj radova na temu VoIP-a, ali nema rada koji se bavi analizom svih kritičnih parametara na svim mrežama koje su predmet promatranja ovog rada. Većinom se promatraju svi parametri na jednoj vrsti mreže ili samo par parametara na jednoj ili najviše dvije različite vrste mreže.

U trećem poglavlju dan je pregled značajki promatranih mreža kao i analiza tih značajki, od pregleda razvoja pojedine mreže dokumentiranog kroz standarde do analize njihovih arhitektura i načina ostvarenja.

U četvrtom i petom poglavlju prikazane su osnovne značajke VoIP-a koje su važne za ovaj rad, s posebnim naglaskom na njegove kritične parametre za *QoS*.

U šestom poglavlju kroz dostupna objavljena istraživanja i različite simulacije napravljena je analiza kritičnih parametara VoIP-a implementiranog na različitim mrežama.

U sedmom poglavlju, „Zaključku“, sintetizirane su sve informacije prikupljene i obrađene tijekom ovog rada.

Na kraju rada, nalazi se Literatura, koja daje uvid u sve studije, knjige i analitike te internetske stranice korištene pri izradi diplomskog rada.

2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Analizom dostupne relevantne literature vezane za mobilne mreže i primjenu VoIP-a utvrđen je određeni broj nepovezanih istraživanja. Velik je broj autora koji analiziraju karakteristike i namjenu mobilnih mreža (Conti, J. P., 2010., [3]; Al-Kandari, A., Al-Nasheet, M., Abdulgafer, A. R. 2014., [4]; Hwang, J., Kim, N., Ji, Y., Koh, J., 2010., [5] i drugi).

Primjetan je veći broj radova koji obrađuju problematiku različitih performansi VoIP-a, odnosno analiziraju performanse u ovisnosti o korištenju određene računalne mreže odnosno mobilne mreže (Sadiku, M.N.O., Musa, S.M.: „*Performance Analysis of Computer Networks*“, 2013., [1]). Takva istraživanja uključuju parcijalnu analizu performansi usluge VoIP korištenjem određene mobilne mreže (Qureshi, M.A., Younus, A., Saeed, M., Siddiqui, F.A., Touheed, N., Qureshi, M.S.: „*Comparative Study of VoIP over WiMAX and WiFi*“, 2011., [6]; Jadhav, S., Zhang, H., Huang, Z.: „*Performance Evaluation of Quality of VoIP in WiMAX and UMTS*“, 2011., [7]; Ali, D.M., Dimyati, K.: „*Performance Study of the WiMAX Uplink Scheduler*“, 2009., [8]) i njihovih mjerljivih parametara (Othman, H.R., Darmawaty, M. Ali, Nurul Anis Mohd, Y., Ku Siti, S., Ku Mohd, N., Azlina, I.: „*Performance Analyses of VoIP over Mobile WiMAX (IEEE 802.16e) Best-Effort Class*“, 2014., [9]; Narbutt, M., Davis, M.: „*Effect of free bandwidth on VoIP Performance in 802.11b WLAN networks*“, 2006., [10]).

Tako se u Wazwaz, A.: „*Analysis of QoS parameters of VOIP calls over Wireless Local Area Networks*“, [11], istražuju glavni čimbenici koji utiču na VoIP pozive uz pretpostavke *roaminga* i mobilnosti korisnika koji se kreću različitim brzinama u WLAN mrežama, te da udaljenost korisnika igra ulogu u kvaliteti. U istom radu se kreće od pretpostavke da udaljšavanje od pristupne točke povećava gubitke paketa. Također se kreće od pretpostavke da s povećanjem broja korisnika opada kvaliteta govora, te da se parametri poput kašnjenja povećavaju.

Autori Vanhatupa, T., Hainnikainen, M. i Hdmalainen, T.D. u svom radu „*Multihop IEEE 802.11 b WLAN Performance for VoIP*“, [12], evaluiraju performanse i mogućnosti WLAN mreže u pogledu samo MOS (engl. *Mean Opinion Score*) parametra uz podršku višestrukih skokova (multihop). U radu se analizira broj skokova kroz mrežu između VoIP pošiljatelja i primatelja te njihov utjecaj na broj poziva s prihvatljivom kvalitetom govora. Smatra se da u maloj mreži već tri skoka uzrokuju probleme poput interferencije, te da se broj skokova može smanjiti odgovarajućom infrastrukturom odnosno dodatnom podrškom u obliku pristupnih točki.

Autori Shin, S. i Schulzrinne, H. u svom radu „*Measurement and Analysis of the VoIP Capacity in IEEE 802.11 WLAN*“ iz 2009., [13], uspoređuju teoretski dobivene vrijednosti s rezultatima dobivenim simulacijom i identificiraju neke čimbenike koji su do tada u većini radova bile zanemarene prilikom mjerenja kapaciteta. Analizom VoIP kapaciteta u WLAN mreži te analizom utjecaja ostalog prometa u mreži na VoIP promet dolaze do zaključka da 802.11e standard može zaštititi VoIP promet od ostalog prometa, ali da ne može doći do poboljšanja u pogledu kapaciteta zbog retransmisija.

U navedenim radovima se promatra jedan ili više mjerljivih parametara na jednoj ili više različitih mreža, ali nije pronađen rad koji bi obuhvatio temu ovog diplomskog rada. Ako se raspravlja o više različitih mreža, tada su u pitanju dvije mreže koje se kompariraju po

jednom ili dva parametra. Ako se u radu raspravlja o više bitnih parametara, tada se radi o samo jednoj mreži.

Određeni broj radova komparira različite mobilne mreže (Krapichler, C.: „*LTE, HSPA and Mobile WiMAX - A Comparison of Technical Performance*“, 2007., [14]). Tako Al-Kandari, A., Al-Nasheet, M., Abdulgafer, A.R.: „*WiMAX vs. LTE: an Analytic Comparison*“, 2014., [4], raspravljaju o kapacitetu i efikasnosti, složenosti i području pokrivanja za obje mreže, obzirom da ti čimbenici utječu na performanse i WiMAX i LTE mreža. Cilj rada je određivanje koja mreža je budućnost bežične tehnologije kroz definiranje ključnih parametara koji određuju budućnost pojedine mreže u pogledu mogućnosti razvoja iste.

Bhandare, T. u radu „*LTE and WiMAX Comparison*“, 2009., [15], obavlja detaljnu usporedbu LTE i WiMAX mreža preko njihove arhitekture te raspravlja o integraciji ove dvije mreže u evoluiranu 3GPP mrežu. U rada je provedena i detaljna analiza zračnog radio sučelja u pogledu pristupnih modova, prijenosnog pojasa, podržanih frekvencijskih pojaseva, antenskih tehnika, protokola, antenskih mehanizama, kvalitete usluge i pitanja sigurnosti komunikacije.

Razvojem programske podrške za potrebe simulacije rada različitih mobilnih mreža i VoIP usluga ostvareno je kvalitetnije testiranje mrežnih parametara. Različiti autori analiziraju i simuliraju mobilne mreže dostupnom programskom podrškom i mrežnim simulatorima (Yang, S., Zhang, J.: „*A New Idea to Simulate Performance of VoIP Network with OPNET*“, 2010., [16]; Asheralieva, A., Khan, J.Y., Mahata, K.: „*Performance analysis of VoIP services on the LTE network*“, 2011., [17]; AlAlawi, K., Al-Aqrabi, H.: „*Quality of service evaluation of VoIP over wireless networks*“, 2015., [18]; Chu, L.: „*VoIP System Simulation Design and Implementation*“, 2012., [19], i drugi).

Najčešći simulacijski alati korišteni u radovima su komercijalni alati i većinom se svode na dva najčešća: OPNET Modeler (Riverbed) i NS-2 simulator. Ova dva alata nude velike mogućnosti analize i imaju u sebi već ugrađene scenarije koje je potrebno malo izmjeniti, što ih čini izuzetno pogodnim za ovakva istraživanja.

3 ZNAČAJKE I ANALIZA MOBILNIH MREŽA

U ovom radu se promatraju performanse VoIP-a korištenjem mobilnih mreža WLAN, LTE i WiMAX, te će se značajke mobilnih mreža ovdje promatrati kroz značajke upravo tih mreža.

Sama ideja bežičnih mreža javlja se još od otkrića elektromagnetskih valova početkom 20. stoljeća, odnosno prvih povezivanja računala u lokalne mreže sredinom istog stoljeća. Princip je vrlo jednostavan i zasniva se na ideji da računala za fizički medij komunikacije koriste zrak umjesto žice. Paketi podataka šalju se elektromagnetskim valovima u radio spektru (3 KHz - 500 GHz) ili infracrvenom spektru (500 GHz - 400 THz).

Prednost bežičnih mreža pred žičanima su vrlo očite - one su obično jednostavnije i jeftinije za implementaciju i naknadno proširenje, fizička infrastruktura je bitno manja od žičane, a održavanje je manje zahtjevno. Međutim, najveća vrijednost bežičnih mreža nije u mogućnosti zamjene žičanih mreža, već u činjenici da one predstavljaju idealno rješenje za proširenje dostupnosti postojećih žičanih mreža.

3.1 WLAN

Porast broja i funkcionalnosti elektroničkih uređaja uz stalnu tendenciju njihove međusobne komunikacije dovodi do brzog porasta broja potrebnih žica i kabela kojim se ti uređaji povezuju. Ovo je jedan od razloga nastanka bežičnih mreža. Bežična mreža je fleksibilni podatkovni komunikacijski sustav koji koristi bežični medij, kao što je tehnologija radio frekvencija, za slanje i primanje podataka zračnim putem, minimizirajući potrebu za žičnim vezama.

Najpoznatiji odgovor računalne industrije je bežični LAN (WLAN - *Wireless LAN*), koji se razvijao kroz niz standarda.

3.1.1 WLAN standardi

Prije izrade i usvajanja 802.11 standarda, nije postojala interoperabilnost niti kompatibilnost bežične opreme. Organizacija za standardizaciju na području elektronike (IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) je 26. lipnja 1997. ratificirala 802.11 standard za bežične lokalne mreže. Ovim standardom se usuglasio prijenos podataka u besplatnom radijsko - frekvencijskom spektru od 2.4 GHz i 5.1 GHz. Od tada su cijene bežičnih uređaja mnogostruko pale, a WLAN-ovi su prisutni u svakodnevnom poslovnom i privatnom životu.

Najpoznatiji standardi koji su odobreni od strane IEEE su: 802.11a, 802.11b, 802.11g i 802.11n. Standardi 802.11b i 802.11g se uglavnom koriste u Hrvatskoj dok je standard 802.11a uglavnom u upotrebi u SAD-u (SAD - *Sjedinjene Američke Države*). Osnovna razlika u standardima je u radijskoj frekvenciji na kojoj rade: 802.11a radi na frekvencijama oko 5 GHz, dok 802.11b i 802.11g rade na frekvenciji od 2,4 GHz. Propisi koji uređuju 2.4 GHz pojas su relativno konstantni, imajući u vidu duljinu vremena kroz koju se ovaj pojas koristi. Ovaj pojas je podijeljen na 14 kanala, a u upotrebi je različit broj kanala, ovisno o državi i

regulatornom tijelu. Tako je u SAD-u njihovo regulatorno tijelo (FCC - *Federal Communications Commission*) dozvolilo upotrebu 11 kanala, europsko regulatorno tijelo (ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*) je dozvolilo upotrebu 13 kanala, dok Japan dozvoljava upotrebu svih 14 kanala, uz posebnu dozvolu za upotrebu kanala 14. 802.11 podržavao je brzine od samo 2 Mbit/s, što je presporo za većinu aplikacija, te se iz tog razloga 802.11 bežični proizvodi više ne proizvode. Ovo je originalni standard, koji je kasnijim razvojem doživio preinake. Frekvencija rada ovog standarda je od 2,4 do 2,485 GHz, [25], [33], [39].

3.1.1.1 802.11b/g/n

802.11b predstavlja proširenje originalnog 802.11 standarda, koje je IEEE¹ ratificirala u rujnu 1999. Nazivna brzina prijenosa podataka kod ovog standarda je 11 Mbit/s, što je ekvivalentno tradicionalnoj Ethernet tehnologiji. 802.11b koristi isti slobodni (neregulirani) radijsko – frekventijski pojas od 2.4 GHz kao i 802.11 standard. 802.11b koristi tehniku izravnog širenja spektra, domet signala je nekoliko desetaka metara, a standard je još uvijek relativno dobro rasprostranjen. Prednosti ovog standarda ogledaju se nižoj cijeni uređaja i dobroj kvaliteti signala, dok se nedostaci ogledaju u brzini i interferenciji s drugim uređajima.

Kako ovaj standard koristi slobodni, nelicencirani ISM spektar od 2.4 GHz (ISM – *Industrial, Scientific and Medical band*), postoji čitav niz različitih uređaja koji se natječu za prostor u frekventijskom spektru. Većina njih nalazi se u domaćinstvima, od mikrovalnih pećnica do bežičnih telefona, što svakako treba uzeti u obzir prilikom dizajniranja bežične mreže jer dolazi do interferencije.

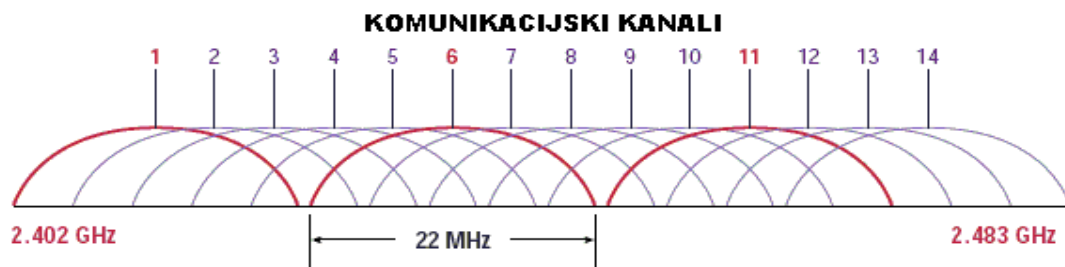
Iako je nazivna brzina korištena ovim standardom 11 Mbit/s za svaki kanal, realna brzina je otprilike dvostruko manja, stoga što je kapacitet dijeljen od svih korisnika koji koriste taj kanal, čime propusnost po korisniku pada ovisno o udaljenosti između korisnika i pristupne točke. Ovo je prikazano slikom 3.1., gdje je vidljivo da od 14 kanala, koji su definirani pomoću tehnike izravnog širenja spektra (DSSS– *Direct Sequence Spread Spectrum*), samo tri kanala (označeni crvenom bojom na slici) se međusobno ne preklapaju (kanali označeni sa 1, 6 i 11). Svaki kanal je širok 22 MHz, ali je odvajanje kanala samo 5 MHz. Ovakvo malo odvajanje kanala uvjetuje međusobno preklapanje signala od susjednih kanala, odnosno njihovu interferenciju. Kanali koji se ne preklapaju i kod kojih se ne pojavljuje interferencija udaljeni su pojasom širine 25 MHz. Ovakvo odvajanje kanala upravlja upotrebom i alokacijom kanala u bežičnim sustavima s više pristupnih točaka (kao što su uredi ili sveučilišne mreže – *campus network*²).

Pristupne točke (AP – *Access Point*) u takvim mrežama su implementirane na način kako je to uobičajeno u ćelijskim sustavima, gdje susjedne pristupne točke alociraju nepreklapajuće kanale. Alternativno, pristupne točke mogu biti ko-locirane koristeći kanale 1,

¹ Vodeća svjetska stručna udruga i najveći autoritet na širokom tehničkom području

² CAN - *Campus Area Network, Corporate Area Network*, ili *campus network* je računalna mreža sastavljena od međusobno povezanih lokalnih mreža unutar ograničenog geografskog područja.

6 i 11, kako bi isporučile brzinu od 33 Mbit/s, ali samo 11 Mbit/s pojedinom klijentu. Usporedbe radi, ako se koristi 802.11g standard na jednak način, agregirani prijenosni pojas (*bandwidth*) je veličine 162 Mbit/s, sa maksimalnom brzinom prijenosa od 54 Mbit/s, [25], [33], [39].



Slika 3.1. Komunikacijski kanali kod 802.11b standarda, [33]

802.11g standard je ratificiran 2003., te predstavlja proširenje postojećih 802.11 standarda. Kompatibilan je sa 802.11b standardom, te radi u istom frekventijskom spektru od 2.4 GHz. Podržava brzine prijenosa od 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, i 54 Mbit/s. 802.11g je danas najšire korišteni standard za bežične lokalne mreže. Na većim brzinama koristi multipleksiranje ortogonalnim razdvajanjem frekvencija (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Tablicom 1. prikazane su korištene frekvencije za 802.11b/g standard, ovisno o državi i regulatornom tijelu.

Tablica 1. Korištene frekvencije za 802.11b i 802.11g standarde

Identifikator kanala	Središnja frekvencija	FCC (SAD)	ETSI (Europa)	TELEC (Japan)	MOC (Israel Outdoor) ³
1	2412	X	X	X	
2	2417	X	X	X	
3	2422	X	X	X	
4	2427	X	X	X	
5	2432	X	X	X	X
6	2437	X	X	X	X
7	2442	X	X	X	X
8	2447	X	X	X	X
9	2452	X	X	X	X
10	2457	X	X	X	X
11	2462	X	X	X	X
12	2467		X	X	X
13	2472		X	X	X
14 ⁴	2484			X	

³ Izrael dozvoljava upotrebu kanala 1 do 13 u zatvorenim prostorima.

⁴ Japan za upotrebu kanala 14 zahtijeva posebnu dozvolu.

Izvor: [33]

3.1.1.2 Ostali 802.11 standardi

802.11a je proširenje 802.11 skupine standarda, a ratificiran je od strane IEEE 1999. Omogućuje brzine prijenosa do 54 Mbit/s, a radi u frekvencijskom području od 5 GHz (u rasponu frekvencija od 5,15 do 5,72 GHz). To ovom standardu omogućuje imunost na interferenciju od strane uređaja koji rade u 2.4 GHz pojasu, kao što su mikrovalne pećnice, bežični telefoni i ostali uređaji. Međutim, to također znači da ovaj standard nije kompatibilan sa 802.11b ili 802.11 g standardom.

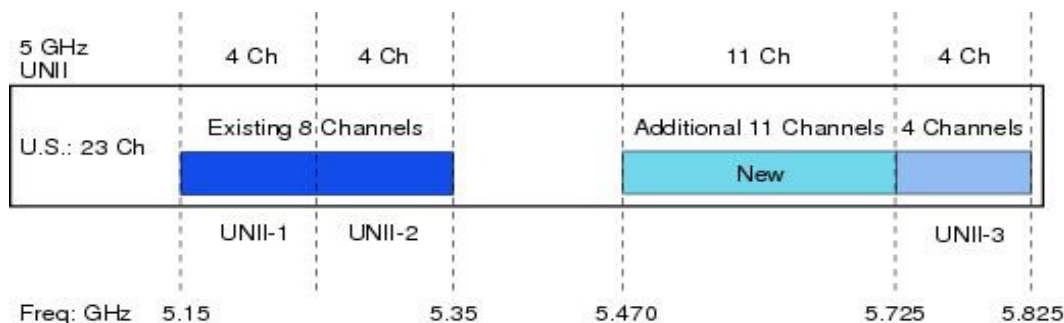
802.11a osigurava brzine prijenosa od 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, do maksimalno 54 Mbit/s, iako na kraćem dometu. Međutim, ovaj standard osigurava 23 nepreklapajuća kanala, što je prednost u odnosu na samo tri takva kanala kod 802.11b/g. Rezultat toga je povećan mrežni kapacitet, poboljšana skalabilnost mreže, mogućnost mikroćelijske implementacije, bez interferencije sa susjednim ćelijama, [33].

5 GHz pojas u kojem radi 802.11a podijeljen je na nekoliko različitih dijelova. Svaki od nelicenciranih pojaseva (UNII - *Unlicensed National Information Infrastructure*), prikazanih tablicom 3., početno je bio namijenjen različitim korisnicima, ali ih se sve može koristiti u zatvorenim prostorima, vodeći računa o ograničenjima jakosti signala. Inicijalno su definirana samo tri UNII pojasa (UNII-1, UNII-2, i UNII-3) od kojih je svaki imao četiri kanala, međusobno razdvojenih pojasom od 20 MHz, te širinom kanala od 20 MHz, što osigurava nepreklapajuće kanale. Za navedene UNII pojaseve postoje različita ograničenja, koja se odnose na jakost odašiljanja, dobitak antene, vrstu antene i način upotrebe. Tako je UNII-1 pojas namijenjen za upotrebu u zatvorenom prostoru, te je imao ograničenja po pitanju trajno postavljenih antena. UNII-2 pojas je namijenjen upotrebi u zatvorenim prostorima, kao i na otvorenom, dok je UNII-3 pojas namijenjen upotrebi na vanjskim otvorenim prostorima, [25], [33], [39].

U UNII-1 pojasu (5.150 do 5.250 GHz) kanali su označeni kao 36, 40, 44, i 48. U UNII-2 pojasu (5.250-5.350 GHz) kanali su označeni kao 52, 56, 60, 64 i zahtijevaju dinamičku selekciju frekvencija (DFS - *Dynamic Frequency Selection*) te kontrolu jakosti odašiljanja signala (TPC - *Transmitter Power Control*). 2011. Napravljena je revizija ovog pojasa, te je postojećim 23 kanala dodano novih 11 kanala. U novom frekvencijskom pojasu (5.470-5.725 GHz) kanali su označeni sa 100, 104, 108, 112, 116, 120, 124, 128, 132, 136, i 140, te također zahtijevaju DFS i TPC, kako bi se izbjegla interferencija sa radarskim signalom, koji radi u ovom frekvencijskom području. U UNII-3 pojasu (5.725-5.825 GHz) kanali su označeni sa 149, 153, 157, 161, 165, te ne zahtijevaju DFS i TPC. Međutim, unutar regulatornih domena ne mogu se koristiti svi kanali. Navedeni kanali, ovisno o UNII pojasu prikazani su slikom 3.2.

IEEE 802.11a definira zahtjeve u pogledu fizičkog sloja mreže, jer koristi OFDM, koji je u svojoj osnovi sustav višestrukih nositelja (*multi-carrier system*), dok su u prijašnjim standardima definirani sustavi sa jednim nositeljem (*single carrier systems*). OFDM ima glavnu značajku podkanalizaciju (koja će biti detaljnije objašnjena u poglavlju o WiMAX-u),

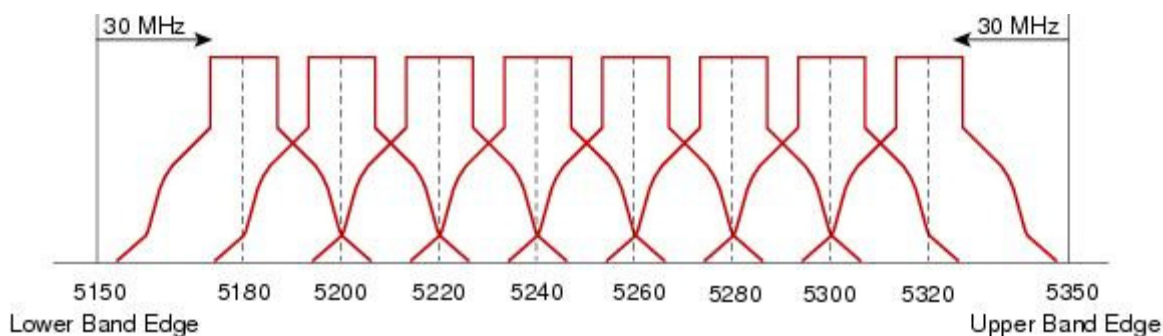
te dozvoljava preklapanje podkanala, osiguravajući visoku spektralnu efikasnost. OFDM je efikasnija tehnika od DSSS.a, [25], [33], [39].



Slika 3.2. 802.11a kapacitet kanala, [33]

Na slici 3.3 prikazan je primjer ostvarenja kanala kod 802.11a standarda, gdje je vidljiva središnja frekvencija kanala. Širina svakog kanala je 20 MHz, odnosno 10 MHz sa svake strane središnje linije, dok je razdvajanje kanala 5 MHz. Ortogonalno razdvajanje frekvencija je ono što OFDM čini izuzetno efikasnom tehnikom, [18,4,12].

802.11n je standard koji treba omogućiti brzine prijenosa do 600 Mbit/s, a radi u oba pojasa, iako je podrška za 5 GHz pojas opcionalna. Ratificiran je 2009. Glavni razlog razvoja ovog amandmana na 802.11 standarde je definiranje i upotreba tehnologije višestrukih antena (MIMO – *Multiple In Multiple Out*)⁵, kako bi se povećala propusnost, povećanje sigurnosti te agregacija okvira. Kanali su kod ovog standarda širine 40 MHz, [25], [33], [39].



Slika 3.3. 802.11a primjer kanala, [33]

802.11p predstavlja proširenje 802.11 u pogledu omogućavanja bežičnog pristupa u vozačkom okruženju (WAVE - *Wireless Access In Vehicular Environments*). Definiraju se poboljšanja potrebna za podršku aplikacijama inteligentnih transportnih sustava (ITS - *Intelligent Transportation Systems*). To uključuje mogućnost razmjene podataka između vozila, te između vozila i fiksne infrastrukture, u licenciranom frekvencijskom spektru od 5.9 GHz (5.85-5.925 GHz), sa dozvoljenim razdvajanjem kanala od 5MHz, 10MHz i 20MHz, [24], [25], [26].

⁵ Omogućuje znatna poboljšanja u propusnosti i dometu bez potrebe za povećanjem frekvencijskog opsega ili odašiljačke snage. Ova tehnologija općenito povećava ukupnu učinkovitost bežičnih komunikacijskih sustava.

802.11d je nadogradnja standarda na MAC sloju 802.11 standarda, čiji je cilj da pristupne točke mogu međusobno razmjenjivati podatke o slobodnim komunikacijskim kanalima s dovoljno snažnim signalom, a da istovremeno ne rasipaju energiju. Stoga što je 802.11 standard ograničen u nekim zemljama, ova nadopuna omogućava korištenje bežičnih uređaja i u tim područjima, prilagođavanjem legislative, [25], [33], [39].

Standard 802.11e je nadogradnja na 802.11 standard, s time da zadržava kompatibilnost s 802.11b i 802.11a standardom. Poboljšanja uključuju implementaciju kvalitete usluge (QoS – *Quality of Service*) za prijenos multimedijalnih sadržaja te poboljšanja na području sigurnosti. Ovo znači da pružatelj usluga korištenjem ovog standarda može korisniku ponuditi korištenje tehnologija tipa: video na zahtjev, audio na zahtjev, brzi pristup Internetu te korištenje usluge prijenosa govora preko internetskog protokola (VoIP – *Voice over IP*) usluga. QoS ključna je tehnologija ugrađena u 802.11e standard jer omogućava funkcionalnost vremenski kritičnih aplikacija. QoS uključuje kontrolu zastoja, modeliranje prometa te kreiranje rasporeda korištenja komunikacijskog kanala, što znači da se ovisno o tipu podataka određuje prioritet korištenja komunikacijskog kanala, [25], [33], [39].

U tablici 2 dan je prikaz 802.11 standarda i njihovih značajki.

Tablica 2. 802.11 standardi

Naziv	Datum	Frekvencija	Propusni pojas	Brzina prijenosa podataka	Modulacija	Doseg	
						Zatvoreni prostor	Otvoreni prostor
		(GHz)	(MHz)	(Mbit/s)		(m)	(m)
802.11-1997	1997	2.4	22	1, 2	DSSS, FHSS	20	100
a	1999	5	20	6 - 54	OFDM	35	120
		3.7				—	5,000
b	1999	2.4	22	1 - 11	DSSS	35	140
g	2003	2.4	20	6 - 54	OFDM, DSSS	38	140
n	2009	2.4/5	20	7.2-72.2	OFDM	70	250
			40	15 - 150		70	250
ac	2013	5	20	7.2 – 87,7		35	
			40	15 - 200		35	
			80	32.5– 433,3		35	
			160	65 – 866,7		35	
ad	2012	60	2,160	Do 6912	OFDM	60	100
ah	2016	0.9					
aj	2016	45/60					
ax	2019	2.4/5			MIMO-OFDM		
ay	2017	60	8000	Do 100 Gbit/s	OFDM	60	1000

Izvor: [51]

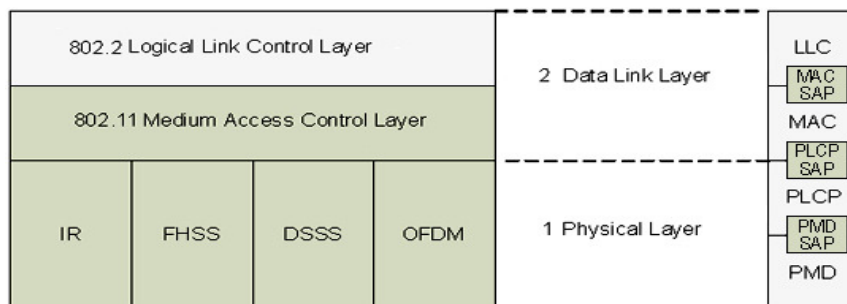
Svrha 802.11f standarda je postizanje međusobne interoperabilnosti između uređaja različitih proizvođača. Ovaj standard određuje način na koji se pristupne točke registriraju unutar mreže te način na koji pristupne točke različitih proizvođača razmjenjuje podatke o korisniku koji prilikom korištenja istih prelazi s područja pokrivenosti jednog u područje pokrivenosti drugog (*roaming*), [25], [33], [39].

Cilj 802.11h standarda je zadovoljenje europske regulative o dozvoljenim snagama odašiljanja u frekventijskom spektru od 5 GHz. Uređaji koji podržavaju ovaj standard moraju imati mogućnost reguliranja izlazne snage, TPC, i mogućnost dinamičkog odabira frekvencija, DFS. TPC određuje najmanju količinu potrebne snage za emitiranje signala, a da bi signal stigao do najudaljenijeg korisnika. Nakon toga, DFS odabire radijski kanal na pristupnoj točki ne bi li se mogućnost međusobne interferencije s drugim sustavima svela na najmanju moguću mjeru, [33].

Ključni element poboljšanja MAC sloja i sigurnosti, te alternativa WEP načinu zaštite (WEP - *Wired Equivalent Privacy*)⁶ je ovaj standard. Mnogi proizvođači isporučuju svoje proizvode bez postavljanja ikakvih zaštita. Korisnik počinje koristiti nesiguran proizvod, bez enkripcije, a mnogi korisnici ni ne znaju kako implementirati najosnovnije mjere sigurnosti. 802.11i standard bi trebao omogućiti nivo sigurnosti koji bi podržavao rješenja koja bi uključivala protokol privremenog ključa kontrole integriteta (TKIP - *Temporal Key Integrity Protocol*), u kombinaciji s naprednim standardima enkripcije. Korporativne mreže, koje su doslovce stalno u razvoju, moraju integrirati standarde enkripcijskih modulacijskih tehnika koje omogućavaju viši stupanj zaštite integriteta podataka prilikom bežičnih komunikacija, [25], [33].

3.1.2 Područje definiranja WLAN standarda

802.11 standard definira podsloj kontrole pristupa mediju (MAC – *Medium Access Control*), MAC servise i protokole te četiri fizička sloja, kako je prikazano slikom 3.4. Četiri fizička sloja unutar 802.11 standarda uključuju: infracrveni frekventijski pojas (IR – *Infra Red*) – zbog prirode tehnologije (nužnosti direktne optičke vidljivosti između uređaja), vrlo je malo ulagano u razvoj infracrvenog fizičkog sloja, prošireni spektar skakanjem frekvencija (FHSS – *Frequency Hopping Spread Spectrum*), prošireni spektar izravnim širenjem spektra (DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*), OFDM.



Slika 3.4. 802.11 područje definiranja, [31]

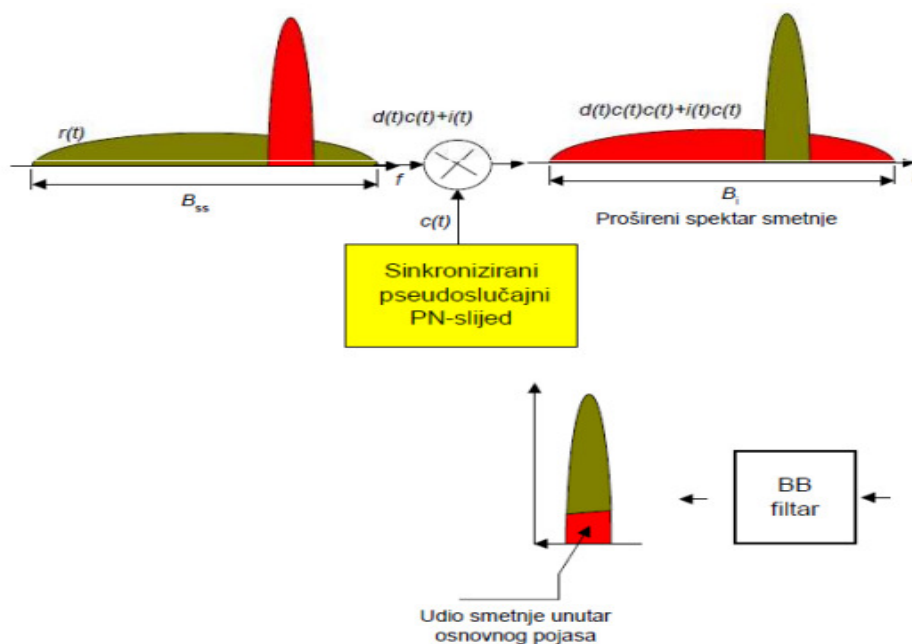
⁶ Algoritam za sigurnu komunikaciju putem IEEE 802.11 bežičnih mreža.

3.1.2.1 Tehnika proširenog spektra

Spread Spectrum tehnika se ostvaruje s korištenjem pseudoslučajnog niza (PN - *Pseudo Noise*) koji je binarni niz te ima valni oblik sličan šumu. Ako se korisni signal pomnoži s pseudoslučajnim nizom doći će, prema [28], do slijedećeg:

- proširenja spektra snage signala na šire frekvencijsko područje od njegovog osnovnog pojasa, i
- signal će poprimiti valni oblik šuma.

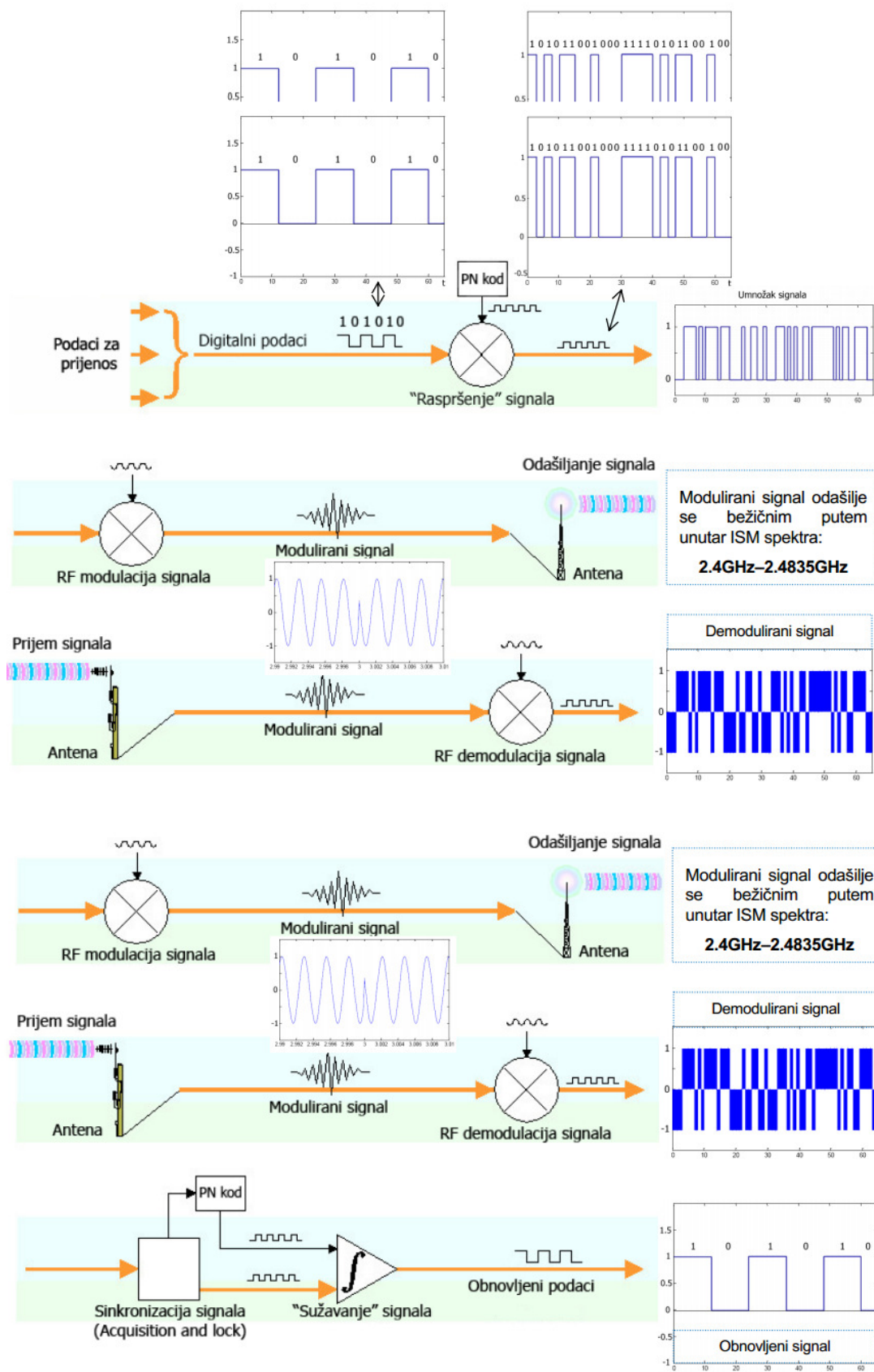
Korisni signal se prilikom prijenosa skriva unutar šuma komunikacijskog kanala. Prošireni korisni signal sažima se na prijašnju širinu pojasa, dok se sve smetnje (posebno neuskopojasne) proširuju. Na ovaj se način smanjuje gustoća spektra snage smetajućeg signala u osnovnom pojasu, te poslije filtriranja od smetnje ostaje samo mali šum. Na prijemnoj strani signal se sažima te dekodira pomoću već prije poznatog PN signala. Slikom 3.5 prikazana je obrada signala u prijemniku. U osnovi se ovom tehnikom "širi" uskopojasni signal na spektar prijenosnog kanala koji omogućuje prijemniku da dobije jači i lakše prepoznatljiv signal. Drugi prijemnici koji nisu podešeni na prijemnu sekvencu, koja je poznata samo predajniku i ciljnom prijemniku, primljene signale interpretirat će kao šum, [28].



Slika 3.5. Obrada signala u prijemniku, [46]

Dva su osnovna principa koja se primjenjuju u proširenom spektru: DSSS i FHSS. Kod DSSS-a se širenje prijenosnog pojasa provodi prije modulacije, dok se kod FHSS-a širenje provodi zajedno s modulacijom, [46].

Kod DSSS-a se signal koji se prenosi prvo množi s pseudo slučajnim signalom (PN) veće frekvencije i na taj način mu se spektar snage "proširuje" na šire frekvencijsko područje. Slikom 3.6 prikazana je DSSS tehnika, [46].

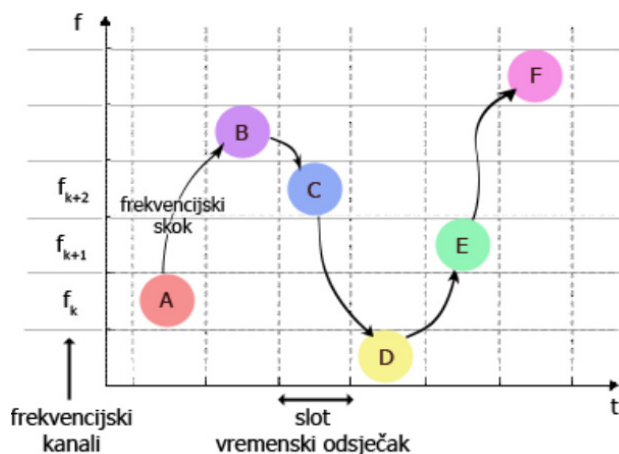


Slika 3.6. DSSS tehnika, [32]

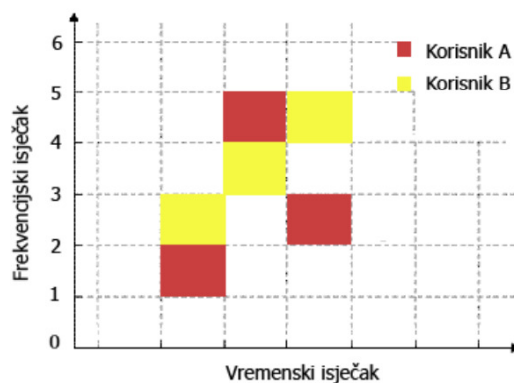
Nakon proširivanja, signal se modulira nekom standardnom modulacijskom tehnikom i prenosi kroz bežični prijenosni medij. Kada prijemnik primi modulirani signal, on se demodulira i na izlazu iz demodulatora se takav prošireni signal množi s lokalno generiranim pseudo slučajnim signalom (prijemnik ima lokalni oscilator) koreliranim s PN signalom korištenim kod predajnika. Time se signal "užava" i dobiva se originalni signal. Kod IEEE 802.11 pseudo slučajni kod zove se *chip* ili *chipping code*. Kod DSSS-a moguće su brzine prijenosa podataka do 1,2,5.5 i 11Mbit/s, [32], [39].

Kod FHSS modulacije definiraju se frekvencijski skokovi unutar spektra. Skokovi su ekstremno brze promjene frekvencija na kojima se prenose podaci. Promjenama frekvencije upravlja neki kod, najčešće PN-slijed. Način rada je takav da predajnik šalje kratke nizove podataka na jednoj frekvenciji neko vrijeme, a potom se prebacuje na drugu frekvenciju. Predajnik i prijemnik moraju biti sinkronizirani prema slijedu preskakivanja jer bi moglo doći do gubitka podataka. Kod IEEE 802.11b inačice standarda, frekvencije se mijenjaju do 1600 puta u sekundi. Cijeli frekvencijski pojas na 2.4 GHz dijeli se na 79 neprekrivajućih podkanala pri čemu je širina svakog kanala 1 MHz. Vremenski intervali za vrijeme kojih se u određenom kanalu nalazi podatak naziva se *time slot* i traje minimalno 625 mikrosekundi. Ako se pojavi interferencija na jednoj frekvenciji, podaci se ponovo šalju prelaženjem na drugu frekvenciju. Stalnim mijenjanjem frekvencije FHSS postiže visoki stupanj sigurnosti prijenosa, kako je prikazano slikom 3.7. Time se omogućava rad više različitih radijskih mreža unutar istog područja, ali bez nepoželjnih međudjelovanja. FHSS omogućava brzine prijenosa do 1-2 Mbps. Neke od prednosti FHSS tehnike su: smanjene uskopojasne smetnje (*narrowband interference*), povećan kapacitet signala, [32].

Na slici 3.8 prikazan je primjer FHSS-a u slučaju da u sustavu postoji dva korisnika. Radna frekvencija svakoga komunikacijskog kanala mijenja se po drugom kodu. Potrebno je sinkrono skakanje radne frekvencije predajnika i prijamnika po istom kodu. Ortogonalni kodovi nikad ne koriste iste frekvencije u isto vrijeme, [32], [46].

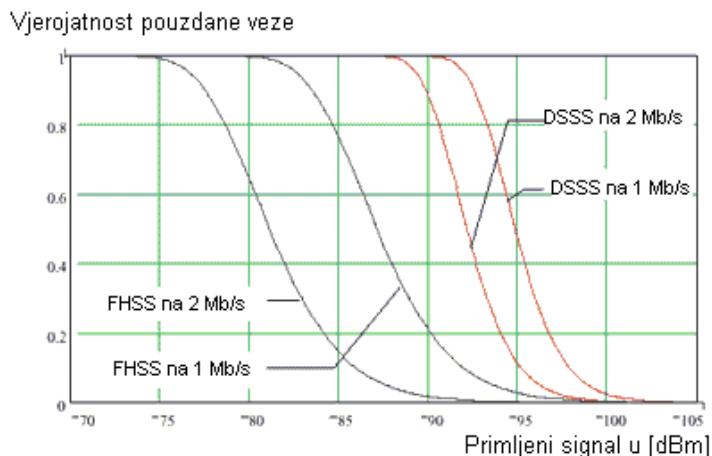


Slika 3.7. FHSS – frekvencijski skokovi, [32]



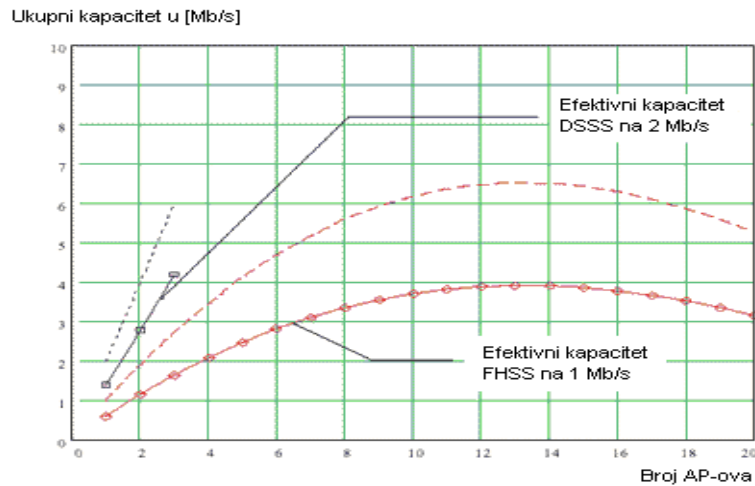
Slika 3.8. FHSS s dva korisnika, [32]

Usporede li se FHSS i DSSS mogu se uvidjeti prednosti DSSS-a: DSSS modulacija mnogo je robustnija, ima veći doseg pokrivenosti, čak i kada radi s pola izlazne snage u odnosu na FHSS modulaciju. Iako skakanje po kanalima koje koristi FHSS nudi više iskoristivih frekvencija, postoji povećana mogućnost smetnji ukoliko se koristi više uređaja na nekom prostoru, a koji koriste ovu modulaciju. S druge strane, kako FHSS modulacija nije toliko raspršena, može se koristiti u uvjetima u kojima postoji puno smetnji u komunikacijskom kanalu. Snaga FHSS moduliranog signala koncentrirana je u užem frekvencijskom području, što znači da je amplituda signala veća, a samim time je i mogućnost penetracije kroz smetnje veća. Još jedna prednost FHSS modulacije je u samoj njenoj prirodi: mogućnost kolizije je manja, [32], [38]. Ipak, te prednosti bivaju umanjene činjenicom da DSSS može raditi na puno većim udaljenostima, kao što se vidi na slici 3.9.



Slika 3.9. Usporedba DSSS i FHSS, [38]

Još jedna prednost DSSS-a je njena efikasnost. DSSS-om je moguće dobiti bolju iskoristivost s manjim brojem bežičnih pristupnih točaka, a opet DSSS omogućuje korištenje većeg broja pristupnih točaka za potpuno iskorištenje kapaciteta bez međusobnog generiranja smetnji, kao što se vidi na slici 3.10. (točkasta linija predstavlja ukupan kapacitet, pune linije predstavljaju efektivnu propusnost mreže za vrstu modulacije). Razlika između ukupnog i efektivnog kapaciteta javlja se zbog potrebe za ponavljanjem prijenosa, kolizija prilikom prijenosa, i sl., [38].



Slika 3.10. Ukupni kapacitet ovisno o broju pristupnih točaka, [38]

Spread spectrum modulacijske tehnike, prema [32], [39], imaju slijedeće značajke:

- omogućuju da više korisnika istovremeno dijeli isti frekvencijski opseg bez međusobne interferencije,
- koriste širi frekvencijski pojas za prijenos signala, ali i manje snage nego što to rade tradicionalne modulacijske tehnike,
- trebaju manju potrebnu snagu za prijenos signala,
- pružaju otpornost na smetnje od drugih izvora, i
- pružaju otpornost na višestazno prostiranje i iščezavanje signala.

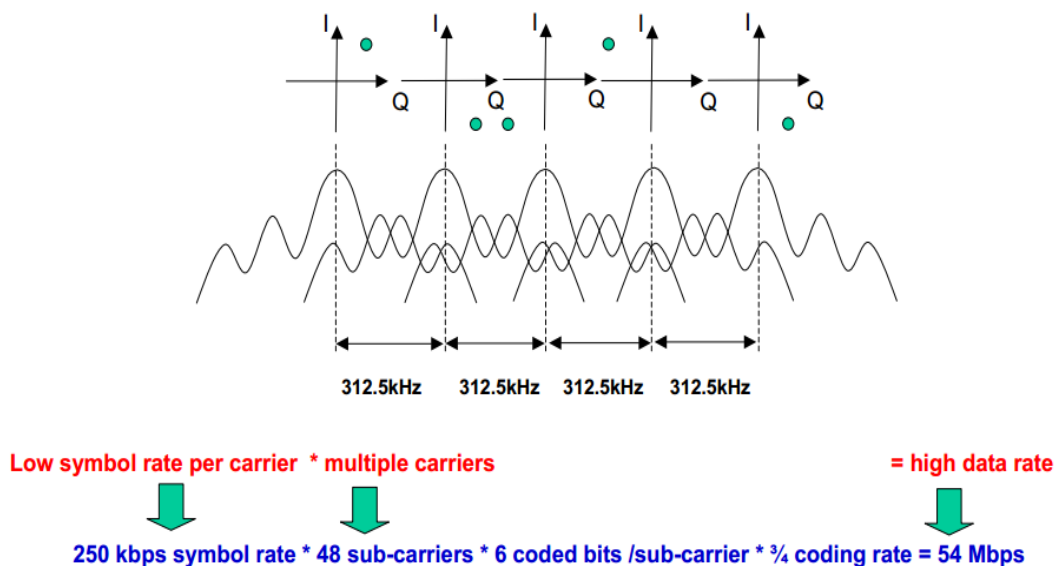
3.1.2.2 OFDM

OFDM koristi višestruke pod-nositelje, koji su smješteni jedan blizu drugoga bez uzrokovanja interferencije. Zaštitni pojas je ovdje maknut što je moguće radi toga jer su frekvencije pod-nositelja ortogonalne što znači da vrh jednog koincidira sa nulom od sljedećeg.

Kod OFDM-a podatkovni tok koji zahtjeva velike brzine prijenosa se dijeli u više paralelnih podatkovnih tokova niže brzine prijenosa, a svaki od njih se mapira na pojedini pod-nositelj i modulira. OFDM zahtjeva manje prijenosnog kapaciteta od FDM-a i ima visoku spektralnu efikasnost. Također je pogodniji za NLOS okruženja. Efekt poznat kao ISI (*Inter Symbol Interference*) se potiskuje dužim periodom simbola paralelnih pod-nositelja i uporabom cikličkog prefiksa (CP - *Cyclic Prefix*). Više istovremenskih korisnika upotrebljavaju odvojene potkanale (o kojima će biti riječ u nastavku rada) za višestruki istovremeni pristup što osigurava: bolji kapacitet, bolju podršku za raspoređivanje kapaciteta i QoS, smanjenu interferenciju (nema unutar ćelijske interferencije), dobitak kapaciteta linka, fleksibilnu podkanalizaciju koja se ostvaruje pseudo slučajnom permutacijom (PUSC - *Pseudo-random permutation*) i AMC (AMC – *Contiguous Assignment*) načina dodjele kako bi se omogućilo *beamforming*, skalabilnu strukturu koja podržava varijabilne prijenosne opsege, [40].

OFDM koristi višestruke pod-nositelje koji su smješteni blizu jedan drugom, ali se grupiraju. Svaka takva grupa se naziva podkanal. Oni nositelji koji čine podkanal ne moraju

biti susjedi. Podkanalizacija definira podkanale koji se mogu alocirati od strane jednog korisnika, ovisno o stanju kanala i podatkovnim zahtjevima. Pomoću podkanalizacije unutar istog vremenskog slota može se alocirati više snage za korisnika sa nižom stopom šuma (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*), kao i manje snage za korisnika sa većim SNR. Na slici ispod je prikazan način rada OFDM-a, [40].



Slika 3.11. OFDM, [40]

Četiri podnositelja sustav koristi kao referencu kojom se služi kako bi nadišao pomake u frekvenciji ili u fazi tijekom prijenosa. U 802.11a standardu, pseudo-binarna sekvenca poslana je kroz noseće potkanale kako bi spriječila nastanak spektralnih linija. Ostalih 48 kanala pružaju odvojene putove kroz koje se mogu slati informacije u paralelnom načinu rada. Rezultirajuća frekvencija podnosećeg signala je 0,3125 Mhz (u spektru od 20 MHz, daje mogućnost 64 podnositeljska kanala).

Fizički sloj OFDM-a se sastoji od dvije protokolske funkcije; prva je konvergencijska funkcija, koja prilagođava mogućnosti fizičkog medija potrebama fizičkog sloja. Druga funkcija definira karakteristike i metode prijenosa i prijama podataka kroz bežični medij između dviju ili više stanica koje koriste OFDM sustav prijenosa, [32], [38], [40].

3.1.3 Arhitektura WLAN tehnologije

Arhitekturu ovih mreža najlakše je opisati kao skup međusobno povezanih ćelija, koje se, prema [34], sastoje od sljedećih komponenti:

- pristupne točke (AP),
- bežičnog medija,
- distribucijskog sustava (DS - *Distribution System*),
- osnovnog skupa usluga (BSS - *Basic Service Set*)
- neovisnog osnovnog skupa usluga (IBSS - *Independent Basic Service Set*),
- proširenog skupa usluga (ESS - *Extended Service Set*), i

- klijenata (STA).

Bežični klijent sadrži karticu adapter, PC karticu ili ugrađeni uređaj koji omogućuje bežičnu povezivost. AP funkcionira kao most između bežičnog klijenta i postojeće okosnice fiksne mreže. Zajedničko funkcioniranje svih ovih čimbenika, pruža bežičnim uređajima mogućnost da lutaju kroz WLAN koristeći se svim mogućnostima kao i uređaji priključeni na fiksnu mrežu.

IBSS predstavlja bežičnu mrežu, koja se sastoji od najmanje dvije STA, koja se koristi kada nije moguć pristup distribucijskom sustavu. IBSS se također naziva ad.hoc bežičnom mrežom. Kako klijenti komuniciraju izravno, moraju biti u dometu prijenosa signala, [34].

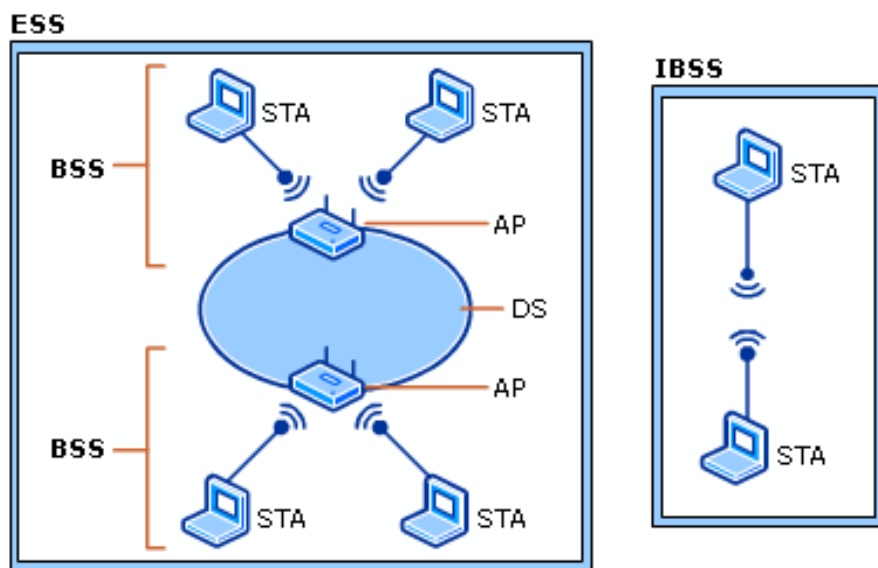
BSS je bežična mreža koja se sastoji od pristupne točke koja podržava jednog ili više bežičnih klijenata. BSS se naziva infrastrukturnom bežičnom mrežom. Svi klijenti u BSS-u komuniciraju preko AP-a. AP osigurava vezu prema žičnoj lokalnoj mreži te funkcionira kao most kada klijent pokuša komunicirati s drugim klijentom ili čvorom u DS-u.

ESS je skup od dvije ili više pristupne točke koje su povezane na istu žičnu mrežu, definirajući pojedinačni lokalni mrežni segment ograničen na jedan usmjernik (podmreža).

Pristupne točke više BSS-ova su međusobno povezane distribucijskim sustavom. Ovo omogućava određenu razinu mobilnosti jer klijenti mogu prelaziti s jednog BSS-a na drugi. AP-ovi mogu biti povezani žično ili bežično, ali su u pravilu povzani žično.

DS je logička komponenta koja međusobno povezuje BSS-ove, a osigurava distribucijske usluge kako bi se omogućio roaming klijenata između BSS-ova, [34].

Na slici 3.12 prikazana je 802.11 arhitektura.



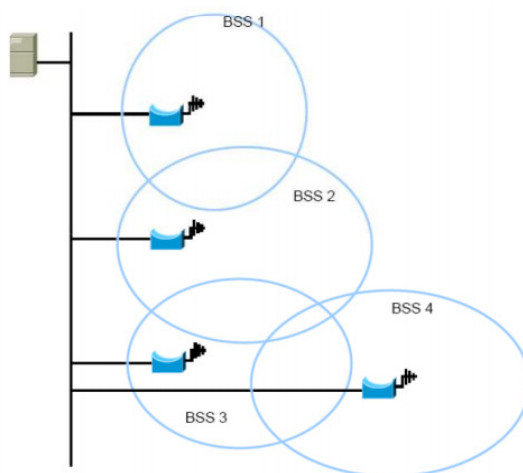
Slika 3.12. 802.11 arhitektura, [34]

3.1.4 WLAN topologije

Moguće su dvije osnovne topologije kod WLAN mreža: ad.hoc i infrastrukturna topologija.

Neovisna ili ad-hoc topologija omogućuje međusobno povezivanje stanica gdje pokretni čvorovi izravno komuniciraju jedni s drugima koristeći bežične adaptere. Takva je topologija pogodna za brzu i jednostavnu implementaciju prema potrebi. WLAN korisnik će koristiti ad.hoc topologiju kada želi napraviti mrežu bez bilo kakve infrastrukture. Nedostatak ad.hoc topologije je to što svi sudionici moraju biti međusobno u dometu radio signala. Ako se želi povećati domet radio signala tada se koristi infrastrukturna topologija sa središnjom pristupnom koja može udvostručiti domet prijenosa između bilo koja dva pokretna čvora, [46].

Kod infrastrukturnog BSS-a stanice komuniciraju posredstvom pristupne točke pri čemu je bitno da stanice budu u dosegu pristupne točke (dok je kod neovisnog to bilo u dosegu signala). Da bi stanica mogla komunicirati mora se prethodno spojiti na pristupnu točku. Stanica može biti istovremeno spojena na samo jednu pristupnu točku. Standard ne propisuje koliki je broj stanica koji će se spojiti na pristupnu točku, ali performanse mreže opadaju s većim brojem istovremeno spojenih stanica na samu točku. BSS-om je moguće pokriti ograničeno područje (10-20 u zgradama do 100 m na otvorenom području). Ako je potrebno napraviti mrežu koja će prekrivati veće područje, potrebno je povezati više BSS-ova odnosno više pristupnih točaka, [46]. Veći broj povezanih BSS-ova se naziva ESS, koji je prikazan slikom 3.13.



Slika 3.13. ESS, [46]

Ukoliko stanice unutar ESS-a žele komunicirati, pristupne točke moraju razmjenjivati podatke o spojenim stanicama. Ako stanica koja je spojena na AP1 želi komunicirati sa stanicom koja je spojena na AP4, AP1 mora znati da je odredišna stanica spojena na AP4. U trenutku kada AP1 primi paket od izvorišne stanice mora ga proslijediti putem žičane mreže do AP4 koja potom taj paket prosljeđuje odredišnoj stanici, [46].

AP može raditi kao bežični *hub*. Na njega se spajaju bežični klijenti, radi kao *repeater* za povećanje dometa ili kao *bridge* za spajanje dva segmenta mreže. AP može istovremeno komunicirati s 30-tak klijenata smještenih u polumjeru od oko 100 m. Kvaliteta signala koji se prenosi ovisi o: smještaju uređaja, snazi emitiranja, mogućim smetnjama izazvanim blizinom drugih uređaja koji interferiraju sa signalom emitirajući na istoj frekvenciji, [46].

3.1.5 Pokretljivost

Klijenti se mogu kretati za vrijeme dok su povezani na mrežu i tijekom kretanja mogu odašiljati podatke. Tri su moguće vrste prijelaza u mreži ili između mreža, prema [34], [46]:

- kretanje bez prijelaza, tj. zadržavanje u okviru jednog BSS,
- prijelazi između BSS segmenta ESS mreže, i
- prijelazi između različitih ESS mreža.

Ako stanica prelazi iz jednog BSS-a u drugi BSS, ali ostaje unutar istog ESS-a to se naziva mobilnost na MAC sloju. Stanice koje su spojene na distribucijski sustav nisu svjesne pozicije mobilne stanice koja se kreće unutar istog BSS-a.

Distribucijski sustav i pristupne točke vode računa o isporuci paketa prema mobilnoj stanici neovisno o njenoj poziciji u BSS-u. Mobilna stanica će mjeriti razinu signala svih pristupnih točaka koje su u dometu. Ukoliko je signal pristupne točke na koju je trenutno spojena preslab, pokreće se *handoff*. Prespajanje na drugu pristupnu točku se obavlja:

1) traženjem BSS-a, aktivno ili pasivno, a nakon završetka pretraživanja liste BSS-a odabire se onaj sa najjačim signalom. Za pravilno prekapčanje između pojedinih pristupnih točaka postoji potreba stalnog određivanja odnosa signal/šum. Ako se pretraživanjem utvrdi da jedna od susjednih pristupnih točaka nudi višu razinu signala, potrebno je postojeću vezu preusmjeriti na tu pristupnu točku,

2) autentikacijom korisnika na pristupnoj točki, što je razmjena informacija kojom stanica koja je locirala neki AP i odlučila se pridružiti njegovoj ćeliji i AP dokazuju znanje zadane lozinke, i

3) spajanjem na pristupnu točku i komunikacijom između pristupnih točaka (razmjena informacija o priključenim stanicama).

Iako 802.11 standard pokriva koncept komunikacije između AP-a i DS-a, on ne definira u potpunosti kako bi se ta komunikacija trebala odvijati, stoga što postoje mnogobrojni načini za implementaciju iste, [34], [46].

3.1.6 Rad pristupne točke

Rad pristupne točke obavlja se na nekoliko načina:

1. AP *root mode* - AP uređaj radi kao središnja pristupna točka i prima bežične klijente. Brzina prijenosa između LAN i WAN korisnika je do 800 kB/s, a između WAN i WAN korisnika do 400 kB/s.

2. AP *client mode* - AP uređaj radi kao klijent i spaja se na drugi AP uređaj, odnosno radi kao bežični adapter ("glumi bežičnu mrežnu karticu"). Dok AP uređaj radi u *client* modu ponaša se isključivo kao klijent i ne može primati ostale klijente. Brzine su: 400 kB/s kod WAN klijenata i 800 kB/s kod LAN klijenata.

3. AP *bridge mode* - AP uređaj radi kao most (*bridge*) i koristi se za spajanje dviju (*point-to-point*) ili više (*point-to-multipoint*) mreža. Dok radi u ovom modu AP uređaj ne

može primati klijente već isključivo služi za povezivanje mreža. Po jednom AP uređaju može biti do 64 računala (IP adresa). Brzine se kreću od 600 - 800 kb/s.

4. *AP repeater mode* - AP uređaj radi kao *repeater* i ponavlja signal neke druge pristupne točke u svom području. Također povezuje klijente sa svog područja u mrežu i njihov promet prosljeđuje prvom AP uređaju. Kod postavljanja AP uređaja u *repeater mode* važno je imati što bolju vezu prema AP-u čiji se promet "ponavlja". Brzina prijenosa između dvije pristupne točke u *repeater* modu je između 100- 250 kb/s, [37].

3.1.7 Skup usluga 802.11 arhitekture

U ovom skupu postoji devet različitih vrsta usluga koje pružaju potporu iz sjene. Od ovih devet, njih četiri pripadaju skupini usluga stanice, a preostalih pet u skupinu distribuiranih usluga.

3.1.7.1 Skupina usluga stanice

Ove usluge obuhvaćaju funkcionalnosti koje prema IEEE 802.3 standardu imaju žične mreže:

- autentifikaciju: definira identitet bežičnog uređaja,
- deautentifikaciju; koristi se za uništenje prethodno poznatog identiteta nekog bežičnog uređaja,
- dostavu podataka; servis koji se brine da podatkovni okviri budu preneseni od jedne MAC adrese do druge, i
- privatnost; služi za osiguranje podataka koji kruže WLAN-om. Iako koristi enkripcijsku shemu, njegova svrha nije da bude jedini način zaštite podataka, već da služi kao osnovni sigurnosni nivo, [39], [43], [46], [51].

3.1.7.2 Skupina distribuiranih usluga

Između LLC podsloja i MAC sloja, postoji pet usluga koje odlučuju o tome gdje će koji 802.11 podatkovni okvir biti proslijeđen.

Ovu skupinu čine:

- asociranje; ovu uslugu klijent koristi odmah nakon priključenja na AP, a ona kreira logičku vezu između uređaja te određuju put koji distribucijski sustav treba znati kako bi mogao kontaktirati uređaj. Jedan klijent može biti autentificiran na više AP-ova, ali može biti asociran na samo jedan,
- reasociranje; kako bi se spriječio gubitak podataka prilikom *roaminga* ili situacija kada dolazi do variranja u napajanju klijenta. U slučaju *roaminga*, ova informacija govori trenutnom AP-u na koji je prethodni AP ovaj klijent bio asociran. Takav podatak novom AP-u omogućuje da kontaktira prethodni AP i preuzme eventualne postojeće podatkovne okvire koji tom bežičnom klijentu moraju biti proslijeđeni,

- disasociranje; koristi se za prekidanje veze između AP-a i klijenta, iz razloga što je klijent izašao iz područja pokrivenosti AP-a, zbog isključivanja AP-a, ili bilo kojeg drugog razloga,

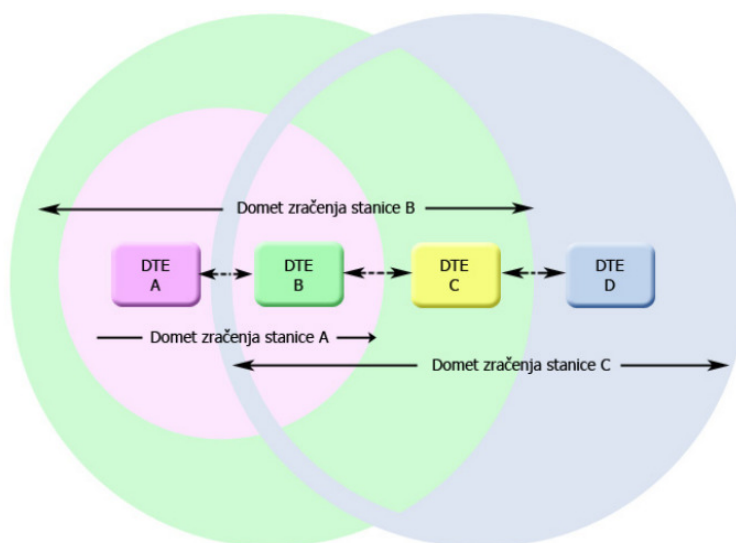
- integracija; vrši pretvorbu podatkovnih okvira 802.11 formata u format koji se koristi na žičnoj mreži na koji je bežična infrastruktura priključena, odnosno, vrši obrnutu pretvorbu; s žičnog LAN-a na WLAN, i

- distribucija; određuje hoće li neki podatkovni okvir biti proslijeđen unutar bežične mreže (drugom AP-u ili nekom bežičnom klijentu) ili će biti proslijeđen s WLAN-a na žični LAN, [39], [43], [46], [51].

3.1.8 Pristup mediju

U infrastrukturnom WLAN-u primjenjuje se centralizirani ili decentralizirani višestruki pristup mediju.

Kod decentraliziranog pristupa primjenjuje se CSMA (CSMA - *Carrier Sense Multiple Access*) protokol koji omogućuje izravno međusobno komuniciranje stanica. No, primjena osnovnog CSMA/CD protokola nije moguća zbog problema skrivene stanice. Problem skrivene stanice objasniti će se na primjeru komunikacije između stanica A i B na slici 3.14.



Slika 3.14. Problem skrivene stanice, [32]

Neka stanica A šalje okvir stanici B. U tom vremenskom intervalu, dok stanica B prima okvir, stanica C koja se ne nalazi u području pokrivenom zračenjem stanice A, zaključuje na temelju mjerenja snage signala u svom prijemniku da je medij slobodan i počinje slati okvir stanici B. Međutim, taj će se okvir u stanici B sudariti s okvirom koji je poslala stanica A. Dakle, stanica A je za stanicu C skrivena stanica.

Drugi problem koji može nastati je problem izložene stanice. Ako stanica B šalje okvir prema A, a stanica C želi slati okvir prema D. Prijemnik stanice C mjerenjem snage signala uviđa da je medij zauzet i odustaje od slanja okvira što je nepotrebno jer ne bi došlo do sudara tog okvira s okvirom kojeg šalje stanica B. Razlog je jednostavan: stanica D se nalazi izvan

područja pokrivanja stanice B. Ali ipak, okvir kojeg stanica C šalje prema D izazvao bi detekciju sudara okvira u stanici B i ona bi prestala slati (opet nepotrebno) svoj okvir prema A. Oba problema pokazuju da nema smisla koristiti CSMA/CD protokol u bežičnoj okolini. Zato je za potrebe bežičnih LAN-ova razvijen MACA protokol višestrukog pristupa mediju s izbjegavanjem sudara okvira (MACA - *Multiple Access with Collision Avoidance*) ili CSMA/CA⁷ protokol (CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

Kod centraliziranog pristupa čvorovi unutar mreže koju pokriva središnja pristupna točka (AP) ne mogu međusobno komunicirati. Izvor šalje okvir AP-u, koja onda taj okvir prosljeđuje odredištu. Na taj se način tijekom duljeg trajanja prostiranja signala, povećava kašnjenje prijenosa, [32], [34], [39].

3.1.9 Centralizirana i distribuirana arhitektura

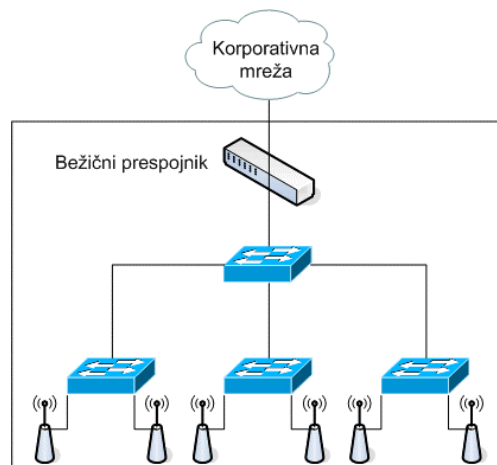
Kod distribuirane arhitekture AP-ova, AP-ovi cjelokupno okružje WLAN-a predstavljaju kao jednu cjelinu, odnosno funkcioniraju kao most između žičnog i bežičnog dijela mreže. S druge strane, tzv. *enterprise level* AP-ovi pružaju i napredne mogućnosti: konfiguracija preko WEB, telnet ili SSH sučelja, filtriranje po protokolu, filtriranje po adresama, liste kontrole pristupa, QoS, implementacija sigurnosnih protokola, i sl. Distribuirana arhitektura je prikazana na slici 3.15.



Slika 3.15. Distribuirana arhitektura, [39]

Postoje dva načina implementacije centralizirane arhitekture. Na slici 3.16. prikazana su dva nivoa prespajanja između AP-ova i bežičnog prespojnika.

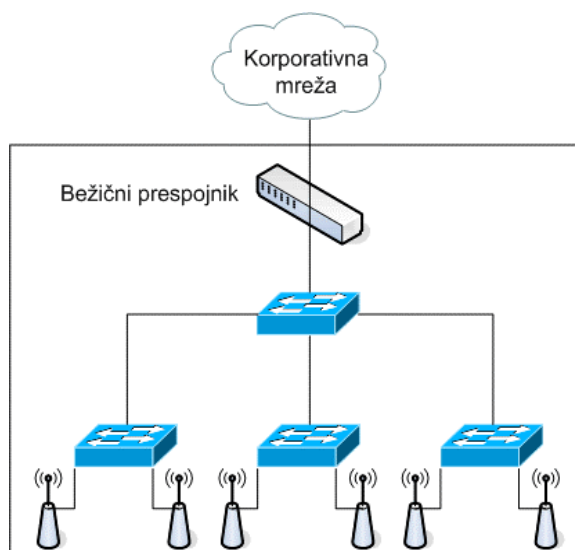
⁷ Mrežni konekcijski protokol za prijenos u mrežama koje koriste 802.11 standard. Za razliku od CSMA/CD protokola koji se bavi problemima transmisije tek nakon što se dogodi kolizija, CSMA/CA radi na način da izbjegne kolizije prije nego se one dogode.



Slika 3.16. Centralizirana arhitektura na dvije razine prospajanja, [39]

Ovakva se arhitektura koristi kada bežični prespojnik ima ograničen broj portova. Ovakav način implementacije najčešće se koristi u malim mrežama.

Kod centralizirane arhitekture (ili prospojene arhitekture) treba najmanje dva uređaja za njenu implementaciju. AP još uvijek služi kao most, dok je sva druga funkcionalnost preseljena na prespojnik WLAN-a. Odabir implementacije funkcionalnosti obično je takav da AP ima funkciju mosta, enkripcije podataka i kontrolu pristupa, dok sve ostalo preuzima prespojnik. Ovakva arhitektura znači da sav odlazni i dolazni promet prema AP-u mora proći preko prespojnika, što znači da prespojnik ima ulogu potpunog nadgledanja prometa. Centralizirana arhitektura tretira WLAN kao prespojnik na Ethernet mrežu. Ova se arhitektura obično implementira kao virtualna lokalna mreža. Ovakav način rada je nužan stoga što sav bežični promet mora proći kroz prespojnik na putu do svog krajnjeg odredišta, a i konfiguracija je na taj način neusporedivo lakša, [32], [34], [39].



Slika 3.17. Centralizirana arhitektura s prospajanjem, [39]

Neki proizvođači opreme preporučaju da bežični i žični dio mreže dijeli portove na bežičnom prespojniku. Ova arhitektura prikazana je na slici 3.17. Ovakva arhitektura omogućava veću propusnost prema WLAN-u.

3.2 WiMAX

WiMAX je akronim za "*Worldwide Interoperability for Microwave Access*". WiMAX je bežični digitalni komunikacijski sustav, poznat i kao IEEE 802.16. može omogućiti širokopojasni pristup do 50 km za fiksne uređaje i 5 - 15 km za mobilne stanice.

Mobilni WiMAX je brzo rastuća širokopojasna pristupna tehnologija bazirana na IEEE 802.16e-2005 standardu za zračno sučelje. WiMax forum razvija mobilni WiMAX sustav kako bi se mogao certificirati od strane te iste organizacije. Mobilni WiMAX nije isto što i sam IEEE 802.16e-2005. Mobile WiMAX danas je širokopojasni bežični standard koji omogućuje *Quadruple play* uslugu – prijenos podataka, govora, videa i mobilnost, koristeći jednu jedinu mrežu. Omogućuje potpunu mobilnost krajnjim korisnicima, koji sada mogu iskoristiti sve prednosti složenih internetski baziranih aplikacija dok putuju brzinama od oko 120 km/h, što ujedno znači i podršku za prekapčanje.

Iz svega navedenog je jasno da 802.16e omogućuje čvrstu mobilnost i platformu za ubrzanje konvergencije mreža i usluga.

3.2.1 WiMAX standardi

IEEE 802.16 napisan je od strane radne grupe uspostavljene od strane IEEE Odbora za standarde (*IEEE Standards Board*) 1999. Cilj uspostavljanja ove radne grupe bio je razvoj standarda za uvođenje širokopojasnih bežičnih mreža koje pokrivaju veća naseljena područja i to na globalnoj razini (*Broadband Wireless Metropolitan Area Network – Broadband WirelessMAN*).

Iako je službeni naziv 802.16 obitelji standarda WirelessMAN, komercijalni naziv pod kojim su poznati je WiMAX (WiMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access*). WiMAX je naziv koji je potekao iz druge organizacije koja je u biti industrijsko udruženje pod nazivom WiMAX Forum. WiMAX Forum je u biti neovisno tijelo koje stimulira komercijalnu upotrebu WiMAX-a. Zadatak WiMAX Forumu je promicanje i certificiranje kompatibilnosti i interoperabilnosti proizvoda za širokopojasnu bežičnu komunikaciju, koja je bazirana na IEEE 802.16 grupi standarda. WiMAX je IP bazirana, bežična širokopojasna pristupna tehnologija koja ima performanse slične onima kod 802.11/Wi-Fi mrežama sa pokrivenošću i kvalitetom usluge mobilnih mreža, [33].

Najpopularnija implementacija IEEE 802.16 standarda je upravo mobilni WirelessMAN (*Mobile WirelessMAN*) koji je prvotno definiran sa 802.16e-2005 amandmanom. Ova verzija IEEE 802.16 standarda se uvodi u praktičnu primjenu u više od 140 država svijeta od strane više od 475 operatora.

IEEE 802.16 (bivši 802.16.1) propisuje uporabu zračnog sučelja u radiofrekvencijskom spektru od 10 do 66 GHz. Usluga koja se pruža unutar navedenog radiofrekvencijskog spektra je poznata i kao usluga lokalne višeodredišne distribucije (LMDS - *Local Multipoint Distribution Service*), [34].

LMDS bežična širokopojasna pristupna tehnologija koja je izvorno osmišljena za distribuciju digitalnog televizijskog signala (DTV - *Digital Television Transmission*). Započela je kao fiksna bežična tehnologija na principu točka – više točaka (*point-to-multipoint*) kako bi se osigurao posljednji dio distribucije usluge do korisnika, izraz koji je u literaturi poznat kao „*last mile*“. LMDS uobičajeno koristi mikrovalni frekvencijske pojaseve od 26 GHz i 29 GHz, dok je u Sjedinjenim Američkim Državama u uporabi i spektar u rasponu od 31.0 do 31.3 GHz, [34].

Kod ove usluge propusnost (*Throughput capacity*) i pouzdana udaljenost linka ovise o uobičajenim ograničenjima radio signala i korištenoj modulacijskoj metodi. Kod ove usluge su se u vrijeme ovog standarda koristile amplitudna modulacija ili fazna modulacija signala. Udaljenost je ograničena na 2.4 km zahvaljujući apsorpciji odnosno degradaciji signala uzrokovanih atmosferskim uvjetima (*rain fade*), odnosno atenuacijskim ograničenjima.

IEEE 802.16 je odobren u prosincu 2001. godine krajnji rezultat je standard za višedredišnu bežičnu širokopojasnu transmisiju u radiofrekvencijskom pojasu 10 – 66 GHz, ali samo sa mogućnosti primjene u liniji vidljivosti (LOS – *Line Of Sight*), [33].

Fizički sloj (*PHY*) koristi modulaciju sa jednim nosiocem. Brzina prijenosa, trajanje i modulacija dodijeljeni su od strane bazne stanice i dijele se sa svim čvorovima u mreži. Pretplatnici ostvaruju vezu samo sa baznom stanicom na koju su spojeni i ne moraju slušati ostale čvorove u mreži, [33], [34].

Standard uključuje QPSK (QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*), 16 QAM (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*) i 64 QAM modulacijske sheme. One se mogu mijenjati od okvira do okvira, kao i od jedne do druge pretplatničke stanice, ovisno o robusnosti konekcije. Standard podržava obje dupleksne tehnike, dupleks na bazi vremenske raspodjele (TDD – *Time Division Duplex*) kao i dupleks na bazi frekvencijske raspodjele (FDD - *Frequency Division Duplex*). Ovaj standard odlikuje i bitna značajka koja omogućuje pružanje različite razine kvalitete usluge (QoS – *Quality of Service*) na podatkovnom sloju (DDL – *Data Link Layer*). NLOS je postao moguć zahvaljujući uključivanju frekvencijskog opsega ispod 11 GHz, što je proširilo geografski domet mreže. Zahvaljujući NLOS-u omogućena je i višestruka propagacija. Mogućnost rada sa višestrukom propagacijom i ublažavanjem interferencije kao što su napredno upravljanje napajanjem i tehnika adaptivnih antena uključene su u specifikaciju standarda. Opcija upotrebe OFDM-a je uključena kao alternativa modulaciji sa jednim nositeljem, [42].

Amandman na 802.16-2004, IEEE 802.16e-2005 (bivši 802.16e), koji se odnosi na mobilnost, završen je 2005. Ovime je uveden veći broj poboljšanja u odnosu na 802.16-2004, uključujući bolju podršku za osiguranje QoS-a, upotrebu skalabilne OFDMA (SOFDMA – *Scalable OFDMA*). Popularni naziv ovog standarda je “Mobile WiMAX”, [42].

QoS⁸ je u 802.16e standardu podržana pomoću alokacije svake konekcije između pretplatničkog uređaja (SS – *Subscriber Station*) i bazne stanice (BS – *Base Station*). Svaka

⁸ Postoji mnogo različitih definicija QoS-a, a ona ovisi o percepciji korisnika. Neki od najčešćih parametara koji se prate i mogu kvantificirati su kašnjenje, gubici, jitter i propusnost.

takva konekcija se naziva prometnim tokom (*service flow*). Svaki prometni tok se dodjeljuje određenoj odgovarajućoj QoS klasi. U sklopu IEEE 802.16e standarda definirano je 5 QoS klasa, kao što je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. 802.16e QoS klase

Vrsta usluge	Kratika	Definicija	Tipična primjena
Unsolicited Grant Service	UGS	Real-time prometni tokovi sastavljeni od paketa fiksne veličine koji se šalju u periodičkim intervalima	T1/E1 prijenos
Extended Real-time Polling Service	ertPS	Real-time prometni tokovi koji generiraju pakete varijabilne veličine na periodičkoj bazi	VoIP
Real-time Polling Service	rtPS	Real-time podatkovni tokovi koji se sastoje od paketa varijabilne veličine koji se šalju u periodičkim intervalima	MPEG Video
Non-real-time Polling Service	nrtPS	Podatkovni tokovi koji su tolerantni na kašnjenje i koji se sastoje od paketa varijabilne veličine koji zahtijevaju određenu minimalnu brzinu prijenosa	FTP sa zajamčenom minimalnom propusnošću
Best Effort	BE	Podatkovni tokovi za koje nema zahtjeva za uslugom određene razine i može se njima rukovati na temelju raspoloživosti kapaciteta	HTTP

Izvor: [42]

BS i SS koriste i rukuju prometnim tokom prema parametrima odgovarajuće QoS klase (neki od tih parametara su kapacitet i kašnjenje) kako bi osigurali aplikaciji odgovarajuću kvalitetu usluge.

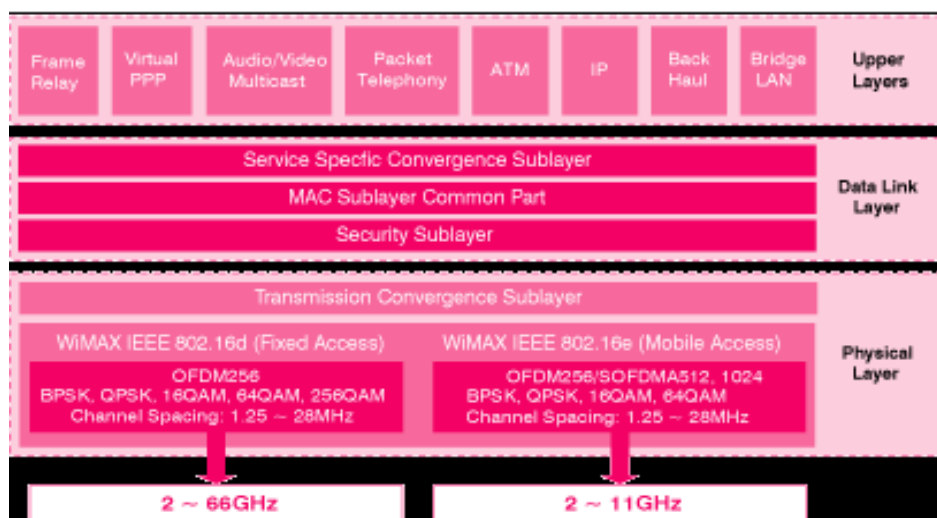
Ovaj standard uključuje poboljšanja fizičkog sloja i sloja za kontrolu pristupa mediju sa ciljem omogućavanja kombinacije fiksnih i mobilnih operacija u licenciranom prijenosnom opsegu, [42].

Kako 802.16e koristi OFDMA to znači da može poslužiti više korisnika istovremeno na način da svakom korisniku dodjeljuje set tonova (*"sets of tones"*). Optimiziran je za dinamičke mobilne radio kanale i omogućava podršku za *handoff* (*handover*, prekapčanje) i *roaming*, [42].

3.2.2 Arhitektura WiMAX tehnologije

IEEE 802.16 protokolni složaj se sastoji od četiri sloja: sloj konvergencije (*Convergence*), sloj pristupa mediju (MAC – *Media Access Layer*), sloj transmisije (*Transmission*) i fizički sloj (*physical*). Ova četiri sloja se mogu mapirati na prva dva sloja OSI⁹ modela (OSI – *Open System Interconnection*) odnosno na sloj fizičke veze i niži dio podatkovnog sloja - MAC. Na slici 3.18. je prikazan skup protokola obuhvaćen 802.16 standardom.

⁹ OSI-model ili referentni model za otvoreno povezivanje sustava je najkorišteniji apstraktni opis arhitekture mreže. Opisuje komunikaciju sklopovlja, programa, software-a i protokola pri mrežnim komunikacijama. OSI model dijeli arhitekturu mreže u sedam logičkih razina, daje spisak funkcija, servisa i protokola koji funkcioniraju na svakoj razini.



Slika 3.18. Prikaz protokolnog složaja WiMAX-a, [47]

IEEE 802.16 MAC sloj opisuje određeni broj konvergencijskih podslojeva (*Convergence Sublayers*) koji opisuju kako se žične tehnologije kao što su Ethernet¹⁰, ATM (ATM – *Asynchronous Transfer Mode*)¹¹ i IP enkapsuliraju na zračnom sučelju, kako se obavlja klasifikacija podataka i slično. Također opisuje razinu sigurnosti isporuke informacija, odnosno koji se sigurnosni ključevi i enkripcijski algoritmi koriste za vrijeme konekcije (AES ili DES - *Data Encryption Standard*). Također osigurava i mehanizme uštede energije kao i mehanizme za prekapčanje (*handover*), [47].

Jedna od bitnih značajki 802.16 standarda je ta što je to konekcijski orijentirana tehnologija što znači da se korisnička stanica (SS) ne može slati podatke dok joj bazna stanica (BS) ne dodijeli kanal. Upravo ova značajka omogućuje čvrsto osiguranje QoS-a u 802.16e standardu, [23], [41], [42].

Uloga MAC sloja se, između ostalog, sastoji i u tome da određuje koji SS može pristupiti mreži. On je, prema [41], podijeljen u tri podsloja:

- 1) podsloj konvergencije prema specifičnosti usluge (SC - *Service Specific Convergence Sublayer*),
- 2) zajednički dio MAC podsloja (MAC *Sublayer Common Part*), i
- 3) sigurnosni podsloj (*Security Sublayer*).

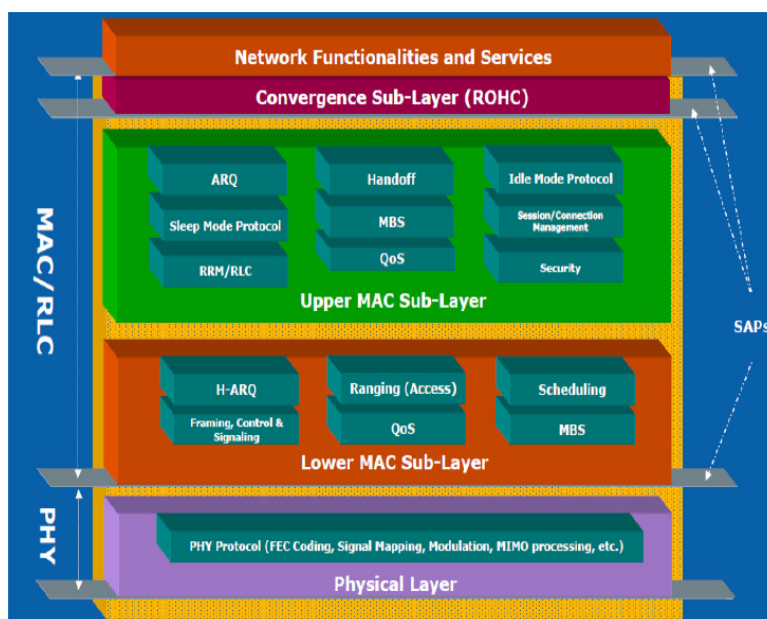
Sigurnosni podsloj je zadužen za privatnost i sigurnost konekcije. Srednji sloj je zajednički dio MAC podsloja i odgovoran je za pravilno obavljanje funkcija poput kontrole pristupa, alokacije frekvencijskog pojasa, uspostavljanje konekcije, održavanje konekcije. Unutar ovog podsloja su smješteni glavni protokoli jer za razliku od drugih 802 mreža ovdje je MAC podsloj usmjeren na uspostavljanje izravne konekcije sa ciljem osiguranja kvalitetne

¹⁰ Ethernet ili IEEE standard 802.3 je danas najčešće korištena tehnologija za lokalne mreže

¹¹ Način prijenosa koji se temelji na asinkronom vremenskom multipleksiranju. Kod ATM-a se podaci prenose u ćelijama fiksne veličine 53 byte-a.

govorne kao i multimedijalne konekcije, odnosno prijenosa informacija. Predviđeno ponašanje je takvo da bazna stanica upravlja čitavim sustavom te efikasno raspodjeljuje prometne kanale prema korisnicima, a odgovorna je i za kanale od korisnika prema baznoj stanici, [41], [42].

Podsloj konvergencije prema specifičnosti usluge preoblikuje dolazne podatke primljene od točke pristupa usluge (SAP – *Service Access Point*) u oblik MAC paketa. Ova operacija vanjske mrežne informacije preslikava (mapira) u IEEE 802.16 MAC informacije, kao što su prometni tok određene vrste usluge te identifikator konekcije (CID – *Connection Identifier*). On u biti zamjenjuje LLC podsloj koji je prisutan u drugim 802 protokolima. Zadatak mu je osiguranje sučelja prema mrežnom sloju. Ovaj podsloj je također odgovoran za zabranu ili omogućavanje QoS-a i dozvoljavanje alokacije frekvencijskog pojasa.



Slika 3.19. Protokolni složaj zračnog sučelja, [41]

IEEE 802.16 fizički sloj je odgovoran za slanje i primanje informacija, odnosno on upravlja prijenosom koji se ostvaruje klasičnim uskopojasnim radio - uređajima uz uporabu uobičajenih tehnika modulacije. Sve gore navedeno je bolje prikazano na slici 3.19.

Prema referentnom modelu uloge pojedinog sloja su slijedeće:

- 1) Podsloj konvergencije orijentiran specifičnosti usluge (CS - *Service specific convergence sublayer*):
 - a) preslikavanje vanjskim mrežnih podataka primljenih preko CS SAP u MAC SDU pakete primljenih od strane MAC CPS kroz MAC SAP,
 - b) klasifikacija vanjskih mrežnih SDU paketa i pridjeljivanje odgovarajućih MAC SFID i CID kodova, i
 - c) potiskivanje / kompresija zaglavlja (PHS - *Payload header suppression/compression*).

- 2) Podsloj MAC zajedničkog dijela (MAC CPS - *MAC common part sublayer*)
 - a) temeljne MAC funkcionalnosti pristupa sustavu (*idle/sleep/active* modovi protokola),
 - b) uspostava i održavanje konekcije,
 - c) osnovna konekcija za prijenos vremenski osjetljivih MAC poruka,
 - d) primarno upravljanje konekcijom za prijenos MAC poruka koje su tolerantne na kašnjenje,
 - e) sekundarno upravljanje konekcijom za prijenos poruka generiranih od strane protokola kao što su DHCP (*DHCP – Dynamic Host Configuration Protocol*),
 - f) transportne konekcije za prijenos prometa generiranog od strane raznih usluga (podaci, govor i slično),
 - g) kvaliteta usluge (QoS),
 - h) raspoređivanje korisnika za DL i UL, i
 - i) kontrola i signalizacija.
- 3) Podsloj sigurnosti (*Security sublayer*)
 - a) autentikacija (korisnička autentikacija je dio temeljne mrežne usluge), i
 - b) razmjena sigurnosnih ključeva i enkripcija.
- 4) Sloj fizičke veze (*Physical layer*) - Funkcije i protokoli fizičkog sloja

Kod ove arhitekture moguća su dva scenarija izvedbe:

- Točka – točka (*point-to-point*), i
- Točka – više točki (*point-to-multipoint*).

Ukoliko se radi o prvoj izvedbi ona se koristi u slučaju kada postoje jedan pošiljatelj i jedan primatelj, dok kod druge izvedbe postoji jedan pošiljatelj i više primatelja. Point to point je mogući scenarij za posrednički transmisijski sustav, "*backhaul*", ili za prijenos podatak od izvora (koji može biti podatkovni centar, središnji ured, i slično) do pretplatnika ili točke distribucije koja dalje koristi drugu izvedbu prema više primatelja. Kako arhitektura mreže zahtjeva izrazito fokusiranu zraku (signal) između dvije točke, tako domet signala i propusnost će biti veća u izvedbi točka-točka, [42].

Arhitektura mreže sastoji se od dvije glavne komponente:

- baznih stanica, i
- pretplatničkih uređaja koji se zajedno nazivaju korisnička oprema (*CPE - Customer Premises Equipment*).

Bazna stanica osigurava konekciju sa jezgrom mreže, dok pretplatnička stanica može biti montirana na krovu ili zidu kao pretplatnička oprema ili može biti zaseban uređaj poput mobilnog telekomunikacijskog uređaja. U slučaju da se radi o vanjskoj pretplatničkoj opremi, korisnici unutar zgrade su spojeni na konvencionalnu mrežu poput Ethernet mreže (IEEE

802.3 LAN) ili bežičnog LAN-a (IEEE 802.11b/g WAN) koji imaju pristup na CPE. Bazna stanica tipično sadrži jednu ili više široko-emisionih antena koje mogu biti podijeljene u nekoliko manjih sektora, gdje suma svih sektora čini pokrivenost od 360°. CPE, sadrži visoko usmjerene antene koje su usmjerene prema baznoj stanici. Zavisno od potrebe, IEEE 802.16 mreža može biti postavljena u različitim formama, [40].

Arhitektura i upotreba WiMAX-a razvijala se u dva pravca, počelo je s fiksnim pristupom koji je evoluirao do pune mobilnosti. Okvir kojim su dane smjernice za razvoj ove arhitekture (*framework*) baziran je, prema [34], na sljedećim značajkama:

- podrška za različite RAN topologije,
- dobro definirano sučelje ima svrhu osiguravanja neovisnosti 802.16 RAN arhitekture, a ujedno omogućava integraciju i umrežavanje (*interworking*) sa WiFi, 3GPP i 3GPP2 mrežama,
- podrška za IPv4 i IPv6,
- podrška budućih pravaca razvoja prema punoj mobilnosti i širokopojasnoj multimediji
- primjenjivost na licencirane i nelicencirane 802.16 pravce razvoja,
- pogodna za prilagođavanje svim dosadašnjim tipovima operatora,
- prikladna je za integraciju sa postojećim IP operatorima (DSL, kablovski pristup ili 3G) pomoću IP baziranog sučelja kao što je prikazano na slici 15.,
- prilagođava se *online* i *offline* korisničkim zahtjevima,
- podržava široki opseg TCP (TCP – *Transport Control Protocol*) i UDP (UDP – *User Datagram Protocol*) aplikacija bilo da imaju stvarnovremenska obilježja ili ne, i
- čvrsta dvostrana korisnička autentikacija bazirana na mehanizmima poput korisničkog imena/lozinke, X.509 certifikacije, pretplatničkog identifikacijskog modula (SIM – *Subscriber Identification Module*), univerzalnog SIM-a (USIM – *Universal SIM*).

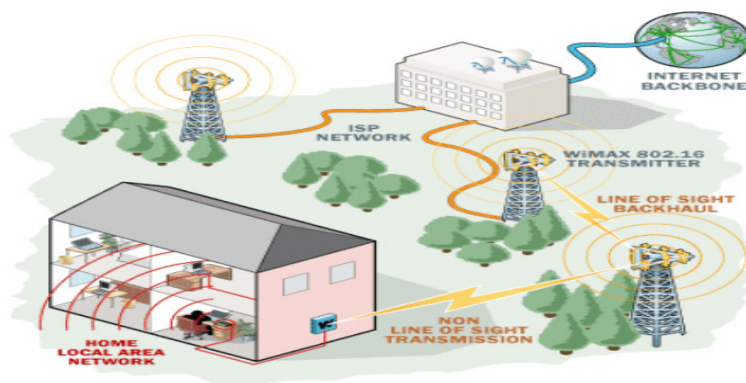
Na temelju navedenih značajke konkretne BS mogu se izvesti i neke opće značajke:

- BS se na javnu mrežu povezuje optičkim linkom, mikrovalnim linkom, ili drugom vezom velike brzine (*backhaul*),
- bazna stanica daje usluge pretplatnicima (tj. korisničkoj opremi u prostorijama) koristeći vezu:
 - bez optičke vidljivosti (NLOS), ili
 - sa optičkom vidljivošću (LOS),
- WiMAX bazna stanica se sastoji od unutrašnje elektronike (BTS – *Base Transceiver Station*) i WiMAX tornja koji je sličan onima kod mobilne telefonije,
- BS osigurava bežični pristup unutar pripadajuće ćelije,
- antene mogu biti omni antene čime koje ćeliji daju kružni oblik, ili usmjerene antene koje daju linearan oblik (povećavanje kapacitet mreže, efektivno dijeleći ćelije na nekoliko manjih sektora), i
- u jezgri je WiMAX radio koji sadrži i prijamnik i predajnik i generira električne oscilacije na frekvenciji nositelja; sličan je funkcijom usmjerniku.

Prijemnici mogu biti vanjski ili unutarnji (kućni). Vanjski prijemnici nude bolje performanse nego kućni prijemnik. To je izraženije kod LOS slučaja kada prijem WiMAX signala nije ometan od strane prepreka (zgrade, zidovi). Implementacija takvog prijemnika je

skuplja od implementacije unutarnjeg prijemnika. Najveća prednost kućnog prijemnika je njegova jednostavnost implementacije, krajnji korisnik ga instalira u svome domu, no i sam odgovara za njega, pa takva situacija oslobađa poslužitelja (operatora) od dodatnih troškova implementacije, [34].

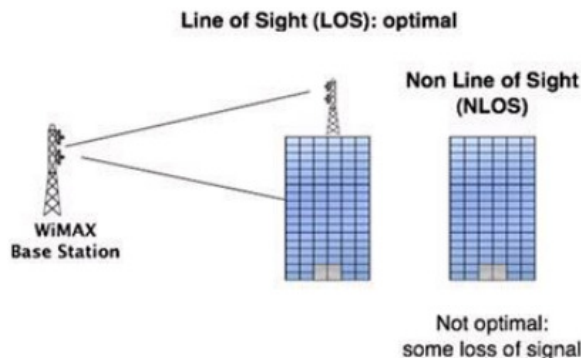
Kako je riječ o tehnologiji koju odlikuje velika pokrivenost signalom od 15 do 50 kilometara (što ovisi o optičkoj vidljivosti i ostalim smetnjama), te velika propusna moć. WiMAX može biti alternativna tehnologija kad nije moguć pristup javnoj govornoj usluzi (odnosno na području gdje je gradnja žičane infrastrukture komplicirana ili neisplativa). WiMAX ne treba telefonski priključak, nego samo posebni WiMAX uređaj, koji se priključuje na struju te spaja s računalom i telefonom. Putem te tehnologije korisnik može dobiti usluge širokopojasnog bežičnog pristupa Internetu te govorne i podatkovne usluge. Teoretske brzine prijenosa podataka iznose i do 70 Mbit/s (međutim, u praksi su znatno niže), [15]. Osnovna namjena sustava je pružanje pristupa lokalnim mrežama, Internetu, prijenos video zapisa, video-telefonija, IP telefonija (IP-Internet Protokol) i slično, kako je prikazano na slici 3.20.



Slika 3.20. WiMAX primjene, [36]

Također, WiMAX može pokazati svoje prednosti vezane uz širokopojasni pristup Internetu. S jedne strane, omogućuje uvođenje širokopojasnog pristupa Internetu na području gdje je gradnja žičane infrastrukture komplicirana ili neisplativa, a s druge strane omogućuje konkurentskim operatorima da ponude širokopojasni pristup Internetu po nižim cijenama i uz veće brzine. Ranije bežične tehnologije nisu udovoljavale komercijalne zahtjeve jer nisu omogućavale uslugu u uvjetima NLOS¹² (NLOS - *Non-Line-Of-Sight*), odnosno postojala je prepreka između bazne stanice i prijamnika. WiMAX naravno najbolje funkcionira u uvjetima LOS (LOS - *Line Of Sight*), međutim za razliku od ranijih tehnologija, nudi prihvatljiv domet i zadovoljava propusnost svojim korisnicima koji su u situaciji NLOS, kako je prikazano na slici 3.21. Zgrade, odnosno prepreke između bazne stanice i korisnika smanjuju domet i propusnost, no u takvim urbanim sredinama signal i dalje biva dovoljno snažan za pružanje usluge krajnjim korisnicima, [34], [36].

¹² Pojam koji označava da prijemnik i predajnik nemaju izravnu optičku vidljivost, već se na putu propagacije signala nalaze prepreke, kao što su primjerice neboderi i slično.



Slika 3.21. WiMAX optimalnost, [36]

Neke od glavnih zamjerki na WiMAX-u su interferencija s drugim odašiljačima. Također treba napomenuti da s obzirom je WiMAX bežičan javlja se problem kvalitete usluge (kodiranje i modulacija) te jamčenje sigurnosti (enkripcija). Još jedan od problema nastaje ukoliko dođe do kvara bazne stanice, javlja se potreba za upotrebom zamjenskog odašiljača na području pogođena kvarom. Upravo takva delikatna situacija ukazuje da fiksna telefonija nudi itekako veću pouzdanost mreže nego WiMAX.

WiMAX ima potencijala zamijeniti brojne postojeće telekomunikacijske infrastrukture. Naime, postoje dvije vrste WiMAX mreža: fiksne i mobilne. Fiksna konfiguracija može zamijeniti telekomunikacijske mreže bazirane na bakrenoj žici te kabelsku TV koja je temeljena na koaksijalnom kablu, a koja nudi ISP (ISP - *Internet Service Provider*) usluge. U mobilnoj varijanti WiMAX može poslužiti kao alternativa mrežama pokretne telefonije (3G). Usporedbe i konfuzije između WiMAX-a i Wi-Fi su učestale, vjerojatno zato što se radi o sličnim, a opet prilično različitim standardima. Zajedničko ovim standardima je da se vežu uz bežično spajanje i pristup Internetu. WiMAX je prvenstveno razvijen za gradska bežična područja (WMAN), domet prijenosa je reda veličine od nekoliko kilometara. Wi-Fi standard je razvijen za lokalne bežične mreže (WLAN) pa je stoga domet prijenosa do 100 m, [34], [36].

Također, ova dva standarda imaju različite QoS mehanizme. WiMAX koristi mehanizme koji se baziraju na konekciji između bazne stanice i korisničkog uređaja. Svaka konekcija je bazirana na specifičnom rasporedu algoritama. Wi-Fi koristi mehanizme slične fiksnom Ethernetu, gdje paketi imaju različite prioritete ovisno o njihovim oznakama. Npr. VoIP promet može imati veći prioritet nego web preglednik. Wi-Fi radi na MAC CSMA/CA protokolu, koji je bespojno i spojno baziran. WiMAX radi na spojno orijentiranom MAC.

Razlika je i u frekvencijskom pojasu u kojem rade ove dvije tehnologije, jer WiMAX radi u puno širem frekvencijskom pojasu. Pomoću WiMAX-a je moguće ostvariti veće brzine prijenosa, te poslužiti veći broj korisnika. Osim toga, WiMAX omogućuje širokopojasni pristup za razliku od WLAN-a. Po pitanju mrežne opreme, glavna razlika je u tome što WLAN ima pristupne točke, koje mogu biti i bežični usmjernici, dok WiMAX podrazumijeva upotrebu baznih stanica. Tehnike prijenosa su također različite, WLAN kao osnovnu tehniku prijenosa koristi širenje spektra, dok WiMAX koristi OFDM, te OFDMA kao tehniku višestrukog pristupa, [34], [36].

WiMAX u svojoj mobilnoj inačici omogućuje punu mobilnost, za razliku od WLAN-a. Također, WiMAX se koristi za povezivanje korisnika gdje je postavljanje fiksne infrastrukture nemoguće ili neisplativo.

3.3 LTE

Mobilni sustavi su od svog nastanka do danas doživjeli velike promjene. Razvijali su se kroz nekoliko generacija. Predmet promatranja ovog rada je treća generacija mobilnih sustava, koja je u Europi poznata kao univerzalni sustav mobilnih telekomunikacija (UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System*). Čak je i treća generacija mobilnih sustava imala svoju evoluciju prema četvrtoj generaciji, te je zadnji standard ove evolucije nazvan dugoročnom evolucijom (LTE – *Long Term Evolution*). Organizacija 3GPP (3GPP - *Third Generation Partnership Project*) je rad na evoluciji mobilnih sustava treće generacije započela 2004., sa radionicom u Torontu.

Zahtjevi i ciljevi koji su identificirani na ovoj radionici su, prema [2], [25], slijedeći:

- smanjenje troškova po bitu,
- povećanje broja usluga uz niže cijene i veće zadovoljstvo korisnika,
- fleksibilnost uporabe postojećih i novih frekvencijskih pojaseva,
- pojednostavljenje arhitekture,
- otvorena sučelja,
- osigurati kontinuiranu kompetitivnost 3G sustava u budućnosti,
- veće brzine prijenosa,
- osiguranje kvalitete usluge,
- optimizirani sustav sa komutacijom paketa,
- povećana propusnost, i
- smanjenje kašnjenja (latencije).

Zaključci ove radionice, prema [2], pretočeni su u studiju koja je fokus stavila na podršku uslugama iz domene paketski komutiranih sustava, odnosno na:

- Radijsko sučelje fizičkog sloja (*downlink i uplink*): načine podržavanja fleksibilnog prijenosnog pojasa do 20 MHz, uvođenje novih shema prijenosa i naprednih višeantenskih tehnologija,
- Radijsko sučelje drugog i trećeg sloja: optimizacija signalizacije,
- UTRAN (UTRAN – *Universal Terrestrial Radio Access Network*) arhitekturu: identificiranje optimalne UTRAN mrežne arhitekture i funkcionalne podjele između čvorova radijskih pristupnih mreža (RAN – *Radio Access Network*) te pitanja u pogledu radijsko - frekvencijskog spektra.

2006. je izdan i Tehnički izvještaj 25.913 (TR 25.913) u kojem su, navedeni i detaljni zahtjevi prema sljedećim kriterijima:

- vršna brzina prijenosa podataka (*Peak data rate*):
 - vršna brzina u downlinku od 100 Mb/s unutar spektra od 20 MHz ili 5 bps/Hz, i
 - vršna brzina u uplinku od 50 Mb/s ili 2.5 bps/Hz unutar spektra od 20 MHz ,
- kapacitet na kontrolnoj ravni - najmanje 200 aktivnih korisnika po ćeliji unutar spektra do 5 MHz,
- latencija na korisničkoj ravni - manje od 5 ms za jednog korisnika s jednim podatkovnim prometnim tokom za male pakete,
- propusnost:
 - *Downlink*: prosječna propusnost po MHz 3 do 4 puta veća nego kod HSDPA (HSDPA - *High-Speed Downlink Packet Access*), i
 - *Uplink*: prosječna propusnost po MHz 2 do 3 puta veća nego kod verzije 6 (*Release 6 Enhanced Uplink*),
- spektralna efikasnost:
 - *Downlink*: u opterećenoj mreži 3 do 4 puta veća nego kod HSDPA, i
 - *Uplink*: u opterećenoj mreži 2 do 3 puta veća nego kod verzije 6.
- mobilnost :
 - evoluirani UTRAN (E-UTRAN – *Evolved UTRAN*) treba biti optimiziran za male mobilne brzine od 0 do 15 km/h,
 - veće mobilne brzine između 15 i 120 km/h trebaju biti podržane visokim performansama, i
 - mobilnost kroz mobilne mreže treba biti održavana pri brzinama od 120 km/h do 350 km/h,
- pokrivanje - gore navedena propusnost, spektralna efikasnost i mobilnost treba biti osigurana za ćelije promjera 5 km, sa malom degradacijom za ćelije promjera 30 km dok ćelije promjera do 100 km ne trebaju biti uključene,
- spektralna fleksibilnost - E-UTRA treba raditi na različitim pojasnim veličinama, uključujući 1.25 MHz, 1.6 MHz, 2.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz i 20 MHz u *uplinku* i *downlinku*,
- koegzistencija i međusobni rad sa 3GPP tehnologijama radijskog pristupa (RAT - *Radio Access Technology*)

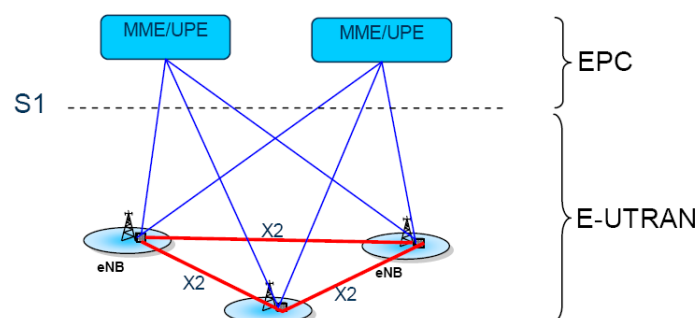
- Koegzistencija na istom geografskom području,
- Podržavanje mjerenja i handovera, i
- Vrijeme prekida priprekapčanju stvarnovremenskih usluga između E-UTRAN i UTRAN treba biti manje od 300 ms.
- upravljanje radijskim resursima:
 - Napredna podrška za kvalitetu usluge s-kraja-na-kraj,
 - Efikasna podrška prijenosa viših slojeva, i
 - Podrška za dijeljenje opterećenja i upravljanje politikom (*load sharing and policy management*) preko različitih RAT.
- složenost:
 - smanjenje broja opcija, i
 - bez redundantnih obaveznih značajki, [5].

Nakon ovog izvještaja došlo se, prema [25], do još nekih zahtjeva:

- pojednostavljenje protokolne arhitekture i samih protokola,
- izbjegavanje sličnih funkcija između radijske i jezgrene mreže, i
- dogovoren je vremenski interval prijenosa (TTI - *Transmission Time Interval*) u iznosu od 1ms kako bi se smanjila količina signalizacije i poboljšala efikasnost.

3.3.1 Arhitektura EPS sustava

Arhitektura evoluiranog paketskog sustava (EPS – *Evolved Packet System*) sastoji se od dva glavna dijela, odnosno dvije odvojene funkcionalne cjeline: evoluirane paketske jezgre (EPC - *Evolved Packet Core*) i E-UTRAN-a, kao što je prikazano na slici 3.22.



Slika 3.22. EPS arhitektura, [26]

E-UTRAN sastoji se od evoluiranih čvorova B (eNB) koji su međusobno povezani pomoću X2 sučelja. eNB su povezani preko S1 sučelja na EPC. S1 sučelje podržava vezu više-više između pristupnika (GW - *Gateway*) i eNB.

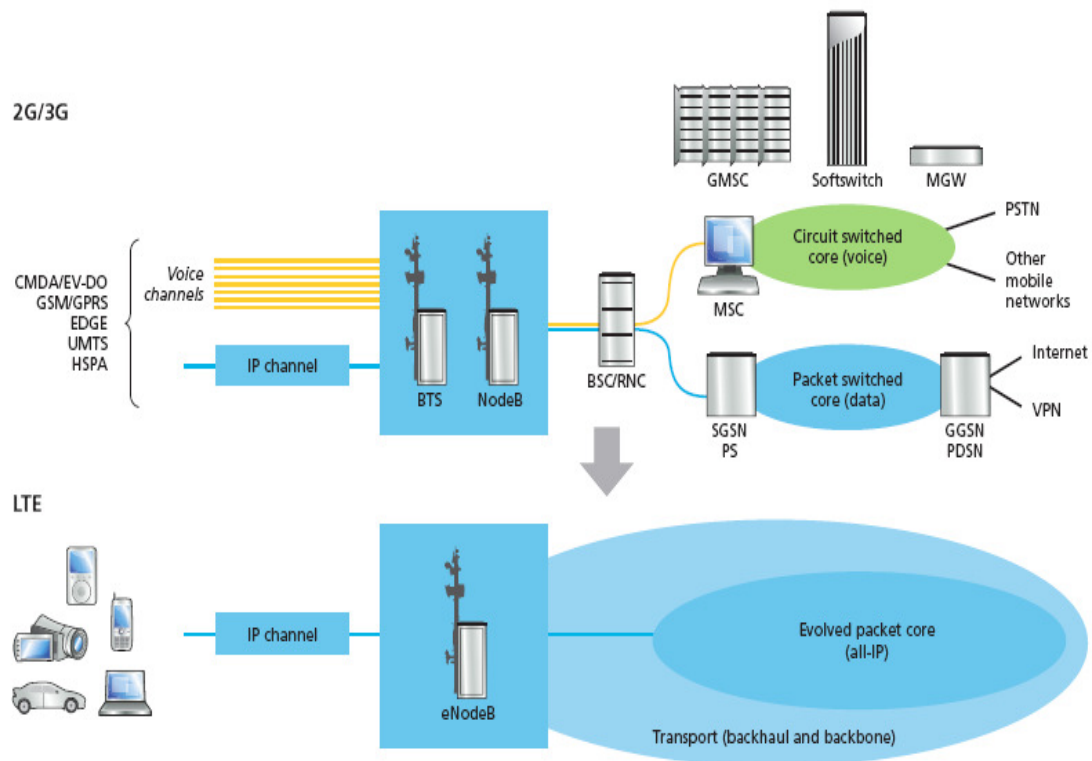
3.3.1.1 EPC

EPC je nova mobilna jezgrena mreža bazirana isključivo na internet protokolu (IP – *Internet Protocol*) za LTE. EPC osigurava funkcionalnost mobilne jezgre koja je u ranijim generacijama bila realizirana kroz dva odvojena sustava: komutacija kanala (CS – *Circuit Switched*), koja se koristila za prijenos govora i komutacija paketa (PS – *Packet Switched*) za prijenos podataka, kao što se može vidjeti na slici 3.23. Na slici 3.24 prikazani su dijelovi EPC-a.

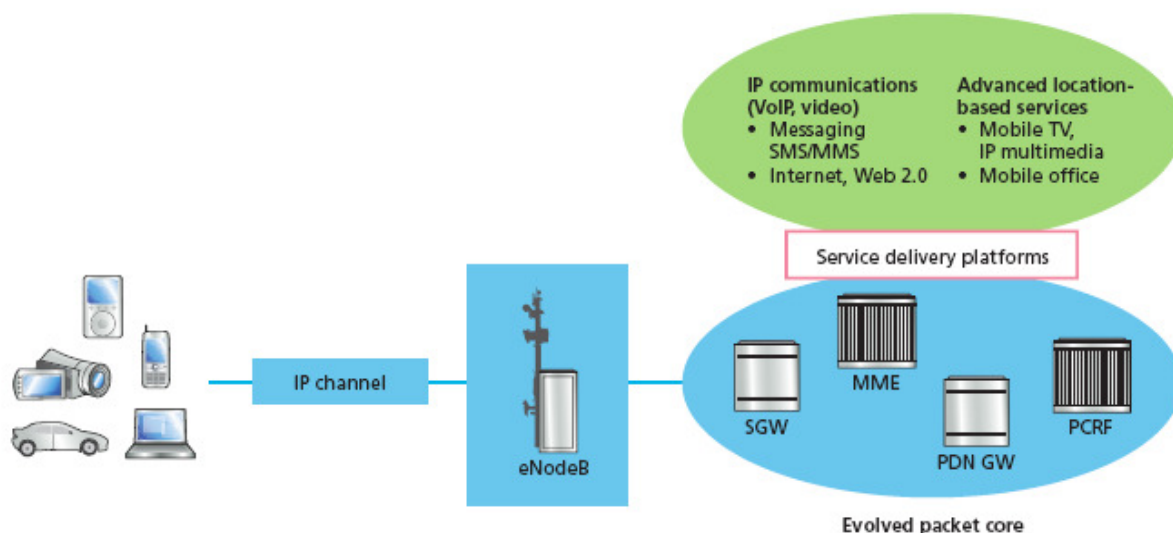
Kao što se može vidjeti sa slike 3.22. EPC je, prema [26], realizirana kroz četiri nova elementa:

- poslužujući pristupnik (SGW - *Serving Gateway*),
- pristupnik paketske mreže (PDNGW - *Packet Data Network Gateway*),
- entite za upravljanje mobilnošću (MIME - *Mobility Management Entity*), i
- dio za funkcionalnosti politike i pravila naplate (PCRF - *Policy and Charging Rules Function*).

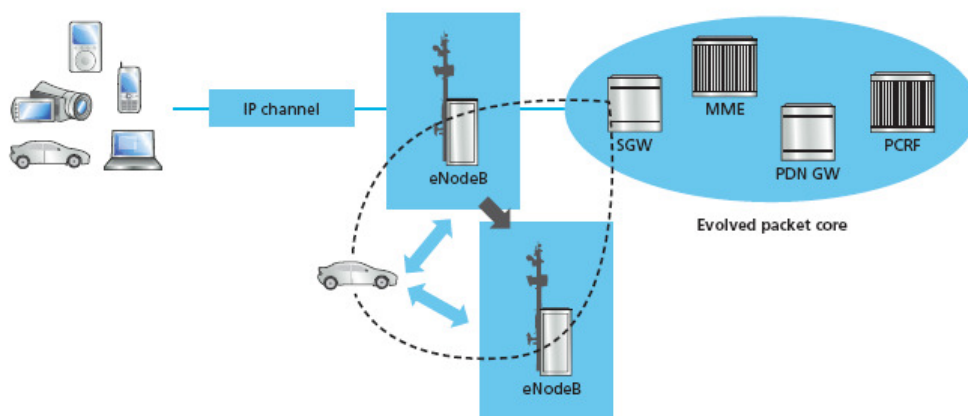
SGW ima primarnu funkciju upravljanja korisničkom mobilnošću te da služi kao točka razdvajanja RAN i jezgrene mreže. SGW održava podatkovne rute između eNodeB i PGW. On je točka završetka sučelja paketske mreže prema E-UTRAN. Kad se terminali kreću kroz područje koje poslužuje eNodeB u E-UTRAN mreži, SGW služi kao lokalno sidrište za mobilnost. To znači da se kroz njega usmjeravaju paketi za mobilnost unutar E-UTRAN-a kao i za mobilnost sa drugim 3GPP tehnologijama. Na slici 3.25. Prikazan je SGW.



Slika 3.23. Evolucija u jednu zajedničku IP jezgru, [27]



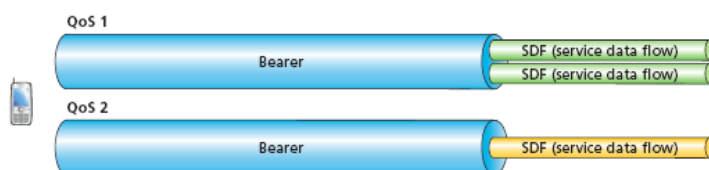
Slika 3.24. EPC, [27]



Slika 3.25. SGW, [27]

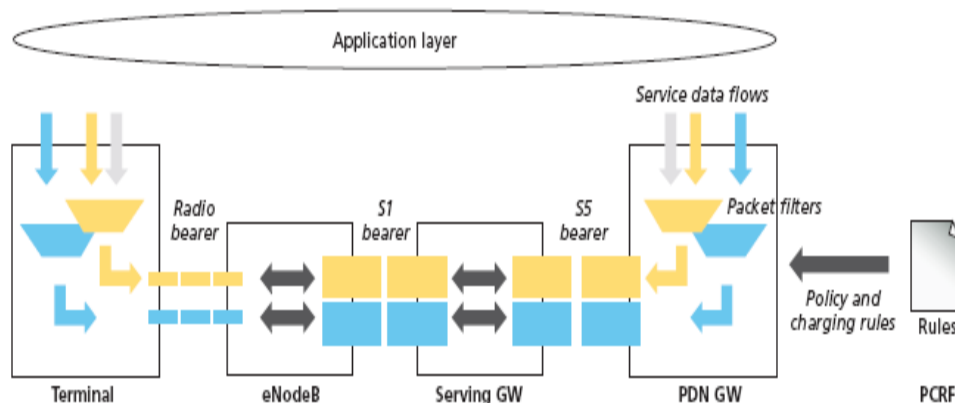
PDNGW je točka završetka sučelja prema paketskim mrežama. On je sidrište za sesije prema vanjskim paketskim mrežama te kao takav podržava: značajke za provođenje politike, filtriranje paketa, naplatu.

Kod LTE podatkovni promet se prenosi preko virtualnih konekcija, koje se nazivaju uslužni podatkovni tokovi (SDF - *Service Data Flows*). Oni se pak prenose preko nositelja – virtualnih kontejnera sa jedinstvenim karakteristikama kvalitete usluge. Na slici 5. prikazano je kako se jedan ili više SDF-ova agregira i prenosi preko jednog nositelja, [27].



Slika 3.26. Prijenos SDF-a, [27]

Jedan nositelj, koji je podatkovni put između korisničke opreme i podatkovne mreže, sastoji se od tri segmenta: radijskog nositelja između korisničke opreme i eNodeB, podatkovnog nositelja između eNodeB i SGW (S1 nositelj), podatkovnog nositelja između SGW i PGW (S5 nositelj).



Slika 3.27. Podatkovni put s-kraja-na-kraj kod LTE, [27]

Na slici 3.27. Prikazana su tri segmenta nositelja s-kraja-na-kraj. Primarna uloga PGW-a je osiguranje kvalitete usluge za svaki SDF, dok se SGW bavi dinamičkim upravljanjem nositeljima. MME obavlja funkcije signalizacije i kontrole kako bi upravljao pristupom korisničke opreme mrežnim konekcijama, dodjelom mrežnih resursa te upravlja mobilnim stanjima kako bi osigurao praćenje, roaming i prekapčanje. MME kontrolira sve funkcije kontrolne ravnine povezane sa pretplatnikom i upravljanjem sesijom. MME može upravljati tisućama eNodeB. On je također i ključni element za odabir odgovarajućeg pristupnika unutar EPC. Obavlja i kontrolne funkcije za upravljanje nositeljem. MME podržava funkcije sigurnosne procedure, upravljanje terminal-mreža, upravljanje lociranjem neaktivnog terminala, [27].

3.3.1.2 Značajke zračnog sučelja

EUTRAN značajke mogu se, prema [23], [24], sintetizirati kroz slijedeće:

- vršne brzine download-a od 299.6 Mbit/s za 4x4 antene, do 150.8 Mbit/s za 2x2 antene unutar 20 MHz,
- vršne brzine upload-a od 75.4 Mbit/s za svakih 20 MHz,
- niska kašnjenja (kašnjenje ispod 5ms za male pakete u optimalnim uvjetima, manja kašnjenja za handover i uspostavu konekcije,
- podrška za mobilne terminale do brzine od 350 km/h ili 500 km/h ovisno o frekvencijskom pojasu,
- podrška za frekvencijsko i vremensko multipleksiranje,
- fleksibilan propusni opseg: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 15 MHz i 20 MHz koji su standardizirani,

- povećana spektralna efikasnost,
- podrška za femto, piko pa sve do makro ćelija,
- pojednostavljena arhitektura: mrežna strana EUTRAN-a se sastoji samo od eNB-a,
- podrška za interoperabilnost sa drugim sustavima, i
- radijsko sučelje koje paketski komutirano.

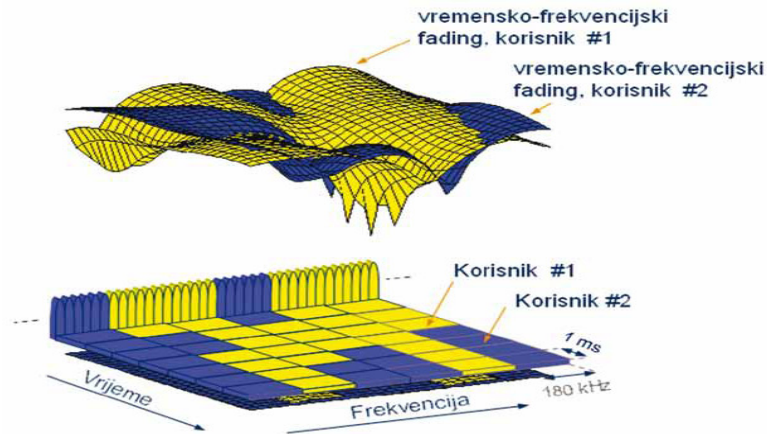
3.3.2 Protokolni složaj

Protokolni složaj EUTRAN, prema [24], čine:

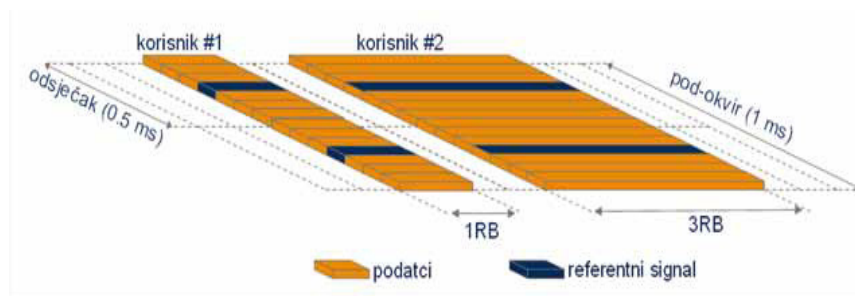
- fizički sloj (*Physical layer*): prenosi sve informacije sa transportnih kanala sloja pristupa mediju (MAC – *Medium Access Control*) preko zračnog sučelja, obavlja adaptaciju na link, kontrolu snage, pretragu ćelija i druga mjerenja, unutar LTE i između sustava za sloj za kontrolu radijskih resursa (RRC – *Radio Resource Control*),
- MAC - pruža set logičkih kanala za podsloj kontrole radijske veze (RLC – *Radio Link Control*) koji ih multipleksira na transportne kanale fizičkog sloja, upravlja ispravkom pogrešaka, obavlja prioritizaciju logičkih kanala za istu korisničku stanicu, obavlja dinamičko raspoređivanje između korisničkih stanica,
- RLC - Prenosi pakete protokola podatkovne konvergencije (PDCP – *Packet Data Convergence Protocol*), može raditi u tri različita moda ovisno o osiguranoj pouzdanosti,
- PDCP - Omogućava prijenos podataka RRC sloja sa enkripcijom i zaštitom integriteta, za IP sloj omogućava prijenos paketa sa kompresijom zaglavlja, enkripcijom te ovisno o RLC modu sekvencijalnu isporuku, detekciju duplikata i retransmisiju vlastitih podatkovnih jedinica tijekom prekapčanja,
- RRC - Brine se o sveodređivim sustavskim informacijama, dozivanjem, uspostavom i raskidanjem RRC konekcije, upravlja sigurnosnim ključevima, prekapčanjem, mjerenjima, i
- NAS (NAS – *Non Access Stratum*) - protokol između korisničke opreme i MME, obavlja autentikaciju korisničke opreme, kontrolu sigurnosti.

3.3.3 Raspoređivanje resursa

Kod LTE se raspoređivanje korisnika obavlja i u vremenskoj i frekvencijskoj domeni na razini jednog odsječka trajanja 1 ms, odnosno 12 podnositelja, što definira rasporedni blok (*Scheduling block*).



Slika 3.28. Raspoređivanje ovisno o kvaliteti kanala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, [23]



Slika 3.29. Raspoređivanje korisnika u uzlaznoj vezi, [29]

U silaznoj vezi korisniku mogu biti dodijeljeni razmaknuti rasporedni blokovi, radi adaptacije na kvalitetu signala u vremensko-frekvencijskoj domeni. Na slikama 3.28. i 3.29. prikazani su načini raspoređivanja, [23].

3.3.4 Tehnike koje omogućuju LTE

LTE radijsko sučelje zasniva se na upotrebi ortogonalnog multipleksiranja frekvencijskim odvajanjem (OFDM - *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) s OFDMA (OFDMA - *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) višestrukim pristupom u silaznoj vezi te višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom na jednom nositelju (SC-FDMA - *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) u uzlaznoj vezi, [27].

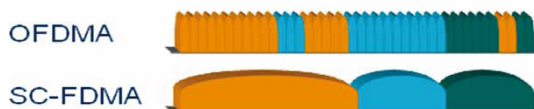
Kako bi se ostvarile velike brzine prijenosa koriste se metode višeslojnih prijenosa MIMO, tehnike odašiljačke i prijemne raznolikosti (*TX/RX diversity*) te upravljanje dijagramom zračenja antene. Koriste se i različite modulacije, kao što je prikazano na slici 3.30.



Slika 3.30. LTE podržane modulacije, [27]

Svaki od podnositelja nosi jedan OFDM simbol koji sadrži informacijske bitove modulirane kvadraturnom modulacijom sa faznim pomakom (QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*), ili nekim oblikom kvadraturene amplitudne modulacije (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) kao što je 16QAM ili 64QAM modulacija, što utječe na broj bitova po simbolu te se prenosi 2,4 ili 6 bita po simbolu. Modulacija višeg reda je osjetljivija na smetnje te zahtijeva bolje radijske uvjete, odnosno bolji odnos snage nositelja prema interferenciji (C/I - *Carrier to Interference*), [29].

Mijenjanjem broja podnositelja moguća je podrška za različite pridjeljenje širine frekvencijskog pojasa, od 1,4 MHz sve do 20 MHz. Kod uzlazne veze koristi se posebna izvedba OFDMA pristupa, pred-kodirani OFDMA, (SC-FDMA - *Single Carrier FDMA*), koji pojedinom korisniku dodjeljuje kontinuirani skup podnositelja koji tada djeluje kao jedan širi nositelj čime se ostvaruje bolje pokrivanje u uzlaznoj vezi. Usporedba OFDMA i SC-FDMA je prikazana na slici 3.31, [29].

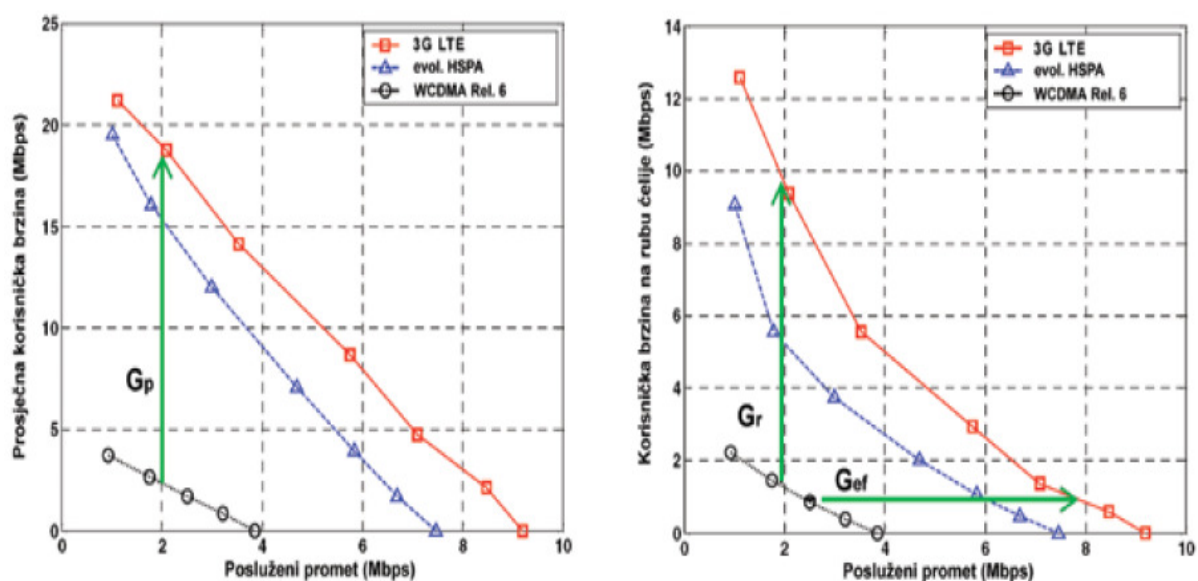


Slika 3.31. Usporedba OFDMA i SC-FDMA, [30]

Korištenjem više-antenskih tehnika ostvaruju se različiti dobici: oblikovanje dijagrama zračenja osigurava veći odnos signal-šum i bolje pokrivanje, dok se višeslojnim prijenosom ostvaruju veće brzine prijenosa. Prijelaz između različitih tehnika može biti dinamički, [23], [26], [27].

3.3.5 Usporedba performansi

Na slici 3.32. prikazana je usporedba prosječne korisničke brzine i korisničke brzine na rubu ćelije s posluženim prometom za silaznu vezu i radijski kanal s tipično urbanim karakteristikama (uz udaljenost od 500m i gubitke prodiranja signala od 20 dB) za različite sustave.



Slika 3.32. Usporedba performansi različitih mobilnih sustava, [29]

Posluženi promet je definiran kao zbroj brzina aktivnih korisnika koji su jednoliko raspoređeni za prijenos. Može se zaključiti da se konceptom evoluirane radio pristupne mreže mogu postići i više od trostruko većih brzina prijenosa (označenih sa G_p - dobitak u odnosu na prosječne brzine prijenosa). Usporedbe kapaciteta, odnosno dobitak uslijed povećane spektralne efikasnosti – G_{ef} , i pokrivanja, odnosno dobitak u odnosu na brzine prijenosa na rubu ćelije – G_r pokazuju slične rezultate, [29].

4 OSNOVNE ZNAČAJKE I RAZVOJ VOIP-A

Prijenos govora pomoću Internet protokola (VoIP - *Voice over Internet Protocol*) je usluga koja je sve popularnija. Razvojem višeslužnih širokopojasnih mreža doživljava svoj procvat. Ova tehnologija se odvija u stvarnom vremenu, što uvjetuje da se, kao i kod svih stvarnovremenskih usluga poseban naglasak stavlja na kvalitetu usluge.

VoIP je skup tehnologija, metodologija, komunikacijskih protokola i prijenosnih tehnika koje omogućuju isporuku govorne komunikacije preko Internet protokola (IP – *Internet Protocol*). Iako se često zamjenjuje terminom Internet telefonije, ovo nisu sinonimi jer je Internet telefonija širi pojam od VoIP-a.

Prilikom uspostave, održavanja i raskidanja komunikacijske veze, odnosno poziva, VoIP koristi različite protokole i algoritme za kompresiju i kodiranje (*codec*). Kako bi se VoIP poziv mogao ostvariti potrebno je proći određeni broj koraka koji omogućuju njegovu uspostavu. Ti koraci su sljedeći: početna signalizacija, uspostava poziva, analogno-digitalna konverzija govornog signala, kodiranje i kompresija, paketizacija, transmisija (prijenos), dekodiranje i dekompresija, digitalno-analogna konverzija signala, [26].

Razvojem VoIP-a razvijali su se i različiti standardi. Iz tog velikog broja različitih standarda danas su najčešće korištena i opće prihvaćena dva standarda. Prvi je razvijen od strane Svjetske telekomunikacijske udruge (ITU – *International Telecommunication Union*) i poznat je pod nazivom H.323. Drugi standard je razvijen od strane Internet radne grupe (IETF – *Internet Engineering Task Force*) i poznat je kao protokol za pokretanje sesije (SIP - *Session Initiation Protocol*).

Signalizacijski protokoli u VoIP mreži moraju, prema [2], [28], zadovoljiti sljedeći niz zahtjeva:

- osigurati uspostavljanje, upravljanje i raskidanje komunikacijske veze,
- osigurati skalabilnost (VoIP mreža mora biti u mogućnosti rasti sa brojem korisnika te prihvatiti veliki broj krajnjih korisničkih uređaja te prihvatiti velikog broja poziva istovremeno),
- osigurati fleksibilnost (mogućnost VoIP mreže da uvodi nove funkcionalnosti bez potrebe za velikim zahvatima i promjenama na mreži),
- osigurati standardiziranost (podrazumijeva kompatibilnost uređaja i rješenja različitih proizvođača kako bi oni mogli međusobno uspješno funkcionirati),
- omogućiti upravljanje mrežom, i
- omogućiti tarifiranje (naplaćivanje usluga).

IP tehnologija, odnosno VoIP usluga ima niz prednosti, koje su sljedeće: poboljšana kvaliteta govora, veća dostupnost, smanjenje troškova, mobilnost, integracija različitih medija, nove usluge, usluga u realnom vremenu, koristi postojeću računalnu mrežu, bolje iskorištenje prijenosnog pojasa (paketi se šalju samo kad se priča; VoIP ima ugrađene mehanizme prepoznavanja i potiskivanja tišine, jer u trenutku kada jedan sudionik

komunikacije priča, drugi sluša, te se u tom slučaju ne prenose nikakvi paketi, što smanjuje i opterećenje poslužitelja), zahtjeva manju pojasnu širinu, [2], [25], [27].

4.1 Standardi i protokoli

VoIP se može implementirati na različite načine koristeći različite standarde i protokole. Neki od protokola i standarda koji se koriste su sljedeći: H.323, MGCP (MGCP - *Media Gateway Control Protocol*), SIP, Protokol prijenosa u stvarnom vremenu (RTP - *Real-time Transport Protocol*), Protokol opisa sesije (SDP - *Session Description Protocol*), [28].

Postoji nekoliko VoIP protokolnih arhitektura baziranih na rješenjima različitih standardizacijskih tijela i proizvođača, a podijeljenih prema signalizacijskom protokolnom složaju. U tablici 4. dana je usporedba njihovih najvažnijih karakteristika, dok je u tablici 2. protokol pridružen sloju OSI modela.

Tablica 4. Komparativni prikaz karakteristika različitih protokolnih arhitektura

	H.323	SIP	MGCP/H.248/Megaco
Standardizacijsko tijelo	ITU-T	IETF	MGCP/Megaco – IETF H.248 – ITU-T
Arhitektura	Distribuirana	Distribuirana, Peer-to-Peer	Centralizirana
Kontrola poziva	Gatekeeper	Proxy/Redirect poslužitelj	Call agent/Media Control Gateway/Softswitch
Krajnje točke	Gateway, terminal	Korisnički agent	Media Gateway
prijenos signalizacije	TCP/UDP	TCP/UDP	MGCP – UDP H.248/Megaco – TCP/UDP
Podrška za multimediju	Da	Da	Da
DTMF-relay transport	RTP	RTP	RTP

Izvor: [30]

Tablica 5. VoIP protokoli i OSI

OSI sloj	VoIP komponenta i protokol
Application	IP Communicator, CallManager, and human speech
Presentation	CODEC
Session	H.323, SIP, MGCP, Megaco
Transport	RTP i UDP (media); TCP i UDP (signal)
Network	IP

Izvor: [33]

4.1.1 H.323

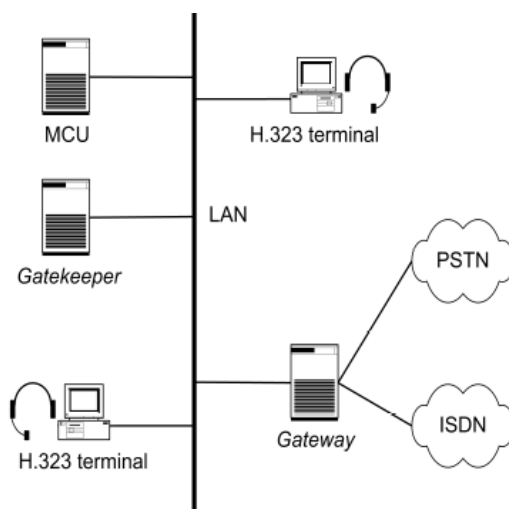
H.323 je standard definiran od strane ITU-T za prijenos govora preko Internet mreže. H.323 osigurava mehanizme za video i podatkovni prijenos te čini glavni VoIP standard. H.323 je krovni standard (engl. *umbrella specification*), jer uključuje i različite druge ITU standarde. Glavne komponente ove arhitekture, prema [2], [23], [24], su:

- Terminal - Terminali su krajnje točke svake konekcije. Omogućuju dvosmjernu komunikaciju u stvarnom vremenu sa drugim H.323 terminalom, GW ili MCU. Ta komunikacija može biti čisto govorna ili kombinacija govora i podataka, govora i videa ili govora, podataka i videa. Mogu biti u obliku IP telefona ili mogu doći kao visoko tehnološki uređaj za videokonferencije. Terminali su temeljni elementi H.323 mreže jer su to uređaji koji se nalaze na strani korisnika. Mogu biti u obliku IP telefona ili mogu doći kao visoko tehnološki uređaj za videokonferencije. To je sučelje za dvosmjernu komunikaciju u stvarnom vremenu koji omogućava samostalnu komunikaciju između dva terminala.
- Pristupnik (GW - *Gateway*) - Pristupnici uspostavljaju konekciju između terminala u H.323 mreži kao i sa terminalima mreža drugačijeg protokolnog složaja. Obavlja prilagodbu informacije na prijelazu iz jedne mreže u drugu. Pristupnik je uređaj koji se koristi i preko kojeg informacija mora proći ako se u komunikaciji koriste H.323 terminali i drugi tipovi terminala. Također ako se H.323 mreža povezuje s drugim mrežama, u takvoj komunikaciji se mora koristiti pristupnik jer on obavlja prilagodbu informacije na prijelazu iz jedne mreže u drugu
- Poslužitelj za kontrolu pristupa (*Gatekeeper*) - Poslužitelj za kontrolu pristupa odgovoran je za prevođenje između telefonskog broja i mrežne adrese, kao i za upravljanje prijenosnim pojasom te mehanizmima za registraciju terminala i provjeru autentičnosti. Osiguravaju i usluge kao što su preusmjerenje poziva. Poslužitelj za kontrolu pristupa

obavlja funkcije autorizacije, registracije kontrole zagušenja, translaciju adresa, kontrolu pristupa, upravljanje zonom¹³.

- Višespojna kontrolna jedinica (MCU - *Multipoint Control Unit*) - MCU- u su odgovorne za uspostavu konferencijskih poziva. Višespojna kontrolna jedinica je jedinica za podržavanje konferencijske veze. Sastoji se od dvije logičke jedinice: višespojnog kontrolera (MC – *Multipoint Controller*) i višespojnog procesora (MP – *Multipoint Processor*). MCU omogućuje i video konferencije.

Za ostvarivanje komunikacije nisu uvijek neophodne sve komponente, primjerice *gatekeeper* nije obavezan u H.323 mreži. Komponente H.323 mreže prikazane su na slici 4.1.



Slika 4.1. Komponente H.323 mreže, [2]

U H.323 arhitekturi omogućen je prijenos pet vrsta informacija: Audio (digitalizirani govor), Video (digitalizirani), Podaci (datoteke ili slike), Kontrola komunikacije, Kontrola konekcije i sesija (uspostava i raskidanje), [35].

Značajke H.323 standarda se ogledaju u sljedećem: standardna kompresija/dekompresija, omogućuje povezivanje različite opreme, neovisan o mreži, neovisan o opremi i aplikaciji, pruža podršku za konferencijsku vezu, omogućuje nadzor mreže. Protokolni složaj H.323 standarda može se podijeliti u dvije velike skupine protokola: protokoli koji kao transportni protokol koriste protokol za kontrolu prijenosa (TCP – *Transport Control Protocol*) i protokoli koji za prijenos koriste protokol korisničkih datagrama (UDP – *User Datagram Protocol*).

TCP protokol je pouzdan protokol transportnog sloja koji ima mogućnost detekcije zagušenja odlaznog kapaciteta i koji u tom slučaju smanjuje brzinu slanja paketa kako bi se zagušenje razriješilo. Također, u slučaju gubitka paketa TCP obavlja ponovno slanje tih paketa (retransmisiju). Upravo iz tih razloga pouzdanosti TCP protokola se kontrola uspostave veze provodi posredstvom TCP protokola. UDP je nepouzdan protokol koji za razliku od TCP-a nema kontrolu prijenosa, ne obavlja retransmisiju paketa, već se samo brine

¹³ Zona – skup uređaja koji je registriran na jednom *gatekeeperu*, [23].

da paket bude poslan. Zbog tih karakteristika je UDP protokol pogodniji za prijenos govora i videa, odnosno za sve aplikacije koje se odvijaju u stvarnom vremenu, [2].

Još jedan razlog zašto se kontrolni protokoli uvijek temelje na TCP-u je taj jer nisu vremenski kritični, dok retransmisija osigurava pouzdanost. UDP je pogodniji za prijenos govora u realnom vremenu upravo zato što nema kontrole prijenosa i retransmisije, koja kod ove vrste aplikacija nema smisla. Kod prijenosa govora u realnom vremenu bolje je izgubiti jedan ili dva paketa (paketi su veličine 20 milisekundi) nego čekati na ponovno slanje tih paketa. Retransmisija uzrokuje veća kašnjenja te je utjecaj čekanja na retransmisiju u ukupnom kašnjenju toliko velik da je neprihvatljiv, [2].

Protokoli H.323 standarda, prema [52], su sljedeći:

- H.245 – kontrolni protokol,
- H.225 signalizacija poziva (Q.931) – signalizacijski protokol koji se koristi prilikom uspostave veze između bilo koja dva entiteta u H.323 mreži,
- H.225 Protokol registracije, kontrole pristupa i praćenja stanja (RAS – Registration, Admission, Status) – upravljanje i kontrola pristupa krajnjim uređajima, razlučivanje adresa. Koristi se između krajnjeg uređaja u H.323 mreži i poslužitelja za kontrolu pristupa,
- G.711, G.72x – standardi za kodiranje i dekodiranje govora,
- H.261, H.263, H.264 – video codec,
- Protokol prijenosa u stvarnom vremenu (RTP – *Real – Time Transport Protocol*), i
- Protokol kontrole prijenosa u stvarnom vremenu (RTCP – *Real – Time Transport Control Protocol*).

RTP osigurava isporuku s kraja na kraj mreže za podatke koji imaju stvarnovremenske karakteristike. Aplikacije koriste RTP povrh protokola korisničkih datagrama (UDP – *User Datagram Protocol*) jer on sam po sebi nema provjeru i kontrolu isporuke. RTP se sastoji od dva dijela: RTP-a, koji prenosi podatke sa stvarnovremenskim značajkama i RTP kontrolni protokol (RTCP – *Real Time Transport Control Protocol*), bazira se na periodičkom slanju kontrolnih paketa između sudionika sesije, [2], [52].

H.225.0 je ključni protokol H.323. H.225.0 opisuje kako upravljati sa audio, video, podatkovnim i kontrolnim informacijama u paketskoj mreži kako bi se omogućile konverzijske usluge kod opreme u H.323 mreži. H.225.0 sadrži dva glavna dijela: Signalizaciju poziva (*Call signaling*) i Registraciju, prihvata i status (RAS – *Registration, Admission and Status*). H.225.0 kontrola signalizacije poziva koristi se za uspostavu konekciju između H.323 krajnjih točaka, što se obavlja razmjenom poruka na signalizacijskom kanalu koji je otvoren između H.323 krajnjih točaka ili krajnje točke i *gatekeepera*. H.225.0/RAS je protokol koji se koristi između krajnjih točaka (terminala i *gatewaya*) i *gatekeepera*. RAS se koristi za registraciju, kontrolu prihvata, promjene pojasa, status, te raskid procedura. Za razmjenu RAS poruka koristi se RAS kanal koji se otvara između krajnje točke i *gatekeepera* prije uspostave bilo kojeg drugog kanala, [2], [52].

H.245 je protokol za kontrolu signalizacije između krajnjih točaka koja se obavlja razmjenom H.245 poruka. To se obavlja H.245 kontrolnim kanalom koji je logički kanal i koji

je stalno otvoren. Poruke koje se razmjenjuju uključuju razmjenu mogućnosti terminala, te otvaranje i zatvaranje logičkih kanala, [52].

4.1.2 SIP

SIP je standard razvijen od strane IETF-a (IETF - *Internet Engineering Task Force*)¹⁴. On je signalizacijski protokol aplikacijskog sloja koji služi za uspostavu, promjenu i raskidanje višemedijskih sesija u IP mrežama i definiran je u dokumentu RFC 3261 (RFC – *Request For Comment*)¹⁵, [2], [53].

Osnovne značajke SIP standarda su slijedeće: SIP je kontrolni protokol aplikacijskog sloja; služi za kreiranje, modifikaciju i raskidanje sesija između dva ili više sudionika; podržava mobilnost korisnika; jednostavna implementacija; neovisan je o transportnom mediju, radi i sa IPv4 i IPv6; fleksibilan protokol, [53].

Dva temeljna mrežna elementa SIP standarda su, prema [2], sljedeća:

- korisnički agent (UA – *UserAgent*) - UA se nalazi u krajnjim točkama mreže i čine ga: korisnički agent klijent (UAC - *User Agent Client*) i korisnički agent poslužitelj (UAS - *User Agent Server*). UAC šalje SIP zahtjeve, a UAS prima zahtjeve od UAC te vraća odgovore na te zahtjeve. UAC i UAS su obavezan su dio mreže, i
- mrežni poslužitelj - nisu neophodni za uspostavu veze između dva terminala, ali se u realnim mrežama uvijek koriste jer osiguravaju i dodatne mogućnosti. SIP poslužitelji su: posrednički poslužitelj (*Proxy*), preusmjeriteljski (*Redirect*) poslužitelj, registracijski (*Register*) poslužitelj, poslužitelj lokacije.

Posrednički poslužitelj ima važnu funkciju pronalaženja korisnika i prevođenja adresa (*alias* – transport). *Proxy* poslužitelj može generirati zahtjeve drugim poslužiteljima ili klijentima. Preusmjeriteljski poslužitelj prihvata zahtjeve i na njih odgovara s 0 ili više mogućih adresa za uspostavljanje veze. On ne može poslati zahtjev niti uspostaviti vezu. Registracijski prihvata "*register*" zahtjeve i najčešće se postavlja zajedno s *redirect* ili *proxy* poslužiteljem. Poslužitelj lokacije omogućuje *proxy* ili *redirect* poslužitelju da temeljem primljenog usklađenog identifikatora resursa omogući prosljeđivanje zahtjeva prema lokaciji pozvanog korisnika, [2], [53].

Osnovna prednost SIP-a je u tome što prebacuje inteligenciju iz mrežnih SIP poslužitelja na periferiju u inteligentne terminale. Tim postupkom se rasterećuju poslužitelji te se korisniku daje bolja kontrola nad pozivom i raspoloživim uslugama, [1,35]

SIP je signalizacijski protokol aplikacijskog sloja koji služi za uspostavu, promjenu i raskidanje višemedijskih sesija u IP mrežama i definiran je od strane IETF-a u dokumentu RFC 3261 (RFC – *Request For Comment*). Osnovna ideja kojom su se vodili tvorci ovog

¹⁴ Organizacija posvećena razvoju i promoviranju Internetskih standarda i protokola, ima važnu ulogu u razvoju Interneta

¹⁵ Memorandum ili skup savjeta i smjernica koje opisuju protokole, standarde i metode vezane uz Internet i sustave koji ga koriste. RFC-evi se javno objavljuju i o njima se slobodno raspravlja, a neki nakon dugih rasprava postaju punopravni Internetski standardi.

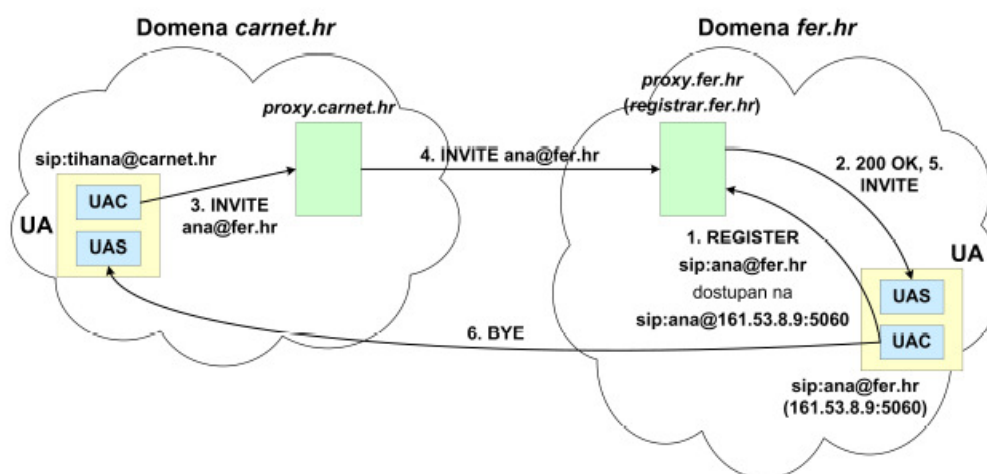
protokola je pozivanje korisnika u sesiju pomoću jedinstvene adrese oblika: [sip:]<user>@(<host>|<domain>), [2], [53].

Dva temeljna mrežna elementa SIP standarda su: korisnički agent (UA – *UserAgent*) i mrežni poslužitelj. UA se nalazi u krajnjim točkama i on se uvijek dijeli na dva segmenta: korisnički agent klijent (UAC – *User Agen Client*) i korisnički agent poslužitelj (UAS – *User Agent Server*). UAC je odgovoran za generiranje zahtjeva, a UAS za odgovore na zahtjeve i obavezan su dio mreže, [2], [53].

SIP poslužitelji nisu neophodni za uspostavu veze između dvaju terminala, međutim oni nude dodatnu funkcionalnost i u stvarnim mrežama uvijek se koriste. SIP poslužitelji su prema [2], sljedeći:

- posrednički poslužitelj (*proxy*) - najvažnija funkcija *proxy* poslužitelja je pronalaženje korisnika i prevođenje adresa (*alias* – transport). *Proxy* poslužitelj može generirati zahtjeve drugim poslužiteljima ili klijentima,
- preusmjeriteljski (*Redirect*) poslužitelj - prihvaća zahtjeve i na njih odgovara s 0 ili više mogućih adresa za uspostavljanje veze. On ne može poslati zahtjev niti kao UA uspostaviti vezu,
- registracijski (*Register*) poslužitelj - prihvaća "REGISTER" zahtjeve i najčešće se postavlja skupa s *redirect* ili *proxy* poslužiteljem, i
- poslužitelj lokacije – omogućuje *proxy* ili *redirect* poslužitelju da temeljem primljenog usklađenog identifikatora resursa omogući prosljeđivanje zahtjeva prema lokaciji pozvanog korisnika.

Ovakva razdioba poslužiteljskih funkcija na više cjelina je prednost SIP standarda jer je ovako postignuta preglednost i olakšana parcijalna implementacija standarda. Na slici 4. prikazan je rad SIP mrežnih entiteta.



Slika 4.2. Međudjelovanje SIP mrežnih entiteta, [54]

Prema [54], mogu se sistematizirati svojstva SIP standarda koja su sljedeća:

- kontrolni protokol u aplikacijskom sloju,
- namjena: kreiranje, modifikacija i raskidanje sesija između dva ili više sudionika,

- ugrađena podrška za razmjenu mogućnosti,
- podržana mobilnost korisnika,
- jednostavna implementacija, i
- neovisnost o transportnom mediju.

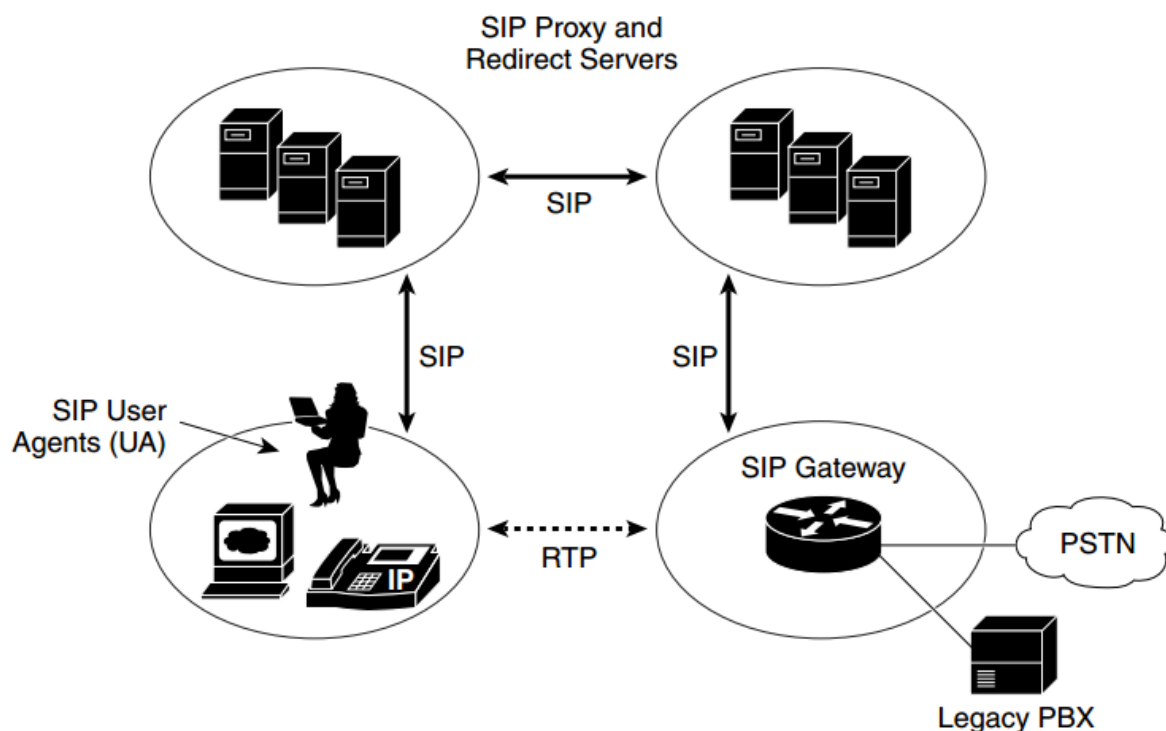
Zbog svoje fleksibilnosti SIP pored osnovne usluge koju nudi (uspostave sesije) može pružiti cijeli niz naprednih usluga. Primjeri tih usluga su preusmjeravanje kod zauzeća, govorna pošta, mobilnost korisnika, i druge. Usluge u IP mrežama mogu biti implementirane na tri mjesta u komunikacijskom putu, a to su:

- poslužitelji; usluge se mogu implementirati u SIP poslužiteljima (*proxy*, *redirect*, *register* i *location*),
- pozivajući korisnički agent; usluga se može implementirati u terminalu pozivatelja, i
- pozvani korisnički agent; usluga se može implementirati u terminalu pozvanog korisnika.

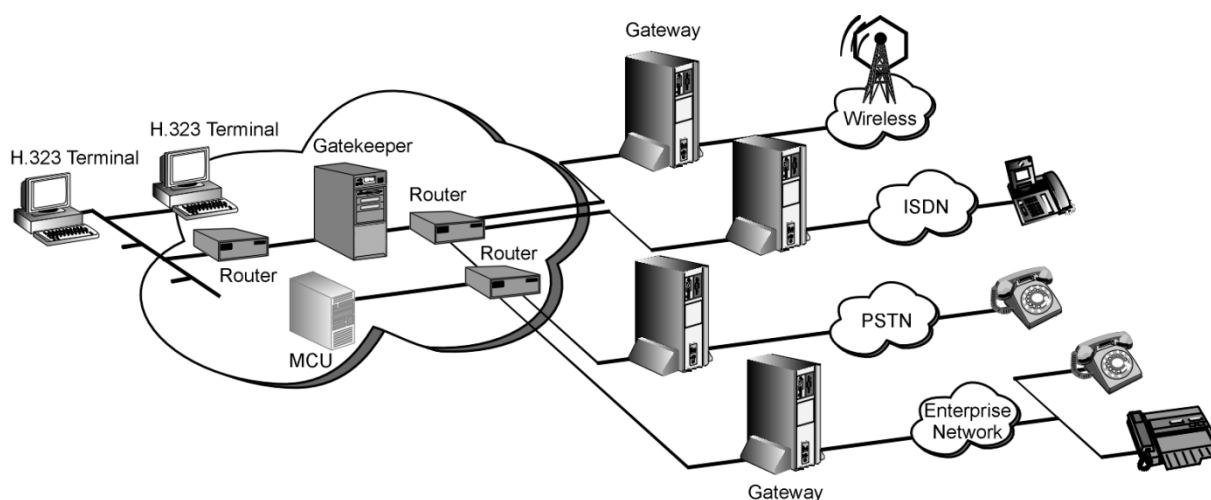
Osnovna prednost SIP-a jest dislokacija inteligencije iz mrežnih SIP poslužitelja na periferiju u inteligentne terminale čime se rasterećuju poslužitelji te se korisniku daje bolja kontrola nad pozivom i raspoloživim uslugama, [54].

4.2 Mrežna arhitektura

Konkretna mrežna arhitektura ovisi o mnogo različitih varijabli, a jedna od njih je i primijenjeni standard. Na slikama 4.3. i 4.4. prikazane su tipične mrežne arhitekture za dva vodeća standarda.



Slika 4.3. SIP arhitektura, [55]



Slika 4.4. Tipična H.323 mreža, [55]

4.3 VOIP aplikacije

Po pitanju VOIP aplikacija potrebno je naglasiti da ima veliki broj različitih programa koji omogućuju VOIP jer je gotovo svaki internetski poslužitelj usluga koji nude VoIP usluge razvio svoj programski paket. Zbog velike konkurencije, svaki program omogućuje besplatnu VoIP uslugu prilikom komunikacije između dva računala, ako oba računala koriste VoIP uslugu od istog poslužitelja. Takvi programi koriste tipičan P2P (*peer-to-peer*) način komunikacije između računala, [48].

Prva VOIP aplikacija koristi se u organizacijama koje imaju mnogo podružnica koje žele spojiti promet da se omogući govorni i podatkovni pristup glavnom uredu. Kako bi se to postiglo koristi se paketna mreža kojom se omogućava standardna transmisija. Govor se preko paketne mreže omogućava fizičkom implementacijom hardwarea i softwarea, odnosno, *interworking function* (IWF - *InterWorking Function*), koji omogućava transmisiju kombiniranog govora i podataka preko paketne mreže. Sučelja koja IWF mora podržavati u ovom slučaju su analogna sučelja koja direktno povezuju telefonske sustave. IWF mora oponašati PBX (PBX – *Private Branch Exchange*) za telefonske terminale u uredima kao i funkcije za PBX u glavnim uredima. IWF postiže to implementirajući signalizacijski software koji obavlja te zadaće, [49].

Druga VOIP aplikacija je glavni link, odnosno, trunking aplikacija i koristi se za organizacije koje žele slati govorni promet između dvije lokacije preko paketne mreže i zamjeniti uske veze korištene za povezivanje PBX-a sa lokacijama. Kod ove aplikacije potrebno je da IWF podržava digitalne kanale većeg kapaciteta nego aplikacije za glavni ured-podružnica veze. Pri tome IWF oponaša signalne funkcije PBX-a, što uzrokuje manje troškove za komunikaciju, [49].

Treća primjena VOIP softwarea je međumrežni rad sa mobilnim mrežama. Kako su govorni podaci u digitalnim mobilnim mrežama već komprimirani i paketizirani za prijenos zrakom putem mobilnog telefona, paketne mreže mogu prenijeti komprimirani govorni paket

koriseći znatno manju količinu propusnog pojasa. Pri tome IWF omogućava prekodiranje potrebno za pretvaranje govornih podataka iz mobilnih mreža u format koji traži PSTN, [48].

5 IDENTIFIKACIJA RELEVANTNIH PARAMETARA VOIP-A

Osiguranje kvalitete usluge (QoS - *Quality of Service*) je izrazito bitna stvar kod IP telefonije. Razina kvalitete usluge promatra se, prema [39], kroz sljedeće kritične parametre:

- minimalna propusnost (*bandwidth*),
- mrežna latencija i kašnjenje (*delay*),
- gubitak paketa (*loss*),
- varijacija kašnjenja (*jitter*), i
- sigurnost.

Glavni argument protiv široke primjene VOIP telekomunikacijskih sustava je ponekad niska razina kvalitete usluge. Varijacije kašnjenja mogu se ukloniti tako da paketi pristižu u međuspremnik (engl. *buffer*), koji će kompenzirati neujednačenost pristizanja paketa. Proizvođači hardvera i ljudi zaduženi za razvoj softvera imaju težak zadatak, proizvesti prijenosni sustav koji će osigurati visoku razinu kvalitete usluge, [57].

Zahtjevi za visokom kvalitetom usluge nisu bezrazložni, naime svega 1 % gubitaka u paketnom prijenosu znači otežanu komunikaciju, a 3 % korisnike dovodi doslovno do ruba očaja. Neslavno objašnjenje za takve pojave donosi UDP protokol koji ne jamči mehanizam koji će osigurati da će paketi podataka na odredištu biti primljeni istim redoslijedom. Kvaliteta VOIP komunikacija u praksi iz spomenutog nije ujednačena: pozivi u zemlje i regije sa razvijenom internetskom infrastrukturom i VOIP regulativom su kvalitetom vrlo visoki i približavaju se tradicionalnoj telefoniji, dok pozivi u regije i zemlje koje nemaju razvijenu IP mrežu, mogu biti problematični. Ako putanja u komunikaciji kojim slučajem uključuje satelitske veze, kašnjenje signala može biti doista jako izraženo (čak 400 do 600 ms za geostacionarnu putanju), u tom slučaju idući prijamni čvor mora presložiti pakete koji kasne prema željenom redoslijedu. Drugi izazov uporabi VOIP-a predstavljaju barijere kao što su vatrozidi i uređaji koji maskiraju adrese (NAT - *Network Access Translation*). Za rješavanje ovih problema, u uporabi su protokoli koji služe kao alat drugim protokolima, kao što su STUN (STUN - *Session Traversal Utilities*) i i ICE (ICE - *Interactive Connectivity Establishment*) protokoli. Unatoč svemu nabrojanom, nedostaci se brzo uklanjaju čime postajemo svjedocima široke rasprostranjenosti VOIP-a, poneko loše iskustvo i povremeni problemi prolaze u trenu, čim stigne račun za telekomunikacijske usluge. Uporaba VOIP-a krije još jednu zanimljivu činjenicu, posve nemjerljivu s PSTN sustavima: mnogo korisnika i sudionika ali samo jedna mreža svih mreža – Internet, [56], [57].

5.1 QOS parametri

Kvaliteta usluge je kod VoIP-a izrazito bitan čimbenik jer je to aplikacija koja se odvija u stvarnom vremenu i interaktivna. Upravo ta interaktivnost određuje kritične parametre kvalitete ove aplikacije, a to su kako je navedeno u nastavku.

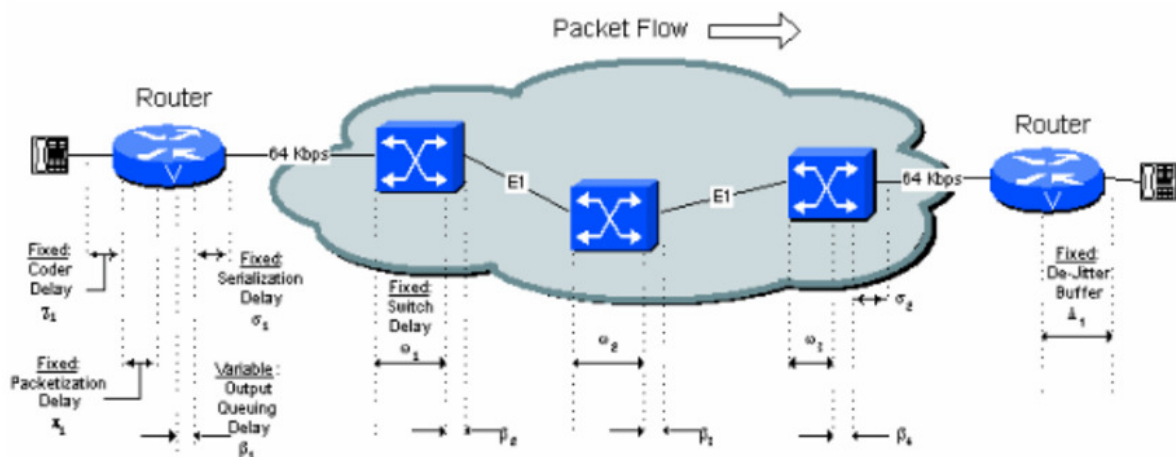
5.1.1 Kašnjenje

Kašnjenje – može se definirati kao vrijeme potrebno da paket stigne od pošiljatelja do primatelja. Na njega utječu razni faktori fiksne i varijabilne prirode kao što su paketizacija, serijalizacija, kompresija, kodiranje, čekanje u redovima, varijabilna veličina paketa, propagacija i drugi. Od strane ITU-a je u preporuci ITU-T G.114 propisano da kašnjenje u jednom smjeru za govor ne smije biti veće od 150 milisekundi, [2], [57].

Izvori kašnjenja se, prema [59], mogu podijeliti na dvije vrste:

1. Fiksni izvori kašnjenja, koji uvijek postoje i poznatih su iznosa
2. Varijabilni izvori kašnjenja, koji mogu postojati i nepoznat im je iznos jer ovisi o trenutnom stanju mreže.

Na slici 5.1. prikazani su fiksni i varijabilni izvori kašnjenja, kao i mjesta u mreži gdje nastaju.



Slika 5.1. Izvori kašnjenja, [59]

Kao što se može uočiti na slici 5.1. u fiksne izvore kašnjenja ubrajaju se kašnjenja koja nastaju radi kodiranja/dekodiranja, paketizacije, serijalizacije, komutacije, propagacije, te kašnjenje zbog uklanjanja varijacija u kašnjenju na prijemnoj strani. U varijabilne izvore ubraja se kašnjenje zbog čekanja u redovima na posluživanje. Kašnjenje varijabilnog izvora koje nije navedeno na slici je i kašnjenje koje nastaje zbog varijabilne veličine paketa, [2].

Kašnjenje zbog kodiranja je ono vrijeme koje je potrebno da procesor digitalnih signala (DSP - *Digital Signal Processor*) kompresira blok PCM uzoraka (PCM – *Pulse Code Modulation*). Ovo kašnjenje se u literaturi naziva i kašnjenje zbog procesiranja, a na slici 5.1. označeno je kao χ_n . Iznos ovog kašnjenja se mijenja ovisno o brzini procesora i korištenom *codec*u. Primjerice ACELP algoritam (ACELP - *Algebraic Code Excited Linear Prediction*) analizira blokove PCM signala duljine 10 ms i tada ih kompresira, CS – ACELP algoritam (CS – ACELP - *Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction*) ima vrijeme procesiranja od 2.5 ms do 10 ms, ovisno o opterećenju DSP procesora. Ako je DSP potpuno opterećen s četiri govorna kanala ovo kašnjenje iznosi 10 ms, a ukoliko je DSP opterećen samo jednim govornim kanalom kašnjenje iznosi 2.5 ms, [59].

Vrijeme dekompresije je oko 10 % vremena kompresije za svaki blok uzoraka, ali je proporcionalno broju uzoraka u okviru te tako najgori slučaj za okvir s tri uzorka je 3x 1 ms odnosno 3 ms. Obično su dva ili tri bloka uzoraka za G.729 codec stavljena u jedan okvir, dok je za G.723.1 jedan blok uzoraka unutar jednog okvira, [59].

Tablica 6. Granični slučajevi kašnjenja zbog kodiranja

Coder	Brzina (Rate)	Duljina bloka uzoraka	Najbolji slučaj	Najgori slučaj
ADPCM, G.726	32 Kbps	10 ms	2.5 ms	10 ms
CS-ACELP, G.729A	8.0 Kbps	10 ms	2.5 ms	10 ms
MP-MLQ, G.723.1	6.3 Kbps	30 ms	5 ms	20 ms
MP-ACELP, G.723.1	5.3 Kbps	30 ms	5 ms	20 ms

Izvor: [59]

Algoritmi za kompresiju se oslanjaju na poznate karakteristike govora kako bi ispravno procesirali blok uzoraka N, jer algoritam mora znati što se nalazi u bloku N+1 kako bi ispravno reproducirali blok N. To uzrokuje dodatno kašnjenje, koje se u literaturi naziva algoritamsko kašnjenje i ono povećava duljinu kompresijskog bloka. Ovaj pogled unaprijed (eng. *look ahead*) se ponavlja za svaki blok uzoraka, a iznosi su mu različiti ovisno o korištenom codec-u te, prema [59], iznose: G.726 - 0 ms, G.729 - 5 ms, G.723.1 - 7.5 ms.

Kašnjenje zbog paketizacije, na slici 5.1. označeno kao π_n , je vrijeme potrebno kako bi se paket ispunio podacima kodiranog/kompresiranog govora. Ono je funkcija veličine bloka uzoraka i broja blokova uzoraka koji se nalaze unutar jednog okvira.

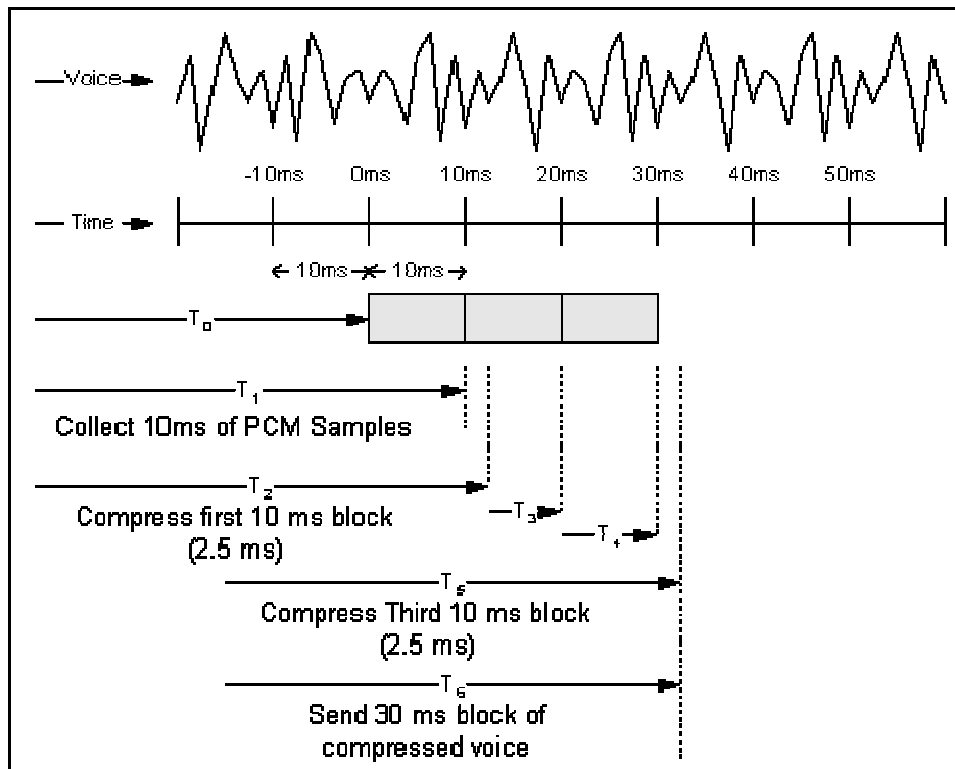
Drugi naziv na koji se može naići u literaturi je akumulacijsko kašnjenje, jer se govorni uzorci akumuliraju u bufferu. Iznos ovog kašnjenja ne bi trebao biti veći od 30 ms. U tablici 7 prikazani su iznosi ovog kašnjenja za različite codece i veličine okvira.

Tablica 7. Paketizacija

Coder		Podaci (Byte)	Paketizacijsko kašnjenje (ms)	Podaci (Byte)	Paketizacijsko kašnjenje (ms)
PCM, G.711	64 Kbps	160	20	240	30
ADPCM, G.726	32 Kbps	80	20	120	30
CS-ACELP, G.729	8.0 Kbps	20	20	30	30
MP-MLQ, G.723.1	6.3 Kbps	24	24	60	48
MP-ACELP, G.723.1	5.3 Kbps	20	30	60	60

Izvor: [59]

Na svaki govorni uzorak djeluju i algoritamsko i paketizacijsko kašnjenje koja se u stvarnosti preklapaju, kako je prikazano na slici 5.2., što se u konačnici pokazuje kao korist za mrežu.



Slika 5.2. Preklapanje algoritamskog i paketizacijskog kašnjenja, [59]

Gornja linija prikazuje valni oblik govornog uzorka. Drugi red prikazuje vremensku skalu s podjelom od 10 ms. U točki T_0 , CS-ACELP algoritam počinje skupljati PCM uzorke. U točki T_1 , algoritam je skupio prvih 10 ms bloka uzoraka i počinje kompresiju. U točki T_2 , prvi blok uzoraka je kompresiran, a vrijeme kompresije je 2.5 ms ($T_2 - T_1$). Drugi i treći blok uzoraka su prikupljeni u točkama T_3 i T_4 . Treći blok je kompresiran u točki T_5 . Paket je sklopljen i poslan u točki T_6 . Zahvaljujući preklapanju procesa kompresije i paketizacije ukupno kašnjenje, od trenutka početka procesa do trenutka slanja paketa ($T_6 - T_0$) je 32.5 ms. Ovo su podaci za najbolji slučaj, dok je u najgorem slučaju taj iznos 40 ms, 10 ms za kompresiju i 30 ms za paketizaciju, [59].

U gornje primjere nije uključeno algoritamsko kašnjenje, što znači da se taj iznos još povećava za iznos ovisan o korištenom codec-u.

Serijalizacijsko kašnjenje, na slici 5.1. označeno kao σ_n , je fiksno kašnjenje potrebno kako bi se svi bitovi paketa poslali na mrežni link za prijenos. Relativno je malih iznosa i nema veliki utjecaj na ukupno kašnjenje. Tablicom 8. prikazani su iznosi serijalizacijskog kašnjenja ovisno o veličini okvira i brzini prijenosnog linka. U izračunu iznosa kašnjenja korištena je ukupna veličina okvira (uključujući i zaglavlje okvira), a ne samo veličina podataka koji se prenose, [59].

Tablica 8. Serijalizacijsko kašnjenje u milisekundama za različite veličine okvira

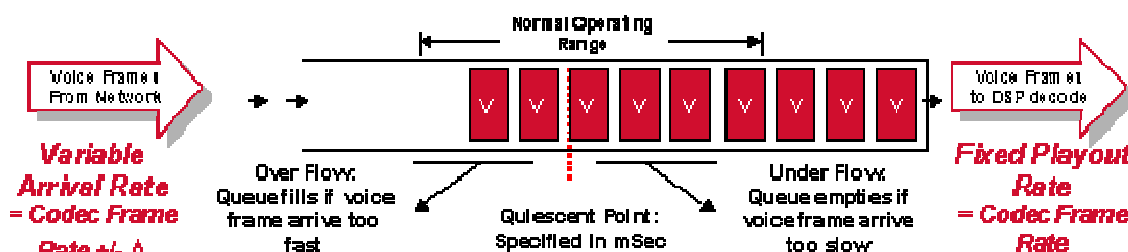
Veličina okvira (byte)	Brzina prijenosnog medija (Kbit/s)										
	19.2	56	64	128	256	384	512	768	1024	1544	2048
38	15.83	5.43	4.75	2.38	1.19	0.79	0.59	0.40	0.30	0.20	0.15
48	20.00	6.86	6.00	3.00	1.50	1.00	0.75	0.50	0.38	0.25	0.19
64	26.67	9.14	8.00	4.00	2.00	1.33	1.00	0.67	0.50	0.33	0.25
128	53.33	18.29	16.00	8.00	4.00	2.67	2.00	1.33	1.00	0.66	0.50
256	106.67	36.57	32.00	16.00	8.00	5.33	4.00	2.67	2.00	1.33	1.00
512	213.33	73.14	64.00	32.00	16.00	10.67	8.00	5.33	4.00	2.65	2.00
1024	426.67	149.29	128.00	64.00	32.00	21.33	16.00	10.67	8.00	5.31	4.00
1500	625.00	214.29	187.50	93.75	46.88	31.25	23.44	15.63	11.72	7.77	5.86
2048	853.33	292.57	256.00	128.00	64.00	42.67	32.00	21.33	16.00	10.61	8.00

Izvor: [59]

Čekanje u redu za posluživanje (prijenos) je varijabilni izvor kašnjenja, koji može i ne mora postojati u mreži, a njegovi iznosi nisu poznati unaprijed jer ovo kašnjenje ovisi o trenutnom stanju mreže. Paketi čekaju u redovima za posluživanje u slučajevima zagušenja mreže. Iznos ovog kašnjenja trebao biti manji od 10 ms, [60].

Govor treba imati najviši prioritet pri prijenosu, te stoga treba čekati samo onaj podatkovni paket koji je trenutno na posluživanju ili druge govorne pakete koji su ispred njega. Kašnjenje zbog čekanja na posluživanje je na slici 5.1. označeno kao β_n i ovisi o brzini prijenosnog medija i trenutnom stanju reda čekanja, [59].

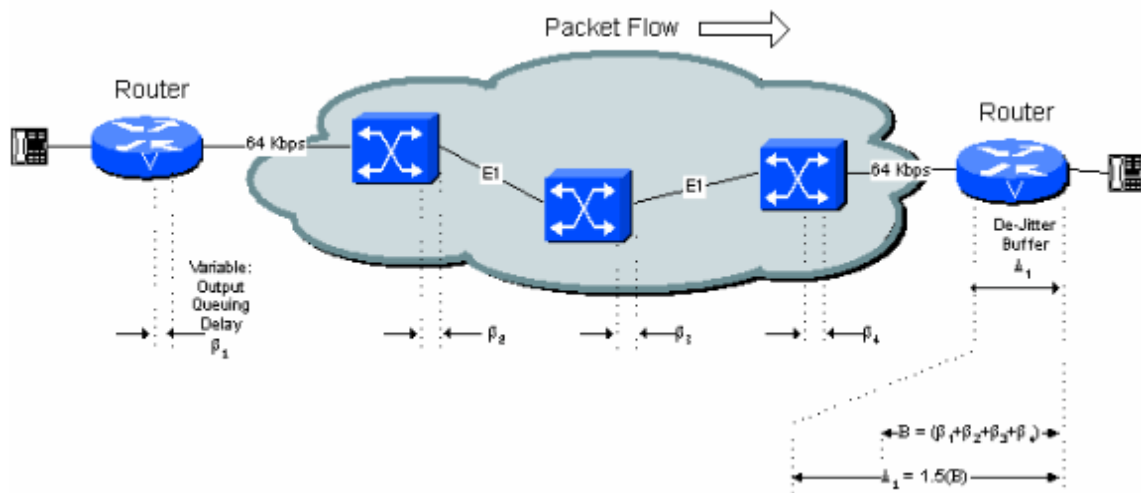
Kako je govor usluga konstante brzine prijenosa potrebno je ukloniti sve varijacije u kašnjenju prije nego signal napusti mrežu. To se postiže međuspremnicima za uklanjanje varijacija u kašnjenju (eng. *de-jitter buffer*) koji je na slici 5.1. označen kao Δ_n , i nalazi se na strani prijemnika. De-jitter buffer pretvara varijabilno kašnjenje u fiksno na način prikazan slikom 5.3.



Slika 5.3. Rad de-jitter buffera, [59]

De-jitter buffer drži prvi primljeni uzorak određeni vremenski period prije puštanja (eng. *initial playout delay*). Od velike je važnosti ispravno konfigurirati de-jitter buffer. Ako

se uzorci drže u bufferu prekratko varijacije u kašnjenju ostaju i mogu nastati prekidi u govoru. Ako se uzorci drže u bufferu predugo dolazi do odbacivanja paketa i ponovo nastaju prekidi u govoru, a kašnjenje može narasti do neprihvatljivih iznosa. Optimalni initial play out delay za de-jitter buffer jednak je ukupnom varijabilnom kašnjenju na čitavom putu, kao što je prikazano na slici 5.4., [59], [60].



Slika 5.4. Varijabilno kašnjenje i de-jitter buffer, [59]

De-jitter buffer može biti adaptivan, ali je maksimalno kašnjenje fiksno. Kada se konfiguriraju adaptivni bufferi kašnjenje postaje varijabilna veličina. Kašnjenje inicijalnog puštanja (eng. *initial playout delay*) je konfigurabilno. Najveća dubina buffera prije prelijevanja (eng. *Overflow*) je uobičajeno postavljeno na 1.5 ili 2 puta veću vrijednost od vrijednosti prelijevanja. Ukoliko se postavi nominalna vrijednost kašnjenja od 40 ms, prvi primljeni govorni uzorak u praznom de-jitter bufferu se drži 40 ms prije puštanja. To znači da sljedeći govorni paket može imati maksimalno kašnjenje od 40 ms bez ikakvog prekida u kontinuitetu govora. Ako je taj paket ima kašnjenje veće od 40 ms de-jitter buffer se prazni i sljedeći paket se drži 40 ms prije puštanja, kako bi se resetirao buffer, što uzrokuje prekide u govoru od 40 ms, [59], [60].

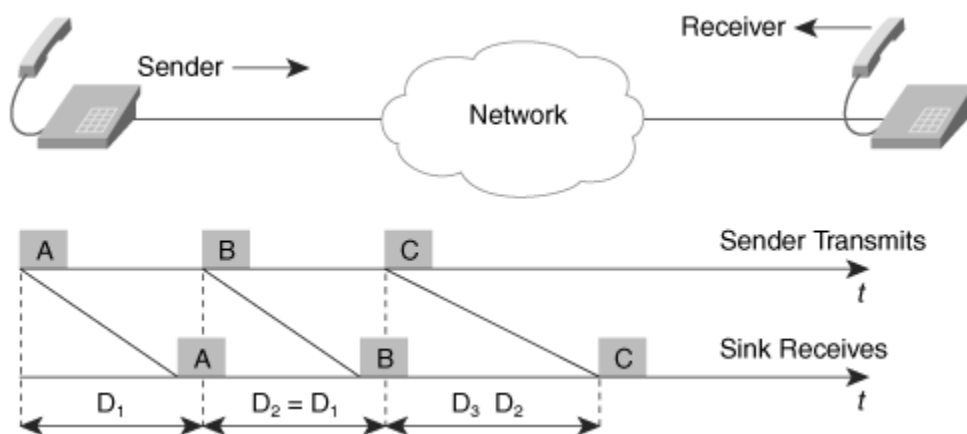
Može se zaključiti da je doprinos de-jitter buffera u ukupnom kašnjenju u iznosima kašnjenja inicijalnog puštanja plus iznos zadržavanja prvog paketa u međuspremniku. Postoje dvije izvedbe de-jitter buffera: statički i dinamički. Statički su ili preveliki ili premali što degradira kvalitetu govora jer dolazi ili do odbacivanja paketa ili do velikog kašnjenja. Dinamički povećavaju ili smanjuju veličinu obzirom na dolazna vremena nekoliko posljednjih paketa, što djeluje povoljnije na kvalitetu govora, ali je potrebno dobro konfigurirati de-jitter buffer, [60].

5.1.2 Jitter

Varijacija kašnjenja (*jitter*) javlja se kao posljedica nejednakih vremena posluživanja za sve pakete u prometnom toku, kao i zbog prolaska paketa različitim putovima do odredišta. *Jitter* više otežava implementaciju VoIP aplikacija nego samo kašnjenje. Varijacija kašnjenja se ublažava tako da se na prijemnoj strani postavljaju posebni spremnici (*de-jitter buffer*) koji

primaju pakete, ali ih ne prosljeđuju odmah već paketi ostaju određeno vrijeme u spremniku. To vrijeme zadržavanja ne smije biti fiksno, već se treba prilagoditi uvjetima u mreži. Najčešće se primjenjuju prediktorski algoritmi koji predviđaju kako će se kašnjenje u mreži mijenjati u budućnosti na temelju već primljenih paketa, [57].

Jitter je u biti varijacija u međudolaznim vremenima paketa. Jitter postoji samo u paketski orijentiranim mrežama. U tim mrežama se očekuje da pošiljalatelj može slati pakete u pravilnim vremenskim intervalima (recimo jedan okvir svakih 20 ms). Ti paketi se mogu slati različitim putovima kroz mrežu i ne stizati na odredište u jednakim vremenskim intervalima, kako je prikazano slikom 5.5. razlika u očekivanom i stvarnom vremenu dolaska paketa je jitter, [60].



Slika 5.5. Varijacije u dolaznim vremenima paketa (jitter), [60]

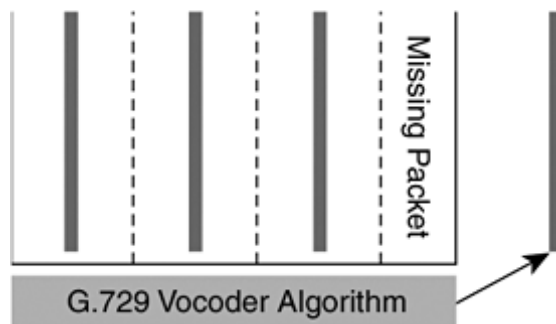
Na slici 5.5. može se uočiti da je razlika vremena slanja i primanja paketa A i B jednaka ($D_1 = D_2$). Paket C u mreži nailazi na drugačije uvjete od paketa A i B, te ima veće kašnjenje i na odredište dolazi kasnije od očekivanog vremena. Upravo iz tog razlog su neophodni de-jitter bufferi, jer oni prikrivaju razlike u dolaznim vremenima paketa, a govorni paketi izrazito varijabilna međudolazna vremena, [60].

Jitter i ukupno kašnjenje nisu sinonimi, iako u velikim mrežama s puno usmjernika jitter može uzrokovati znatno povećanje kašnjenja. Kako de-jitter bufferi nisu beskonačne veličine ponekad je bolje odbaciti pakete nego stvarati velika i neželjena kašnjenja de-jitter bufferima. Jitter obično ne predstavlja problem u pogledu kašnjenja i ne pridonosi ukupnom iznosu kašnjenja u značajnom iznosu, [59], [60].

5.1.3 Gubitak paketa

Izgubljeni paketi su normalna i česta pojava u mrežama, a do gubitaka paketa može doći iz razloga kao što je preopterećenje linka, česte kolizije na lokalnoj mreži ili zbog fizičkog oštećenja prijenosnog medija. TCP protokol ima ugrađen mehanizam retransmisije te na taj način ispravlja ovakve pogreške. Kako VoIP u većini slučajeva koristi nepouzdan UDP, o izgubljenim paketima moraju brinuti drugi mehanizmi. Ako je postotak izgubljenih paketa mali, oko 1 %, nisu potrebne nikakve akcije, jer je gubitak govornog signala u tom trajanju jedva primjetan. Čak i gubitak paketa do 10 % se može ispraviti na prijemnoj strani, ali sve preko toga smatra se da je veza neupotrebljiva za prijenos govora, [57].

Mnogi protokoli koriste gubitak paketa kao pokazatelj uvjeta mreže kako bi smanjili ili povećali broj paketa koji se šalje. Kod vremenski osjetljivog prometa, kakav je prijenos govora, od velike je važnosti kontrolirati količinu izgubljenih paketa. Za to se koriste različiti mehanizmi poput klasifikacije prometnih tokova, primjene adekvatnih prometnih politika, davanje prioriteta i druge, kojima se broj izgubljenih paketa svodi na minimum. Jedna od njih ponavljanje posljednjeg primljenog paketa, kao što je prikazano na slici 5.6.



Slika 5.6. Gubitak paketa kod G.729, [60]

Govorni usmjernik je konfiguriran na način da odgovori na periodični gubitak paketa. Ako paket nije primljen u očekivanom vremenu smatra se izgubljenim, a posljednji primljeni paket se ponavlja. Kako je duljina izgubljenog paketa samo 20 ms govora čovjek ne primjećuje razliku u kvaliteti govora zbog tromosti ljudskih osjetila. Međutim, ova strategija skrivanja izgubljenih paketa djeluje samo u slučaju ako je jedan paket izgubljen. Ukoliko dođe do gubitka više uzastopnih paketa osjeti se prekid u govoru, jer strategija skrivanja ponavlja samo jedan paket jednom i ne pokreće se ponovo za sljedeći paket. Zbog strategije skrivanja i ponavljanja izgubljenog paketa G.729 ima toleranciju na izgubljene pakete od 5 % unutar jednog poziva, [60].

Dodjela prioriteta uslugama u realnom vremenu nad ostalim uslugama može riješiti veliki dio problema oko osiguranja potrebne razine kvalitete usluge, ali se pri izboru odgovarajuće discipline posluživanja mora voditi računa o velikom broju čimbenika: vrsti mreže, broju prometnih tokova, broju stvarno vremenskih prometnih tokova, zahtjevima pojedinog toka i slično.

5.2 Sigurnosni aspekti VOIP tehnologije

Glavni problemi vezani uz sigurnost kod VOIP-a su slični problemima sigurnosti IP mreža. Upotrebom IP adresiranja većina podatkovne komunikacije se danas obavlja putem Interneta. Kako VoIP također koristi IP adresiranje za lociranje ostalih korisnika na glasovnim komunikacijskim mrežama, tako je IP sigurnost jako važna stavka sigurnosti VoIP mreža, za koje se očekuje da postanu okosnica svih glasovnih komunikacija u svijetu, [57].

Neke od prijetnji koje su zajedničke IP i VoIP mrežama su neovlašteno praćenje i analiza prometa (*Sniffing / Eavesdropping*), uskraćivanje računalnih resursa (DoS - *Denial of Service*) i distribuirano uskraćivanje računalnih resursa (DDoS - *Distributed Denial of Service*).

Neovlašteno praćenje i analiza prometa je vrsta napada koji može rezultirati otkrivanjem povjerljivih ili nezaštićenih korisničkih informacija, a u najgorem slučaju i krađom identiteta korisnika. Iskorištavanjem ovog propusta napadačima je omogućeno prikupljanje informacija o VoIP mreži koje se mogu iskoristiti za napade na druge dijelove mreže (podatkovna, nadzorna, itd.). Svi potrebni alati za prisluškivanje, uključujući i H.323 i SIP pomoćne programe za paketno prisluškivanje mogu se pronaći na Internetu. Za rješavanje ovih napada predlaže se primjena neke od dodatnih metoda enkripcije na višim mrežnim slojevima (tuneliranje prometa korištenjem virtualnih privatnih mreža), [57], [58].

Uskraćivanje računalnih resursa su vrsta napada koji mogu biti zasnovani na okupiranju računalnih mreža s nepotrebnim podacima ili na rušenju pojedinih komponenti mreže. Ukoliko organizacija koristi tradicionalne komunikacijske kanale za razgovor (PSTN), tada čak i u slučajevima kada je podatkovna mreža srušena, organizacija i dalje može komunicirati i obavljati telefonske razgovore. Ali ukoliko organizacija bazira svoje poslovanje na VoIP mreži, tada DoS napadi mogu biti veoma efikasni protiv tih organizacija. To je prvenstveno rezultat činjenice da DoS napadi ili prekidaju uslugu ili smanjuju kvalitetu postojeće usluge za koju je nužno da bude visoka kako bi VoIP bio funkcionalan. Zbog opasnosti koju DoS napadi predstavljaju za VoIP mreže, proizvođači VOIP opreme sve češće ugrađuju u svoje proizvode različite metode zaštita od DoS napada, [58].

Distribuirano uskraćivanje računalnih resursa su vrsta napada koji su slični prethodno opisanim napadima uz razliku što se ovi napadi ne izvršavaju s jednog, nego s većeg broja računala. Da bi maliciozni korisnik izvršio DDoS napad potrebno je da na određeni način utječe na veću skupinu računala. To se može izvesti ukoliko napadač preuzme kontrolu nad tim računalima. Ta računala mogu biti upravljana preko različitih virusa i "trojanaca" koji napadaču omogućavaju upravljanje računalima i zagušivanje mreže hrpom nepotrebnih podataka koji uzrokuju uskraćivanje resursa na napadnutom računalu ili mreži. Za ispunjenje DDoS napada nije potrebno da napadač preuzme kontrolu nad računalima s kojih želi izvesti napad. Napadač može izvesti DDoS napad ukoliko pošalje zahtjev s lažiranom izvorišnom IP adresom na grupu računala. Tada će sva ta računala odgovoriti na te upite na ciljano računalo te time onemogućiti rad tog računala, [58].

Prijetnje koje su karakteristične za VoIP mreže su Presretanje poziva (*call interception*), Krađa identiteta, Financijska zlouporaba VoIP infrastrukture (*call fraud*) i VoIP neželjena pošta (SPIT - *Spam over Internet Telephony*). Presretanje poziva omogućava nedozvoljeno nadgledanje i snimanje poziva i glasovnih poruka. Presretanjem i prisluškivanjem poziva unutar organizacija moguće je ukrasti tajne i povjerljive poslovne podatke. VoIP pozivi se mogu presretati tako da se preusmjere na neki posredni poslužitelj koji prema svojoj konfiguraciji nadzire VoIP pozive - tzv. "*Man in the middle*" napad. VoIP pozivi se mogu na jednostavan način skupljati i dekodirati ukoliko napadač ima fizički pristup lokalnoj računalnoj mreži preko koje VoIP paketi putuju. Kao protumjere za ovakve napade potrebno je zaštititi fizičke pristupe mreži te implementirati enkripciju s nekom od raspoloživih metoda. Krađom tuđeg identiteta napadač može doći do informacija potrebnih za stjecanje kontrole nad tuđim IP telefonom te preusmjeriti promet na drugu lokaciju. Ukoliko legitimni korisnik nije svjestan preusmjeravanja poziva tada on može odavati povjerljive

informacije, a da nije ni svjestan toga. Financijska zlouporaba VoIP infrastrukture je specifičan napad za VoIP mreže koji se sastoji od nezakonitog korištenja VoIP infrastrukture za obavljanje telefonskih poziva. Takvi telefonski pozivi izgledaju kao da su pokrenuti od legitimnih korisnika unutar napadnute mreže pa se njima i naplaćuju, [57], [58].

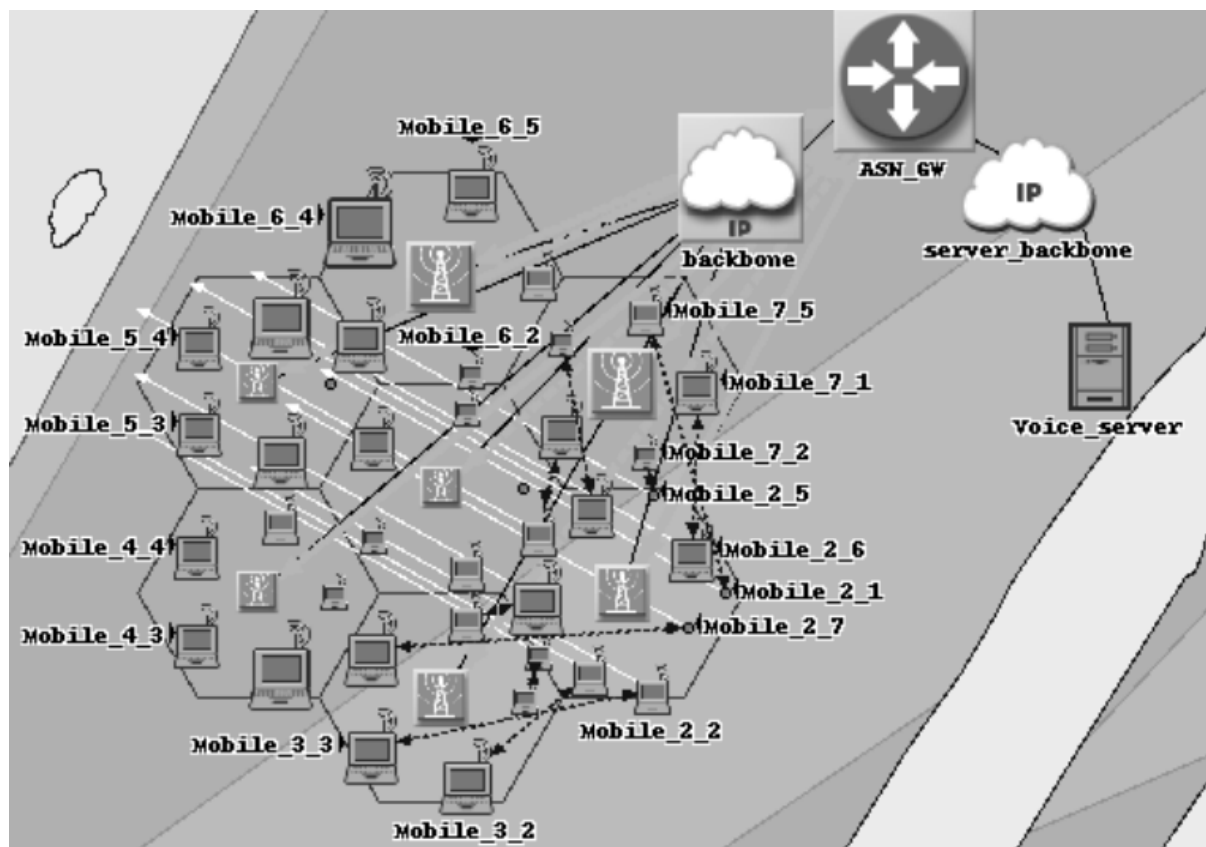
6 ANALIZA PERFORMANSI VOIP-A KORIŠTENJEM MOBILNIH MREŽA WIMAX, LTE I WLAN

U ovom poglavlju su prikazani važniji parametri QoS-a za VoIP na različitim mrežama ili kombinacijom istih. Analiza performansi prikazana je i komentirana preko preuzetih simulacija iz znanstvenih i stručnih radova vodećih stručnjaka i znanstvenika ovog područja, a iz razloga ograničenosti dostupne licence Riverbed Modelera po pitanju mreže LTE.

6.1 WiMAX - WLAN

Kako bi se što bolje prikazalo iznose određenih kritičnih parametara u radu su korištene simulacije iz nekoliko izvora. Za prikaz performansi VoIP-a na mobilnim WiMAX i WLAN korišteni su podaci iz [20], gdje se uspoređuju vrijednosti parametara kao što su jitter i kašnjenje s kraja na kraj na mobilnim WiMAX i WLAN mrežama te integriranoj WiMAX – WLAN mreži. Za izradu simulacije korišten je simulacijski program OPNET.

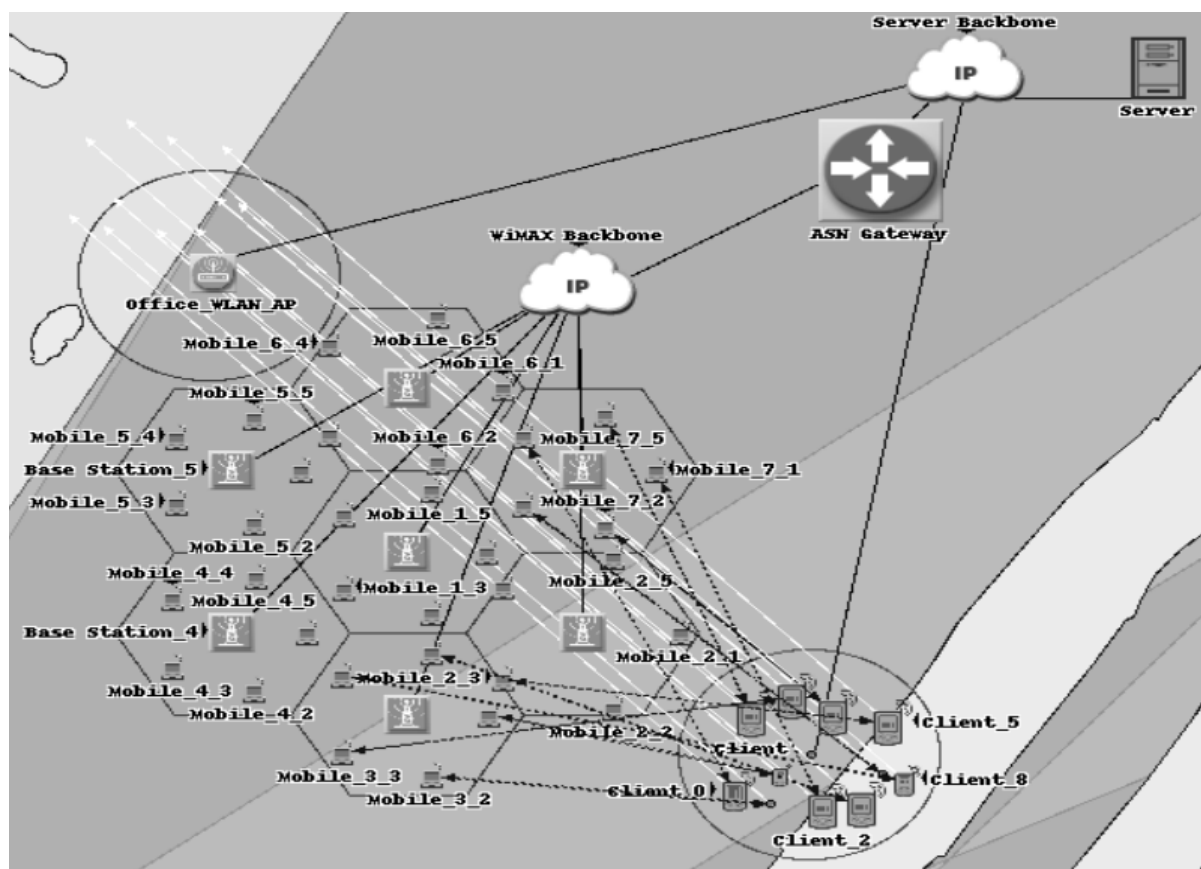
U simulaciji je WiMAX mreža realizirana pomoću sedam ćelija, s višestrukim pretplatničkim stanicama unutar područja pokrivanja bazne stanice. Bazna stanica je s jezgrom mreže povezana poslužiteljskom okosnicom (engl. *server backbone*) preko IP okosnice (engl. *IP backbone*) i ASN Gatewaya koji kontrolira mobilnost mobilnih čvorova. Poslužiteljska okosnica je dalje povezana sa SIP poslužiteljem. Ovo je prikazano slikom 6.1.



Slika 6.1. Simulacijski model WiMAX mreže, [20]

U simulacijskom modelu prikazanom na slici 6.1. korišteno je tuneliranje pomoću GRE protokola (GRE - *Generic Routing Encapsulation*) kako bi se uspostavili tuneli između ASN gatewaya i baznih stanica. Ovi tuneli su potrebni za kontrolu mobilnosti mobilnih čvorova. Sami mobilni čvorovi su konfigurirani tako da se kreću različitim brzinama - od 50 km/sat, 100 km/sat i 15 km/sat. Broj pretplatnika u ćeliji 2 je 10, dok je u ćeliji 3 i ćeliji 7 postavljeno 10 pretplatnika. Između tih pretplatnika su uspostavljeni SIP pozivi koji su prikazani linijama sa strelicama, [20].

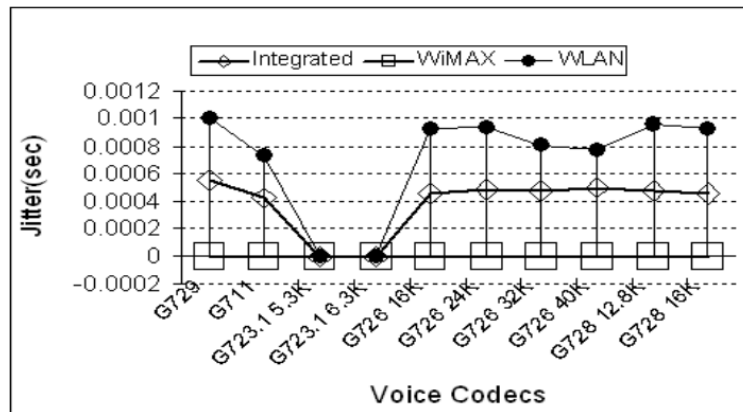
Integrirana WiMAX – WLAN mreža je realizirana pomoću dva (2) WLAN hot spota, dok je veliko područje između njih pokriveno WiMAX mrežom. Ovakva konfiguracija je prikazana na slici 6.2.



Slika 6.2. Simulacijski model integrirane WiMAX – WLAN mreže, [20]

Kao što je prikazano na slici 6.2. WiMAX – WLAN integrirana mreža je dizajnirana na način da je 10 čvorova konfigurirano da se kreću od jednog do drugog AP-a, dok u isto vrijeme komuniciraju s 5 čvorova u ćeliji 3 i s 5 čvorova u ćeliji 7 unutar WiMAX mreže. U rezultatima simulacije je vidljivo da mobilni čvorovi komuniciraju čak i kad su izvan područja pokrivanja WLAN mreže, odnosno kada su unutar WiMAX mreže, [20].

Na slikama 6.3 i 6.4 prikazane su varijacije jittera za različite *codece*, sa i bez primjene metode potiskivanja tišine, komparirajući te performanse na WiMAX i WLAN mreži te na WLAN – WiMAX integriranoj mreži. Na slici 6.3. prikazani su ostvareni iznosi jittera za VoIP. Na slici 6.3. prikazani su iznosi jittera za različite *codece* bez primjene mehanizma potiskivanja tišine.

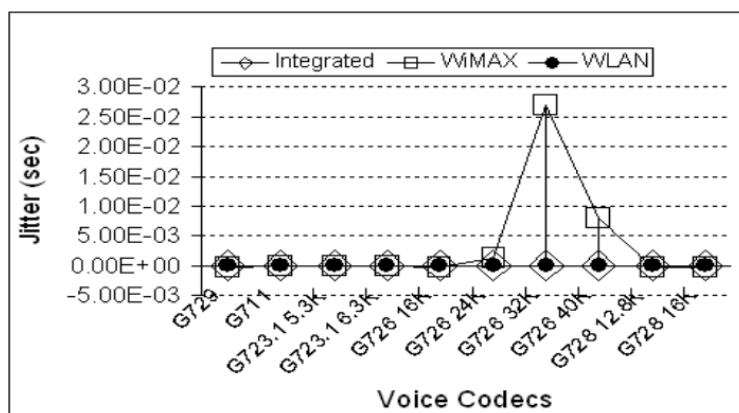


Slika 6.3. Prosječni jitter bez potiskivanja tišine, [20]

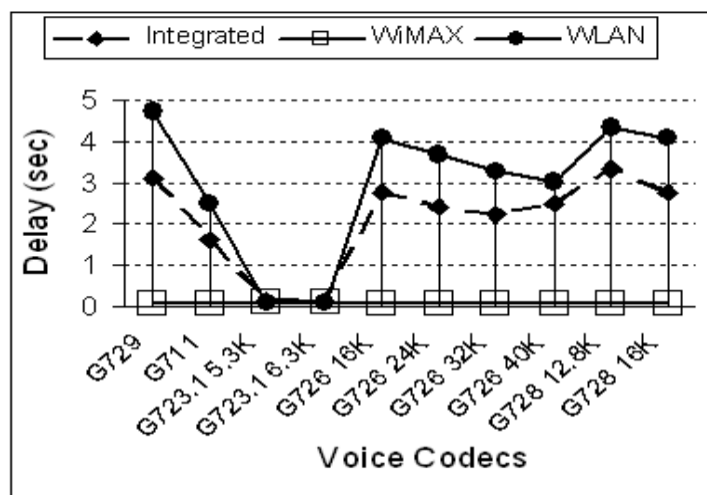
Sa slike 6.3. može se uočiti da prosječni jitter za WiMAX iznosi 0, što pokazuje vrlo dobru kvalitetu govora, a WLAN mreža pokazuje pozitivne vrijednosti jittera u iznosima od 0.0007 do 0.001 sekunde, dok integrirana mreža ima iznose jittera od 0.0004 do 0.0006 sekundi. Međutim, ti iznosi ovise o codec-u. Tako je vidljivo da je za G.723.1, neovisno radi li se brzini prijenosa od 5,3 kbit/s ili 6,3 kbit/s, prosječni iznos jittera 0 za sve mreže, što se najviše može zahvaliti tome što ovdje dolazi do generiranja malih paketa, [20].

Promatrajući rezultate simulacije na slici 6.3. može se vidjeti da najlošije rezultate, neovisno o primijenjenom codec-u, pokazuje WLAN mreža, dok su rezultati integrirane WLAN – WiMAX mreže u sredini. Ako se promatraju primijenjeni codeci tada se može uočiti da najbolji rezultat daje G.711, dok najlošiji rezultat ima G.729. međutim, kako je, prema ITU, najveći dozvoljeni iznos jittera 30 ms (0,03 s), tako je vidljivo da svi codeci zadovoljavaju uvjetima kvalitete.

U slučaju primjene metode potiskivanja tišine, kao što je prikazano na slici 6.4, rezultati pokazuju drukčije vrijednosti. Prosječni jitter je 0 za sve codece u svim promatranim mrežama, sa malim odstupanjima za codec G.726, kod kojeg je iznos jittera najveći za brzine prijenosa od 32kbps i iznosi oko 0.03 sekunde, što je još u dozvoljenim granicama, [20].



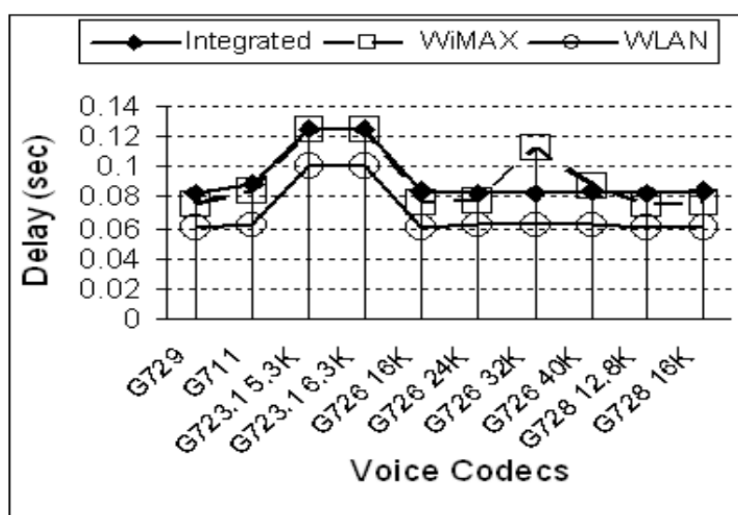
Slike 6.5 i 6.6 prikazuju kašnjenje paketa s kraja na kraj mreže za sve tri promatrane mreže.



Slika 6.5. Prosječno kašnjenje s kraja – na – kraj bez potiskivanja tišine, [20]

Na slici 6.5. prikazano je prosječno kašnjenje s kraja na kraj mreže bez upotrebe mehanizma potiskivanja tišine. Za WiMAX on iznosi manje od 0.5 sekundi bez potiskivanja tišine dok je za WLAN, posebice za codece s većim brzinama prijenosa, on izrazito visok. Razlog tome je što se i tišina paketizira što rezultira većim zahtjevom za propusnim pojasom i uzrokuje zagušenje. Kako integrirana mreža ima veće kapacitete tako je vidljiv i pad iznosa kašnjenja, jer povećani kapacitet rezultira manjim zagušenjem, [20].

Na slici 6.6. prikazano je prosječno kašnjenje s kraja na kraj mreže uz upotrebu mehanizma za potiskivanje tišine te su i rezultati same simulacije nešto različiti od prijašnjeg primjera.

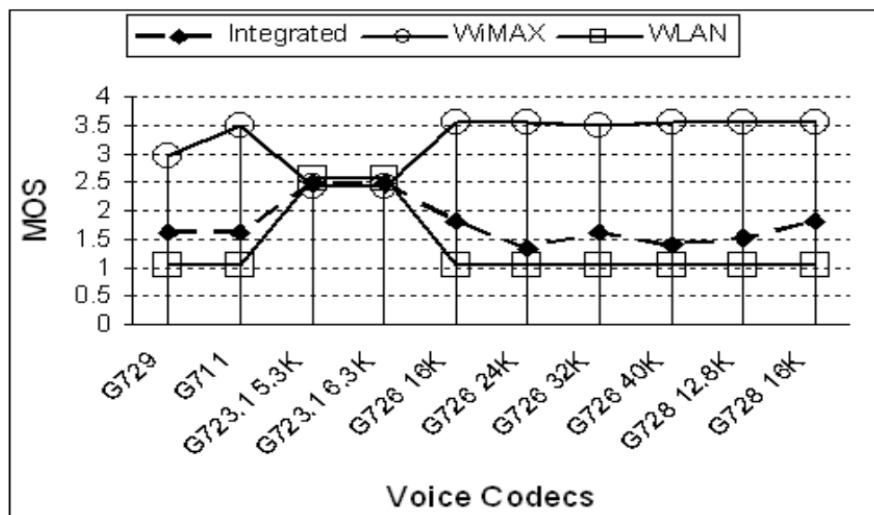


Slika 6.6. Prosječno kašnjenje s kraja – na – kraj s potiskivanjem tišine, [20]

Kako je prikazano na slici 6.6., kašnjenje paketa za VoIP s korištenjem mehanizma za potiskivanja tišine je veće za WiMAX nego za WLAN, dok je za integriranu mrežu gotovo jednakih iznosa kao i za WiMAX. Pri korištenju metode potiskivanja tišine smanjuje se broj

paketa što rezultira smanjenjem zagušenja u WLAN-u. Također, udaljenost koju paketi moraju proći je manja u WLAN mreži nego kod druge dvije, dok je za WiMAX i integriranu mrežu ona gotovo jednaka. Za WLAN kašnjenje paketa je oko 0.06 sekundi, osim za G.723.1, dok za WiMAX i WLAN-WiMAX integriranu mrežu kašnjenje varira od 0.08 sekundi (za G.729 i G.711) do 0.13 sekundi (za G.723.1). iz prikazanih podataka može se zaključiti da se pri upotrebi mehanizma za potiskivanje tišine smanjuje kašnjenje iz glavnog razloga: smanjuje broj paketa koji se mora paketizirati jer se uklanja tišina. Također se može zaključiti da kašnjenje ovisi o duljini puta koju paketi prolaze, a on je najmanji u WLAN mreži.

Na slikama 6.7 i 6.8 prikazuju prosječnu MOS vrijednost za tri promatrane mreže.

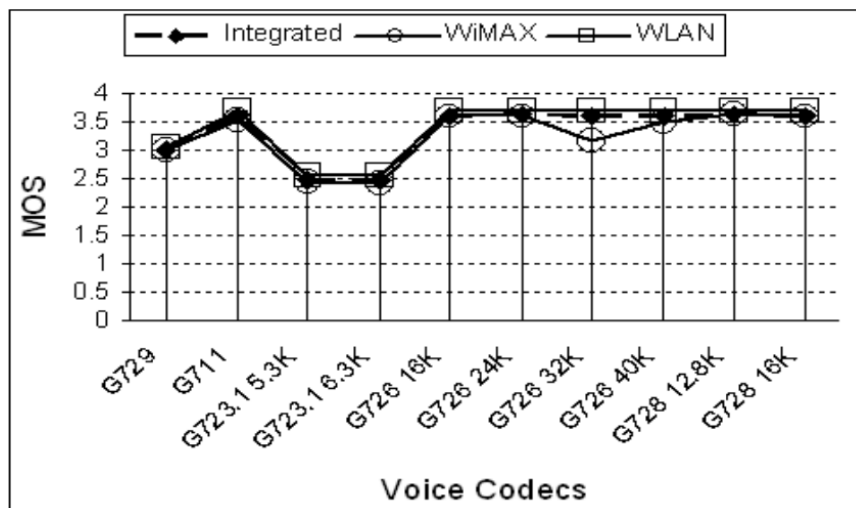


Slika 6.7. Prosječna MOS vrijednost bez potiskivanja tišine, [20]

MOS ovisi o kašnjenju paketa s kraja na kraj mreže i gubitku paketa. Na slici 6.7 može se uočiti da je za WiMAX mrežu MOS vrijednost iznad 3, za WLAN je 1, dok je za integriranu mrežu ta vrijednost 1.5, osim za G.723.1 gdje je 2.5. G.723.1 generira veći broj paketa što uzrokuje veće kašnjenje pa je MOS vrijednost niska u slučaju WiMAX mreže, dok s druge strane G.723.1 zahtijeva malu propusnost pa je manje odbačenih paketa u odnosu na druge codece WLAN mreže što rezultira većom MOS vrijednosti u odnosu na druge codece, [20].

Ukoliko se usporede rezultati kašnjenja s kraja na kraj, prikazani na slici 6.5., s rezultatima prikazanim na slici 6.7. te ukoliko se zna da MOS ovisi o kašnjenju i gubitku paketa, odnosno da se s povećanjem kašnjenja i gubitka paketa MOS vrijednost smanjuje, može se zaključiti da u ovom slučaju nema velikih gubitaka paketa te da MOS vrijednost izravno ovisi o veličini kašnjenja jer je kašnjenje najmanje za WiMAX dok je istovremeno za istu mrežu MOS vrijednost najveća.

U slučaju primjene metode potiskivanja tišine rezultat je potpuno drugačiji, kao što se može vidjeti sa slike 6.8.



Slika 6.8. prosječna MOS vrijednost s potiskivanjem tišine, [20]

Na slici 6.8. vidljivo je da WLAN mreža ima najbolje rezultate sa MOS vrijednosti preko 3.5 osim za G.711 i G.723.1. MOS vrijednost za G.711 je oko 3, a za G.723.1 je oko 2.5. Kada se koristi potiskivanje tišine broj paketa koji putuju mrežom se smanjuje što smanjuje zagušenje WLAN mreže. To uzrokuje smanjenje broja odbačenih paketa i povećava MOS vrijednost. Kašnjenje je veće za G.723.1 u usporedbi s ostalim codecima što rezultira nižom MOS vrijednosti, [20].

Iz svega prikazanog za tri promatrane mreže može se zaključiti da kritični parametri kvalitete usluge za VoIP ovise jedan o drugome te da bolje rezultate sve mreže pokazuju u slučaju upotrebe mehanizma za potiskivanje tišine, jer se njegovom primjenom smanjuje broj paketa što izravno utječe na smanjenje jittera i kašnjenja, a time se povećava MOS vrijednost.

U sljedećoj simulaciji promatra se područje koje se pokriva s dva različita scenarija: WLAN i WiMAX mrežom. Ova dva rješenja su simulirana alatom OPNET Modeller Wireless Suite koji implementira čitav TCP/IP protokolni složaj te, zahvaljujući tome, daje realistične rezultate. Performanse ova dva rješenja su evaluirane obzirom na rastući broj korisnika koji koriste slijedeće usluge: samo VoIP te VoIP i FTP, [62].

Tablicom 9. prikazani osnovni VoIP parametri korišteni u simulaciji.

Tablica 9. Parametri simulacije

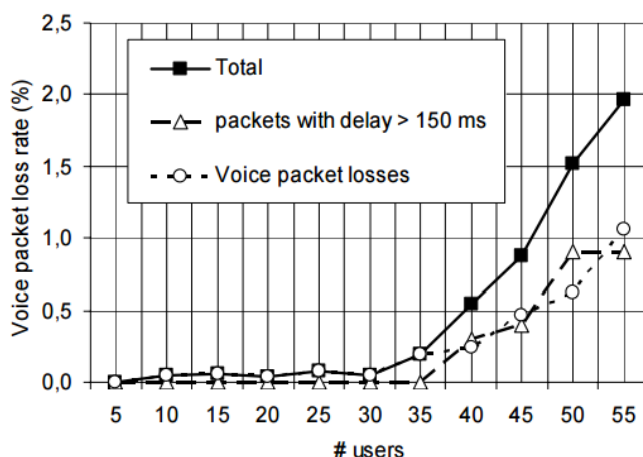
Parametri govora	
Interval uzorkovanja [ms]	20
Codec bit rate [kbit/s]	8
VOpkt [bytes]	20
IPhdr [bytes]	40

Izvor: [62]

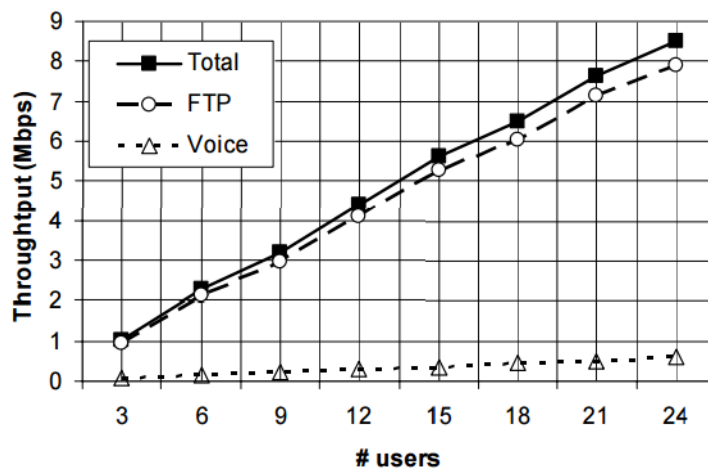
Iz podataka prikazanih tablicom vidljivo je da je korišten codec brzine 8 kbit/s koji svakih 20 ms producira jedan govorni paket (VOpkt) veličine 20 byta sa zaglavljem veličine (IPhdr) 40 byta. Broj korisnika ovisi o promatranoj vrsti prometa: 5 korisnika po jednoj AP za čisti VoIP promet te 3 korisnika za miješani VoIP i FTP promet. Povećanje broja korisnika po

simulaciji ostvaruje se dodavanjem jednog AP-a s odgovarajućim brojem korisnika. Broj izvedenih simulacija s različitim brojem korisnika je velik kako bi se dobili što realniji rezultati. Za prag (eng. *threshold*) je uzet najveći podržani broj aktivnih VoIP korisnika vodeći računa o zadovoljenju QoS zahtjeva za govor: najveće dozvoljeno kašnjenje od 150 ms, najveći dozvoljeni jitter od 50 ms i gubici paketa ispod 1%. Gubici paketa su predviđeni kao rezultat prelijevanja buffera te kao postotak prometa s kašnjenjem većim od 150 ms, [62].

Rezultati simulacija prikazani su slikama 6.9. i 6.10.



Slika 6.9. Gubici VoIP paketa (čisti VoIP promet), [62]



Slika 6.10. Propusnost, [62]

U simulaciji samo VoIP prometa, prikazanoj slikom 6.9., rezultati pokazuju da je najveći broj podržanih korisnika, uz zadovoljenje kvalitete usluge od najviše 1 % gubitaka, iznosi 54 korisnika. Međutim, ako se promatraju i gubici nastali zbog kašnjenja većeg od 150 ms, taj broj se smanjuje na 46 korisnika.

S porastom broja korisnika raste i broj mogućih kolizija što utječe na povećanje kašnjenja. To je vidljivo kada je broj korisnika veći od 35, jer tada dolazi do drastičnog porasta broja kolizija i broja paketa s nedozvoljenim iznosom kašnjenja koji bivaju odbačeni.

To pak utječe na povećani broj retransmisija što smanjuje količinu korisnih paketa koji putuju mrežom (eng. *goodput*), [62].

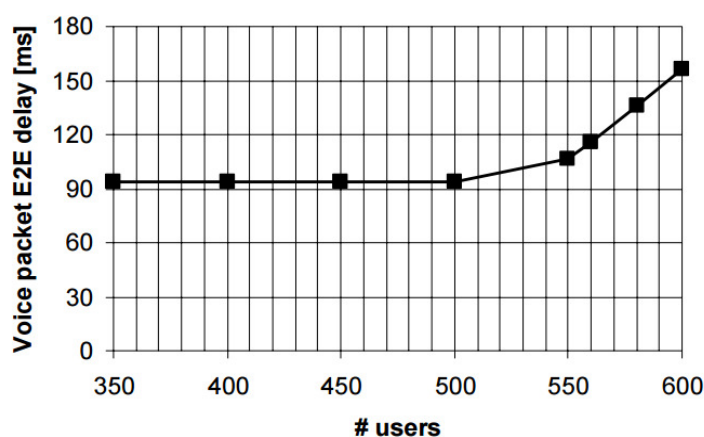
Kada se promatra miješani VoIP i FTP promet, prikazan slikom 6.10., vidljivo je da broj korisnika pada na 18. Smanjenje broja korisnika rezultat je vrste prometa koji putuje mrežom, jer je količina FTP prometa po korisniku mnogo veća od količine VoIP prometa (oko 320 kbit/s FTP prometa naspram 25 kbit/s za VoIP).

Kod FTP prometa, TCP garantira da neće biti grešaka u prijenosu, jer ukoliko do njih i dođe, TCP obavlja retransmisiju. Zanimljivost FTP prometa je u tome što jedan FTP paket veličine 1500 byta traje 528 μ s, dok VoIP paket veličine 60 byta traje 245 μ s, odnosno FTP paket, koji je oko 25 puta veći od VoIP paketa zahtijeva samo dvostruko više vremena za prijenos.

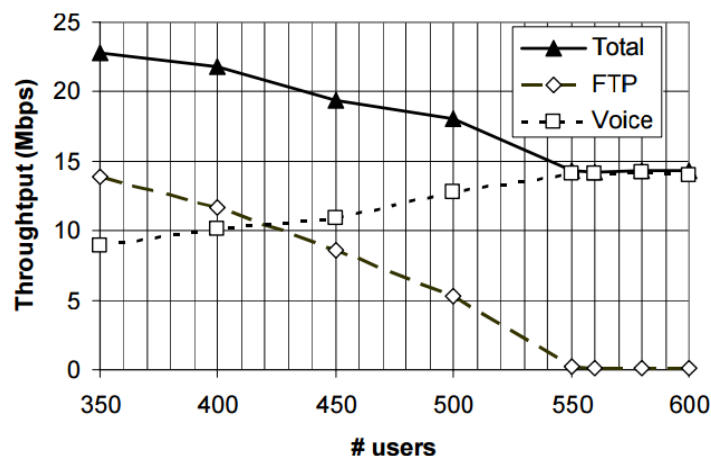
Međutim, FTP promet s TCP retransmisijama drastično povećava ukupan promet na mreži. Također, povećava kašnjenje VoIP paketa istovremeno smanjujući broj mogućih VoIP korisnika. Povećano kašnjenje govornih paketa za više od 18 istovremenih korisnika izravna je posljedica kumulativnih retransmisija. Na slici 6.10. vidljivo je da najveći dio propusnosti čini FTP promet te da njegov udio raste s porastom broja korisnika, dok VoIP promet ne prelazi udio od 1 Mbit/s. kao što je vidljivo sa slike 6.9. i 6.10. govorni i FTP promet se povećavaju istovremeno, jer ova tehnologija nema kontrolu prihvata poziva te rezervaciju resursa koja može garantirati kvalitetu usluge govornom prometu.

Promatranjem samo parametra kašnjenja može se zaključiti da nakon određenog broja korisnika (18), kvaliteta razgovora pada ispod standarda kvalitete (manje od 150 ms za kašnjenje). Iako su u standardu IEEE 802.11e uvedeni neki mehanizmi određivanja i dodjele prioriteta, oni još nisu dovoljno robusni kako bi mogli jamčiti kvalitetu usluge, [62].

Iz dobivenih simulacijskih rezultata za WiMAX, prikazanih slikama 6.11. i 6.12., vidljivo je znatno povećanje broja mogućih korisnika.



Slika 6.11. Kašnjenje govornih paketa za WiMAX, [62]



Slika 6.12. Propusnost za VoIP i FTP promet u WiMAX mreži, [62]

Prema slici 6.11., ako se promatra kašnjenje kao parametar, vidljivo je da u sustavu može biti istovremeno 551 korisnik, a da su još zadovoljne i kvalitete usluge od najviše 150 ms kašnjenja. Iznad ovog broja korisnika dolazi do odbacivanja zbog povećanog kašnjenja što je rezultat ograničenog kapaciteta odlaznog linka (UL – *UpLink*). Ukoliko se radi o čistom govornom prometu, rezultati su jednaki kao i kad se radi o miješanom VoIP i FTP prometu. Razlog tome je mehanizam rezervacije resursa koji govornom prometu osigurava apsolutni prioritet nad FTP prometom koji, klasificiran kao najbolja moguća usluga (eng. *best effort*) može dobiti preostali dio kapaciteta, [62].

U pogledu kašnjenja, prikazan na slici 6.11., može se uočiti da nakon broja od 500 korisnika kašnjenje počinje izrazito rasti. Taj porast kašnjenja se može zahvaliti potpuno opterećenoj mreži koja tada uzrokuje dodatna i veća kašnjenja. Nakon što se broj korisnika poveća preko 550, kašnjenje se drastično poveća, dosežući granične vrijednosti od 150 ms. Ovo povećanje kašnjenja rezultat je asimetričnosti kapaciteta odlaznog i dolaznog linka (DL – *DownLink*). Zbog toga je dolazni poziv prihvaćen, jer postoji dovoljan DL kapacitet za usmjeravanje. Međutim, ne postoji dovoljan UL kapacitet koji bi zadovoljio ovu simetričnu sesiju te UL komunikacija neće biti prosljeđena te će nastati veća kašnjenja koja će najveću posljedicu imati u ukupnom kašnjenju. Za prvih 551 korisnika prosječno kašnjenje se kreće oko 106 ms. Ovaj manjak efikasnosti u korištenju ostatka DL kapaciteta od strane govornih sesija može se objasniti jedino nedostatkom OPNET simulatora, jer je vidljivo da ukoliko je broj korisnika veći od 551 ne postoji FTP DL promet, [62].

Na slici 6.12. može se uočiti da je propusnost za govorni promet osigurana WIMAX-ovim mehanizmima rezervacije prijenosnog pojasa, dok za FTP promet ne postoji rezervacija, već on koristi preostali dio prijenosnog pojasa. Kada je čitav prijenosni pojas zauzet od strane govornog prometa dolazi do izgladnjivanja FTP prometa, [62].

Na kraju razmatranja rezultata simulacije može se zaključiti da WLAN scenario podržava do 54 korisnika za čisti govorni promet odnosno 18 korisnika za miješani govorni i FTP promet, uz pridruženi prijenosni pojas od 6.5 Mbit/s, od čega je 6 Mbit/s za FTP promet i 470 kbit/s za govorni promet. WIMAX podržava do 551 VoIP korisnika sa ukupnom propusnošću od 14.3 Mbit/s, od kojeg je 113 kbit/s za FTP i 14.2 Mbit/s za govor.

Kako bi se podržala već količina FTP prometa u opterećenoj WIMAX mreži potrebno je smanjiti broj VoIP korisnika ili FTP promet treba biti klasificiran drugačije, a ne kao best effort. Prednosti WLAN-a se očituju u njegovoj jednostavnosti i niskoj cijeni te pogodnosti za implementaciju u manjim područjima (manja sela) dok WIMAX dozvoljava znatno veći broj korisnika, ali je složenije i skuplje rješenje od WLAN-a.

6.2 LTE

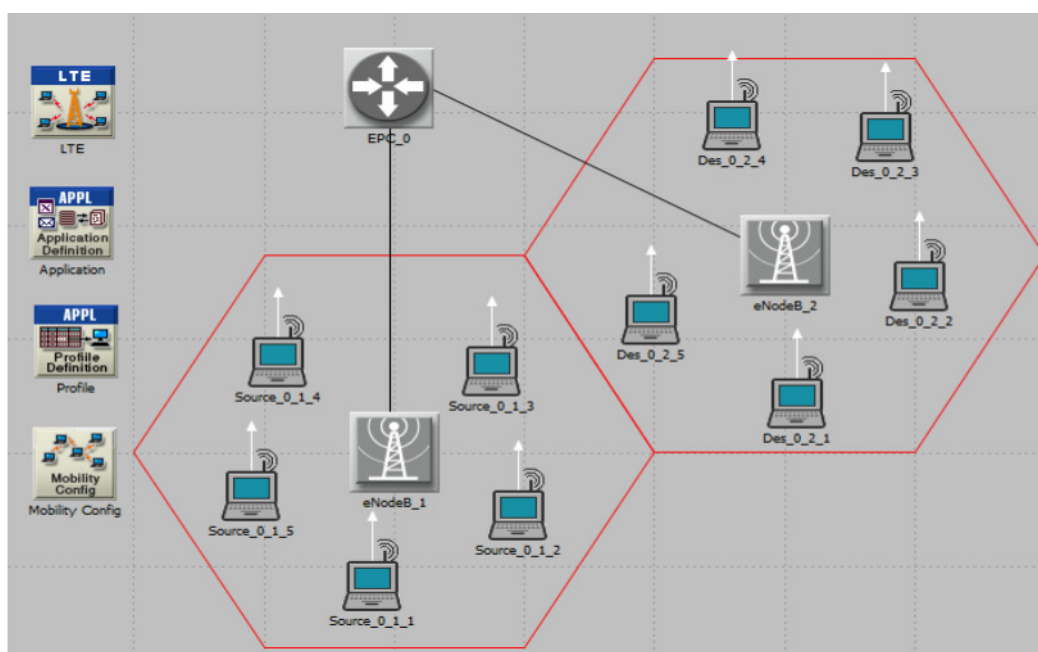
Kako bi se prikazali QoS parametri VoIP-a i njihova usporedba, u ovom poglavlju će se koristiti nekoliko različitih scenarija. Za parametre kašnjenja i gubitka paketa koristit će se dva scenarija:

1. početna VoIP mreža, i
2. zagušena VoIP mreža.

Za prikaz parametara koristit će se simulacija iz [21]. Simulacija za LTE mrežu je napravljena simulacijskim programom OPNET Modeler.

Primjer simulacijskog mrežnog modela prikazan je na slici 6.13. Radijus ćelije u modelu iznosi 1 km. U simulacijskom modelu koriste se dva eNodeB čvora, nazvani eNodeB_1 i eNodeB_2, koji su povezani sa EPC-om pomoću linkova brzine 44.736 Mbit/s. Svaki eNodeB ima pet VoIP radnih stanica (workstations). Čvorovi spojeni na eNodeB_1 su izvorišta, dok su čvorovi spojeni na eNodeB_2 odredišta. Koristi se prijenosni pojas širine 20 MHz koji ima maksimalnu propusnost (throughput) od 35.88 Mbit/s. U početnom scenariju prometno opterećenje iznosi 50% i generirano je isključivo VoIP pozivima. Prvi poziv je generiran u 100-toj sekundi simulacije, a nakon toga se dodaje po jedan poziv svake sekunde. U simulaciji se promatraju četiri slučaja ovisno o kretanju čvorova, [21].

Svi ovi podaci su radi bolje preglednosti prikazani i tablicom 10.



Slika 6.13. Simulacijski model LTE mreže, [21]

Tablica 10. Simulacijski podaci za početnu VoIP mrežu

Slučaj	Pojas (Bandwidth) u MHz	VoIP promet u %	Radijus ćelije u km	Brzina u m/s
1	20	50	1	Fiksna (0)
2	20	50	1	10
3	20	50	1	20
4	20	50	1	50

Izvor: [21]

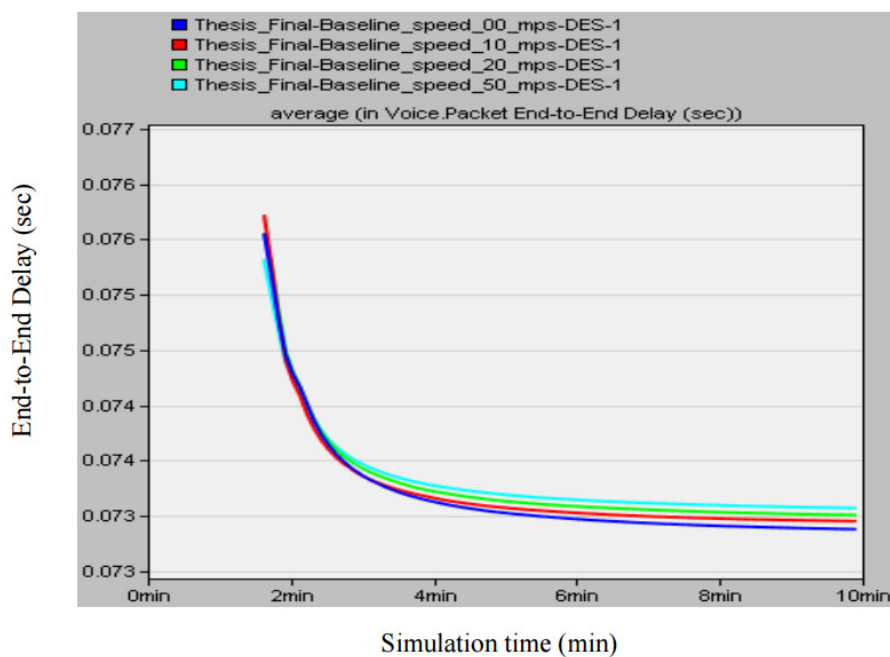
U zagušenoj VoIP mreži je generirano prometno opterećenje u iznosu od 95%. Sve prometno opterećenje i dalje čine samo VoIP pozivi. Podaci za zagušenu VoIP mrežu su radi bolje preglednosti prikazani tablicom 11.

Tablica 11. Simulacijski podaci za zagušenu VoIP mrežu

Slučaj	Pojas (Bandwidth) u MHz	VoIP promet u %	Radijus ćelije u km	Brzina u m/s
1	20	95	1	Fiksna (0)
2	20	95	1	10
3	20	95	1	20
4	20	95	1	50

Izvor: [21]

Sama simulacija traje 600 sekundi. Slika 6.14. prikazuje iznose kašnjenja s kraja na kraj mreže za početnu mrežu u kojoj su generirani VoIP prometni tokovi s različitim brzinama kretanja. Na osi y prikazan je iznos kašnjenja izražen u sekundama, dok je na x osi prikazano vrijeme izvođenja simulacije.



Slika 6.14. Kašnjenje u početnoj mreži, [21]

Kao što se može vidjeti, u prvom slučaju (plava linija) je najmanje kašnjenje i iznosi oko 73.68 millisekundi (ms) te varira od 73.38 ms do 76.06 ms. Najveće kašnjenje je za slučaj 4 (tirkizna linija) - 73.82 ms, no na početku najveće kašnjenje ima slučaj 2 (crvena linija) i ono iznosi 76.062 ms, dok se kasnije kroz simulaciju stabilizira oko vrijednosti od 73.38 ms. Prosječno kašnjenje za slučaj 4 je oko 0.25% veće od slučaja 1, [21].

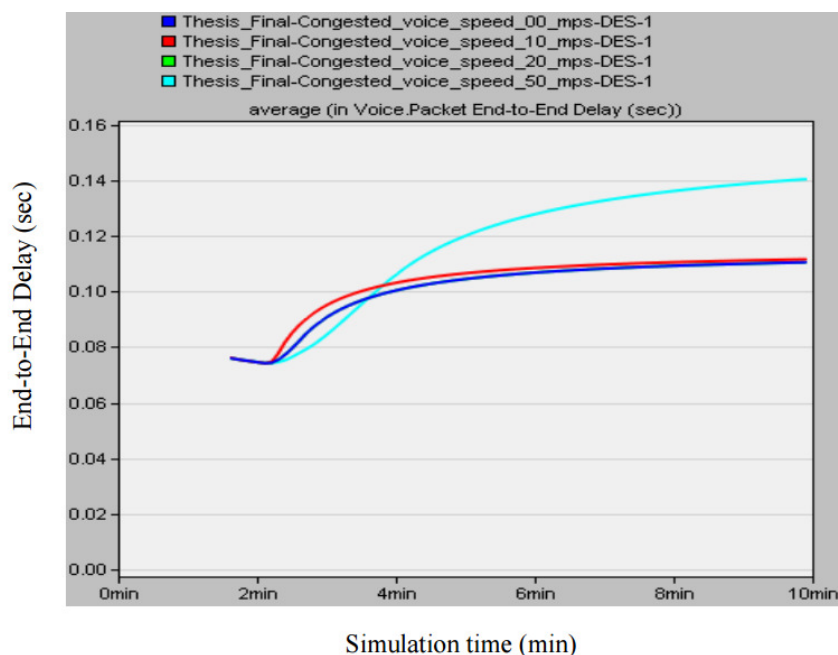
Međutim, može se uočiti da svi prometni tokovi zadovoljavaju zahtjev maksimalnog iznosa kašnjenja od 150 ms. Također se može zaključiti da kašnjenje ovisi o brzini kretanja čvora te tako najveće kašnjenje ima čvor koji se kreće najvećom brzinom – 50 m/s, dok najmanje kašnjenje ima fiksni čvor. Rezultati su radi bolje preglednosti prikazani tablicom 12.

Tablica 12. Prikaz kašnjenja za početnu mrežu

Scenario	Min. [s]	Avg. [s]	Max. [s]	Std Dev [s]
Case 1	7.338E-02	7.368E-02	7.606E-02	5.10E-04
Case 2	7.345E-02	7.372E-02	7.622E-02	4.97E-04
Case 3	7.351E-02	7.378E-02	7.606E-02	4.85E-02
Case 4	7.357E-02	7.382E-02	7.582E-02	4.26E-02

Izvor: [21]

Slika 6.15. daje grafički prikaz kašnjenja u zagušenoj VoIP mreži. Na slici su prikazana 4 slučaja, ovisno o brzini kretanja čvorova. Čvor 1 (plava linija) je fiksni, čvor 2 (crvena linija) ima brzinu kretanja 10 m/s, čvor 3 (zeleni linija) ima brzinu kretanja 20 m/s dok čvor 4 (tirkizna linija) ima brzinu kretanja 50 m/s. Na osi y se nalaze iznosi kašnjenja izraženi u sekundama, dok je na osi x prikazano vrijeme trajanja simulacije. Rezultati simulacije u zagušenoj mreži prikazana je na slici 6.15., te radi bolje preglednosti podataka i u tablici 13.



Slika 6.15. Kašnjenje u zagušenoj mreži, [21]

Kako je i očekivano prvi slučaj ima najmanje kašnjenje koje sada u zagušenoj mreži iznosi prosječno 101.283 ms te varira od 74.232 ms do 110.566 ms. Najveće kašnjenje pokazuje slučaj 4 sa iznosom od prosječno 116.788 ms. Slučajevi 2 i 3 imaju prosječne iznose kašnjenja od oko 111.639 ms. U zagušenoj mreži slučaj 4 ima 13% veće iznose kašnjenja od slučaja 1, dok slučajevi 2 i 3 imaju 11 % manje kašnjenje od slučaja 4. Međutim, i u zagušenoj mreži svi slučajevi zadovoljavaju gornju dozvoljenu granicu kašnjenja od 150 ms, [21].

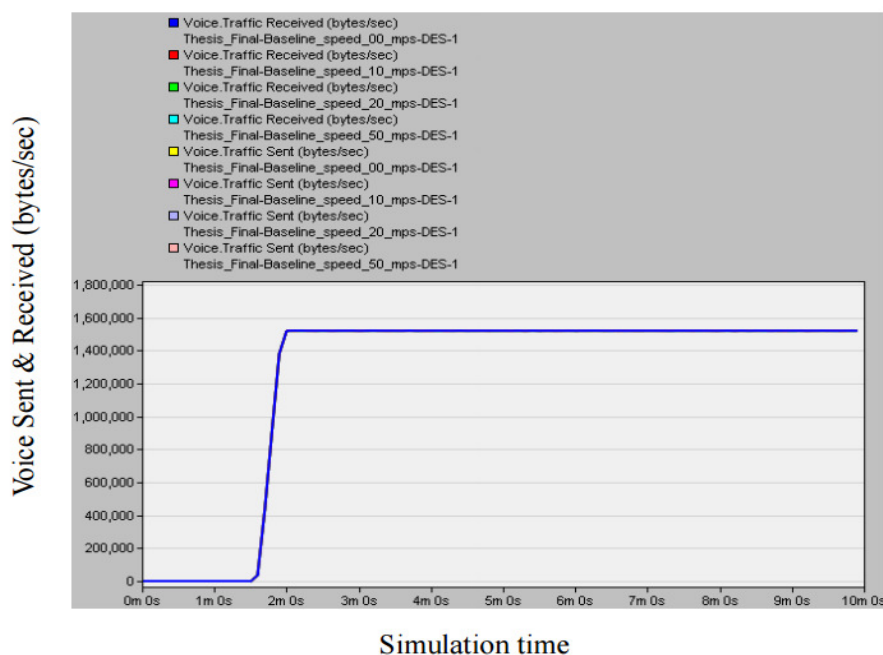
I ovdje je vidljivo da iznos kašnjenja izravno ovisi o brzini kretanja čvora te tako najveće kašnjenje opet ima čvor 4, koji ima najveću brzinu kretanja, dok najmanje kašnjenje ima fiksni čvor. Također je vidljivo da se linije čvorova 2 i 3 preklapaju te se može zaključiti da u zagušenoj mreži čvorovi koji imaju malu razliku u brzini imaju relativno slična kašnjenja, odnosno da veća razlika u brzini kretanja ima veći utjecaj na kašnjenje

Tablica 13. Kašnjenje u zagušenoj mreži

Scenario	Min. [s]	Avg. [s]	Max. [s]	Std Dev [s]
Case 1	7.423E-02	1.012E-01	1.105E-01	1.128E-02
Case 2	7.423E-02	1.032E-01	1.116E-01	1.103E-02
Case 3	7.423E-02	1.032E-01	1.116E-01	1.103E-02
Case 4	7.429E-02	1.167E-01	1.405E-01	2.287E-02

Izvor: [21]

Slika 6.16. prikazuje gubitak paketa za početno prometno opterećenje mreže. Na osi y se nalaze iznosi poslanog i primljenog govornog prometa, izraženi u byte/s, dok je na osi x prikazano vrijeme trajanja simulacije. Rezultati simulacije za čvorove različitih brzina kretanja prikazani su na slici 6.12. te radi bolje preglednosti podataka i u tablici 10.



Slika 6.16. Gubitak paketa za slučaj početnog prometnog opterećenja mreže, [21]

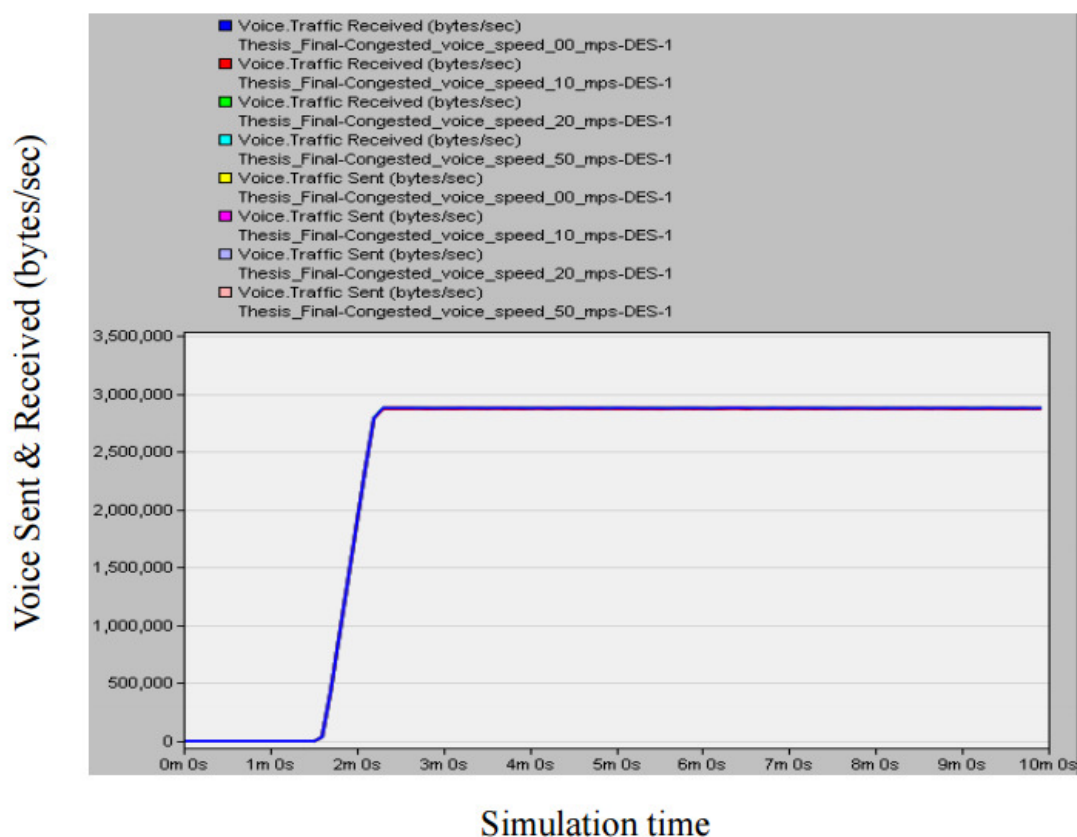
Iz slike 6.16., na kojoj je prikazan poslani i primljeni promet je vidljivo da se za sve promatrane slučajeve linije preklapaju. Iz tablice 14. je vidljivo da je prosječni poslani promet 1463285 byte/s dok je prosječni primljeni promet 1463236, 1463239, 1463237, 1463236 byte/s, što znači da je preko 98% paketa uspješno isporučeno te da je prosječni gubitak paketa 0.003%.

Tablica 14. Sumarni prikaz poslanog i primljenog prometa u početnoj mreži

Scenario	Min. [Bytes]	Avg. [Bytes]	Max. [Bytes]	Std Dev [Bytes]	Avg. Packet Loss (%)
Case 1	0	1463236	1520653	262508	0.003
Case 2	0	1463239	1520573	262499	0.003
Case 3	0	1463237	1520707	262512	0.003
Case 4	0	1463236	1520587	262421	0.003

Izvor: [21]

Slika 6.17 prikazuje poslani i primljeni promet u zagušenoj mreži gdje se vidi da se jedno vrijeme, od 100-te do 140-te sekunde izvođenja simulacije, svi slučajevi preklapaju. Međutim, kada opterećenje dostigne vrijednost od oko 95%, nakon 140-te sekunde izvođenja simulacije, dolazi do gubitka paketa u svim slučajevima, iako slučaj 1 ima najmanji prosječni gubitak paketa od oko 0.07%. Gubitak od 0.16% ostvaruju slučajevi 2 i 3, gdje je brzina kretanja čvorova 10 odnosno 20 m/s, dok slučaj 4, gdje je brzina kretanja čvora 50 m/s, ima gubitak od 0.42%, kao što je prikazano u tablici 15, [21].



Slika 6.17. Poslani i primljeni promet u zagušenoj mreži, [21]

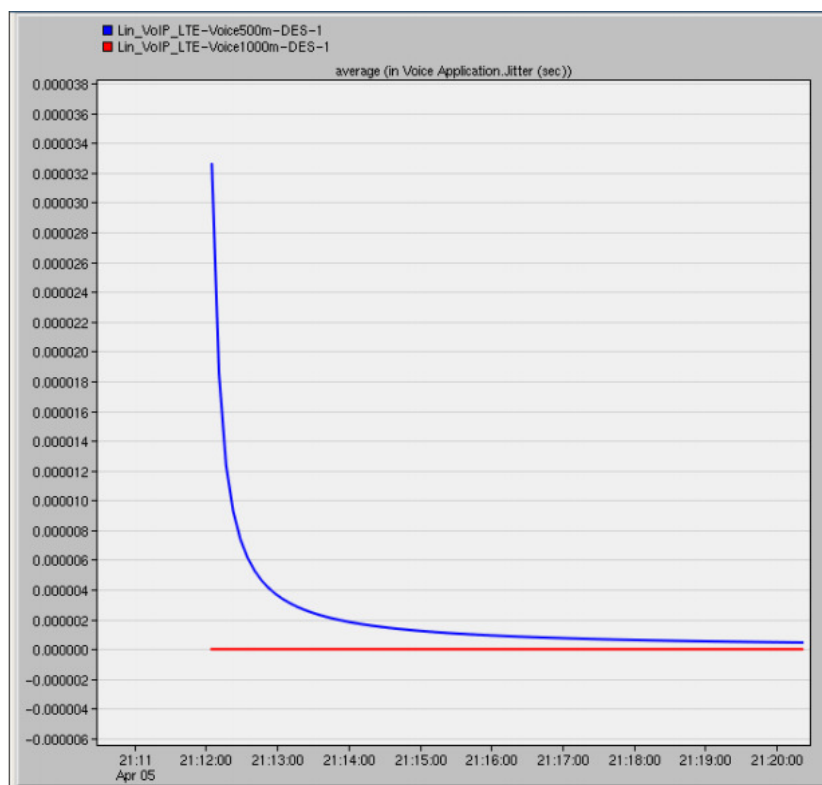
Tablica 15. Usporedni prikaz poslanog i primljenog prometa u zagušenoj mreži

Scenario	Min. [Bytes]	Avg. [Bytes]	Max. [Bytes]	Std Dev [Bytes]	Avg. Packet Loss (%)
Case 1	0	2722538	2879627	572960	0.07
Case 2	0	2720056	2877187	572283	0.16
Case 3	0	2720056	2877187	572283	0.16
Case 4	0	2713011	2869027	570354	0.42

Izvor: [21]

Iz podataka prikazanih slikom 6.17. i tablicom 15. Može se zaključiti da postoji izravna veza između brzine kretanja čvorova i količine izgubljenih paketa, odnosno da će veće gubitke imati čvorovi s većom brzinom kretanja.

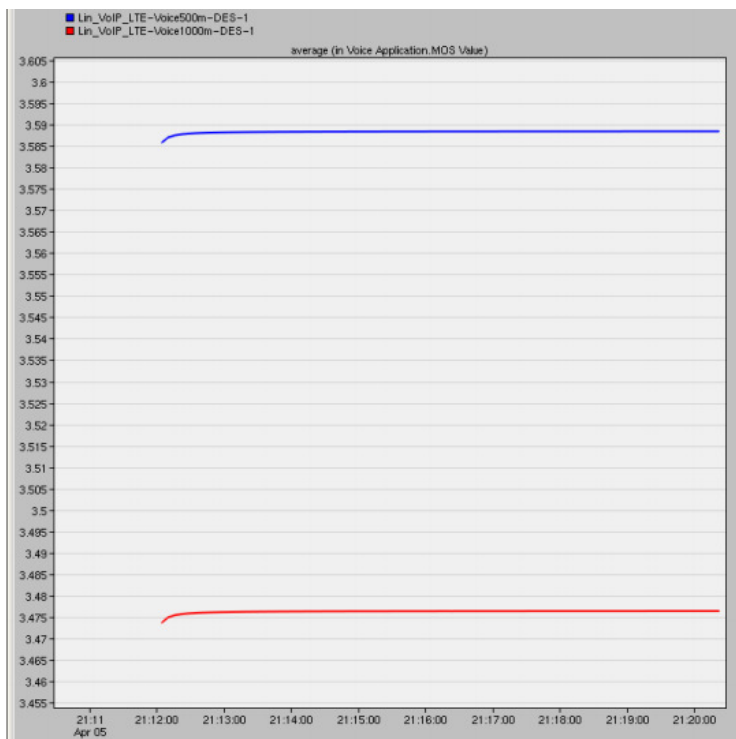
Jitter kao parametar promatran je na primjeru dva slučaja različitih udaljenosti jednog eNodeB od dva mobilna korisnika, jedan korisnik je udaljen 500 m, a drugi 1000 m. Na slici 6.18. na Y osi je predstavljen iznos jittera izražen u milisekundama, dok je na X osi vrijeme izvođenja simulacije.



Slika 6.18. Jitter, [21]

Kao što je vidljivo sa slike 6.18., na početku simulacije jitter je, za stanicu udaljenu 500 m (plava linija), iznosio 33 ms, što je manje od ITU standarda za prosječni iznos ovog parametra (60 ms), a kako se govorni poziv stabilizirao tako je iznos jittera pao ispod 20 ms, što prema ITU predstavlja idealan iznos. U slučaju udaljenosti od 500 m, može se zaključiti da je performansa jittera za VoIP na LTE mreži izvrsna, [22]. Vrijednost jittera za stanicu udaljenu 1000 m nije bilo moguće dobiti simulacijom, kao što je i vidljivo sa slike 6.18. (crvena linija).

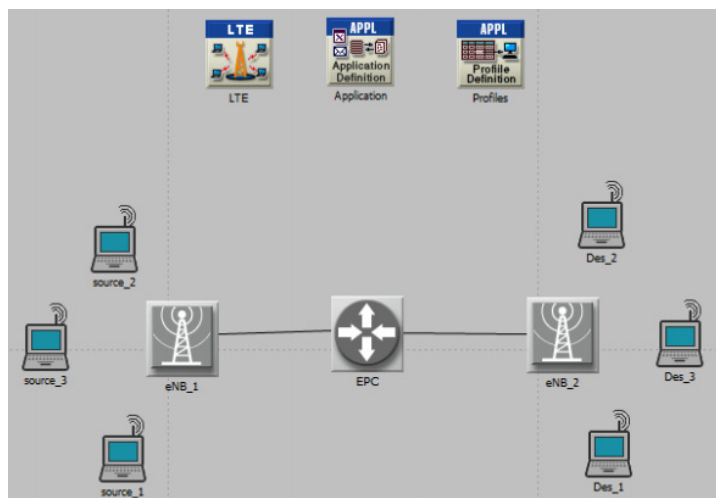
Slikom 6.19. prikazano je kretanje MOS parametra. Na x osi je prikazano vrijeme trajanja simulacije dok je na y osi prikazan iznos MOS vrijednosti.



Slika 6.19. MOS, [22]

U pogledu MOS parametra, kao što se može vidjeti sa slike 6.19., za slučaj udaljenosti 500 m i 1000 m, MOS iznosi 3.59 i 3.48, što je prema ITU standardu klasificirano kao kvaliteta govora u rasponu od zadovoljavajuće do dobre. Vidljivo je da MOS ovisi o udaljenosti korisnika te da manje udaljenosti za posljedicu imaju bolji MOS, [22].

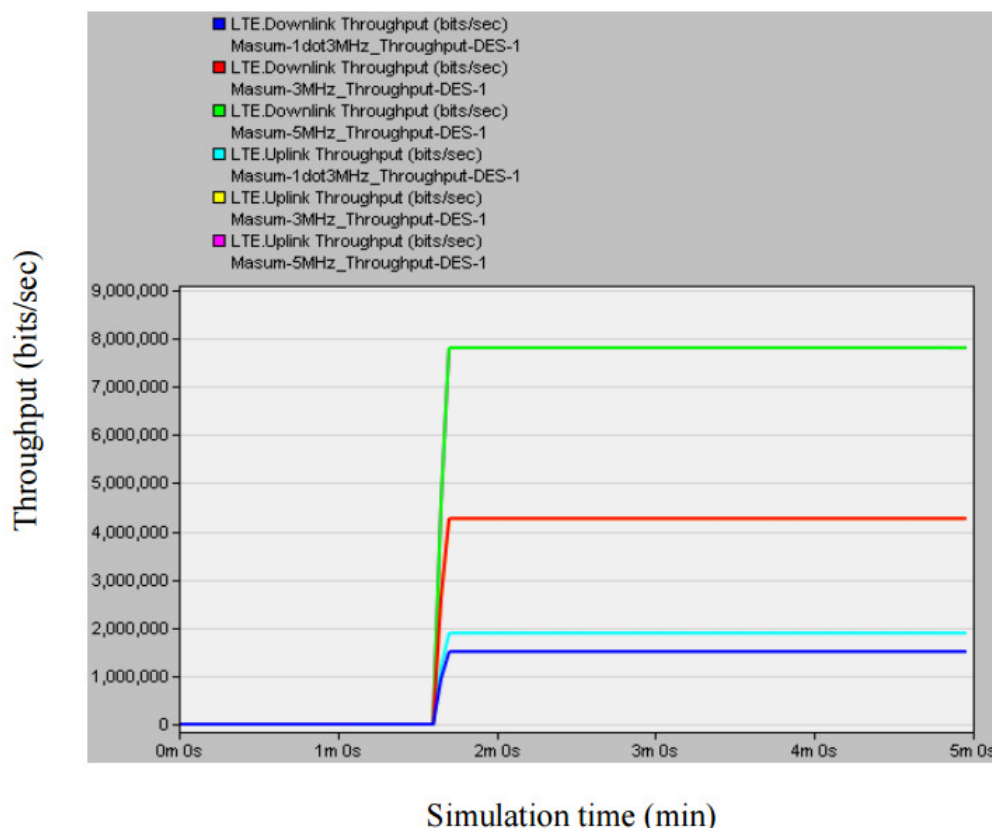
Za propusnost je korištena simulacija izrađena simulacijskim alatom OPNET Modeler 16.0 u mreži prikazanoj na slici 6.20.



Slika 6.20. Simulirana LTE mreža - 1.3MHz, [22]

Ova LTE mreža podržava skalabilni prijenosni pojas od 1.4, 3, 5, 10, 15 i 20 MHz. Kako bi se evaluirala propusnost u simulaciji je pokrenuto 6 različitih scenarija za navedene prijenosne pojaseve. Na slici 6.20. prikazana je mreža korištena za simulaciju iz koje se vidi da se sama mreža sastoji od dva eNodeB čvora, nazvana eNB_1 i eNB_2 koja su povezana na EPC jezgru linkovima brzine 44.736 Mbit/s. Svaki eNodeB ima tri čvora, od kojih čvorovi eNB_1 imaju ulogu izvora, a čvorovi eNB_2 odredišta. Kako bi se evaluirala maksimalna propusnost generiran je neograničen broj VoIP poziva.

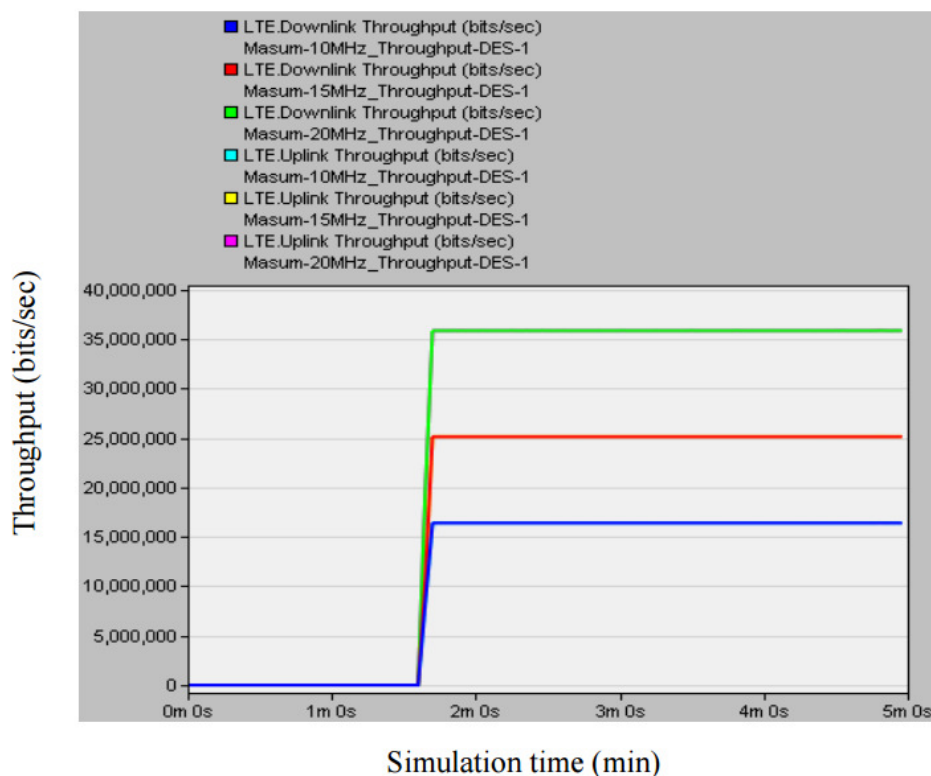
Početak generiranja paketa u simulacije je u 100 simulacije.



Slika 6.21. Downlink i Uplink propusnosti za 1.3, 3 i 5 MHz, [22]

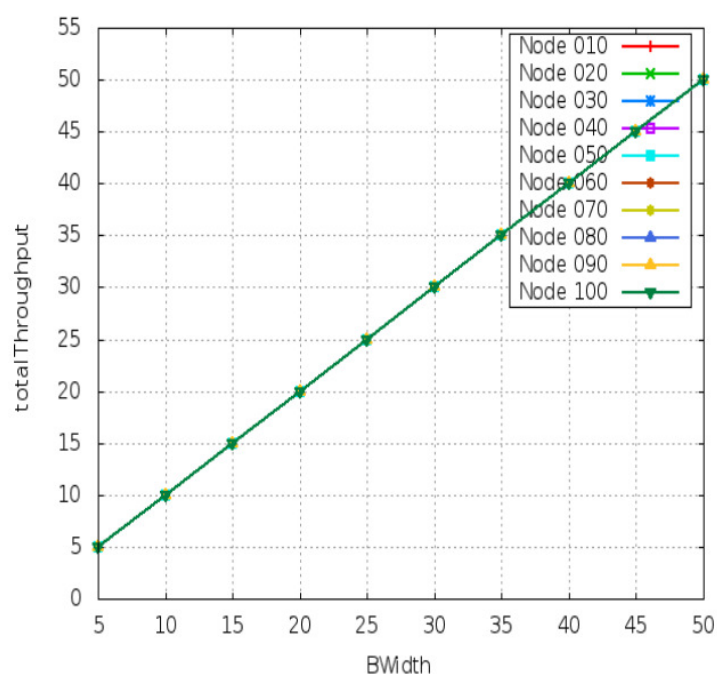
Na slici 6.21. prikazani su rezultati simulacije različitih propusnosti scenarija za 1.4, 3, 5 MHz pojas. Os X prikazuje vrijeme trajanja simulacije u sekundama dok os Y predstavlja propusnost izraženu u bit/s. sa slike se može uočiti da je za pojas od 1.3 MHz maksimalna propusnost za downlink i uplink oko 1,507,200 bit/s i 1,889,920 bit/s. U međuvremenu je maksimalna propusnost za 3 MHz i 5 MHz pojas oko 4,266,240 bit/s i 7,808,640 bit/s. Jednake vrijednosti su zabilježene i za oba promatrana pojasa, [22].

Slikom 6.22. prikazani su simulacijski rezultati za propusnost pojaseva od 10, 15, 20 MHz. Uplink i downlink propusnost je jednaka za vrijednosti pojaseva od 10, 15 i 20 MHz. Propusnost za pojaseve od 10 i 15 MHz je oko 16,407,680 bit/s i 25,145,600 bit/s. Propusnost za 20 MHz pojas iznosi oko 35,887,680 bit/s. Od šest različitih promatranih scenarija maksimalnu propusnost ostvaruje 20 MHz pojas, [22].



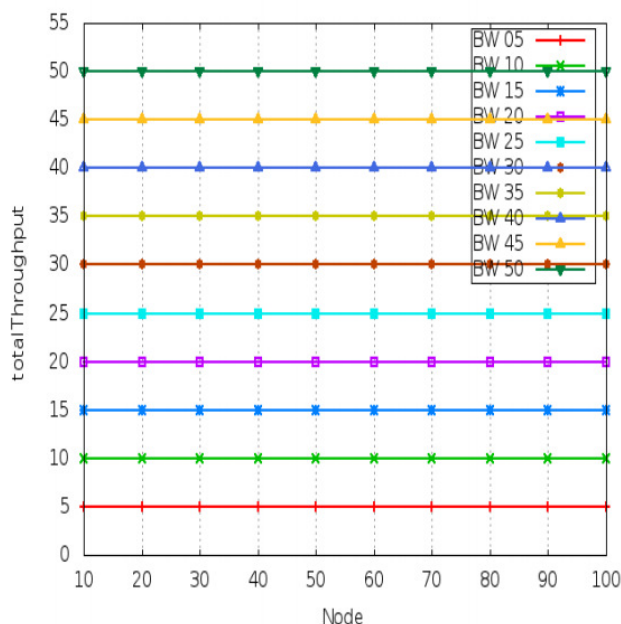
Slika 6.22. Downlink i Uplink propusnosti za 10, 15 i 20 MHz pojas, [22]

Sljedeće simulacije su napravljene simulacijskim alatom NS-2. Promatra se WiMAX i LTE mreža preko četiri različita scenarija. Analizira se propusnost kao funkcija broja čvorova i kapaciteta prijenosnog pojasa. Slika 6.23. prikazuje ukupnu propusnost kao funkciju broja čvorova u WiMAX mreži.



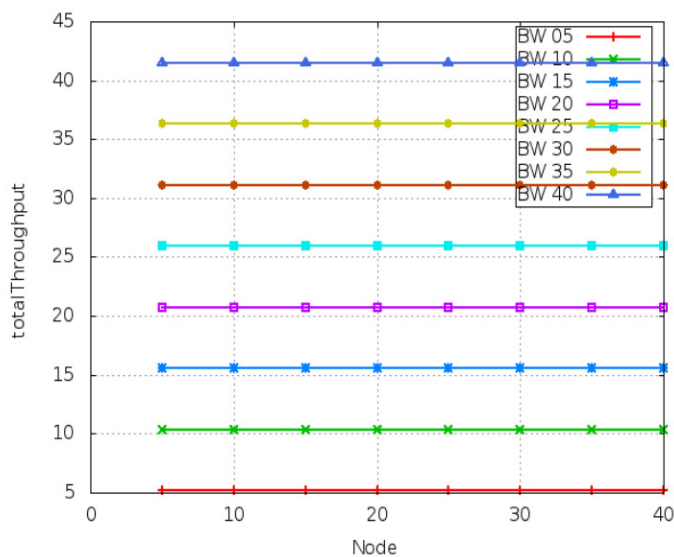
Slika 6.23. Ukupna propusnost (kbit/s) kao funkcija broja čvorova u WiMAX mreži, [61]

Može se primjetiti da se propusnost polagano povećava kako se povećava broj čvorova, što je očekivano ponašanje. Razlog tome je što povećanje broja aktivnih čvorova znači povećanje broja poslanih paketa. Važno je napomenuti da ti paketi podrazumijevaju i kontrolne pakete koje razmjenjuju SS i BS. Prema prikazanim podacima propusnost između dva čvora iznosi oko 486 kbit/s. Za 20 čvorova ova vrijednost dostiže iznose oko 4715 kbit/s za mobilni WIMAX, a fiksni WiMAX daje slične rezultate, [61].

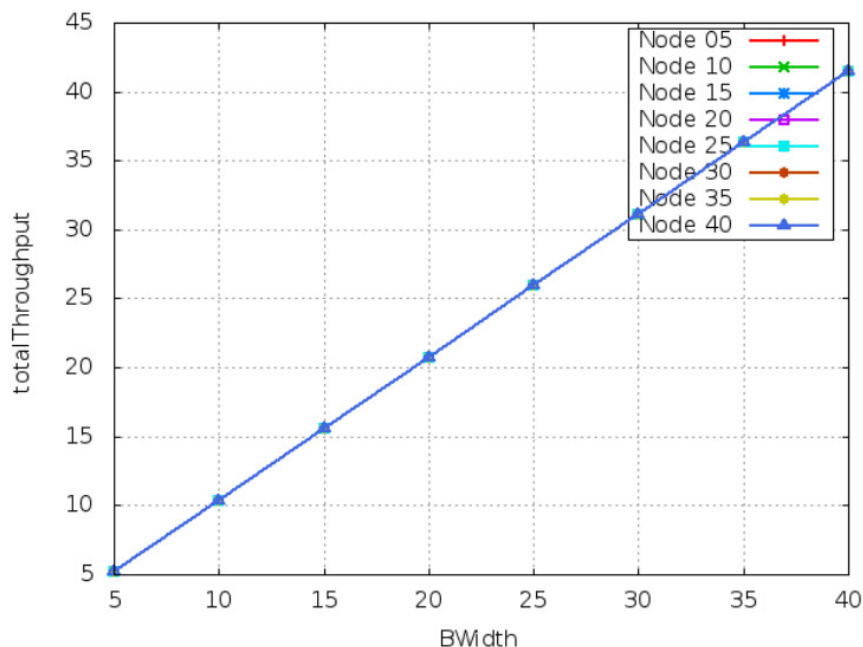


Slika 6.24. Ukupna propusnost kao funkcija kapaciteta u WiMAX mreži, [61]

Na slici 6.24. prikazan je ukupna propusnost sustava. Vidljivo je da povećanje broja čvorova i povećanje kapaciteta prijenosnog linka ne utječe na ukupnu propusnost pojedinog čvora, već on ostaje jednak.



Slika 6.25. prikazuje ukupnu propusnost kao funkciju kapaciteta uz rastući broj čvorova u LTE mreži. Kao i kod WiMAX mreže, povećanje kapaciteta uz povećanje broja čvorova rezultira jednakom propusnošću po čvoru, bez ikakve promjene. Razlog tome je što uz istovremeno povećanje ove dvije veličine količina paketa u mreži ostaje ista te i propusnost mora ostati jednaka.



Slika 6.26. Ukupna propusnost kao funkcija broja čvorova u LTE mreži, [61]

Slika 6.26. prikazuje ukupnu propusnost kao funkciju povećanja broja čvorova u LTE mreži. Kako se ovdje povećavaju obje veličine može se uočiti da i u LTE mreži, uz povećanje broja čvorova, uz istovremeno povećanje kapaciteta, ukupna propusnost raste. To je i očekivano ponašanje, jer uz veći broj korisnika u sustavu dolazi do povećanja broja paketa, što izravno utječe na povećanje propusnosti.

Nakon analiziranih podataka prikazanih u ovom poglavlju može se zaključiti da, ukoliko se promatraju –WiMAX i WLAN mreža, prema promatranim parametrima niti jedna mreža zasebno ne daje značajno bolje rezultate, već najbolje rezultate daje hibridna WiMAX-WLAN mreža. Ukoliko se promatra LTE mreža, primjećuje se da su rezultati slični u pogledu kretanja grafa, iako su sami iznosi različiti. Može se uočiti da određene promatrane veličine, kao što je propusnost, ovise o povećanju broja korisnika te o povećanju kapac

7 ZAKLJUČAK

Proučavanjem dostupne literature uočeno je da postoji veliki broj radova i autora koji obrađuju temu VoIP-a te njegovu realizaciju putem različitih mreža, međutim, svi radovi su dosta nepovezani, kako po pitanju vrste mreža za realizaciju, tako i u pogledu vremenskog razdoblja ili scenarija istraživanja. Ovim radom se pokušalo dati pregled nekih osnovnih značajki različitih mreža za realizaciju VoIP-a, te i samih QoS parametara.

WLAN je mreža koja se javila kao prvi odgovor industrije na rastuće potrebe korisnika za smanjenjem ožičenja i prividne mobilnosti, a definirana je 802.11 standardima. Temelji se na tehnici proširenog spektra i OFDM-u. Arhitekturu čini skup međusobno povezanih ćelija, koje se sastoje od pristupne točke, bežičnog medija, distribucijskog sustava, osnovnog skupa usluga, neovisnog osnovnog skupa usluga, proširenog skupa usluga i klijenata. Moguće su dvije osnovne topologije kod WLAN mreža: ad-hoc i infrastrukturna topologija, dok joj sama arhitektura može biti centralizirana i decentralizirana. Osnovna značajka, uz to da je bežična tehnologija, je pokretljivost klijenata unutar mreže i između mreža.

WiMAX je bežični digitalni komunikacijski sustav, poznat i kao IEEE 802.16, a može omogućiti širokopojasni pristup do 50 km za fiksne uređaje i 5 - 15 km za mobilne stanice. Mobilni WiMAX je širokopojasna pristupna tehnologija bazirana na IEEE 802.16e-2005 standardu za zračno sučelje. Mobile WiMAX danas je širokopojasni bežični standard koji omogućuje *Quadruple play* uslugu – prijenos podataka, govora, videa i mobilnost, koristeći jednu jedinu mrežu. Omogućuje potpunu mobilnost krajnjim korisnicima, koji mogu koristiti internetski bazirane aplikacije dok putuju brzinama od oko 120 km/h, što ujedno znači i podršku za prekapčanje. Omogućuje čvrstu mobilnost i platformu za ubrzanje konvergencije mreža i usluga.

LTE predstavlja prijelaz između treće i četvrte generacije mobilnih sustava, a zahtjevi stavljeni pred ovu vrstu mreže su: smanjenje troškova, povećanje broja usluga, pojednostavljenje arhitekture, otvorena sučelja, veće brzine prijenosa, osiguranje kvalitete usluge i drugi. Arhitektura LTE mreže temelji se na evoluiranom paketnom sustavu: evoluirane paketske jezgre i E-UTRAN-a.

VoIP je skup tehnologija, metodologija, komunikacijskih protokola i prijenosnih tehnika koje omogućuju isporuku govorne komunikacije preko Internet protokola. Usluga koja je osjetljiva na parametre kao što su kašnjenje, jitter i gubitak paketa. U radu se promatralo tri gore navedene mreže.

Za analizu su korištene preuzete simulacije napravljene simulacijskim alatom OPNET Modeler.

U slučaju WiMAX, WLAN i integrirane WiMAX – WLAN mre

s porastom broja korisnika upravo prijenosni pojas postaje ograničavajući čimbenik koji uvjetuje upotrebu mehanizma potiskivanja tišine.

U slučaju kada se koristi taj mehanizam, rezultati simulacija pokazuju da WLAN mreža osigurava bolju kvalitetu govora od WiMAX mreže, ali uz ograničenje mobilnosti. WiMAX mreža osigurava veći kapacitet, ali nižu MOS vrijednost u mobilnom okruženju. Kada se koristi mehanizam potiskivanja tišine, kapacitet mobilne WiMAX mreže se udvostručuje. Integrirana mreža pokazuje odlične rezultate u svim promatranim scenarijima, te se može zaključiti da je upravo ova vrsta mreže najbolji izbor jer pruža optimalnu kvalitetu govora uz optimalni mrežni kapacitet.

U slučaju promatranja LTE mreže odabrana je širina prijenosnog pojasa od 20 MHz, jer upravo ta širina daje najveću propusnost te su kritični parametri promatrani u simulaciji s upravo tom širinom prijenosnog pojasa. U četiri promatrana slučaja, jedan fiksni i tri mobilna čvora, simulacijski rezultati su pokazali da je kašnjenje nešto veće u zagušenoj mreži u slučaju fiksnog čvora dok manje kašnjenje imaju čvorovi koji se kreću. Gubitak paketa u ovoj mreži je minimalan i u zagušenoj mreži, bez obzira na brzinu kretanja čvora.

Analizom promatranja udaljenosti stanice od eNodeB čvora rezultati simulacije pokazuju povećanje kašnjenja s povećanjem udaljenosti. Također se došlo do zaključka da MOS vrijednost opada s povećanjem udaljenosti između korisnika i eNodeB čvora.

Krajnji zaključak dobiven analizom rezultata simulacija je taj da svi kritični parametri ovise o nizu drugih čimbenika kao što je udaljenost korisnika od čvora, brzina kretanja korisnika kroz mrežu, broj korisnika u mreži te o samom opterećenju mreže.

Odabir optimalne mreže ovisi o konkretnom području koje mreža treba pokrivati, broju i vrsti korisnika, kao i o njihovim navikama. Analizirana istraživanja prikazana u ovom radu nameću zaključak da je optimalna mreža za implementaciju upravo LTE, koja ima svoju budućnost u daljnjem razvoju i rastućim trendovima konvergencije.

LITERATURA

- [1]Sadiku, M.N.O., Musa, S.M.: „*Performance Analysis of Computer Networks*”, Springer International Publishing, Switzerland, 2013. – knjiga
- [2]Bošnjak, I., Mrvelj, Š.: Tehnologija telekomunikacijskog prometa II, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2007.
- [3]Conti, J. P., LTE vs WiMax: the battle continues [COMMS WiMax vs LTE], Engineering & Technology, 2010.
- [4]Al-Kandari, A., Al-Nasheet, M., Abdulgafer, A. R. WiMAX vs. LTE: An analytic comparison, IEEE Xplore, 2014.
- [5]Hwang, J., Kim, N., Ji, Y., Koh, J., A mobile VoIP architecture over LTE & WLAN networks, IEEE Xplore, 2010.
- [6]Qureshi, M.A., Younus, A., Saeed, M., Siddiqui, F.A., Touheed, N., Qureshi, M.S.: „*Comparative Study of VoIP over WiMAX and WiFi*”, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 3, No. 1, svibanj 2011.
- [7]Jadhav, S., Zhang, H., Huang, Z.: „Performance Evaluation of Quality of VoIP in WiMAX and UMTS”, 12th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, PDCAT 2011, Gwangju, Korea, 2011
- [8]Ali, D.M., Dimyati, K.: „Performance Study of the WiMAX Uplink Scheduler”, MICC, 2009.
- [9]Othman, H.R., Darmawaty, M. Ali, Nurul Anis Mohd, Y., Ku Siti, S., Ku Mohd, N., Azlina, I.: „Performance Analyses of VoIP over Mobile WiMAX (IEEE 802.16e) Best-Effort Class“, ICSGRC 2014 IEEE 5th, IEEE Computer Society, Washington, 2014.
- [10]Narbutt, M., Davis, M.:“ Effect of free bandwidth on VoIP Performance in 802.11b WLAN networks“, ISSC 2006, Dublin, 2006.
- [11]Wazwaz, A.: „Analysis of QoS parameters of VOIP calls over Wireless Local Area Networks“, ACIT, 2012.
- [12]Vanhatupa, T., Hainnikainen, M. i Hdmalainen, T.D. u svom radu „Multihop IEEE 802.11 b WLAN Performance for VoIP“, PIMRC, IEEE Computer Society, Washington,, 2005.
- [13]Shin, S., Schulzrinne, H.: „Measurement and Analysis of the VoIP Capacity in IEEE 802.11 WLAN“ IEEE Transactions on Mobile Computing (Volume:8 , Issue: 9), IEEE Computer Society, Washington,, 2009.
- [14]C. Krapichler, "LTE, HSPA and Mobile WiMAX a comparison of technical performance," in Institution of Engineering and Technology Hot Topics Forum: LTE vs WiMAX and Next Generation Internet, 2007., Institution of Engineering and Technology (pp 1-31)
- [15]Bhandare, T.: “LTE and WiMAX Comparison”, Santa Clara University, 2009.
- [16]Yang, S., Zhang, J.: „*A New Idea to Simulate Performance of VoIP Network with OPNET*“, ITAP 2010., IEEE Computer Society, Washington,, 2010.

- [17] Asheralieva, A., Khan, J.Y., Mahata, K.: „*Performance analysis of VoIP services on the LTE network*“, ATNAC 2011., IEEE Computer Society, Washington, 2011.
- [18] AlAlawi, K., Al-Aqrabi, H.: „*Quality of service evaluation of VoIP over wireless networks*“, GCCCE 2015, IEEE Computer Society, Washington, 2015.
- [19] Chu, L.: „VoIP System Simulation Design and Implementation“, IMCCC 2012 (pp 296-298), IEEE Computer Society, Washington, 2012.
- [20] Kundu, A., Misra, I. S., Sanyal, S. K., Bhunia, S.: „VoIP performance over broadband wireless networks under static and mobile environments“, IJWMN, Vol.2, No.4 (pp. 82-93), AIRCC Publishing Corporation, 2010., URL: <http://airccse.org/journal/jwmn/1110ijwmn07.pdf> (pristupljeno: svibanj 2016)
- [21] Masum, E., Babu, J.: „End-to-End Delay Performance Evaluation for VoIP in the LTE network“, Blekinge Institute of Technology, 2011., URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:831593/FULLTEXT01.pdf> (pristupljeno: svibanj 2016)
- [22] Guo, E., Lin, J., Zhang, Y.: „The performance analysis of LTE network“, ENSC 427: Communication Networks, 2014., URL: http://www2.ensc.sfu.ca/~ljilja/ENSC427/Spring14/Projects/team6/ENSC427_team6_report.pdf (pristupljeno: svibanj 2016)
- [23] Blajić, T.: «Evolucija radijske pristupne mreže u mobilnim sustavima treće generacije», ETK Revija, URL: http://www.ericsson.com/hr/etk/revija/Br_2_2006/radijska_mreza.pdf (pristupljeno: siječanj, 2016.)
- [24] URL: ftp://ftp.3gpp.org/Inbox/2008_web_files/LTA_Paper.pdf (pristupljeno: siječanj, 2016.)
- [25] URL: <http://compnetworking.about.com/cs/wireless80211/a/aa80211standard.htm> (pristupljeno: siječanj, 2016.)
- [26] URL: http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution (pristupljeno: siječanj, 2016.)
- [27] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA> (pristupljeno: veljača 2016)
- [28] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/H.323> (pristupljeno: veljača 2016)
- [29] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX> (pristupljeno: veljača 2016)
- [30] URL: http://lte.alcatel-lucent.com/locale/en_us/downloads/wp_evolved_packet_core.pdf (pristupljeno: veljača 2016)
- [31] URL:

- [36] URL: http://www.3gpp.org/ftp/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090005%20LTE%20RAN%20Architecture%20aspects.pdf (pristupljeno: travanj 2016)
- [37] URL: http://www.ashtonmetzler.com/WLANarch_SR_070605.pdf (pristupljeno: travanj 2016)
- [38] URL: <http://www.bynkii.com/archives/arcana/2005/> (pristupljeno: travanj 2016)
- [39] URL: http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/emob41dg/ch3_WLAN.html (pristupljeno: travanj 2016)
- [40] URL: http://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/introduction_orthogonal_frequency_division_multiplex.pdf (pristupljeno: travanj 2016)
- [41] URL: <http://www.ieee802.org/16/> (pristupljeno: travanj 2016)
- [42] URL: <http://www.javvin.com/protocolWiMAX.html> (pristupljeno: svibanj 2016)
- [43] URL: <http://www.leger.ca/pages/pdf/WLAN-A07/WLAN-420-874-LA-A07-Module-4.pdf> (pristupljeno: svibanj 2016)
- [44] URL: <http://www.protocols.com/pbook/h323.htm> (pristupljeno: svibanj 2016)
- [45] URL: <http://www.slideshare.net/mulimuljati/wimax-deployment-considerations> (pristupljeno: travanj 2016)
- [46] URL: http://www.unidu.hr/unidu/rm/WLAN_novo7.pdf (pristupljeno: ožujak 2016)
- [47] URL: <http://www.wimax.com/whitepapers/whitepapers> (pristupljeno: ožujak 2016)
- [48] URL: www.ericsson.com/hr/etk/revija/Br_2_2005/h323.pdf (pristupljeno: studeni 2016.)
- [49] URL: www.fer.unizg.hr/_download/repository/11_voip-sip-h323-notes.pdf (pristupljeno: studeni 2015.)
- [50] URL: [www.wikipedia.com/wiki](http://www.wikipedia.com/wiki/Voice_over_IP.htm)

- [59] URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/5125-delay-details.html> (pristupljeno: lipanj 2016)
- [60] URL: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=606583> (pristupljeno: lipanj 2016)
- [61] URL: <http://www.ijcsit.com/docs/Volume%205/vol5issue04/ijcsit20140504104.pdf> (pristupljeno: lipanj 2016)
- [62] URL: <https://splash.riverbed.com/docs/DOC-5399> (pristupljeno: lipanj 2016)

POPIS KRATICA

3GPP - *Third Generation Partnership Project*

AMC – *Contiguous Assignment*

AP – *Access Point*

ATM – *Asynchronous Transfer Mode*

BEB - *Binary Exponential Backoff*

BS – *Base Station*

BSS - *Basic Service Set*

BTS – *Base Transceiver Station*

C/I – *Carrier to Interference*

CAN - *Campus Area Network, Corporate Area Network*
UNII - *Unlicensed National Information Infrastructure*

CID – *Connection Identifier*

CP - *Cyclic Prefix*

CPE - *Customer Premises Equipment*

CS – *Circuit Switched*

CS - *Service specific convergence sublayer*

CSMA - *Carrier Sense Multiple Access*

CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

CTS - *Clear to Send*

DDL – *Data Link Layer*

DES - *Data Encryption Standard*

DFS - *Dynamic Frequency Selection*

DHCP – *Dynamic Host Configuration Protocol*

DL – *DownLink*

DS - *Distribution System*

DSSS– *Direct Sequence Spread Spectrum*

ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*

E-UTRAN – *Evolved UTRAN*

FCC - *Federal Communications Commission*

FDD - *Frequency Division Duplex*

FHSS – *Frequency Hopping Spread Spectrum*

GW – *Gateway*

HSDPA - *High-Speed Downlink Packet Access*

IBSS - *Independent Basic Service Set*

ICE - *Interactive Connectivity Establishment*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IP – *Internet Protocol*

IR – *Infra Red*

ISI - *Inter Symbol Interference*

ISM – *Industrial, Scientific and Medical band*

ITS - *Intelligent Transportation Systems*

LMDS - *Local Multipoint Distribution Service*

LOS – *Line Of Sight*

LTE – *Long Term Evolution*

MAC – *Medium Access Control*

MAC CPS - *MAC common part sublayer*

MACA- *Multiple Access with Collision Avoidance*

MIME - *Mobility Management Entity*

MIMO – *Multiple In Multiple Out*

NAS – *Non Access Stratum*

NAS – *Non Access Stratum*

NLOS – *Non-Line-of-Sight*

OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplex*

OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

OSI – *Open System Interconnection*

PCRF - *Policy and Charging Rules Function*

PDCP – *Packet Data Convergence Protocol*

PDNGW - *Packet Data Network Gateway*

PHS - *Payload header suppression/compression*

PN - *Pseudo Noise*

PS – *Packet Switched*

PUSC - *Pseudo-random permutation*

QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*

QoS – *Quality of Service*

QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*

RAN – *Radio Access Network*

RAT - *Radio Access Technology*

RLC – *Radio Link Control*

RRC – *Radio Resource Control*

RTS - *Request to Send*

RUIM – *Removable User Identification Module*

SC - *Service Specific Convergence Sublayer*

SC-FDMA – *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*

SDF - *Service Data Flows*

SGW - *Serving Gateway*

SIM – *Subscriber Identification Module*

SNR - *Signal-to-Noise Ratio*

SOFDMA – *Scalable OFDMA*

SS – *Subscriber Station*

STUN - *Session Traversal Utilities*

TCP – *Transport Control Protocol*

TDD – *Time Division Duplex*

TKIP - *Temporal Key Integrity Protocol*

TPC - *Transmitter Power Control*

TTI - *Transmission Time Interval*

UDP – *User Datagram Protocol*

UL – *UpLink*

UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System*

UMTS – *Universal Mobile Telecommunication System*

USIM – *Universal SIM*

UTRAN – *Universal Terrestrial Radio Access Network*

VoIP – *Voice over IP*

WAVE - *Wireless Access In Vehicular Environments*

WEP - *Wired Equivalent Privacy*

WiMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

WLAN - *Wireless LAN*

POPIS SLIKA

Slika 3.1. Komunikacijski kanali kod 802.11b standarda, [33]	7
Slika 3.2. 802.11a kapacitet kanala, [33].....	9
Slika 3.3. 802.11a primjer kanala, [33]	9
Slika 3.4. 802.11 područje definiranja, [31]	11
Slika 3.5. Obrada signala u prijemniku, [46].....	12
Slika 3.6. DSSS tehnika, [32]	13
Slika 3.7. FHSS – frekvencijski skokovi, [32]	14
Slika 3.8. FHSS s dva korisnika, [32]	15
Slika 3.9. Usporedba DSSS i FHSS, [38].....	15
Slika 3.10. Ukupni kapacitet ovisno o broju pristupnih točaka, [38].....	16
Slika 3.11. OFDM, [40].....	17
Slika 3.12. 802.11 arhitektura, [34].....	18
Slika 3.13. ESS, [46]	19
Slika 3.14. Problem skrivene stanice, [32]	22
Slika 3.15. Distribuirana arhitektura, [39]	23
Slika 3.16. Centralizirana arhitektura na dvije razine prospajanja, [39].....	24
Slika 3.17. Centralizirana arhitektura s prospajanjem, [39]	24
Slika 3.18. Prikaz protokolnog složaja WiMAX-a, [47].....	28
Slika 3.19. Protokolni složaj zračnog sučelja, [41]	29
Slika 3	

Slika 3.25. SGW, [27].....	38
Slika 3.26. Prijenos SDF-a, [27]	38
Slika 3.27. Podatkovni put s-kraja-na-kraj kod LTE, [27].....	39
Slika 3.28. Raspoređivanje ovisno o kvaliteti kanala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, [23].....	41
Slika 3.29. Raspoređivanje korisnika u uzlaznoj vezi, [29]	41
Slika 3.30. LTE podržane modulacije, [27].....	42
Slika 3.31. Usporedba OFDMA i SC-FDMA, [30].....	42
Slika 3.32. Usporedba performansi različitih mobilnih sustava, [29]	43
Slika 4.1. Komponente H.323 mreže, [2].....	47
Slika 4.2. Međudjelovanje SIP mrežnih entiteta, [54]	50
Slika 4.3. SIP arhitektura, [55].....	51
Slika 4.4. Tipična H.323 mreža, [55]	52
Slika 5.1. Izvori kašnjenja, [59].....	55
Slika 5.2. Preklapanje algoritamskog i paketizacijskog kašnjenja, [59]	57
Slika 5.3. Rad de-jitter buffera, [59].....	58
Slika 5.4. Varijabilno kašnjenje i de-jitter buffer, [59].....	

Slika 6.8. prosječna MOS vrijednost s potiskivanjem tišine, [20].....	69
Slika 6.9. Gubici VoIP paketa (čisti VoIP promet), [62]	70
Slika 6.10. Propusnost, [62]	70
Slika 6.11. Kašnjenje govornih paketa za WiMAX, [62].....	71
Slika 6.12. Propusnost za VoIP i FTP promet u WiMAX mreži, [62]	72
Slika 6.13. Simulacijski model LTE mreže, [21]	73
Slika 6.14. Kašnjenje u početnoj mreži, [21]	74
Slika 6.15. Kašnjenje u zagušenoj mreži, [21].....	75
Slika 6.16. Gubitak paketa za slučaj početnog prometnog opterećenja mreže, [21].....	76
Slika 6.17. Poslani i primljeni promet u zagušenoj mreži, [21]	77
Slika 6.18. Jitter, [21].....	78
Slika 6.19. MOS, [22]	79
Slika 6.20. Simulirana LTE mreža - 1.3MHz, [22]	79
Slika 6.21. Downlink i Uplink propusnosti za 1.3, 3 i 5 MHz, [22].....	80
Slika 6.22. Downlink i Uplink propusnosti za 10, 15 i 20 MHz pojas, [22]	81
Sli	

POPIS TABLICA

Tablica 1. Korištene frekvencije za 802.11b i 802.11g standarde	7
Tablica 2. 802.11 standardi.....	10
Tablica 3. 802.16e QoS klase	27
Tablica 4. Komparativni prikaz karakteristika različitih protokolnih arhitektura	45
Tablica 5. VoIP protokoli i OSI	46
Tablica 6. Granični slučajevi kašnjenja zbog kodiranja	56
Tablica 7. Paketizacija	56
Tablica 8. Serijalizacijsko kašnjenje u milisekundama za različite veličine okvira	58
Tablica 9. Parametri simulacije	69
Tablica 10. Simulacijski podaci za početnu VoIP mrežu	74
Tablica 11. Simulacijski podaci za zagušenu VoIP mrežu	74
Tablica 12. Prikaz kašnjenja za početnu mrežu	75
Tablica 13. Kašnjenje u zagušenoj mreži.....	76
Tablica 14. Sumarni prikaz poslanog i primljenog prometa u početnoj mreži.	77
Tablica 15. Usporedni prikaz poslanog i primljenog prometa u zagušenoj mreži	78