Određivanje prijenosnog kapaciteta za VoIP

Škrlec, Nikola

Undergraduate thesis / Završni 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:119:879067

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET POMETNIH ZNANOSTI

Nikola Škrlec

ODREĐIVANJE PRIJENOSNOG KAPACITETA ZA VOIP

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

ODREĐIVANJE PRIJENOSNOG KAPACITETA ZA VOIP

DETERMINING LINK CAPACITY FOR VOIP

Mentor: dr. sc. Marko Matulin

Student: Nikola Škrlec

JMBAG: 0135217230

Zagreb, lipanj 2016.

ODREĐIVANJE PRIJENOSNOG KAPACITETA ZA USLUGU VOIP

SAŽETAK

Cilj rada je opisati osnovne značajke prijenosa govora Internet protokolom, uključujući različite metode kompresije govora i njihovog učinka na kvalitetu usluge. Uz to, analizirati protokole transportnog, mrežnog i podatkovnog sloja korištene u VoIP komunikaciji. Na primjeru zadanog slučaja analiziran je potreban kapacitet prijenosnog linka s grafički prikazanim rezultatima.

KLJUČNE RIJEČI: prijenos govora, IP protokol, kodeci govora

DETERMINING LINK CAPACITY FOR VOIP

SUMMARY

The purpose of this paper is to describe basic characteristics of voice transmission via Internet protocol, involving various metods of voice compression and their effect on quality of service. Moreover, to analize protocols of transport, network and data link layers used in VoIP communication. On the example of the given case the necessary capacity of data link has been analized with graphically displayed results.

KEYWORDS: voice transmission, IP protocol, voice codecs

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. ZNAČAJKE PRIJENOSA GOVORA INTERNET PROTOKOLOM (VoIP) 3
2.1. POVEZANOST GOVORNE I PODATKOVNE MREŽE 5
2.2 PAKETIZACIJA GOVORA 6
2.3. KODIRANJE GOVORA 6
2.4. DICING I SPLICING GOVORNIH STREAMOVA 8
3.1. KODECI GOVORNOG SIGNALA 11
3.1.1. G.711 kodek 12
3.1.2. G.726 kodek 14
3.1.3. G.728 kodek 16
3.1.4. G.729 kodek 18
3.1.5. G.723.1 kodek 19
3.2. KVALITETA USLUGE 21
4. KORIŠTENI PROTOKOLI TRANSPORTNOG, MREŽNOG I PODATKOVNOG SLOJA 23
4.1. User Datagram Protocol (UDP) 23
4.2. Real-Time Protocol (RTP) 24
4.3. Real-Time Control Protocol (RTCP) 26
4.4. Real-Time Streaming Protocol (RTSP) 26
4.5. Ethernet 27
4.6. Point-to-Point Protocol (PPP) 29
5. ANALIZA KAPACITETA PRIJENOSNOG LINKA 30
6. IMPLEMENTACIJA VOIP RJEŠENJA U RAZLIČITIM MREŽAMA 38
7. ZAKLJUČAK 40
LITERATURA 41
POPIS KRATICA 42
POPIS SLIKA 44

1. UVOD

Usluga prijenosa govora od svojeg je nastanka imala nekoliko značajnih promjena što se tiče samog načina prijenosa i modulacije govora. Standardizacija i dostupnost Interneta je promijenila komunikacije u potpunosti, pa tako i govorne komunikacije. Prijenos govora je uvođenjem VoIP-a (*Voice over Internet Protocol*) doživio najveću promjenu od kad postoje govorne komunikacije. Kroz povijest su postojale različite vrste mreža koje su se koristile u svrhu prijenosa govora, gdje je mod prijenosa bio komutirani kanal. Nastankom VoIP-a govor je objedinjen zajedno s prijenosom podataka i na taj način otvorio nove mogućnosti za govorne usluge. VoIP je direktno utjecao i na njihovu cijenu, a time i kroz godine napretka poboljšao kvalitetu usluge, te omogućio korisnicima mogućnosti personalizacije same usluge i njihov utjecaj na kvalitetu prijenosa i na korištenje različitih mreža za pristup uslugama VoIP-a.

Ovaj rad se sastoji od sljedećih cjelina:

1. Uvod
2. Značajke prijenosa govora Internet protokolom (VoIP)
3. Načini kompresije govora i kvaliteta usluge
4. Korišteni protokoli transportnog, mrežnog i podatkovnog sloja
5. Analiza kapaciteta prijenosnog linka
6. Implementacija VoIP rješenja u različitim mrežama
7. Zaključak.

Kroz drugo poglavlje ukratko je opisan nastanak i razvoj VoIP-a, njegove najbitnije razlike u usporedbi s prijašnjim načinima prijenosa govora, povezanost govornog i podatkovnog prometa i način na koji se govor prenosi mrežom, oblikovanje govora za prijenos i njegovo kodiranje te utjecaj modulacije na govorne signale.

Treće poglavlje govori o načinima kompresije govora i korištenju različitih kodeka. Neki kodeci koji imaju specifične karakteristike su detaljno opisani, kao i način rada tih kodeka. Ukratko je opisan utjecaj odabira kodeka na kvalitetu usluga, kao i faktori koji utječu na kašnjenja, a time i kvalitetu.

U četvrtom poglavlju navedeni su protokoli koji su potrebni za funkcioniranje VoIP-a, s obzirom da postoji mnoštvo protokola i izvedbi, opisani su protokoli korišteni u daljnjoj analizi.

Peto poglavlje sadrži analizu potrebnog kapaciteta prijenosnog linka gdje je na primjeru prikazan utjecaj odabira različitih kodeka i protokola s obzirom na željenu

vjerojatnost odbijanja poziva, kao i na kvalitetu. Uz to, kodeci su međusobno uspoređeni na primjeru korištenom za analizu, kao prikaz mogućeg realnog scenarija. Za analizu je korištena aplikacija VoIP Bandwith Calculator, kao i online Erlang B Calculator.

U šestom poglavlju opisano je korištenje VoIP usluge kao paketa usluga koje operatori pružaju korisnicima, poput prijenosa govora i podataka, te implementacija VoIP usluga u aktualnim mrežama koje koriste sve prisutni uređaji.

Sedmo poglavlje je zaključak s obzirom na provedenu analizu potrebnih kapaciteta prijenosnog linka i trenutno stanje VoIP-a.

2. ZNAČAJKE PRIJENOSA GOVORA INTERNET PROTOKOLOM (VoIP)

Ne tako davno, prijenos govora i prijenos podataka bili su strogo odvojeni. Govor se prenosio isključivo fiksnom telefonskom linijom, tj. javnom telefonskom mrežom (*Public Switched Telephone Network* - PSTN), a putanja fiksne veze ostvarivala se pozivom i održavala se za vrijeme trajanja veze, pri čemu su svi resursi bili rezervirani za poziv (komutacija kanala). Model naplate za korištenje govornih usluga bio je isključivo temeljen na trajanju poziva. Godine ulaganja u fiksnu telefonsku mrežu učinile su ovaj način komuniciranja gotovo 100% pouzdanim i svim korisnicima prihvatljivim u cijelom svijetu. Kao posljedica pouzdanosti i dostupnosti same telefonske usluge, lokalni i međunarodni pozivi postali su dio svakodnevice.

Nasuprot tome, podatkovni promet prenio se u javne podatkovne mreže. Datoteke, poruke i dokumenti segmentiraju se u niz paketa, koji se u tom obliku šalju mrežom na odredište, pri čemu svaki paket poslan u mrežu sadrži zaglavlje u kojem je, između ostalog, zapisana IP adresa odredišta. Svi paketi ne moraju se primiti istim redoslijedom kao što su odaslani, a neki mogu imati znatno različite putanje prolaska kroz mrežu usmjerivača i preklopnika te ostalih elemenata u mreži. Zbog te činjenice moguće je da dio paketa ne stigne na odredište i bude izgubljen ili oštećen u mreži, [1].

Telekomunikacijski trendovi ukazuju na kombiniranje dva osnovna načina prijenosa podatkovnih i govornih informacija. U početku su se podaci najčešće pretvarali u oblik koji podsjeća na govorni i tako prenosili postojećom infrastrukturom, dok se kod suvremenih načina prijenosa govor pretvara se u podatkovni oblik i tako se prenosi javnom podatkovnom mrežom. Ovakve pretvorbe ukazale su na postojanje neiskorištenih prijenosnih kapaciteta u govornoj komunikaciji, pri čemu se došlo do zaključka da je samo mali vremenski interval potreban za prijenos govora. Prosječni poziv sastoji se od tek 20 % govorne komunikacije dok se u ostalo vrijeme najčešće sluša sugovornik s druge strane, razmišlja o odgovoru kojeg će dati na upit ili tek diše između izgovorenih riječi, [1]. Na temelju ovih činjenica krije se prednost prijenosa govora putem podatkovnih mreža, koji je tada zbog kompresije znatno efikasniji, a time i jeftiniji.

Voice over Internet Protocol (VoIP) koji se često naziva i IP telefonija ili Internet telefonijom je govorna komunikacija putem Internet protokola (IP), odnosno to je prijenos govora putem Interneta ili bilo koje druge mreže (npr. *Local Area Network* - LAN) uz uvjet da je temeljena na IP protokolu. Govor se na ovaj način prenosi u obliku digitaliziranog

zvuka, koji se komprimira oblikuje u IP pakete koji tada putuju kroz u IP mreži. Sredinom devedesetih godina prošlog stoljeća započelo je eksperimentiranje prijenosa glasa putem računalne mrežne infrastrukture i internetske mreže, potpuno zaobilazeći fiksne telefonske linije, pretvarajući govorne informacije u podatkovne pakete koji su se na odredištu ponovno spajali u cjelinu i tako omogućili glasovnu komunikaciju. Pokazalo se kasnije, iako vrlo skromnih i ograničenih tehničkih mogućnosti, da je to jeftin i funkcionalan koncept koji pred sobom ima velike mogućnosti za napredovanje i svijetlu budućnost.

U najranijoj fazi, tehnički preduvjeti bili su skromni: računalo (*Personal Computer* - PC) sa zvučnom karticom (u to vrijeme nisu sva računala bila opremljena zvučnom karticom), modem ili mrežna kartica te konekcija prema Internetu, slušalice i mikrofon te identičan komunikacijski softver na obje strane. Zbog malih brzina modemske veze, prvi korisnici su vrlo često imali relativno lošija iskustva, no to se s vremenom itekako promijenilo. Nakon toga, slijedili su uspješni pokušaji priključenja klasičnog telefona na računala, a kasnije i razna poboljšanja osnovne ideje u svrhu povećanja kvalitete prijenosa, a samim time i zadovoljstva korisnika, [1].

Danas se razlikuje nekoliko različitih izvedbi VoIP sustava od kojih se kao najvažniji može navesti već prethodno opisan sustav. Drugi slučaj uključuje neki oblik VoIP adaptera ili USB IP telefona, spojenog na računalo, ili direktno na DSL (*Digital Subscriber Line*) Router ili VoIP pristupnu točku, putem koje se komunicira standardnim telefonom. Treći slučaj ne uključuje izravno VoIP opremu, no uz prepaid bonove za VoIP usluge u nepokretnoj ili mobilnoj mreži, biranje odgovarajućeg predbroja znači izravno korištenje VoIP usluge, a uz to i značajnu uštedu, najčešće prema pozivima u inozemstvo ili određenim skupinama, npr. besplatni pozivi prema obitelji (ovisno o dogovorenim uslugama davatelja usluga). Zadnji i sve popularniji slučaj, koji sada postoji i na našem tržištu, je ponuda fiksne telefonske linije s DSL konekcijom kod pojedinih davatelja telekomunikacijskih usluga, a čija se usluga temeljeni na DSL liniji u kojoj je implementiran VoIP komunikacijski kanal. Time korisnici imaju mogućost korištenja više vrsti govornih usluga uz naravno VoIP, [1].

2.1. POVEZANOST GOVORNE I PODATKOVNE MREŽE

Početak podatkovne komunikacije bile su iznajmljene analogne linije i modemi, a zatim je uslijedilo korištenje digitalnih usluga s fiksnom brzinom prijenosa bitova korisničke informacije. Središnja računala podržavala su tisuće terminala na dijeljenim linijama koja su rijetko prekoračivala brzinu 9600 bit/s – za 30 ili više terminala po višespojnoj liniji. Prospajanje paketa uvelo je veću fleksibilnost u prijenosu podataka i omogućilo lakše opremanje i rješavanje problema. Sedamdesetih godina prošlog stoljeća nastaje ITU (*International Telecommunication Union* – Međunarodna telekomunikacijska unija), sa svrhom definiranja protokola i paketnih formata za pristup uslugama prijenosa podataka. Pod okriljem preporuke X.25, definira se uslužno sučelje između korisnika i mreže. Unutarnji rad mreže ovisio je o pojedinačnom dobavljaču mrežne opreme. Prije no što su otvoreni standardi postali norme, običaj je bio da se pri svakoj izradi X.25 preklopnika dodaje vlastita vlasnička metoda za registraciju terminala, zahtjeve za povezivanjem linije te stvaranje evidencije o naplati. Standardi frame relay mreže slijedili su sličan put definirajući UNI (*User Network Interface*), ali ne unutarnje dijelove mreže, [2].

Standardiziranje određenih dijelova mreža omogućilo je daljnji napredak koji na kraju dovodi do razvoja VoIP-a. SS7 (*Signalling System No.7*) razvijen je još 1975. godine, a sadržavao je skup signalnih protokola za telefoniju, koji su korišteni za uspostavu i raskid poziva u tada već globalnoj PSTN mreži, a uz to omogućio je i prijenos kratkih poruka (kratica - SMS), te se u tom segmentu javlja spajanje govorne i podatkovne komunikacije, iako u minimalnom obliku, [2].

Do 1990-ih X.25 protokol pokriva svijet i postaje dostupan na gotovo svakom računalu. Zadržao je svoju popularnost sve dok pristup Internetu nije postao širom dostupan. Sličnost između X.25 i SS7 omogućila je telefonskim kompanijama stvaranje ponude digitalnog X.25 sučelja na ISDN (*Integrated Services Digital Network*) linijama, uključujući DS-0 kanal za korisničke podatke i D kanal (D označuje podatke, i to signalizacijske, a ne govorne), [2].

2.2 PAKETIZACIJA GOVORA

Govor u paketima ima dugu povijest. Američki patenti datiraju sve do 1980-ih. Još je ranije vojska koristila enkodere vrlo niske brzine prijenosa podataka na X.25 mrežama. Oni su bili relativno loše kvalitete, ali su funkcionirali na vrlo sporim vezama i bili su dostupni malom broju ljudi koji su se znali njima koristiti. Jedna od prvih javnih demonstracija govornih paketa u obliku praktičnom za komercijalna poduzeća odvila se na frame relay mreži na Interop sajmu 1991. godine, [3].

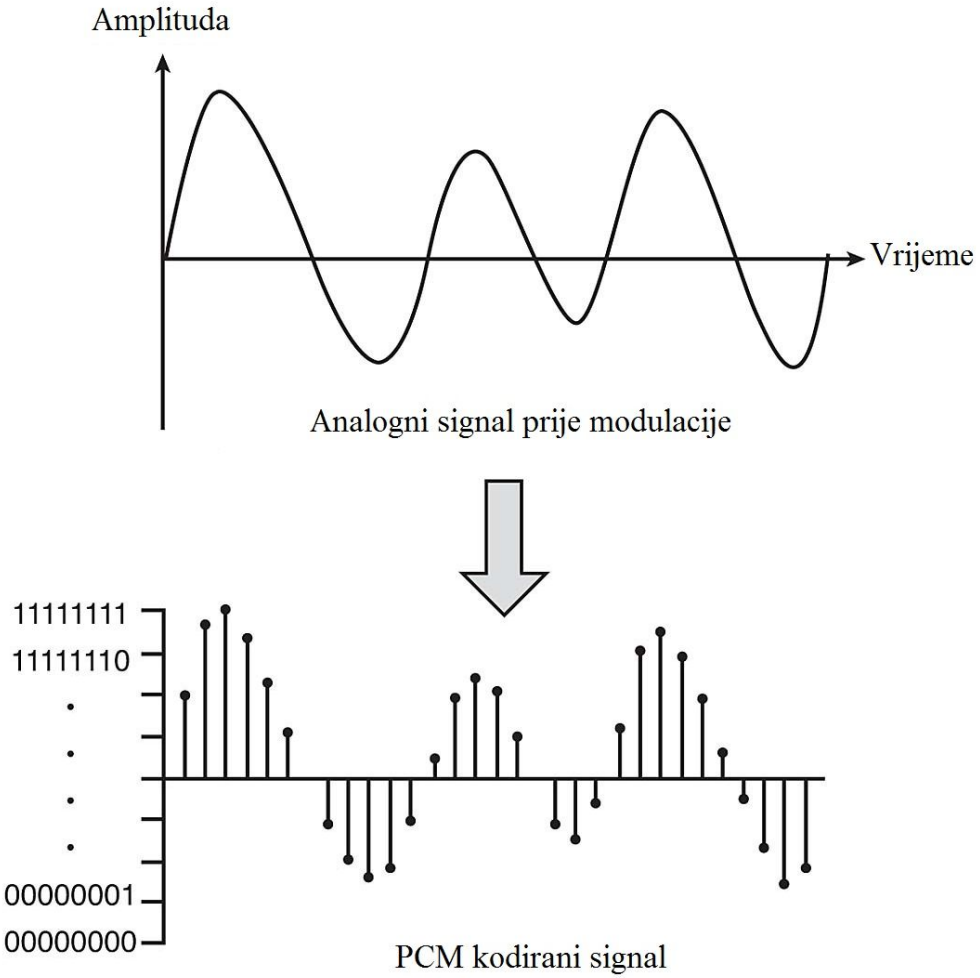
Kao povijesna bilješka, elektronički komutacijski sustav 5ESS (proizveden od tvrtke Western Electric) proizveden je kao kružni prekidač (*circle switch*). Princip rada bio je temeljen na TDM-u (*Time Division Multiplex*), koji je prenosio govor u 64 kbit/s kanalima. Demonstracija frame relaya radila je na istoj bazi govornog kodiranja, pulsnokodnoj modulaciji (*Pulse-Code Modulation* - PCM), te ostaje standard za PSTN. Za VoIP unutar LAN-a (*Local Area Network* – lokalna mreža) može se koristiti PCM ili zvuk veće kvalitete. Na WAN-u (*Wide Area Network*) se često bira opcija kompresiranja signala kako bi se smanjila potrebna propusnost, [3].

Kako bi prenio govor u paketima, uređaj kojim se šalje nastoji očuvati konstantni *stream* brzine prijenosa bitova u kratkom intervalu, a zatim postavlja podatkovne bitove (*payload*) u paket. Primatelj (*reciever*) izvlači dijelove tog tzv. *payloada* te ih ponovo sastavlja u cjelinu, rekreira (za PCM) stream od 64 kbit/s i ponovo ga pretvara u zvuk, [3].

VoIP i UC (*Unified Communications*) imaju isto svojstvo, što znači da se digitalna informacija šalje u paketskom modu prijenosa. Na govorne pakete poslane paketskim modom prijenosa utječe *jitter*, tj. varijacija u kašnjenju paketne mreže. Preko linka se istovremeno šalje više informacija, paketi višeg prioriteta će se poslati, a paketi nižeg prioriteta biti će na čekanju. Razlog čekanja paketa na slanje je *buffering*, tj. u svakom čvoru postoji *buffer* (međuspremnik) kako ne bi došlo do prekida komunikacije. Govorni paketi visokog prioriteta iz tog razloga imati će prednost ispred podatkovnih paketa, [3].

2.3. KODIRANJE GOVORA

Veliki dio tržišta VoIP-a oslanja se na pulsnokodnu modulaciju (PCM, definiranu u ITU preporuci G.711 i raznim Bell System izdanjima). PCM je jednostavan i prenosi ne samo govor, nego i moderne signale, uključujući prijenos faksimila, bez dodatnih zahtjeva, [4].



Slika 1. Usporedba analognog i PCM kodiranog signala, [4]

Govorni signal prije modulacije je analogni i valnog je oblika, što nije pogodno za slanje i potrebno ga je kodirati. Signal nakon kodiranja poprima vrijednosti nula i jedinica, kao što je prikazano na slici 1.

Međutim, dodavanje zaglavlja prilikom prenošenja PCM-a u paketima stvara problem propusnosti (*bandwidth hog*), koristeći do 156 kbit/s pri kodiranju. To je propusnost preklopnika. Minimalna preporučena propusnost na full-duplex lokalnom pristupu iznosi najmanje 80 kbit/s za PCM, 100 kbit/s ako koristi Ethernet na lokalnoj petlji (*loop*). Prodavači VoIP opreme koriste dva načina za kodiranje govora kako bi se smanjili potrebni prijenosni kapaciteti:

- Kompresiraju govor
- Potiskuju pakete koji ne nose ništa osim pozadinske buke.

Dostupno svojstvo nekih dekodera skriva efekt povremenog nestalog paketa. Dekoder ubacuje tišinu ili ponavlja prethodno primljeni paket kako bi nadomjestio paket koji nedostaje. Slušatelju to zvuči bolje od prekida reprodukcije kao da je dio audio zapisa izrezan. Bilo koji zvuk smanjuje učinak nedostajećeg paketa. Prijamnik premosti tu prazninu jednim od sljedećih nadomjestaka (*fillera*):

- Ugodna buka nalik generičkom pozadinskom zvuku izbjegava mrtvu prazninu u potpunosti.
- Ponavljanje zadnjeg paketa prije ovog koji nedostaje. Jedan paket koji nedostaje obično zauzima samo 20 ms pa ih slušatelj i ne primijeti.
- Zvuk sintetiziran kombinacijom sadržaja prethodnog paketa i prvog koji slijedi nakon nedostajećeg, [4].

Nažalost za VoIP, paketi češće nestaju u grupama nego pojedinačno. Zadnja metoda zamjene izgubljenih paketa funkcionira bolje u slučaju gubitka paketa, [4].

2.4. DICING I SPLICING GOVORNIH STREAMOVA

Da bi govor postao podatkovni paket, potrebno je provesti nekoliko karakterističnih koraka. Prije slanja zvuk se kodira u digitalni oblik. Prvi korak za zvuk tipično je tradicionalni standard pulsno kodne modulacije (PCM); odnosno, 16-bitna konverzija iz analognog u digitalno, po mogućnosti mapirana u 8-bitnu skalu. Prodavači ponekad ne nude nijedan drugi oblik kodiranja, iako postoje mnogi. Različite metode kodiranja omogućuju bolju kvalitetu zvuka i veću točnost. Neki uzimaju uzorke mnogo frekventnije – više od 40 000 puta u sekundi za audio CD-e, na primjer.

Kako bi se smanjio zahtjev za propusnošću, primjerice ADPCM (*Adaptive Differential PCM*) kodira promjene među uzorcima, umjesto cijelih uzoraka, i to u polovici ili četvrtini PCM-ove brzine prijenosa podataka.

Kao kod uređaja za multipleksiranje i demultipleksiranje, svaki PCM enkoder opisuje govornu informaciju 8 000 bajtova po sekundi. Pojedinačno slanje paketa i ograničenje u ulaznom toku (pak/s ili B/s), čini slanje svakog bajta kao vlastiti paket neizvršivim. Umjesto toga, uređaj kojim se šalje akumulira bajtove kako bi načinio paket veličine koja je pogodnija za slanje, na primjer 80 ili 160 bajtova podataka, [4].

Kodirani govor zahtijeva dodatne informacije kako bi se prenio do mreže i omogućio prijemniku da ga pravilno dekodira. S obzirom da protokoli dodaju svoja zaglavalja (na primjer *Transmission Control Protocol* - TCP, *User Datagram Protocol* - UDP), često se

mogu vidjeti napomene na veličinu zaglavlja koja iznosi 20 bajtova, povremeno nekoliko više. Ta se brojka odnosi na veličinu IP zaglavlja, i to samo jednog. Ostala će zaglavlja više nego udvostručiti veličinu paketa koji se prenose. Ta zaglavlja mogu prekoračiti sveukupnih 64 bajta, veličinu podataka koji se prenose, koja može udvostručiti traženu propusnost za govornu vezu, [4].

Na kraju primanja informacije, dijelovi zvuka u prenesenom paketu su preuzeti i ponovno spojeni u neprekidni signal za reprodukciju govora. Za sustav koji koristi PCM, to znači reprodukciju DS-0 bitnog *streama* i dekodiranje istog na način kao da dolazi iz TDM kanala. Druge metode kodiranja koriste drukčije strategije reproduciranja, [4].

3. NAČINI KOMPRESIJE GOVORA I KVALITETA USLUGE

Da bi se govorni signal prenio preko paketske mreže (IP mreže) neophodno ga je oblikovati u pakete, te se prije oblikovanja paketa govor mora digitalizirati. Kao što to slučaj u telefonskim mrežama, u digitalnim telefonskim centralama odvija se digitalizacija govornog signala po A zakonu kompresije, [5]. U slučaju ISDN mreže digitalizacija se odvijala već u samom telefonskom uređaju (ISDN telefon), odnosno na korisničkoj strani. Govorni signal koji je digitaliziran upotrebom A zakona kompresije, kodiran je G.711 kodekom, jer (ITU-T) preporuka G.711 definira A i μ zakone kompresije, [5].

Pored G.711 kodeka, mogu se koristiti i drugi kodeci poput G.726, G.729 i dr. Kada je govorni signal digitaliziran, tada se binarni digitalni oblik govornog signala može ubaciti u paket (paketizacija govornog signala) i to u korisni dio paketa (*payload*) - ovaj proces se obavlja na mrežnom sloju. Da bi se paketizirani govorni signal prenio ispravno na odredište i tamo dekodirao, neophodno je koristiti usluge nižih slojeva (transportni, mrežni, sloj link podataka, fizički sloj) pa je potrebno definirati i pripadajuće protokole, kao i koristiti već postojeće protokole koji će omogućiti ispravan prijenos paketiziranog govora kroz mrežu temeljenu na komutaciji paketa. Postoji više različitih tehnologija temeljenih na komutaciji paketa, ali trenutno je najvažniji prijenos govora preko Internet mreže, kao i Ethernet LAN mreže koje su najpoznatije paketske tehnologije, [5].

Govorni signal tipično zauzima frekvencijski opseg do 10 kHz, ali se najveći dio govornog signala nalazi u opsegu 300-3400 Hz. Na taj način se govorni signal propušta kroz NF (nisko frekvencijski) filtar čija je gornja granica 3400 Hz. Druga osobina govornog signala je da samoglasnici nose govorni signal, a suglasnici razumljivost govornog signala, pri čemu su suglasnici manje snage. Budući da digitalizacija unosi šum kvantizacije, poželjno je da ovaj šum bude mali kada se digitaliziraju suglasnici da bi se dobila izrazito dobra razumljivost govornog signala, dok kod samoglasnika šum može biti i veći jer oni nose snagu govornog signala, a imaju manji utjecaj na razumljivost signala. Postoje i druge značajke govornog signala. Sve značajke govornog signala se u većoj ili manjoj mjeri uzimaju prilikom digitalnog kodiranja govornog signala. Kao rezultat kodeci mogu proizvesti kompaktniji digitalni oblik govornog signala koji ima manji protok, tj. količinu informacija kojom se opisuje govor izraženu u bitovima po sekundi (b/s), ali i manju kvalitetu reprodukcije, i obrnuto, [5].

3.1. KODECI GOVORNOG SIGNALA

Koji kodek će se koristiti ovisi o definiranoj razini kvalitete govornog signala, tj. komunikacije, broja istovremenih komunikacija koje se žele ostvariti, dozvoljenog protoka za jednu govornu komunikaciju (razgovor) i sl. Kodeci se često nazivaju i kompresorima jer komprimiraju govorni signal da bi ostvarili niži protok, ali to opet utječe na kvalitetu govornog signala. G.711 kodek daje najbolju kvalitetu govornog signala i jedino se za njega može reći da daje nekomprimirani digitalizirani govorni signal, [5]. Kodeci se mogu podijeliti u dvije grupe:

- Valni kodeci
- Parametarski kodeci

Valni kodeci se zasnivaju na ideji da se govorni signal kodira na način da se na prijamnoj strani može rekonstruirati izvorni valni oblik govornog signala. Kako je moguće rekonstruirati izvorni oblik signala, ovi kodeci se u principu mogu primijeniti i na druge vrste signala, a ne samo na govorne signale. Ovakvi kodeci tipično omogućavaju veću kvalitetu, ali zahtijevaju i veći protok. Rekonstrukcija valnog oblika signala može biti rekonstrukcija valnog oblika vremenske domene ili frekvencijske domene. U slučaju vremenske domene rekonstruira se izvorni vremenski oblik signala u skladu s principima kompleksnosti (kolika je potrebna procesna snaga za obradu kodeka), pri čemu su najpoznatiji kodeci takve vrste G.711 i G.726, [6].

S druge strane, ideja rekonstrukcije valnog oblika u frekvencijskoj domeni se zasniva na ideji da se frekvencijski spektar signala podijeli na podopsege koji se zasebno kodiraju, pri čemu se važniji podopsezi kodiraju preciznije sa više bitova, a manje važni podopsezi se kodiraju s manje bitova tj. manje precizno, [5].

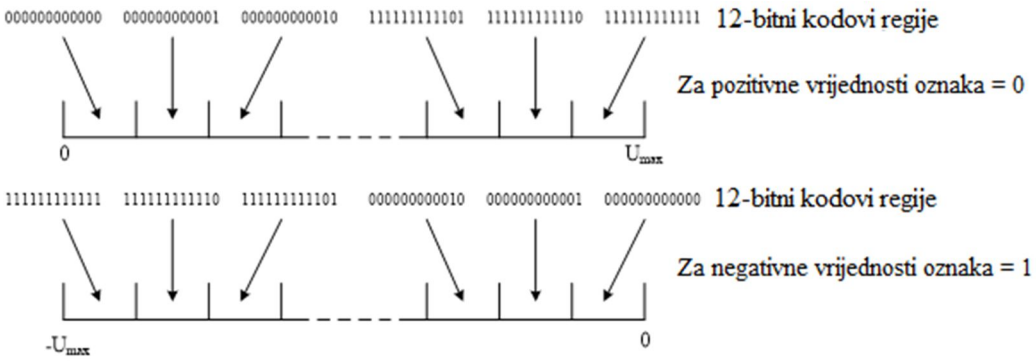
Druga metoda za valno kodiranje u frekvencijskoj domeni je primjena brzih transformacija poput kosinusoidne transformacije za predstavljanje odsječka govornog signala u obliku velikog broja frekvencijskih opsega, pri čemu se odvija adaptivno kodiranje koeficijenata koji opisuju spektralne karakteristike odsječka govornog signala. Koeficijenti se kodiraju adaptivno tako da se preciznije (s više bitova) kodiraju važniji koeficijenti, a manje precizno (s manje bitova) manje važni koeficijenti. Potrebno je napomenuti da su valni kodeci jednostavni za implementaciju i brzo kodiranje (procesiranje govornog signala nije kompleksno kod valnih kodeka), pri čemu se za kodiranje govornog signala češće koriste valni kodeci koji rekonstruiraju valni oblik temeljen na vremenskoj domeni, [5].

Parametarski kodeci zasnivaju se na ideji da se kodira govorni signal, odnosno za razliku od valnih kodeka, uzimaju se u obzir sve značajke govornog signala, pa parametarski kodeci nisu upotrebljivi za ostale vrste signala. Stoga, parametarski kodeci modeliraju govor korisnika i prenose vrijednosti karakterističnih parametara govornog signala koji se dobivaju analizom govornog signala. Na odredišnoj strani se na osnovi tih prenijetih parametara odvija spajanje govornog signala.

Međutim, cilj spajanja nije rekonstruiranje izvornog valnog oblika govornog signala, već dobivanje razumljivog govornog signala koji slušatelj može razumjeti. Iz tog razloga ovi sustavi nazivaju se još o sustavi analize i sinteze, jer se na izvoru odvija analiza govornog signala zbog određivanja karakterističnih parametara (redundancija, neravnomjerna amplituda i frekvencijska raspodjela) govornog signala koji se nakon toga prenose, a onda se na odredištu na osnovi tih parametara rekonstruira govorni signal. Ovakvi kodeci omogućavaju bolju kompresiju (zahtijevaju manji protok), ali imaju i nižu razinu kvalitete. Niža razina kvalitete dolazi od činjenice da se govorni signal na odredištu rekonstruira pa slušatelju takav govorni signal djeluje umjetno, što kod slušatelja stvara osjećaj slabije kvalitete iako je govor potpuno razumljiv. Govorni signal je potpuno razumljiv jer je glavni cilj parametarskih kodeka prijenos parametara koji se odnose na razumljivost govora. [5]

3.1.1. G.711 kodek

G.711 kodek je definiran u ITU-T preporuci G.711, [2]. Ovaj kodek se temelji na PCM-u, pulsno kodnoj modulaciji govornog signala. Unutar G.711 preporuke definirani su A i μ zakoni kompresije, a na području Europe uglavnom se koristi A zakon kompresije. Prije obrade u G.711 kodeku, govorni signal se filtrira (NF filtar) i odabire frekvencijom od 8 kHz, jer je za prijenos govornog signala predviđen frekvencijski pojas od 4 kHz. Govornom signalu iz pojasa 300-3400 Hz se pridodaje zaštitni dio od 0-300 Hz i 3400-4000 Hz. Uzorci govornog signala (impulsi govornog signala) se kodiraju sa 8 bita, te tako dolazi i naziv PCM - pulsno kodna modulacija. A zakon kompresije podrazumijeva kodiranje uzoraka sa po 8 bitova i kao rezultat se dobiva digitalizirani govorni signal protoka 64 kb/s (8 bitova na svakih 125 μs). G.711 spada u grupu valnih kodeka, [2].



Slika 2. Prikaz uniformnog PCM kodiranja, [2]

Pored kompresije, G.711 kodek koristi i pojam uniformne PCM modulacije koja podrazumijeva korištenje 13 bitova. Prema tome, definira se maksimalna apsolutna razina govornog signala (razina može imati i pozitivnu i negativnu vrijednost) i potom se u slučaju uniformne PCM modulacije čitav opseg razina govornog signala podijeli na regije iste veličine. Svaka regija se kodira s 12 bitova, dok 13. bit definira znak regije (pozitivan ili negativan), kao što je prikazano na slici 2. Govorni signal se kodira tako što se odredi u koju regiju upada i potom se uzima dvanestobitni kod regije ispred kojega se stavlja znak regije (koji u stvari odgovara znaku razine govornog signala).

Uniformni pristup isto tretira sve regije, odnosno šum kvantizacije je u prosjeku uvijek isti bez obzira na razinu signala, ali ovaj pristup nije optimalan iz razloga što niske razine govornog signala treba preciznije kvantizirati nego visoke razine govornog signala. Iz tog razloga se koristi A zakon kompresije koji prepoznaje logaritamsku prirodu govornog signala, [2].

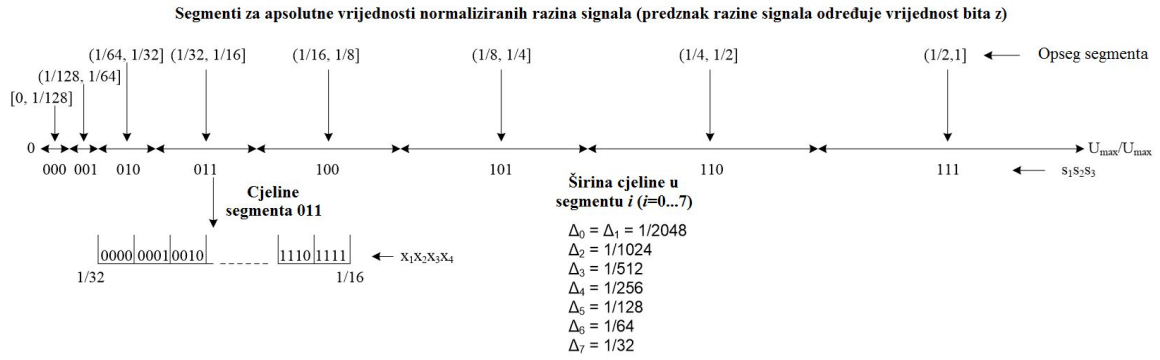
Prema [2], zakon kompresije $F(x)$ govornog uzorka definira se sljedećim izrazom:

$$F(x)=\begin{cases}\operatorname{sgn}(x)\cdot\dfrac{A|x|}{1+\ln A}, & |x|<\dfrac{1}{A}\\ \operatorname{sgn}(x)\cdot\dfrac{1+\ln(A|x|)}{1+\ln A}, & \dfrac{1}{A}\le|x|\le 1\end{cases} \tag{1}$$

gdje je x normalizirana vrijednost uzorka govornog signala, A je parametar kompresije koji u Europi iznosi 87.7.

Prema [2], na odredištu se mora izvršiti dekompresija koja je definirana na sljedeći način:

$$F^{-1}(y)=\begin{cases}\operatorname{sgn}(y)\cdot\dfrac{|y|(1+\ln A)}{A}, & |y|<\dfrac{1}{1+\ln A}\\ \operatorname{sgn}(y)\cdot\dfrac{e^{|y|(1+\ln A)-1}}{A}, & \dfrac{1}{1+\ln A}\le|y|\le 1\end{cases} \tag{2}$$



Slika 3. Prikaz A zakona kompresije, [2]

Svaki segment se dijeli na 16 cjelina iste veličine. Kodirani govorni uzorak ima tri dijela informacije. Znak *z* definira predznak govornog uzorka - pozitivan (0) ili negativan (1). Tri bita s_1, s_2, i s_3 definiraju u koji segment upada govorni uzorak, dok četiri bita x_1, x_2, x_3 i x_4 definiraju u koju cjelinu određenog segmenta upada govorni uzorak. Kao što se vidi sa slike 3, širine segmenata rastu s povećanjem razine signala, a samim tim i širine cjelina koje odgovaraju segmentima. To znači da će šum kvantizacije biti manji u regijama koje odgovaraju nižim razinama govornog uzorka, a veći u regijama koji odgovaraju višim razinama govornog uzorka, što je u skladu s karakteristikama govornog signala, [2].

Kada se na odredištu dobije kodirani uzorak, dekodiranje (dekompresija) se odvija na način da dekodirani uzorak dobije razinu koja odgovara sredini cjeline kojoj pripada kodirani uzorak, jer se time dobiva minimalni šum kvantizacije. Potrebno je napomenuti da je govorni signal kodiran G.711 kodekom gotovo nekomprimiran govorni signal iako se koristi A zakon kompresije, a razlog je taj što G.711 kodek daje najvjerniju reprodukciju govornog signala, ali pri tome zahtjeva i najveći protok od 64 kb/s za govorni signal, [2].

3.1.2. G.726 kodek

G.726 kodek je definiran u ITU-T preporuci G.726, [2]. Ovaj kodek obavlja ADPCM (*Adaptive Differential PCM*) modulaciju govornog signala i spada u grupu valnih kodeka. Uz to, G.726 kodek ima više izvedbi koje se razlikuju u zahtjevima vezanim uz protok. Prema tome, podržani su protoci od 40 kb/s, 32 kb/s, 24 kb/s i 16 kb/s.

Princip ADPCM modulacije je da smanji protok u odnosu na PCM modulaciju tako što se kodiraju razlike između razina uzoraka i razina procjene uzoraka umjesto samih uzoraka (tj. njihovih razina). Iz razloga što su susjedni uzorci govornog signala međusobno

visoko povezani, ima smisla kodirati razliku, a ne same uzorke jer se time bolje iskorištava postojanje redundantnosti u govornom signalu, odnosno njegovim uzorcima (zato se i uzima razlika uzoraka i njihove procjene, a ne razlika susjednih uzoraka, jer ona ne bi iskoristila povezanost). Za procjenu vrijednosti uzoraka se koriste prediktivni filtri. U samom predajniku se odmah odvija i rekonstrukcija uzoraka signala (simulacija dekodera u prijemniku) da bi se dobila povratna informacija za bolju procjenu uzoraka govornog signala. U G.726 standardu se u prediktivnom filtru koristi šest prethodnih razlika (razlika uzoraka i njihovih procjena), kao i dva prethodna rekonstruirana uzorka da bi se odredila procjena za trenutni uzorak govornog signala i time se mogla izračunati razlika trenutnog uzorka i njegove procjene. Za kodiranje razlike potrebno je manje bitova nego za kodiranje samih uzoraka (opseg vrijednosti razlike je manji od opsega vrijednosti uzoraka), tada se dobivaju niži protoci u odnosu na PCM modulaciju (G.711 kodek), ali je i kvaliteta govornog signala nešto niža. Kodiranje razlike se može odvijati sa 2 (16 kb/s), 3 (24 kb/s), 4 (32 kb/s) ili 5 (40 kb/s) bitova, [2].

Generiranje bitova razlike odvija se na svakih 125 μs, pa je jednostavno izračunati prethodno navedene protoke. ADPCM modulacija ima dobru otpornost na greške u prijenosu. Iz razloga što je procjena vrijednosti uzorka obavljena na osnovi prethodnih uzoraka, ukoliko dođe do greške u prijenosu, greška će biti smanjena zahvaljujući prethodnim dobro dekodiranim uzorcima, a uz to će njen utjecaj biti manji i na buduće uzorke. Na osnovi prethodno navedenog, jasno je otkud pojam diferencijalan u nazivu ADPCM kodeka. Pojam adaptivan potiče od mehanizma adaptacije koji je ugrađen u ovaj kodek. Naime, korak kvantizacije (kvantizira se razlika uzorka i njegove procjene) je veći ili manji u ovisnosti od brzine promjena signala, [2].

Ako signal ima velike promjene vrijednosti razlika (govor) tada je korak veći da bi se mogle kvalitetnije umanjiti nagle promjene signala, odnosno ako su promjene signala manje tada je korak manji. G.726 kodek je složeniji od G.711 kodeka, ali je i dalje relativno jednostavan za implementaciju. Postoje i druge moguće izvedbe i implementacije ADPCM modulacije koje nisu definirane u G.726 preporuci, odnosno ADPCM modulacija je širi pojam od G.726 preporuke koja definira samo određene implementacije ADPCM modulacije, [2].

3.1.3. G.728 kodek

Ovaj kodek je definiran u ITU-T preporuci G.728,[2], a temeljen je na LD-CELP (*Low Delay - Code Excited Linear Prediction*) algoritmu i spada u grupu parametarskih kodeka. G.728 kodek u osnovnoj izvedbi podržava 16 kb/s, dok je u aneksima standarda definirana i podrška za protoke 9,6 kb/s. 12,8 kb/s i 40 kb/s.

CELP (*Code Excited Linear Prediction*) algoritam i njegove izvedbe (poput LD-CELP) se nalaze u osnovi mnogih parametarskih kodeka. Ideja CELP algoritma je da simulira govorni sustav korisnika. Sam izvor govornog signala se modelira tzv. rječnikom (*codebook*) mogućih pobuda, dok se govor modelira linearnim prediktivnim (LP) filtrom i kroz ovaj filtar se propušta pobuda. Signal se na izlazu iz LP filtra u kodeku dodatno obrađuje, na način da se šum različito potisne u različitim frekvencijskim područjima (gdje šum ima veći negativan utjecaj potiskuje se više i obrnuto). Razlog dodatnog procesiranja je struktura slušnog sustava čovjeka koji je osjetljiviji na šum u nekim frekvencijskim područjima i obrnuto. Filtar koji obavlja ovu dodatnu obradu se označava kao *perceptual* (ili *noise*) *weighting* filtar, [2]

Prema slušatelju se šalju parametri neophodni za sintezu govornog signala na odredištu. Prije svega, šalje se indeks pobude kojom se određuje koja pobuda iz rječnika se koristi na odredištu, ali mogu se slati i drugi parametri poput koeficijenata LP filtra, pojačanja pobude (tipično se pobuda iz rječnika propušta kroz svojevrsni pojačivač, tzv. *gain* blok) i slično. Potrebno je napomenuti da se za prijenosnu karakteristiku LP filtra uzima karakteristika koja ima samo polove, jer je ona jednostavna za realizaciju, a pri tome predstavlja sasvim dobar model govora. Što se tiče rječnika pobuda, najčešće se koristi adaptivni rječnik pobuda i fiksni rječnik pobuda, [2].

Adaptivni rječnik, predstavlja zakašnjelu pobudu i koristi se za efikasno kodiranje periodičnih signala. Govorni signal ima svoju osnovnu frekvenciju koja se može izmjeriti, pri čemu osnovna frekvencija tijekom govora mijenja svoju vrijednost, tj. ona nije stacionarna veličina. S druge strane, slušni sustav je nelinearan sustav pa se definira i veličina *pitch* koja predstavlja subjektivnu percepciju osnovne frekvencije, odnosno to bi po definiciji bila frekvencija sinusoide za koju slušatelj (subjektivno) osjeća da je najpribližnija osnovnoj frekvenciji govora, pa se pravo mjerenje *pitch* veličine može obaviti samo uz pomoć slušatelja. Pored toga, važnu veličinu predstavljaju i neodređeni glasovi (kao nuspojava ljudskog govora) govornog signala koji definiraju važnije dijelove frekvencijskog pojasa u govoru. Pod značajnim dijelom se podrazumijeva i dio frekvencijskog pojasa u okviru kojeg

je koncentrirana veća snaga signala. U ovisnosti od izgovorenog slova/sloga/riječi mijenjaju se ti neodređeni glasovi pa su oni bitni sa stajališta razumljivosti govora. Krivulja govornog signala nosi informaciju o intonaciji što je bitno ako se želi rekonstruirati prirodnost (emocije) govora - ovo postižu valni kodeci jer oni rekonstruiraju valni oblik signala, [2].

Za sintetiziranje govora na odredištu bitno je dinamički generirati *pitch* parametar da bi se u slušnom sustavu izazvao osjećaj prirodne frekvencije govora, stoga je važan i adaptivni rječnik koji kasni za pobudom procijenjenog trajanja *pitch*-a. S druge strane, fiksni rječnik se koristi za pokrivanje onih informacija koje nisu pokrivene LP filtrom i adaptivnim rječnikom (tj. pretpostavkom *pitch* parametra) i on sudjeluje s najviše bitova (ili bolje rečeno utječe na najviše bitova) u kodiranju govornog signala, [2].

Sadržaj fiksnog rječnika (fiksne pobude) se direktno ili indirektno implementira u kodek. Direktno podrazumijeva svojevrsnu memoriju koja sadrži sve fiksne pobude, dok indirektno podrazumijeva da se fiksne pobude mogu rekonstruirati, na primjer, pomoću algebarskih izraza.

Način rada ovog kodeka je da primjeni princip analize i sinteze. Odvija se sinteza svih mogućih pobuda iz rječnika, pri čemu se na ulaz filtra (LP filtar) dovodi skup izlaza (koji su eventualno pojačani) adaptivnog i fiksnog rječnika. Pod pojmom *sve moguće pobude* se misli na sve moguće pobude iz fiksnog rječnika, jer je adaptivni rječnik zakašnjela pobuda pa se njegov izlaz određuje na osnovi prethodnih pobuda. Izlaz (LP) filtra se propušta kroz *perceptual weighting* filtar radi boljeg uobličavanja šuma. Cilj je pronalazak pobude koja najbolje odgovara govornom odsječku koji se analizira, da bi se u dekoderu mogao sintetizirati govorni signal koji će najviše podsjećati na izvorni govorni signal. Obično se pod najboljom pobudom smatra ona koja daje najmanju srednjekvadratnu grešku na izlazu iz *perceptual weighting* filtra (određivanje srednjekvadratne greške je dio procesa analize). Kao rezultat, kodek daje indeks pobude u fiksnom rječniku, a može dati i ostale parametre poput koeficijenata u LP filtru, procijene *pitch* perioda i dr., [2].

Dekoder na osnovu primljenog indeksa obavlja generiranje pobude iz fiksnog rječnika. Skup pobuda (koje su pojačane) iz fiksnog i adaptivnog rječnika (LP) filtar koji producira govorni odsječak na temelju kojeg se može reproducirati analogni govorni signal. Često se iza LP filtra dodaje još jedan filtar za dodatno procesiranje koji služi za povećanje prirodnost govornog signala. Kodek simulira strukturu dekodera u cilju određivanja najbolje pobude koja opisuje govorni odsječak, [2].

G.728 kodek koristi LD-CELP izvedbu CELP algoritma, a kao ulaz prima uniformni PCM signal, pri čemu procesira blokove od po 5 uzoraka. Fiksni rječnik ima 1024 moguće

pobude, odnosno za indeksiranje fiksnog rječnika potrebno je 10 bitova. Sve pobude se ispituju da bi se odredila ona koja najbolje odgovara procesiranom bloku od 5 uzoraka. Kao rezultat se šalje indeks pobude, tako da se u dekoderu može aktivirati odgovarajuća pobuda koja će rekonstruirati odgovarajući odsječak koji bi trebalo najviše podsjećati na obrađeni blok od 5 uzoraka. Pobuda se propušta kroz pojačivač i LP filtar, a razlika između sintetiziranog uzorka i procesiranog uzorka se propušta kroz *perceptual weighting* filtar čiji izlaz se ispituje da bi se odredila srednjekvadratna greška radi izbora najbolje pobude. Koeficijenti LP filtra i pojačivača se povremeno ažuriraju preko povratnih sprega (na osnovu prethodnih sintetiziranih pobuda se procjenjuje, tj. predviđa ponašanje govornog signala pa se u skladu s procjenom prilagođavaju koeficijenti LP filtra, odnosno pojačivača), [2].

Dekoder prima indeks pobude i na osnovu ovog indeksa generira odgovarajuću pobudu iz fiksnog rječnika koja prolazi kroz pojačivač i LP filtar. Izlaz iz LP filtra se procesira u dodatnom filtru (postfiltar) radi postizanja bolje prirodnosti sintetiziranog govornog signala. Izlaz postfiltra se pretvara u uniformni PCM format koji se može iskoristiti za D/A pretvorbu u analogni govorni signal koji će se reproducirati slušatelju. Iz razloga što se 10 bitova generira na svakih 0.625 ms (trajanje 5 uzoraka), protok je 16 kb/s. Upravo ovo procesiranje malog broja uzoraka, tj. kratkih blokova, je razlog za LD (*Low Delay*) u nazivu LD-CELP, tj. ovaj algoritam zbog procesiranja kratkih blokova unosi izrazito malo kašnjenje u prijenosu govornog signala tijekom procesiranja.

Izvedbe od 9,6 kb/s i 12,8 kb/s su relativno slične osnovnoj izvedbi, ali je rječnik manji pa se manje bitova prenosi jer je manje bitova potrebno za predstavljanje indeksa. Kod ovakve izvedbe, 6 bitova se generira svakih 0,625 ms za protok 9,6 kb/s, odnosno 8 bitova svakih 0,625 ms za 12,8 kb/s protok. Izvedba od 40 kb/s se značajnije razlikuje od osnovne izvedbe i ona je opisana u aneksu J G.728 preporuke, [2].

3.1.4. G.729 kodek

Ovaj kodek definiran je u ITU-T preporuci G.729, [2]. Temeljen je na CS-ACELP (*Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction*) algoritmu. G.729 kodek u osnovnoj izvedbi podržava 8 kb/s, dok je u aneksima standarda definirana i podrška za protoke 6,4 kb/s, 11,8 kb/s, kao i skalabilna podrška za protoke 8-32 kb/s. G.729 kodek spada u grupu parametarskih kodeka.

ACELP kodeci su varijanta CELP kodeka, gdje je fiksni rječnik pobuda temeljen na algebarskoj strukturi (indirektno) umjesto na memorijskoj strukturi (direktno). Na ovaj način

je omogućena podrška i za velik broj pobuda, odnosno može se koristiti velik broj bitova (>50 b) za predstavljanje pobuda čime je omogućeno kreiranje velikih fiksnih rječnika koji sadrže velik broj pobuda. Na ACELP algoritmu temeljen je i velik broj postojećih kodeka.

U G.729 kodeku fiksni (algebarski) rječnik odgovara rječniku kodiranom sa 17 bitova. Obrađuju se govorni odsječci od 10 ms, što odgovara bloku od 80 uzoraka ako se pretpostavi frekvencija odabiranja od 8 kHz. Kao rezultat obrade, kodek generira parametre koji se šalju prijemniku, tj. slušatelju. Parametri koji se šalju su koeficijenti LP filtra, indeksi fiksnog i adaptivnog rječnika, kao i koeficijenti pojačivača koji se nalaze iza fiksnog i adaptivnog rječnika u dekoderu. Pod indeksima adaptivnog rječnika se podrazumijeva vrijednost kašnjenja pobude koju unosi adaptivni rječnik. Svakih 10 ms generira se 80 bitova koji predstavljaju kodirane parametre, pa je generirani protok kodiranog govornog signala (preciznije njegovih parametara) 8 kb/s. Na odredištu se na osnovi primljenih parametara sintetizira govorni signal. Prvo se generiraju pobude iz fiksnog i adaptivnog rječnika (pobude iz svakog od rječnika se puštaju kroz pojačivač), pri čemu primljeni indeksi fiksnog i adaptivnog rječnika određuju pobude koje se generiraju, a primljeni koeficijenti pojačivača određuju razinu pojačanja pobuda na izlazu iz rječnika. Generirane pobude se nakon toga skupljaju i vode na LP filtar čiji su koeficijenti prilagođeni na temelju primljenih koeficijenata, a potom se signal s izlaza iz LP filtra pušta kroz postfiltar zbog dobivanja prirodnijeg govornog signala. Sami detalji oko strukture kodeka i dekodera mogu se naći u preporuci G.729, ali uglavnom slijede CELP arhitekturu, [2].

3.1.5. G.723.1 kodek

G.723.1 kodek je definiran u ITU-T preporuci G.723.1, [2]. Ovaj kodek se temelji na principu analize i sinteze CELP algoritma, a u osnovnoj izvedbi podržava 5,3 kb/s i 6,3 kb/s protoke. G.723.1 kodek spada u grupu parametarskih kodeka. Obrađuju se govorni odsječci od 30 ms, što odgovara bloku od 240 uzoraka ako se pretpostavi frekvencija odabiranja od 8 kHz. Pri tome se prilikom obrade bloka koristi još i 7,5 ms sljedećeg govornog uzorka (tzv. *look-ahead* kašnjenje G.723.1 kodeka je 7,5 ms). Može se reći da je ovaj kodek zasnovan na CELP arhitekturi, ali postoji mala razlika u formiranju fiksnog rječnika. Ako se koristi manji protok (5,3 kb/s) koristi se algebarska struktura za fiksni rječnik, pa se može reći da kodek radi po ACELP principu. Ako se koristi veći protok (6,3 kb/s) koristi se MP-MLQ (*MultiPulse Maximum Likelihood Quantization*) metoda za generiranje pobude. Ostatak kodeka je zajednički za obje izvedbe. Na odredište se šalju parametri koji se odnose na

koeficijente LP filtra, i na indekse fiksnog i adaptivnog rječnika. Generiraju se pobude koje se potom skupljaju, a skupna pobuda se propušta prvo kroz *pitch* postfiltar koji služi za podizanje kvalitete govornog signala koji se sintetizira i to tako što povećava odnos signal/šum na mjestima koja predstavljaju umnožak perioda *pitch*-a. Zatim se signal propušta kroz LP filtar. Izlaz se potom vodi na pojačivač i na postfiltar. Postfiltar kontrolira razinu pojačivača da bi se izbjeglo sintetiziranje ravnog, monotonog govora. Izlaz pojačivača predstavlja konačno sintetizirani govorni signal, [2].

U aneksu A G.723.1 preporuke, [2] je definiran i rad sa detektorom aktivnosti govora (*Voice Activity Detector* - VAD) i generatorom umjetnog šuma (*Comfort Noise Generator* - CNG). Govornik prilikom stvaranja govornog signala stvara i pauze u govoru, koje se nazivaju intervali tišine. S obzirom da se govorni signal predstavlja u obliku parametara koji ga opisuju, bilo bi poželjno kada se ne bi kodirali govorni signali tijekom intervala tišine, ili kad bi se bar kodirali u manjoj mjeri. S druge strane, ako se ne bi sintetiziralo ništa na strani slušatelja za vrijeme tih intervala tišine govornika, to bi izazvalo loš subjektivan osjećaj kod slušatelja jer se u tom slučaju kod slušatelja pojavljuje osjećaj prekida komunikacije. Stoga je potrebno proizvesti svojevrstan šum na strani slušatelja za vrijeme intervala tišine, ali ne bilo kakav šum, već onaj koji odgovara zvukovima okoline govornika (tzv. ambijentalni šum). Ukoliko bi se stvarao drugačiji šum, to ne bi bilo ugodno slušatelju jer bi primijetio takve razlike i one bi stvarale neugodu.

VAD se koristi na strani govornika za detekciju aktivnosti govornika, tj. intervala tišine. Kada VAD detektira interval tišine on šalje kodiranu informaciju zvuka okoline, tj. ambijentalnog šuma. U sljedećem trajanju intervala tišine VAD će periodično slati parametre ambijentalnog šuma iz razloga da suprotna strana zna da je konekcija u redu. U slučaju značajne promjene u parametrima ambijentalnog šuma poslat će se automatski novi parametri ambijentalnog šuma. Na ovaj način je u intervalima tišine smanjen protok kodiranog govornog signala, tj. njegovih parametara.

Ono što je bitno u radu VAD detektora je da VAD detektor mora pouzdano detektirati intervale tišine, čak i u uvjetima kada govorni signal nije jači od ambijentalnog šuma. Kada prijemnik (dekoder) primi kodirane parametre ambijentalnog šuma, on zna da je trenutno u tijeku interval tišine i da treba proizvesti ambijentalni šum. Tijekom sintetiziranja ambijentalnog šuma na LP filtar se povezuje izlaz CNG generatora koji na osnovu primljenih parametara generira pobudu za LP filtar radi sintentiziranja ambijentalnog šuma slušatelju.

Postfiltriranje izlaza LP filtra se preskače za vrijeme rada CNG generatora jer se sintetizira ambijentalni šum, a ne govorni signal kome je namijenjeno postfiltriranje.

Parametri ambijentalnog šuma podrazumijevaju parametre energije pobude (snage ambijentalnog šuma) koji su neophodni za rad CNG generatora, kao i koeficijente LP filtra, odnosno parametri ambijentalnog šuma trebaju što bolje opisati karakteristike ambijentalnog šuma. Detalji vezani za VAD i CNG u slučaju G.723.1 kodeka se mogu naći u aneksu A preporuke G.723.1, [2].

3.2. KVALITETA USLUGE

Kvaliteta usluge (*Qualitty of Service* - QoS) je jedan od najvažnijih faktora bilo kojeg područja telekomunikacija, a u slučaju VoIP-a odnosi se na različite pojave koje nastaju za vrijeme komunikacije. U većini slučajeva kvaliteta ovisi o vrsti mreže koja se koristi (samim time i kvaliteti te mreže), propusnosti i dostupnosti mreže, a ponajprije o odabiru kodeka. Ukoliko korisnik odabere kodeke koji zahtijevaju veću propusnost, dobiva veću kvalitetu (podrazumijeva se da mreža koja se koristi može udovoljiti zahtjevima kodeka).

VoIP, kao i sve stvarno vremenske (*real-time*) usluge, zahtjeva određenu propusnost i osjetljiv je na kašnjenja koja se javljaju na različitim točkama komunikacije. Uz to, potrebno je uzeti u obzir i dostupnost usluge, koja se definira kao mogućnost korištenja usluge u bilo koje vrijeme, to jest, korisnik u bilo koje doba dana mora imati uslugu dostupnu onog trenutka kad mu je to potrebno.

Protok ponajprije definira odabir kodeka. Kako je već navedeno, različiti kodeci zahtijevaju određenu propusnost jer informaciju opisuju s određenim brojem bitova, pa korisnik koji odabere kodek koji zahtijeva malu propusnost dobiva i manju kvalitetu usluge. To ne mora uvijek biti loša strana VoIP-a, iz razloga što malo lošiju kvalitetu usluge (a opet dovoljnu za razumljivu komunikaciju) korisnici mogu birati ako mreža koju koriste ne može udovoljiti zahtjevima kodeka koji zahtijevaju veću propusnost. Najbolju kvalitetu korisnici mogu dobiti korištenjem kodeka čiji su zahtjevi manji od prijenosnih kapaciteta mreže, kako bi se izbjegla kašnjenja, [7].

Kašnjenje (*delay*) predstavlja vrijeme potrebno za prolazak paketa mrežom od izvorišta do odredišta. Faktori koji utječu na kašnjenje su: vrijeme procesiranja, vrijeme transmisije, vrijeme propagacije i vrijeme prosljeđivanja paketa, [7].

Vrijeme procesiranja je vrijeme potrebno mreži (svim dijelovima mreže uključenim u prijenos) da procesiraju IP pakete, a ovisi ponajprije o procesnoj snazi elemenata uključenih u prijenos (tj. njihovoj brzini), no kašnjenje procesiranja je toliko kratko da se najčešće zanemaruje, [7].

Vrijeme transmisije ovisno je o veličini paketa i brzini prijenosnog linka, tj. ovisi o prijenosnom kapacitetu linka, a izražava se kao omjer veličine paketa i brzine linka, [7].

Vrijeme propagacije je vrijeme koje je potrebno da se signal prenese od jedne točke mreže do druge. Ovo kašnjenje ovisi direktno o vrsti medija i njegovoj brzini prijenosa i udaljenosti točaka mreže, [7].

Vrijeme prosljeđivanja paketa je vrijeme koje IP paketi provedu u redovima čekanja na ulazu i izlazu iz mrežnih komponenti. Različito stanje mreže i njeno opterećenje mijenjaju trajanje ovog kašnjenja, pa se u slučajevima zagušenja kašnjenja prosljeđivanja paketa znatno povećavaju. Čekanje na prosljeđivanje paketa ne smije biti van predviđenih vremenskih okvira, jer paketi koji ne stignu na vrijeme biti će izgubljeni i samim time utjecati na kvalitetu prijenosa i usluge, [7].

Uz navedena kašnjenja, s obzirnom da je komunikacija VoIP-a zapravo razmjena govornih paketa, javlja se i kolebanje kašnjenja (*jitter*). Kolebanje kašnjenja predstavlja razliku kašnjenja različitih paketa iste sesije, a time uzrokuje prekide u razgovoru i ponekad potpuno nerazumljivu komunikaciju. Da bi se to spriječilo koriste se memorijski međuspremnici (*dejitter bufferi*). Cilj *buffera* je zadržavanje dva do četiri paketa (što povećava kašnjenje), ali time se korisniku stvara dojam neprekinute komunikacije jer nema prekida, već samo dodatno kašnjenje, [7].

4. KORIŠTENI PROTOKOLI TRANSPORTNOG, MREŽNOG I PODATKOVNOG SLOJA

U VoIP-u, govorni uzorci s telefonskog sučelja komprimirani su pomoću kodeka za kompresiju, kao što su G.711, G.729A, G.723.1 i G.722 te su oblikovani kao okviri. Veličina *payloada* govora varira s obzirom na upotrijebljeni kodek za kompresiju, opcije koje određuju brzinu kompresije i trajanje *payloada*. Za G.729A, okvir je 10 ms, a za G.723.1 osnovni okvir je 30 ms. Govor može koristiti grupu komprimiranih okvira čak do 80 ms.

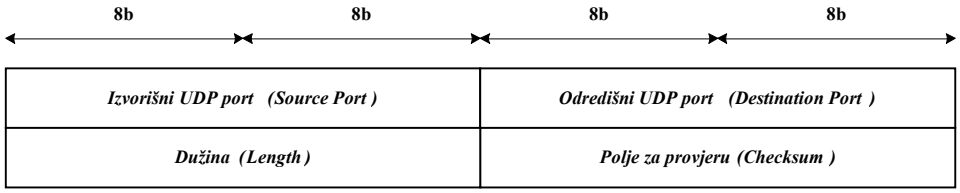
Podaci se prvo enkapsuliraju u transportnom sloju i dodaje im se zaglavlje transportnog sloja, te zajedno čine segment. Segment se zatim spušta do mrežnog sloja i dobiva zaglavlje mrežnog sloja, koji zajedno sa segmentom čini paket. Paket se potom šalje prema podatkovnom sloju gdje prima zaglavlje podatkovnog sloja i zajedno s paketom čini okvir. U fizičkom sloju ne dodaje se zaglavlje na okvir već je zadaća fizičkog sloja konvertiranje podataka u oblik pogodan za slanje. Kada stignu na odredište obavlja se obrnuti postupak, tj. deenkapsulacija. Uz to, na odredištu je *dejitter buffer*, koji služi za otklanjanje *jittera*, prije dekompresije u dekoderu.

RTP (*Real-Time Protocol*) Control protokol (RTCP), RTCP – Extended Report (XR) paketi obično mijenjaju parametre prijenosa i statistike *end-to-end* govornih paketa. Pri stvarnoj implementaciji, govorni *payload*, RTP, *dejitter buffer*, RTCP, sustavi nadzora kvalitete zvuka, mehanizmi kvalitete usluge i parametri propusnosti rade koordinirano kako bi se osigurala bolja kvaliteta dostave paketa. Na samom sloju podatkovne veze koriste se 802.3 Ethernet, PPP (*Point-to-Point Protocol*), *Frame Relay* ili neke od inačica ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) prijenosa, [8].

4.1. User Datagram Protocol (UDP)

UDP protokol je bezkonekcijski protokol (*ConnectionLess* - CL) transportnog sloja, što podrazumijeva da postoji samo faza razmjene podataka (nema uspostave i raskida veze). UDP protokol radi na principu najboljeg pokušaja (*best effort*) i ne garantira isporuku podataka, pa je na aplikacijskom sloju da implementira podršku za pouzdan prijenos ukoliko je to neophodno. Ovaj protokol razvijen je za aplikacije koje ne zahtijevaju pouzdan prijenos i prije svega su transakcijski orijentirane u smislu da se svaki UDP paket gleda kao jedna transakcija. Upravo zbog nedostatka mehanizma retransmisije za postizanje pouzdanosti, ali i

mehanizma kontrole toka i zagušenja, UDP protokol je idealno rješenje i za audio/video podatke, a time i za *streaming* aplikacije, [9].



Slika 4. UDP zaglavlje, [9]

Zaglavlje UDP paketa je prikazano na slici 4, kao što se može vidjeti vrlo je jednostavne strukture. UDP zaglavlje se sastoji iz sljedećih dijelova:

- Izvorišni UDP port (*Source Port*) - Šesnaestobitna identifikacija UDP porta predajne strane (koja je formirala UDP zaglavlje, tj. UDP paket).
- Odredišni UDP port (*Destination Port*) - Šesnaestobitna identifikacija UDP porta prijemne strane (koja prima UDP zaglavlje, tj. UDP paket).
- Dužina (*Length*) - Dužina UDP paketa u bajtovima. Pod UDP paketom se podrazumijevaju UDP zaglavlje i korisnički podaci koji se stavljaju u UDP korisni (*Data*) dio.
- Polje za provjeru (*Checksum*) - Ovo šesnaestobitno polje se koristi za detekciju bitskih grešaka u prijenosu. Ako se polje za provjeru ne koristi tada se popunjava sa svim nulama čime se signalizira prijemnoj strani da se polje za provjeru ne koristi, [9].

4.2. Real-Time Protocol (RTP)

RTP je protokol za prijenos stvarno vremenskih informacija, koji se koristi pri govornim, audio i video sadržajima te se primjenjuje kod drugih stvarno vremenskih usluga. RTP nosi podatkovni dio i stvarno vremenske parametre. Uz to, RTP parametri također služe za podešavanje *dejitter buffera* u VoIP aplikacijama.

S obzirom da je govor osjetljiv na kašnjenje, RTP omogućuje pravilnu *end-to-end* dostavu stvarno vremenskog govornog prometa. Kompresija RTP zaglavlja smanjuje broj bajtova. Prvih 12 okteta do izvora sinkronizacije (*Synchronization Source* - SSRC) prisutno je u svakom RTP paketu, dok je lista identifikatora doprinosećih izvora (*Contributing Source* - CSRC) prisutna samo kada se umetne RTP *mixerom* (služi za resinkronizaciju paketa, ukoliko je to potrebno). Ispod su prikazani detalji RTP header parametara, [10]:

- V = RTP verzija (2 bita)

- P = *padding* bit (1 bit), postavljanje ovog bita naznačuje više *padding* bajtova pri kraju RTP paketa

- X = bit ekstenzije zaglavlja (1 bit), ako se on postavi, fixed header bit će popraćen jednim produženim zaglavljem. Korisno je za shemu redundancije.

- CC = broj CSRC polja u headeru (4 bita) koja slijede fixed header. To služi 0 do 15 CSRC identifikatorima.

- M = marker bit (1 bit), omogućuje, primjerice, markiranje granica frameova u paketnom *streamu*.

- PT = *payload* tip (7 bitova) naznačuje nekoliko *payload* tipova, uključujući PT za govorne kodeke, paketne tipove detektora govorne aktivnosti, te RFC2833 i faks, [10].

Sekvencijski broj (16 bitni) započinje nasumičnom vrijednošću odabranom u vrijeme razgovora koja pomaže u popravljanju sekvencijskog slijeda paketa na odredištu. Adaptivni *dejitter buffer* (*Adaptive Jitter Buffer* - AJB) i algoritmi za prikrivanje gubitka paketa (*Packet Loss Concealment* - PLC) također koriste informacije sekvencijskih brojeva kako bi pakete složili u pravilan redoslijed i poslali ih dekoderu, [10].

Vremenska oznaka (time stamp – 32 bita) je instantni uzorak prvog okteta *payloada*. Vremenska se oznaka povećava trajanjem *payloada*. Ta je informacija korisna na odredištu za izvlačenje okvira iz velikih paketa te za izračunavanje jittera kod AJB-a, [10].

Izvor sinkronizacije (SSRC) = 32 bita; područje SSRC-a identificira izvor sinkronizacije. Taj se identifikator odabire nasumično, s namjerom da se ne dogodi da dva izvora sinkronizacije unutar iste RTP sesije imaju isti SSRC identifikator, [10].

CSRC lista sadrži od 0 do 15 stavki s 32 bita za svaki izvor. CSRC lista identificira izvore koji doprinose *payloadu* sadržanom u ovom paketu. Područje CC-a određuje broj identifikatora. U slučaju da takvih izvora koji doprinose ima više od 15, samo će ih 15 biti identificirano. *Mixeri* koji koriste SSRC identifikatore doprinosećih izvora (ako RTP sadrži podatke s više izvora) umeću CSRC identifikatore. U uobičajenom end-to-end govornom pozivu CSRC nije prisutan, [10].

RTP je obavezan za VoIP govorne pakete, a njegovi parametri korisni su kod izvođenja nekoliko stvarno vremenskih parametara i osiguravanja pravilne reprodukcije paketa dok prolaze kroz *dejitter buffer*. Ovaj protokol zajedno s RTCP protokolom spaja mrežni i transportni sloj, [10].

4.3. Real-Time Control Protocol (RTCP)

RTCP se koristi za *end-to-end* prijenos podatkovnih *streamova* u RTP sesiju. Statistike poput kašnjenja, *jittera*, broja poslanih paketa i broja izgubljenih paketa omogućuju sudionicima sesije kontrolu kvalitete veze. Uz to, RTCP omogućuje funkcije ograničene kontrole poput BYE paketa za kontrolu statusa sesije. RTCP i RTP paketi odašilju se s različitih mjesta. RTCP paketi razmjenjuju se između krajnjih točaka u periodičnom obliku. RTCP paketi poslani su na manje od 5% RTP paketa. *Packet-to-packet* parametri izvode se samo s RTP-a. RTCP se sastoji od pet paketnih tipova:

1. Sender Report (SR) – prenosi statistike aktivnog RTP pošiljatelja.
2. Reciever Report (RR) – prenosi statistike RTP primatelja.
3. Source Description (SDES) – Opisuje izvor neovisno o tome je li riječ o pošiljatelju ili primatelju.
4. BYE – Koristi se za poklapanje u sesiji, odnosno indicira prekid sudjelovanja.
5. APP – Application-specific paket za eksperimentalnu upotrebu, [10].

RTCP paketi su složeni paketi sastavljeni od nekoliko iznad navedenih paketnih tipova. Složeni paket uvijek započinje izvještajem pošiljatelja ili primatelja, popraćenim drugim paketnim tipovima. U slučaju da se koristi BYE paket, on uvijek dolazi posljednji. RTCP zaglavlje je duljine 16 bitova, a sastoji se od sljedećih dijelova:

V = RTCP verzija (2 bita),

P = padding bit (1 bit),

RC = Reception Report Count- broj izvještaja u tom paketu (5 bitova),

PT = RTCP paketni tip (8 bitova),

Lenght = duljina (16 bitova), [10].

4.4. Real-Time Streaming Protocol (RTSP)

RTSP je protokol aplikacijskoj sloja namijenjen kontroli dostave podataka sa *real-time* svojstvima kao što su audio i video. Izvori podataka mogu biti dobavljani u realnom vremenu ili mogu biti pohranjeni isječci.

Ovaj protokol ostvaruje i kontrolira jedan ili više vremenski sinkroniziranih tokova kontinuiranih podataka kao što su u ovom slučaju audio podaci, a uz to RTSP ne zahtijeva konekciju. Server održava sesiju koja nije nikako ovisna o vezama prijenosnih slojeva kao što je na primjer TCP veza. Klijent zato može koristiti i bezkonekcijske protokole kao na primjer UDP. Tokovi podataka kontrolirani od strane RTSP-a mogu koristiti RTP, ali funkcije koje

obavlja RTSP ne ovise o transportnom mehanizmu koji se koristi za prijenos podataka. Sam RTSP protokol je dosta sličan HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) protokolu ali ima i nekih razlika:

1. RTSP server mora pamtiti stanje za razliku od HTTP servera
2. i RTSP klijent i RTSP server mogu dati zahtjev za podacima.

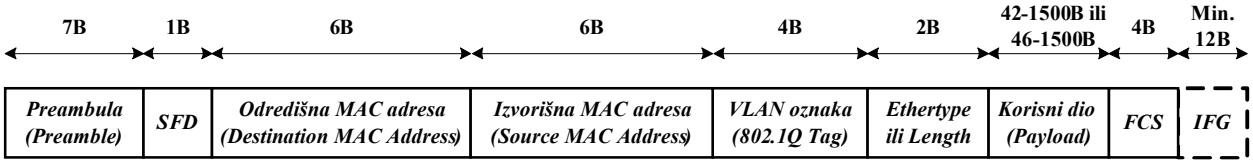
RTSP se isto tako dosta ispreplići sa HTTP protokolom tako da se RTSP serveru može bez problema pristupati preko nekih web stranica, [11].

Protokol podržava sljedeće funkcije:

1. Dohvat podataka sa servera – klijent može zatražiti opis prezentacije preko HTTP protokola ili nekom drugom metodom. Ako je prezentacija multicast tada njen opis sadrži adresu i port koji se koristi za prijenos podataka. Ako bi prezentacija trebala biti unicast tada klijent određuje adresu na koju će se slati podaci zbog sigurnosnih razloga.
2. Pozivanje servera da se pridruži konferenciji – server može biti pozvan da se pridruži postojećoj konferenciji ili da bi on slao podatke ili da bi ih snimao .
3. Dodavanje novih medija postojećoj prezentaciji – korisno je ako server može obavijestiti klijenta da su dodatni materijali postali raspoloživi, [11].

4.5. Ethernet

Ethernet je dominantna tehnologija u ostvarivanju LAN komunikacije. Za VoIP nije toliko bitan način rada Ethernet mreže, već je bitna sama struktura Ethernet okvira. Struktura Ethernet okvira je prikazana na slici 5:



Slika 5. Ethernet okvir, [11]

Ethernet okvir se sastoji od sljedećih djelova:

-Preambula (*Preamble*) i SFD (*Start Frame Delimiter*) - Preambula se sastoji od 7 bajtova vrijednosti 10101010, a SFD od jednog bajta vrijednosti 10101011 (pri tome se prvo prenose niži bitovi u bajtu tj. koristi se *little endian* princip). Preambula i SFD se koriste za detekciju početka okvira.

-Odredišna MAC adresa (*Destination MAC Address*) - Odredišna MAC adresa hosta kojem je okvir namijenjen. MAC adrese su dužine 48 bita, tj. 6 bajtova. Važno je napomenuti da su MAC adrese jedinstvene na globalnoj razini i da se koristi princip ravnog (*flat*) adresiranja u Ethernet LAN mrežama. Na osnovi odredišne MAC adrese okviri se prosljeđuju u Ethernet preklopnika po stablu LAN mreže kreiranim STA (*Spanning Tree Algorithm*) algoritmom.

- Izvorišna MAC adresa (*Source MAC Address*) - Izvorišna MAC adresa hosta koji je kreirao okvir.

- VLAN oznaka (*802.1Q Tag*) - Ovo polje je dužine 4 bajta i definira VLAN (*Virtual Local Area Network*) mrežu kojoj gledani okvir pripada. Ovo polje je opcionalno, tj. koristi se samo u slučaju da je konfigurirana upotreba VLAN mreže. Viših 16 bitova ima heksadecimalnu vrijednost 8100 čime se identificira da okvir sadrži VLAN oznaku. Nižih 16 bitova se sastoji od 3-bitnog polja PCP (*Priority Code Point*) koji definira prioritet okvira u posluživanju (veća vrijednost označava viši prioritet).

- Tip korisnog sadržaja (*Ethertype*) ili dužina korisnog dijela (*Length*) - Tumačenje ovog polja dužine dva bajta ovisi o vrsti Ethernet okvira. U slučaju da se koristi Ethernet II format tada se ovo polje tumači kao vrsta enkapsuliranog sadržaja u korisnom dijelu okvira (*Ethertype*), dok u slučaju da se koristi 802.3 format okvira tada se ovo polje tumači kao dužina korisnog dijela u bajtovima (*Length*).

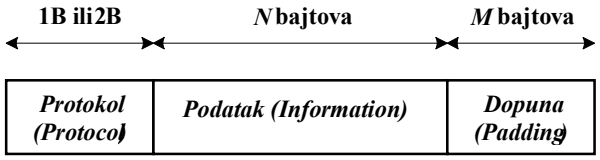
- Korisni sadržaj (*Payload*) – Ovo polje sadrži enkapsulirani sadržaj iz protokola koji koristi Ethernet okvire za prijenos svog sadržaja. Dužina ovog polja se kreće u granicama od 46-1500 bajtova ako se ne koristi VLAN oznaka, odnosno 42-1500 ako se koristi VLAN oznaka. Ethernet preklopnici mogu se konfigurirati i za rad sa tzv. *jumbo* okvirima, koji tada omogućavaju prijenos korisnog sadržaja većeg od 1500 bajtova, koji predstavlja limit u slučaju normalnih Ethernet okvira.

- Polje za provjeru (*Frame Check Sequence* - FCS) – 32-bitno polje za provjeru ispravnosti. Koristi se CRC-32 provjera, a pri tome se štiti cjelokupan Ethernet okvir bez preambule i SFD bajta (IFG nije dio okvira).

- IFG (*InterFrame Gap*) – Ovo polje nije dio Ethernet okvira, već predstavlja obavezni razmak između susjednih okvira. Minimalna dužina ovog razmaka je 12 bajtova, [12].

4.6. Point-to-Point Protocol (PPP)

PPP protokol se koristi za ostvarivanje veze na linku između susjednih čvorova i definiran je u RFC 1661, [12]. Ovaj protokol omogućava ostvarenje simultanog prijenosa paketa za više mrežnih protokola preko istog linka, tj. da se paketi različitih mrežnih protokola simultano šalju preko PPP okvira, a to podrazumijeva upotrebu LCP (*Link Control Protocol*) i NCP (*Network Control Protocol*) protokola. LCP protokol se koristi za uspostavu, konfiguriranje i testiranje PPP veze na sloju podatkovne veze, dok NCP protokol predstavlja skup protokola koji se definiraju za mrežne protokole i koji se koriste za uspostavu i konfiguriranje mrežnih protokola za rad s PPP protokolom (odnosno za korištenje usluga PPP protokola za prijenos paketa mrežnih protokola). Najčešće se PPP protokol koristi i za povezivanje mrežnih uređaja preko linka koji ih spaja, a uz to omogućava i upotrebu autentifikacije, enkripcije i kompresije, što je u značajnoj mjeri doprinijelo njegovom sve većem korištenju, [12].



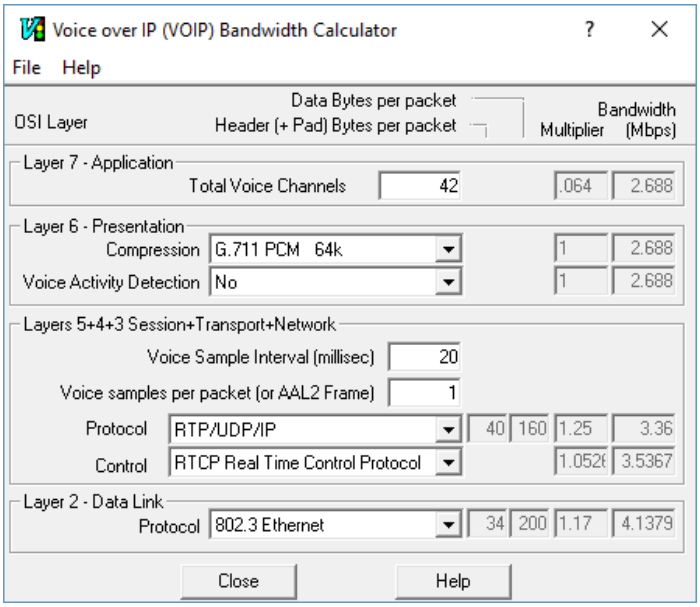
Slika 6. PPP enkapsulacija, [12]

PPP protokol enkapsulira koristan sadržaj na jednostavan način prikazan na slici 6. Ispred podatka (polje podatak) se stavlja informacija o protokolu (polje protokol) koji je formirao podatak. Na kraju se može dodati i dopuna (polje dopuna), ukoliko je ona neophodna. Polje protokol je dužine 1 ili 2 bajta. Na primjer, heksadecimalna vrijednost C021 odgovara LCP protokolu, a 8021 odgovara IPCP protokolu. Po unaprijed definiranim vrijednostima protokol je uvijek dužine 2 bajta, osim ako se prilikom konfiguriranja PPP veze (upotrebom LCP protokola) ne dozvoli da ovo polje bude dužine 1 bajt. Podatak (računajući i dopunu) ima maksimalnu dužinu koja se definira kao MRU (*Maximum Receive Unit*) parametar PPP veze. Unaprijed definiran MRU je duljine 1500 bajtova, ali može se promijeniti tijekom konfiguriranja PPP veze, [12].

5. ANALIZA KAPACITETA PRIJENOSNOG LINKA

Različiti kodeci zahtijevaju različitu propusnost, sukladno tome razina kvalitete usluge raste sa zahtjevima kodeka. Protokoli koji se koriste utječu na krajnju kvalitetu usluge, ne u tolikoj mjeri poput kodeka, ali nisu zanemarivi. Kroz sljedeći primjer prikazat će se utjecaj odabira kodeka, protokola i različitih mogućnosti koje nudi VoIP. Klasična telefonska mreža ne nudi mogućnosti korisnicima da sami biraju kvalitetu usluge, u većini slučajeva kvaliteta usluge određena je samom kvalitetom infrastrukture, dok VoIP nudi veliku količinu varijabilnih komponenata koje utječu na zahtjeve koje stavljaju pred mrežu na način da korisnik može definirati razinu usluge na temelju svojih zahtijeva za uslugom kakva je njemu potrebna.

Za ovaj primjer korištena je aplikacija VoIP Bandwith Calculator u svrhu izračunavanja potrebnih kapaciteta, tj. prijenosnog pojasa koji je potreban za željenu vrstu VoIP usluge. Aplikacija ima jednostavno sučelje, prikazano na slici 7, gdje se unose podaci i biraju protokoli te se time mijenjaju ostali parametri koji se odnose na prijenos.



Slika 7. Prikaz sučelja aplikacije

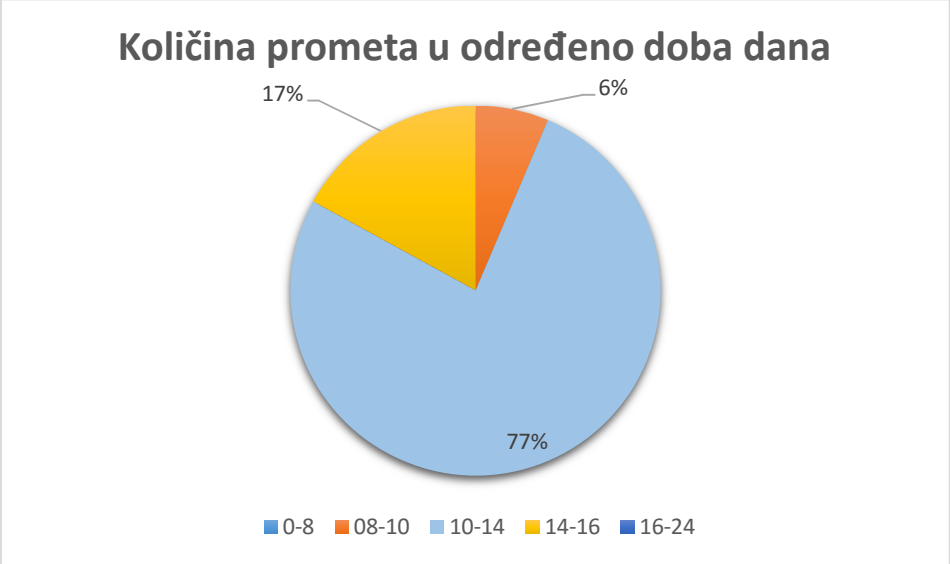
U aplikaciji je prvo potrebno unijeti broj govornih kanala, nakon toga potrebno je odabrati željeni kodek (samim time utječe se na kvalitetu usluge), uz biranje kodeka nudi se mogućnost korištenja VAD-a (detekcije tišine). Kako bi se željeni primjer mogao dodatno oblikovati unosi se željeni interval govornog uzorka (*Voice Sample Interval*) i broj uzoraka po paketu. Zatim se nudi mogućnost biranja protokola za prijenos i kontrolnog protokola, a uz to i protokola veze podataka. Na desnoj strani sučelja prikazana je potrebna širina prijenosnog pojasa s obzirom na unesene podatke.

Za primjer je uzeta neka tvrtka koja ima 60 zaposlenika koji zajedno ostvaruju određeni broj poziva tijekom dana i trajanje tih poziva se mijenja prema dobu dana, a vjerojatnost blokiranja poziva (Pb) ne smije prelaziti 0,01. Pozivi po satu su vrijednosti za jedan sat s najvećim opterećenjem koji se nalazi u naznačenom vremenskom intervalu (tablica 1.). Promet u erlanzima je produkt broja poziva (λ) i prosječnog vremena zauzimanja resursa (Ts) podijeljen sa 60, [13].

Tablica 1. – Promet koji generiraju korisnici u određeno doba dana

	Period dana	0-8	08-10	10-14	14-16	16-24
60 korisnika	λ [poz/h]	0	100	600	200	0
	Ts [min]	0	1,5	3	2	0
	Promet [Erl]	0	2,5	30	6,67	0

Iz tablice 1 se vide sljedeći podaci: tvrtka ima 60 korisnika koji u određenim periodima dana generiraju različitu količinu prometa, a u razdoblju od 10 do 14 sati generiraju najveći promet pa se u tom intervalu uzima glavni prometni sat (GPS). Vrijednosti navedene u tablici se odnose na jedan sat s najvećim opterećenjem. Promet koji se odvija za vrijeme GPS-a je najveći te je kapacitet potreban za to razdoblje dovoljan i u ostale periode dana. Za period od 10 do 14 sati korisnici generiraju 600 poziva u intervalu od jednog sata sa prosječnim trajanjem poziva od 3 minute. Maksimalni promet koji ostvaruju u tom intervalu je 30 Erlanga te se ta vrijednost uzima u daljnjem izračunu.



Slika 8. Grafički prikaz postotka prometa u jednom danu

Tablicom 1 prikazan je najveći promet generiran u jednom satu pojedinog intervala. Vidljivo je da od tri karakteristična sata, u intervalu od 10-14 sati postoji GPS u kojemu je napravljeno 30 Erlanga prometa, što zauzima 77% ukupnog prometa (prikazano slikom 8) tih karakterističnih satnih opterećenja.

Da bi se izračunao potreban broj kanala za GPS korišten je online Erlang B Calculator. Prema tome, za 60 korisnika koji u GPS-u generiraju 30 Erlanga prometa uz uvjet da vjerojatnost odbijanja poziva ne smije prelaziti vrijednost veću od 0,01, potreban broj kanala iznosi 42.

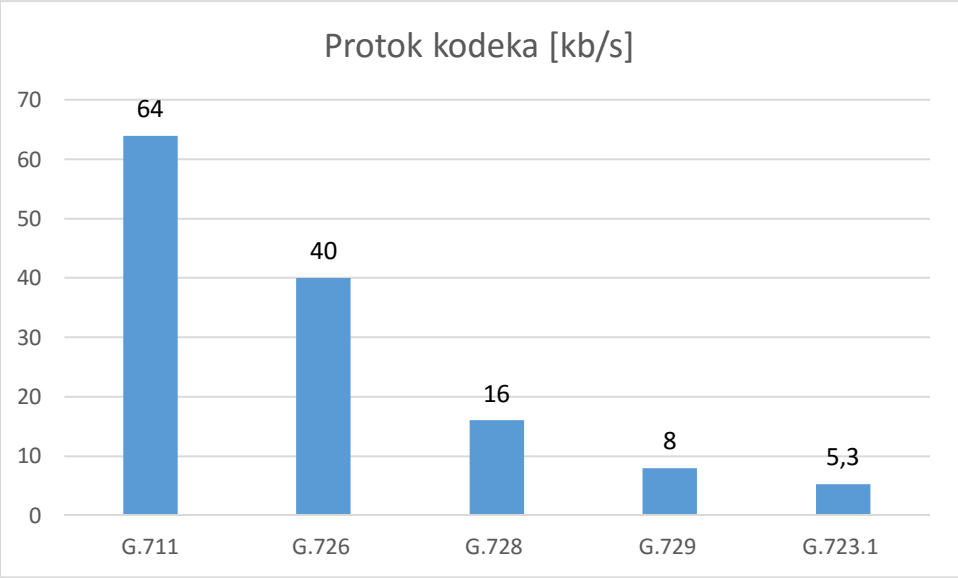
Na primjeru ove tvrtke korišteni su kodeci: G.711, G.726, G.728, G.729 i G.723.1, u slučaju kada se koristi VAD (detekcija tišine) i kada se ne koristi. Interval govornih uzoraka se mijenja s obzirom na korištene protokole, dok je za broj govornih uzoraka po paketu uvijek korištena vrijednost 1.

Vrijednosti korištene za intervale govornih uzoraka su sljedeće:

-za kodeke G.711, G.726 i G.729 iznosi 20 [ms]

-za kodeke G.728 i G.723.1 iznosi 30 [ms].

U slučaju protokola aplikacijskog, transportnog i mrežnog sloja, za sve primjere korištena je kombinacija protokola RTP/UDP/IP uz kontrolni protkol RTCP. Na sloju podatkovne veze korišteni su protokoli 802.3 Ethernet i PPP protokol.

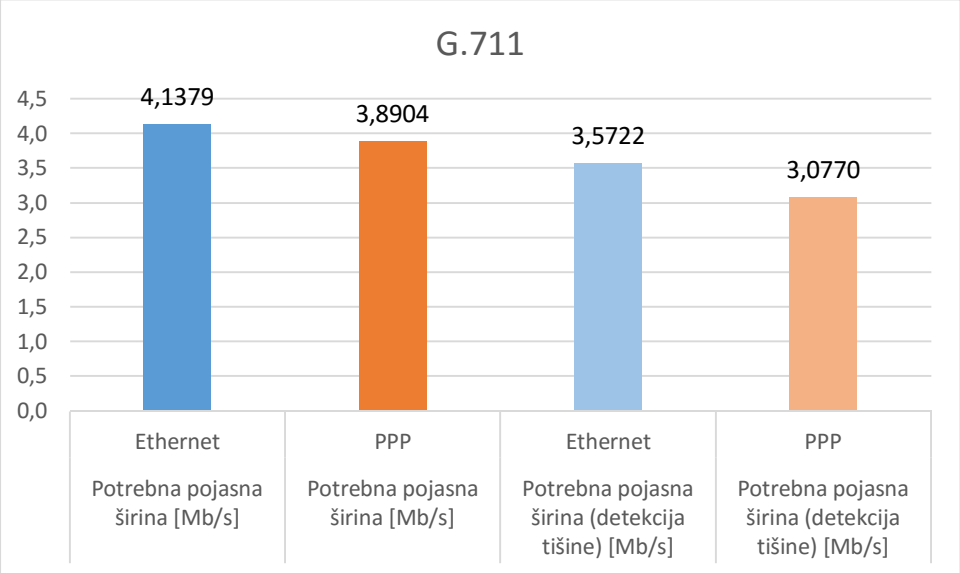


Slika 9. Prikaz protoka kodeka korištenih u analizi

Različiti kodeci zahtijevaju različiti protok da bi se mogli iskoristiti potpuno i tako pružiti odgovarajuću kvalitetu usluge. Iz slike 9 se vidi da kodek G.711 ima najveći zahtijevani protok (samim time i nudi najveću kvalitetu usluge), a to će se kasnije vidjeti kroz analizu. Kodek G.711 je jedan od najkorištenijih kodeka zbog svojih karakteristika, no

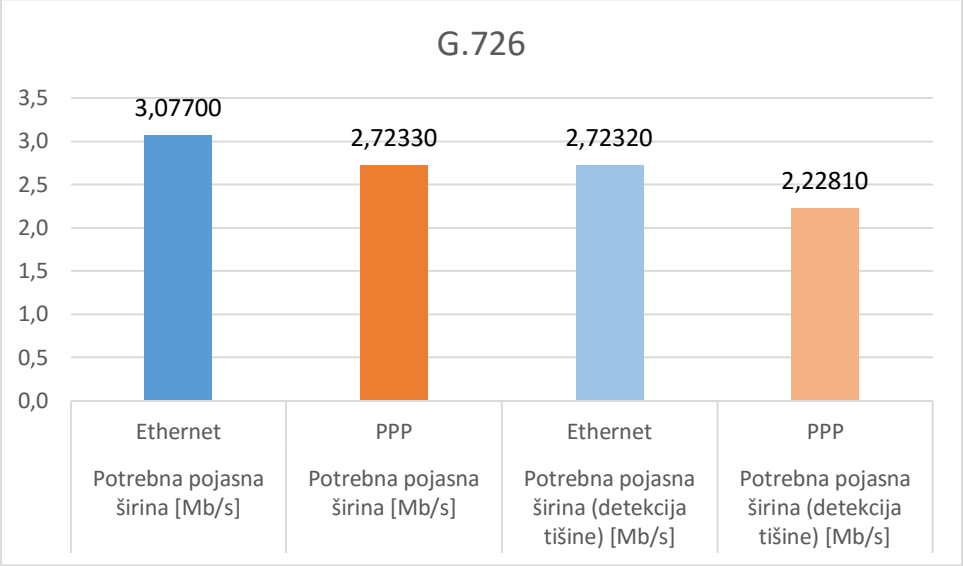
zahtjevi koje je potrebno ostvariti se mijenjaju s obzirom na protokole različitih razina koji se mogu koristiti. Kodek G.726 spada u sredinu s obzirom na zahtjeve i kvalitetu, dok ostali kodeci imaju relativno male zahtjeve za mrežnim kapacitetima, ali samim time nude nižu razinu kvalitete.

Tijekom analize kodeka napravljeni su sljedeći scenariji: u svakom se koristi isti broj govornih kanala (42), svaki kodek se promatra sa detekcijom tišine i bez korištenjem Etherneta i PPP-a. Kao što je već prethodno navedeno, detekcija tišine utječe na potrebne prijenosne kapacitete na način da se zahtjevi za potrebnom propusnošću smanjuju. No, gledano sa strane korisnika, detekcija tišine donosi „prazne“ dijelove razgovora ukoliko oba korisnika prestanu pričati, dok s mrežne strane donosi uštede na prijenosu, jer se u razdoblju razgovora dok ni jedan korisnik ne priča samo ubaci tišina, a po početku ponovnog pričanja se nastavlja s prijenosom govora.



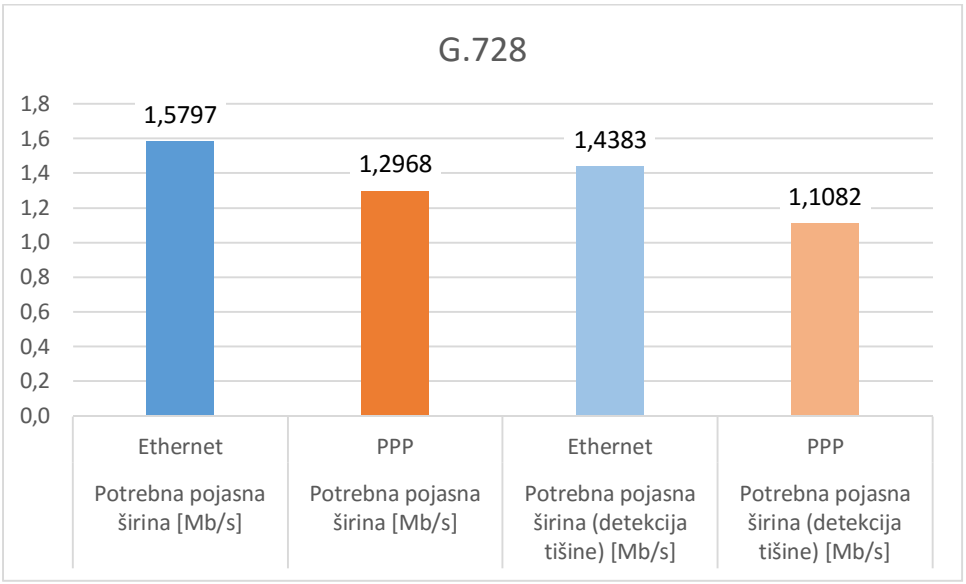
Slika 10. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.711

Promatrajući kodek G.711, sa slike 10 se vidi gotovo linearan pad zahtijeva kodeka za prijenosnim kapacitetima, no ako se uzme u obzir npr. Ethernet i PPP s detekcijom tišine tada je razlika u zahtjevima kodeka značajna i može se reći da se kodek G.711 može prilagoditi na različitim mrežama, ako se dodatno izmjene neke karakteristike.



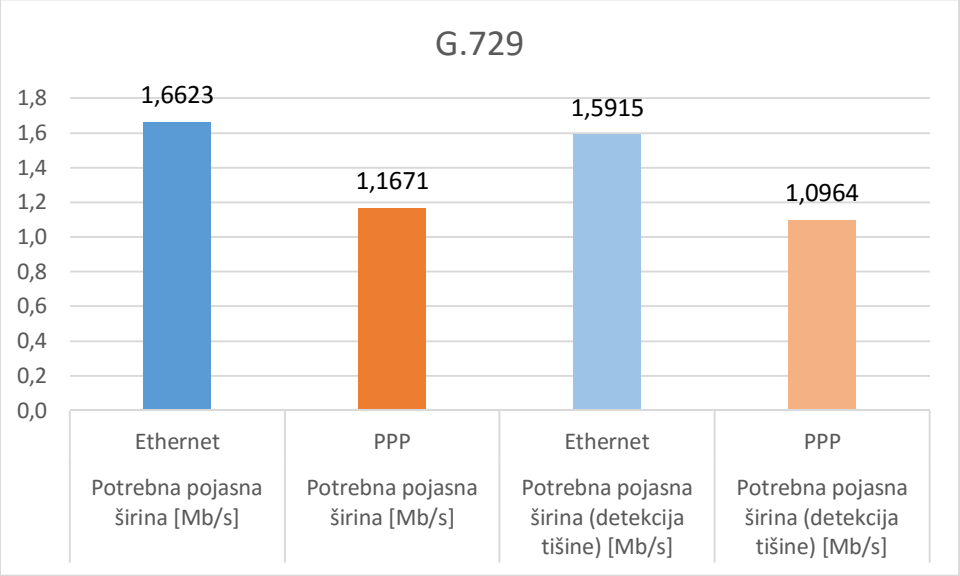
Slika 11. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.726

Kod kodeka G.726, kao što je prikazano na slici 11, razlika u potrebnim prijenosnim kapacitetima je relativno slična kodeku G.711 gdje se vide značajne razlike ukoliko se koristi detekcija tišine, no ako se promatra korištenje Etherneta na sloju podatkovne veze tada je razlika nešto manja nego kod PPP-a. Zanimljivo je primijetiti da u ovom slučaju ako se koristi PPP bez detekcije tišine ili Ethernet sa detekcijom tišine, zahtjevi od strane kodeka su gotovo identični.



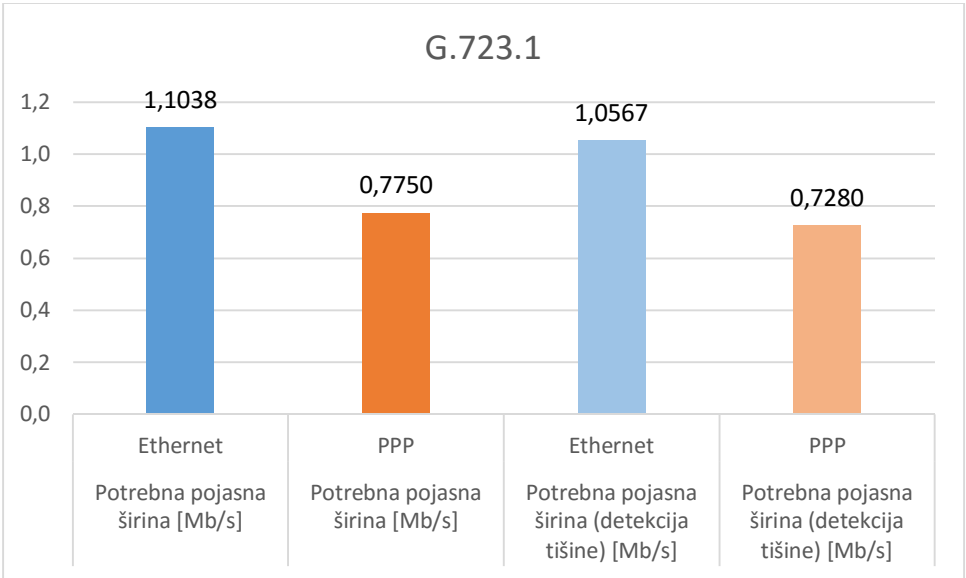
Slika 12. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.728

Kod promatranja kodeka G.728 u usporedbi s prethodnim kodecima jasno je vidljiva velika razlika u potrebnim prijenosnim kapacitetima, prikazano na slici 12, što je utjecaj smanjenog potrebnog protoka koji zahtijeva ovaj kodek, no iz grafičkog prikaza se vidi utjecaj korištenja PPP protokola koja značajno smanjuje zahtijevane kapacitete.



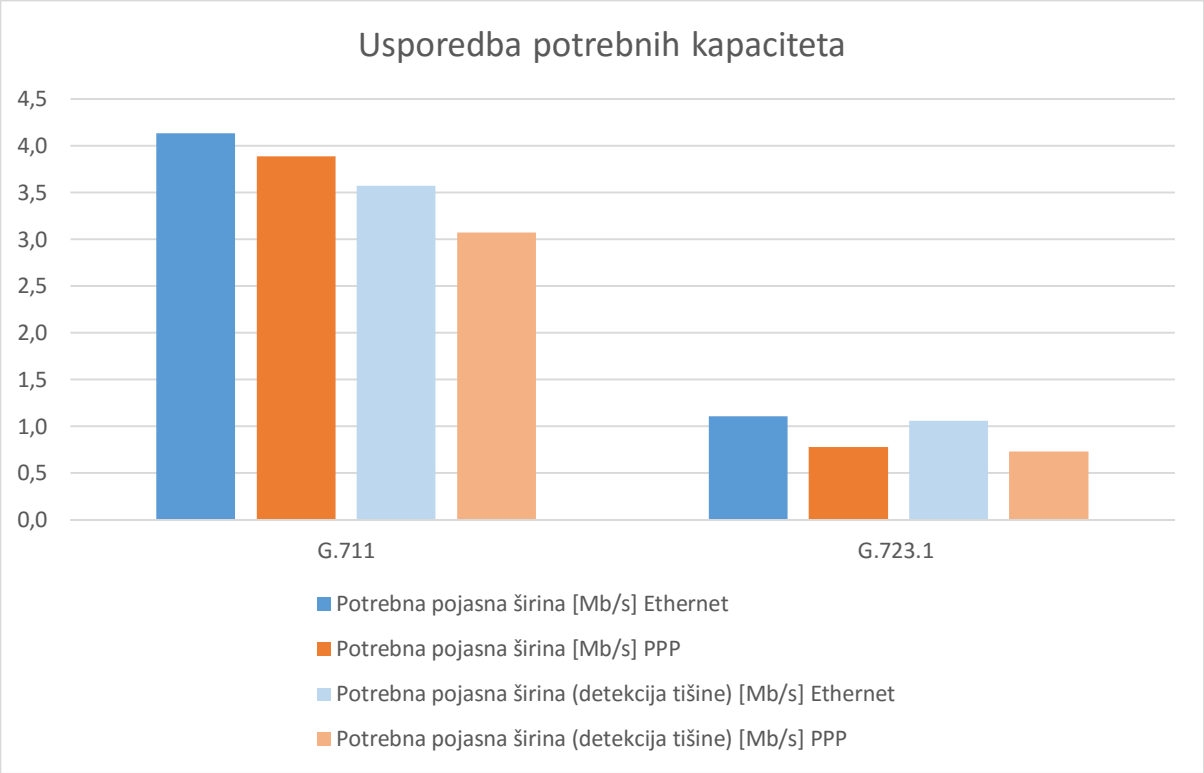
Slika 13. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.729

Kao što je prikazano na slici 13, kodek G.729 je zanimljiv za promatranje iz razloga što se (s obzirom na prethodne kodeke) vidi velika razlika u zahtjevima postavljenim pred mrežu ukoliko se koristi Ethernet ili PPP, dok detekcija tišine kod oba protokola ne donosi značajne razlike.



Slika 14. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.723.1

Kao zadnji promatrani kodek, G.723.1 u usporedbi s prethodnim kodecima donosi značajne razlike u pogledu potrebnih prijenosnih kapaciteta, te je sa slike 14 vidljivo ukoliko se koristi PPP protokol da su potrebne brzine prijenosa čak i ispod 1 [Mb/s], što je u usporedbi s kodekom G.711 čak 5 puta manje za isti zamišljeni scenarij (PPP bez detekcije tišine). Ovaj kodek bi bio idealan za korištenje u mrežama gdje su prijenosne brzine male.



Slika 15. Usporedba kodeka G.711 i G.723.1

Ukoliko se usporede prikazi protoka kodeka (slika 15) te potrebnih pojasnih širina kada se tim kodecima pridodaju vrijednosti dobivene prilikom analize, vidi se da konačni zahtjevi pojedinog kodeka nisu jednaki ukoliko se uspoređuju samo protoci pojedinih kodeka. Za primjer se mogu uzeti kodeci G.711 (kao najzahtjevniji promatrani kodek) i G.723.1 (kao promatrani kodek koji ima najmanje zahtjeve). Kodek G.711 ima potreban protok od 64 [kb/s], što je 12 puta veći potrebni protok nego kod kodeka G.723.1 koji ima protok od 5,3 [kb/s], no kada se ti kodeci uspoređuju, razlike između zahtjeva postaju sve manje. Kao što je već navedeno od razlike 12 puta, kod samog zahtjeva protoka, dolazi se dok razlike od tek 5 puta kada se uzme u obzir potrebna pojasna širina oba kodeka koristeći iste protokole na svim razinama.

Ovakve razlike jasno pokazuju različite vrste pristupa kodeka ka govornim informacijama i različito postupanje prema govoru, što se na kraju reflektira na kvalitetu

usluge. Ukoliko bi se različiti kodeci koristili na istoj mreži koja pruža dovoljnu pojasnu širinu i za najzahtjevniji kodek, tada bi kvaliteta usluge gledana od strane mreže bila ista bez obzira na korišteni kodek, dok bi korisnici osjetili veliku razliku, ponajprije između najzahtjevniji kodeka i onih najmanje zahtjevnih.

6. IMPLEMENTACIJA VOIP RJEŠENJA U RAZLIČITIM MREŽAMA

Kada se govori o korištenju VoIP-a, govori se o velikom broju mogućih usluga koje su dostupne korisnicima, putem različitih mreža i na različite načine. Taj broj usluga se povećava gotovo svaki dan, a najčešće usluge su spoj nekih već postojećih usluga i usluga koje se temelje na VoIP-u. Na taj način dolazi se do pojma unificiranih komunikacija.

Takve usluge su redefinirane kao „više nego govorne usluge“ u smislu obavljanja usluga IP telefonije zajedno sa uslugama nadovezanim na prijenos govora. Usluge koje se razvijaju za osobna računala su što se tiče funkcionalnosti najbogatije. Na tom području može se je postignut najveći napredak, iz razloga što se najlakše mogu dijeliti aplikacije, a samim time i intenzivno surađivati. Što se tiče mobilnih unificiranih komunikacija tu je slučaj nešto drugačiji, [15].

Postoje mnogi kriteriji po kojima se uvode ovakve aplikacije, no primarno obilježje je cijena, uz to, ovakve aplikacije (UC) donose svakakve različite *real-time* tehnologije koristeći podatkovne mreže.

Pametni telefoni, tableti i ostali uređaji koriste se diljem svijeta, a i postali su najkorišteniji način međusobne komunikacije (kako na privatnoj, tako i na poslovnoj razini). Prisustvo najčešće besplatnih područja pokrivenih Wi-Fi signalom donosi još značajnije uštede, jer time korisnici dobivaju zapravo potpuno besplatnu uslugu, a to je korisnicima primamljivo. Na primjeru VoIP-a, korisnici mogu razgovarati putem aplikacija na svojim pametnim telefonima (primjer Skype, Viber i slično) bez obzira gdje se trenutno nalaze ukoliko imaju pristup Internetu, a kao detaljan primjer mogu biti zračne luke gdje korisnik iz zemlje udaljene na primjer tisuću kilometara može komunicirati sa nekim kod kuće potpuno besplatno ako zračna luka posjeduje Wi-Fi, [15].

Što se tiče same implementacije VoIP-a na različitim uređajima i platformama, pred korisnike se ne stavlja pritisak dodatnog znanja ili vještina da bi se omogućilo korištenje, već je to postao dio svakodnevice. Na pametnim telefonima, tabletima, računalima, pa čak i u automobilima postoje neki oblici govorne komunikacije putem Interneta, a to naravno uključuje korištenje nekog oblika VoIP-a. Implementacija VoIP-a je s gledišta korisnika u posljednjih nekoliko godina prošla gotovo ne zamjetno, dok je korištenje postalo globalno. Svaki pametni telefon ima mogućnost korištenja različitih VoIP aplikacija, uz to platforme na kojima se temelje mobilni uređaji su gotovo jednake bez obzira na proizvođače, zatim su vrlo

slične i sve više popularnim pametnim televizorima, pa sustavima ugrađenim u automobile, a na kraju krajeva svi su kompatibilni i s operativnim sustavima na računalima. Kad se sve to zbroji dobiva se spoj gotovo svih vrsta mreža koje se danas koriste i na svim tim sustavima i mrežama je moguće međusobno komunicirati upravo VoIP-om.

Implementacija VoIP-a na postojeću PSTN mrežu omogućuje se korištenjem VoIP *Gateway-a*. VoIP *Gateway* je uređaj koji pretvara telefonski (govorni) promet u podatkovni kako bi se mogao prenijeti podatkovnom mrežom. Korištenje VoIP *Gatewaya* moguće je na dva načina i to pretvaranjem dolazećeg govornog prometa u VoIP podatkovni promet ili spajanjem privatne centrale (*Private Branch Exchange* - PBX) na IP mrežu. U prvom slučaju VoIP *Gateway* koristi PSTN mrežu kako bi se osigurala veća kvaliteta poziva ili ako PSTN nudi veću razinu dostupnosti, a da to je u tom trenutku potrebno. U drugom slučaju koristi IP mrežu za uslugu poziva. Na taj način mogu se koristiti i prijašnje usluge i VoIP usluga, [16].

Za potrebe većeg broja korisnika, npr. neka tvrtka, implementacija VoIP-a izvodi se kao sustav VoIP telefona spojenih na IP PBX poslužitelj (privatna centrala koja koristi IP protokol) i opcionalno može sadržavati VoIP *Gateway*. Na IP PBX poslužitelj mogu biti spojeni fizički telefoni, ali i softverski, tj. telefonske aplikacije na računalu, registrirane na IP PBX poslužitelju. Kada se želi uspostaviti poziv, zahtjev za pozivom prvo ide do IP PBX poslužitelja, a zatim se uspostavlja konekcija. IP PBX poslužitelj posjeduje informacije o svim spojenim telefonima (korisnicima) i u slučaju poziva ima mogućnost biranja kako će se uspostaviti poziv. Ukoliko je to poziv koji se odvija na području tog poslužitelja poziv se odvija samo unutar područja poslužitelja (IP mrežom) bez uključivanja drugih mreža, a ako poziv ide prema drugim mrežama tada se putem VoIP *Gatewaya* usmjerava dalje kroz mrežu, [16].

7. ZAKLJUČAK

Prijenos govora kao najznačajniji oblik komunikacije do razvoja VoIP-a odvijao se isključivo putem mreža namijenjenim samo prijenosu govora. Razvoj različitih tehnologija prijenosa podataka, kao i mreža, omogućio je prijenos govora IP paketima i time spojio prijenos govora i podatka u jednu cjelinu. Različite mogućnosti moduliranja signala i zauzimanja prijenosnih kapaciteta kod VoIP-a donose korisnicima prilagodbu njihovih potreba i zahtjevima za kvalitetom usluge, što kod prijašnjih načina prijenosa govora nije bilo moguće.

Kroz rad je opisan utjecaj odabira kodeka, kao glavnog faktora koji utječe na kvalitetu usluge. Svaki kodek različito obrađuje i priprema govor za prijenos i stoga ima različite zahtjeve koje postavlja pred kapacitete mreže, a biranjem detaljnijih mogućnosti zahtjevi se mogu dodatno smanjiti ili povećati i time utjecati na kvalitetu usluge. Ta karakteristika je korisnicima pogodna, jer u prijašnjim načinima prijenosa nije postojao utjecaj korisnika i njegovih želja, već samo usluga takva kakva jest.

U analizi kapaciteta prijenosnog linka prikazano je utjecanje kodeka na potrebne prijenosne kapacitete na postavljenom primjeru. Na primjeru je prikazan utjecaj kodeka, korištenje ili ne korištenje detekcije tišine i odabir različitih protokola na razini podatkovne veze. Kodek koji ima najveći potrebi protok u ovom primjeru ima i najveće zahtjeve u pogledu potrebnih kapaciteta, samim time i nudi najbolju kvalitetu usluge, dok se korištenjem detekcije tišine potrebni kapaciteti mogu dodatno smanjiti. Ako se odabiru kodeci s manjim protokom tada detekcija tišine ne predstavlja značajne uštede prijenosnih kapaciteta. U analizi je vidljivo da se odabiranjem različitih protokola sloja podatkovne veze potrebni kapaciteti mogu dodatno smanjiti, u nekim slučajevima gotovo za pola.

Budućnost donosi samo poboljšanja, kako se povećavaju pristupne brzine različitih mreža tako se povećava i kvaliteta VoIP usluga, no s druge strane i male brzine pristupa nisu prepreka za VoIP jer postoje i načini izvedbe u kojima velike brzine nisu potrebne. Veliki broj kodeka zapravo nudi veliki broj usluga, a s obzirom da je VoIP moguć na svim mrežama koje se temelje na IP protokolu. Moglo bi se reći da VoIP nije samo jedna usluga već skup usluga koje posjeduju mogućnost prijenosa govora sve dok postoji mogućnost prijenosa podataka.

LITERATURA

[1] http://www.vidipedija.com/index.php?title=VoIP (lipanj 2016.)

[2] Flanagan, W. A.: *VoIP and Unified Communications: Internet Telephony and Future Voice Network*, Wiley, New Jersey, USA, 2012.

[3] Nagireddi S.: *VoIP Voice and Fax Signal Processing*, Wiley, New Jersey, USA, 2008.

[4] Davidson J., Peters J.F., Bhatia M., Kaldindi S., Mukherjee S.: *Voice over IP Fundamentals, 2nd Edition*, Cisco Press, Indianapolis, USA, 2006.

[5] Ogunfunmi T., Togneri R., Narisimha M.: *Speech and Audio Processing for Coding, Enhancement and Recognition*, Springer, New York, USA, 2015.

[6] http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/h323/14069-codec-complexity.html (lipanj 2016.)

[7] http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/solutions_docs/qos_solutions/QoSVoIP/QoSVoIP.html (lipanj 2016.)

[8] http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html (lipanj 2016.)

[9] Tanenbaum A. S.: *Computer Networks, 4th Edition*, Prentice Hall, New York, USA, 2003.

[10] Koistinen T.: *Protocol overview: RTP and RTCP*, Nokia Telecommunications, New York, USA, 2000.

[11] Syme M., Goldie P.: *Optimising Network Performance with Content Switching*, Prentice Hall, New York, USA, 2004.

[12] Long, J.: *Storage Networking Protocol Fundamentals*, Cisco Press, Indianapolis, USA, 2006.

[13] Matulin M., Mrvelj Š.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa: Osnove teorije prometa 1. i 2. vježbe,* Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

[14] http://www.erlang.com/calculator/erlb/ (lipanj 2016.)

[15] http://searchitchannel.techtarget.com/photostory/4500273623/UC-technology-Tips-for-channel-partners/1/Capture-the-UC-market (lipanj 2016.)

[16] http://www.3cx.com/pbx/ip-pbx-overview/ (lipanj 2016)

POPIS KRATICA

ACELP - (*Algebraic Code Excited Linear Prediction*) algebarsko linearno predviđanje kodnim pobuđivanjem

ADPCM - (*Adaptive Differential Pulse-Code Modulation*) adaptivna diferencijalna pulsno kodna modulacija

AJB - (*Adaptive Jitter Buffer*) adaptivni dejitter buffer

ATM - (*Asynchronous Transfer Mode*) asinkroni mod prijenosa

CELP - (*Code Exicited Linear Prediction*) linearno predviđanje kodnim pobuđivanjem

CS-ACELP - (*Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction*) kondenzacijski strukturirano algebarsko linearno predviđanje kodnim pobuđivanjem

CSRC - (*Contributing Source*) doprinoseći izvor

CNG - (*Comfor Noise Generator*) generator komfornog šuma

DSL - (*Digital Subscriber Line*) digitalna pretplatnička linija

FCS - (*Frame Check Sequence*) slijep provjere okvira

HTTP - (*HyperText Transfer Protocol*) hipertekstualni prijenos govora

IFG - (*InnerFrame Gap*) razmak susjednih okvira

IP - (*Internet Protocol*) internet protokol

ISDN - (*Integrated Services Digital Network*) digitalna mreža integriranih usluga

ITU (*International Telecommunication Union*) Međunarodna telekomunikacijska unija

LAN (*Local Area Network*) lokalna mreža

LCP (*Link Control Protocol*) protokol kontrole linka

LD-CELP (*Low Delay-CELP*) linearno predviđanje kodnim pobuđivanjem s niskim kašnjenjem

MP-MLQ (*Multi Pulse Maximum Likelihood Quantization*) multi pulsna maksimalno vjerojatna kvantizacija

MRU (*Maximum Receive Unit*) maksimalna primjena jedinica

NCP (*Network Control Protocol*) mrežni kontrolni protokol

PBX (*Private Branch Exchange*) privatna centrala

PC (*Personal Computer*) osobno računalo

PCM (*Pulse-Code Modulation*) pulsno kodna modulacija

PPP (*Point-to-Point Protocol*) protokol od točke do točke

PSTN (*Public Switched Telephone Network*) javna telefonska mreža

RTCP (*Real-Time Control Protocol*) stvarno vremenski kontrolni protokol

RTCP-XR (*Real-Time Control Protocol – Extended Report*) stvarno vremenski kontrolni protokol s opširnijim izvještajem

RTP (*Real-Time Protocol*) stvarno vremenski protokol

SFD (*Start Frame Delimiter*) graničnik početnog okvira

SS7 (*Signalling System No.7*) signalni sustav broj 7

SSRC (*Synchronization Source*) izvor sinkronizacije

TDM (*Time Division Multiplex*) vremenski multipleks

UC (*Unified Communications*) objedinjene komunikacije

UDP (*User Datagram Protocol*) protokol korisničkih datagrama

UNI (*User Network Inteface*) korisničko mrežno sučelje

USB (*Universal Serial Bus*) univerzalna serijska sabirnica

VAD (*Voice Activity Detector*) detektor tišine

VLAN (*Virtual Local Area Network*) virtualna lokalna mreža

VoIP (*Voice over Internet Protocol*) govor putem internet protokola

WAN (*Wide Area Network*) mreža širokog područja

QoS (*Quality of Service*) kvaliteta usluge

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba analognog i PCM kodiranog signala, [4] 7
Slika 2. Prikaz uniformnog PCM kodiranja, [2] 13
Slika 3. Prikaz A zakona kompresije, [2] 14
Slika 4. UDP zaglavlje, [9] 24
Slika 5. Ethernet okvir, [11] 27
Slika 6. PPP enkapsulacija, [12] 29
Slika 7. Prikaz sučelja aplikacije 30
Slika 8. Grafički prikaz postotka prometa u jednom danu 31
Slika 9. Prikaz protoka kodeka korištenih u analizi 32
Slika 10. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.711 33
Slika 11. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.726 34
Slika 12. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.728 34
Slika 13. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.729 35
Slika 14. Grafički prikaz potrebnih prijenosnih kapaciteta za kodek G.723.1 35
Slika 15. Usporedba kodeka G.711 i G.723.1 36

METAPODACI

Naslov rada: Određivanje prijenosnog kapaciteta za VoIP

Student: Nikola Škrlec

Mentor: Dr. sc. Marko Matulin

Naslov na drugom jeziku (engleski):

Determining Link Capacity for VoIP

Povjerenstvo za obranu:

- Izv. prof. dr. sc. Štefica Mrvelj_____ predsjednik
- Dr. sc. Marko Matulin_____ mentor
- Dr. sc. Ivan Gregurević _____ član
- Izv. prof. dr. sc. Dragan Peraković_____ zamjena

Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: Zavod za informacijsko komunikacijski promet

Vrsta studija: Preddiplomski

Studij: Promet

Datum obrane završnog rada: 5. srpnja, 2016.

Napomena: pod datum obrane završnog rada navodi se prvi definirani datum roka obrane.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Određivanje prijenosnog kapaciteta za VoIP**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 26.6.2016

(potpis)