

# G.711 i njegove primjene u praksi

---

**Stakor, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:112679>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Stručni studij**

**ZAVRŠNI RAD**

**G.711 i njegove primjene u praksi**

**Ime i prezime:**

Tin Stakor

**Mentor:**

Mr.sc. Anđelko Lišnjic

**Osijek, 2016.**

# Sadržaj

## Stranica

1. UVOD .....	2
2. ANALOGNO/DIGITALNA PRETVORBA .....	3
2.1. POSTUPCI A/D PRETVORBE .....	5
2.2. METODE PRETVORBE.....	6
3. G.711 (PULSNO KODNA MODULACIJA) .....	7
3.1. UNIFORMNO UZORKOVANJE PO VREMENU .....	10
3.2. KVANTIZACIJA PO AMPLITUDI .....	11
3.2.1. ŠUM KVANTIZACIJE .....	13
3.2.2. DITHERING .....	16
3.3. KODIRANJE .....	17
3.4. ITU-T G.711 .....	18
4. PRIMJENE G.711.....	23
4.1. MULTIPLEKSIRANJE.....	24
4.2. PDH - PLEZIOKRONA DIGITALNA HIJERARHIJA .....	24
4.3. SDH – SINKRONA DIGITALNA HIJERARHIJA.....	27
4.4. PCM-OVI VIŠEG REDA .....	27
5. ZAKLJUČAK .....	29
LITERATURA .....	30
POPIS KRATICA.....	31
POPIS SLIKA I TABLICA .....	32
SAŽETAK .....	33
ŽIVOTOPIS .....	34

## 1. UVOD

PCM (*Pulse Code Modulation*) i njene varijacije u današnje vrijeme imaju široku upotrebu, pogotovo u telekomunikacijama. Korištenjem PCM-a možemo digitalizirati različite tipove analognih signala, npr: glasove, video zapise, glazbu i virtualnu stvarnost. Prema tome, u budućnosti se može očekivati još veća primjena pulsno kodne modulacije u svim područjima prijenosa i skladištenja podataka i informacija.

U radu je obrađen princip rada i primjena pulsno kodne modulacije. U prvom dijelu završnog rada obrađena je cjelina digitalno/analogna pretvorba. Da bi se kontinuirani signal po vremenu pretvorio u niz impulsa potrebno je izvršiti tri koraka, a to su uzorkovanje, kvantiziranje i kodiranje te su opisani postupci i metode A/D (*analog/digital*) pretvorbe. U drugom dijelu rada će se objasniti G.711. To je modulacijski postupak gdje se uzorak ulaznog signala zamijeni odgovarajućim kvantizacijskim nivoom. PCM je u komunikacijama prihvaćen princip digitalnog prijenosa analognih signala te se na taj način zapisuje glazba na CD (*compact disk*) također i reproduciranje audio signala. U trećem dijelu će se objasniti ITU-T G.711 (*The Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunication Union*), sinkrona i plezikorna digitalna hijerarhija te primjena PCM-a u praksi. ITU-T preporuka je G.711 koja definira standarde PCM-a. PCM je relativno starija metoda načina kodiranja govora, ali ne i zastarjela, jer se većina uređaja za prijenos signala oslanja na preporuke G.711. Ovom metodom se govorni većini današnjih signal širine spektra 4 kHz kodira brzinom 64 kbit/s. U puno paketskih mreža poželjno je govor kodirati s manjom brzinom.

## 2. ANALOGNO/DIGITALNA PRETVORBA

Signali stvarnog svijeta kao: govor, mjerni signali, video, su analogni signali. Pomoću analogno-digitalnih pretvarača (*analog-digital converter* ili *A/D converter* ili *ADC*) oni se prevode u digitalnu domenu što omogućava<sup>[1]</sup>:

- Djelotvorniji prijenos signala
- Djelotvorniju pohranu signala
- Djelotvorniju obradu.

Pretvorba kontinuiranog signala u digitalni signal (A/D) i obrnuto (D/A) sastavni je dio suvremenih sustava za obradbu, pohranu i prijenos informacija. Već se 30-tih godina 20. stoljeća, zbog želje za bržim i uspješnijim prijenosom signala, pojavljuju prva istraživanja vezana uz digitalni prijenos. Kako se kod analognih signala pojavljuju velike distorzije i šumovi tako se postupno razvija postupak kodiranja iz analogne u digitalnu informaciju.

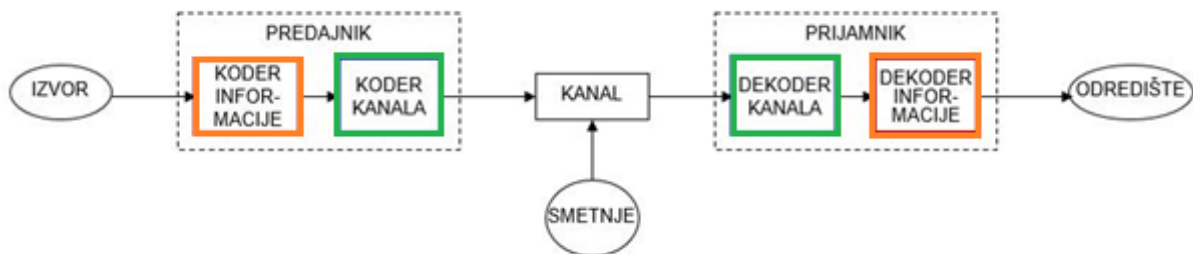
Prednost uvođenja digitalnog prijenosa je ta što je kvaliteta prijenosa neovisna o udaljenosti. Na taj način se signal puno puta pojačava, a informacija ostaje sačuvana. Nadalje, prednosti su i visoka imunost na smetnje, upotreba vremenskog multipleksa, ali i kompatibilnost s digitalnom komunikacijom – digitalni prijenos omogućuje izgradnju jedinstvene digitalne mreže gdje se A/D i D/A pretvorba vrši samo kod prijemnika i predajnika.<sup>[1]</sup>

Prema trenutnim vrijednostima amplitude, i po vremenu kontinuirani signal mora se izraziti izrazom „*digit*“ (*eng. znamenka*), tj. da bi se pretvorio u niz impulsa potrebno je obaviti tri najvažnija postupka, a to su:

- „uzorkovanje“ signala po vremenu
- od izvora se pošilja analogni signal na uzorkovanje, a on se izvršava u pravilnim vremenskim oblicima.

- „kvantiziranje“ signala po trenutnim vrijednostima amplitude
  - signal se kvantizira, tj. uzima se vrijednost uzoraka koja je najbliža kvantizacijskoj razini.
- „kodiranje“ otkriva da se kvantizirani signal pretvara u binarno kodnu grupu, a diskretna vrijednost signala u binarni broj.
  - predstavljanje diskretne vrijednosti signala skupinom znakova
  - kodna riječ se dodjeljuje svakoj razini kvantiziranja, odnosno kvantiziranom uzorku se dodjeljuje određeni broj bita. Tada se dobiva niz kodnih riječi koje odgovaraju nizu kvantiziranih uzoraka.

Na slici 1. prikazan je model komunikacijskog sustava. Zadaća komunikacijskog sustava je ta da komunikacijski signal omogući razmjenu informacija od izvora do odredišta.



**Slika 1.** Komunikacijski sustav

Prema slici 1. komunikacijskog sustava, A/D pretvorbe vežemo uz predajnik, tj. uz koder informacije. Signal se iz analognog oblika s izvora (npr. ljudski glas) pretvara u digitalni oblik kako bi putem kanala mogao doći do odredišta gdje se u prijamniku odvija D/A (*digital-analog*) pretvorba, a ponovno se iz digitalnog pretvara u analogni oblik (npr. ponovno ljudski glas).

## 2.1. POSTUPCI A/D PRETVORBE

A/D pretvorba podrazumijeva kodiranje informacije, ali uz određeni gubitak informacije. Gubitak informacije se nalazi jedino u postupku kvantizacije, a kod postupka uzorkovanja i kodiranja predstavljaju kodiranje bez gubitka informacije.<sup>[1]</sup>

Postupke A/D pretvorbe dijelimo na:

1. PCM (*Pulse Code Modulation*),
2. DM (*Delta Modulation*).

Postoji i dodatna podjela koja se dijeli na: pretvarače koji se nazivaju sigma delta pretvarači te na pretvarače temeljene na uobličavanju šuma. Pretvarači temeljeni na uobličavanju šuma rade na višoj frekvenciji od sigma delta pretvarača.

Broj kodnih elemenata u apstraktnoj abecedi naziva se obim koda. Kod računala broj uporabljenih elemenata proporcionalan je broju bit-a koji se žele upotrijebiti za kodnu zamjenu prema slijedećem izrazu<sup>[19]</sup>:

$$N=2^m$$

gdje je

- N - broj elemenata koda
- m – broj bit-a uporabljen za kodnu zamjenu

Važni čimbenici za pretvornike su: vrijeme u kojem tu pretvorbu treba izvršiti iz jednog oblika u drugi te mjerni raspon na ulazu i izlazu za te pretvornike. Ako su veličine koje se mjere vrlo malog iznosa, treba se koristiti pretvarač koji ima pojačalo ili onaj koji radi s više mjernih raspona.

## 2.2. METODE PRETVORBE

Postoje tri karakteristične metode pretvorbe, a to su:

- a) sukcesivna aproksimacija (eng. successive approximation)
  - glavne karakteristike su joj da ima srednju razlučivost, brzinu i osjetljivost na smetnje. Sukcesivna aproksimacija se primjenjuje u višekanalnim mjerenjima te za prikupljanje podataka.
- b) integracija (eng. integration)
  - integracija je mjerenje vremena koje je potrebno da se kondenzator nabije. Naboj će dobiti od nepoznatoga napona, a od poznatog napona će se isprazniti.
- c) neposredna usporedba (eng. direct comparison)



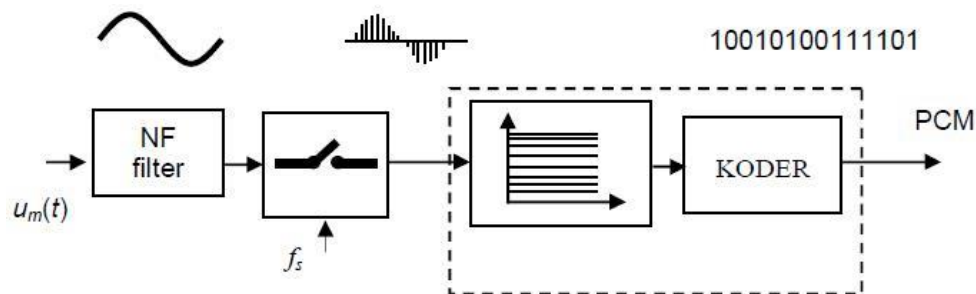
### 3. G.711 (PULSNO KODNA MODULACIJA)

Pulsno kodna modulacija (PCM) je modulacijski postupak gdje se uzorak ulaznog signala mijenja odgovarajućim kvantizacijskim nivoom tj, postupak kojim se analogni izvorni signal pretvara u digitalni i obratno te je prilagođena karakteristikama govornog kanala. Pulsno kodna modulacija koristi se za digitalni prikaz analognog signala te je standardna forma za: digitalni audio na računalima, kompaktne diskove, digitalnu telefoniju i ostalu digitalno audio primjenu. U upotrebi je preko četrdeset godina. Digitalni sustavi s pulsno-kodnom modulacijom primjenjuju se od 60-tih godina prošlog stoljeća, i to gotovo istovremeno u Japanu, Europi i Americi. U suvremenim informacijskim sustavima kodne metode prijenosa i obrade informacija na vrlo prikladan način rješavaju veliki broj problema. PCM sustavi isto kao i drugi sustavi s kvantiziranjem, sadrže pragovni efekt. To znači da vanjski šumovi nemaju nikakav utjecaj na procese obrade informacije sve dok odnos signal/šum ostaje ispod određene pragovne vrijednosti. Kada se ta vrijednost prijeđe, nastupaju velike pogreške. Radi dobrih osobina s obzirom na utjecaj smetnji te zato što se informacije u digitalnom obliku mogu direktno unositi u digitalna elektronička računala, PCM metode imaju vrlo veliku primjenu u suvremenim informacijskim sustavima.

PCM se vrši u tri koraka:

1. Uniformno uzorkovanje po vremenu (*Sampling*),
2. Kvantizacija po amplitudi (*Quantization*),
3. Kodiranje (*Coding*).

što je prikazano slikom 2.



**Slika 2.** Pulsno kodna modulacija (PCM)

Prema slici 2. analogni signal prolazi kroz niskofrekvencijski (NF) filter, gdje se frekvencijski ograniči. Poslije toga se uzorkuje, kvantizira i kodira.

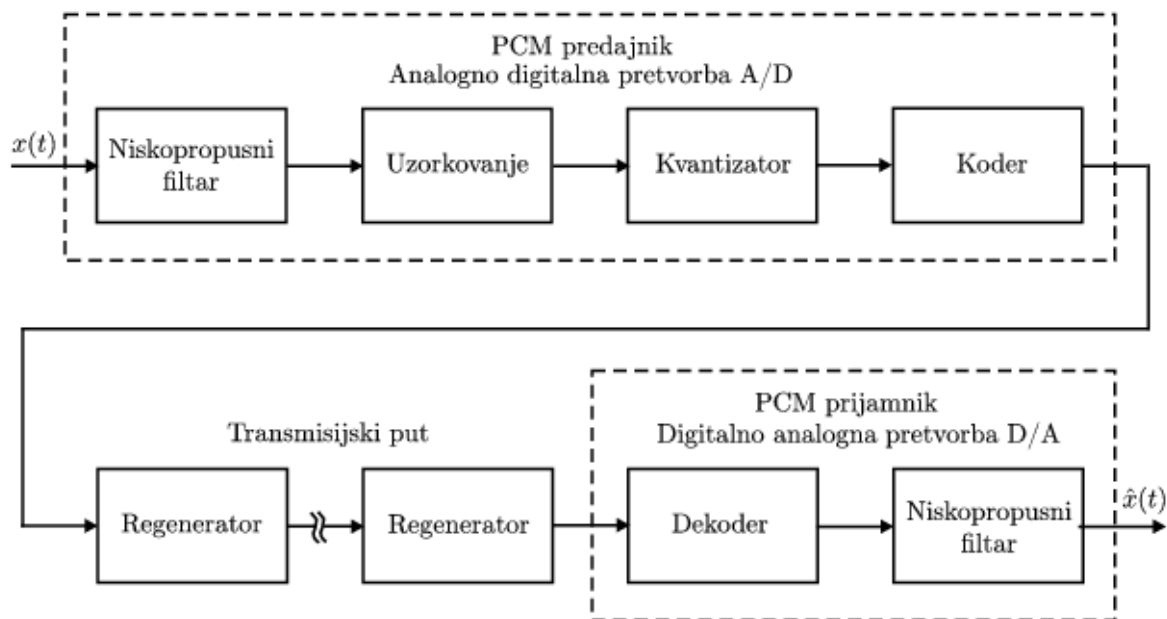
Na osnovama teorema uzorkovanja, koji zapravo prikazuje proces PAM-a (*pulsno-amplitudne modulacije*), nastao je PCM (*pulsno-kodna modulacija*) kojim se iznosi amplituda diskretnih impulsa PAM-a kvantiziraju i kodiraju u binarni oblik. PCM je u suvremenim komunikacijama prihvaćen princip digitalnog prijenosa analognih signala - te se tako prenosi govor u suvremenoj telefoniji, zapisuje glazba na CD-u (compact disk), a tako se i snimaju/reproduciraju audio signali u glazbenim karticama PC-a. Ovisno o potrebama za kvalitetom prijenosa analognih signala, razlikuju se iznosi za  $f_m$  i  $f_{sr}$  te finoća kvantiziranja u broju bita<sup>[2]</sup>.

Primjena PCM-a	$f_s$	$f_B$	Kvantizacija
Telefonija	8 kHz	3400 Hz	8 bita
CD	44.1 kHz	20 kHz	16 bita
DAT	48 kHz	22 kHz	16 bita
Standard PC soundcard	Do 44.1 kHz – 48 kHz	20/22 kHz	8 ili 16 bita
Profesionalni glazbeni uređaj	Do 96 kHz	Do 44 kHz	18, 20, 24, 32 bita

**Tablica 1.** Primjena PCM-a

Kvantizirani signal na izlazu iz ravnomjernog ili neravnomjernog kvantizatora uobičajeno se kodira s  $L$ -narnim ravnomjernim kodom. Drugim riječima, svakom kvantiziranom uzorku, čija veličina može biti predstavljena s brojem odgovarajuće kvantne razine, treba pridružiti kodnu grupu ili kodnu riječ od  $m$  simbola iz alfabeta. Broj bitova,  $m$  po kodnoj grupi, broj kvantizacijskih razina  $N$  i broj simbola iz kodnog alfabeta  $L$  povezani su izrazom:

$$N \leq L^m$$



**Slika 3.** PCM komunikacijski sustav

PCM je digitalna modulacija gdje se signal kao nositelj informacije uzorkuje u istim vremenskim intervalima te gdje se informacija o amplitudi kodira, odnosno zapisuje nekim brojem. Kodiranje treba biti jednoznačno pridijeljeno. Broj različitih naponskih razina treba ograničiti kada je broj naponskih razina u nekom intervalu beskonačan. Taj se postupak naziva kvantiziranje. Budući da se PCM signal sastoji od nula i jedinica, na njega teško utječu šumovi i smetnje, a u slučajevima kada i nastanu smetnje na kanalu, lagano se uoče i otklone. Važno je napomenuti i to da se digitalizirani signali na jednostavan način procesiraju, pa se zbog toga koriste jeftinije i standardne tehnike procesiranja. Digitalizirani podaci se lako skupe i šalju kroz male kanale. Štoviše, računalni dijelovi korišteni u slanju i primanju digitaliziranog signala veoma su jeftini i pouzdani.

### 3.1. UNIFORMNO UZORKOVANJE PO VREMENU

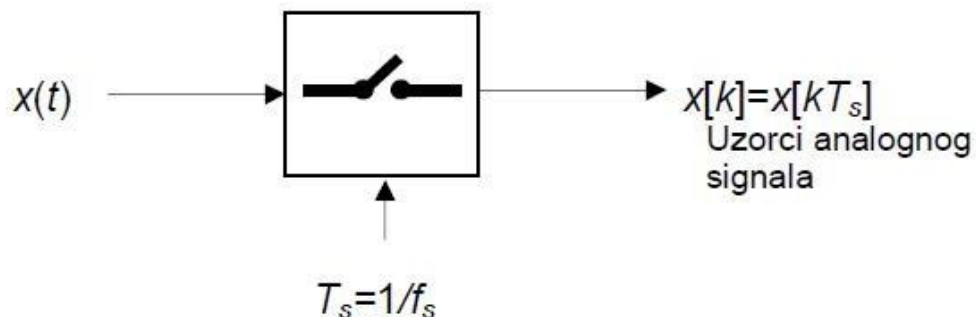
Uzorkovanjem se očitava vrijednost signala na ekvidistantim vremenskim razmacima. To znači da se svakih nekoliko mikrosekundi mjeri iznos signala i uzima u tom trenu uzorak signala kakav on jest. Uzorkovanje se provodi po teoremu uzoraka - analogni signal pomoću vremenski diskretnih uzoraka iz kojih se bez gubitka informacije rekonstruira prvobitni signal.<sup>[1]</sup>

Uzorkovanje se izvršava po Shannonovom teoremu prema kojem frekvencija uzorkovanja treba biti barem dva puta veća od najveće frekvencije signala koji se uzorkuje.

Teoremom uzorkovanja dokazano je kako se analogni kontinuirani signal može pretvara u slijed vremenskih diskretnih impulsa i obrnuto, tako da nema nikakvog gubitka informacije ako je zadovoljeno da frekvencija uzorkovanja  $f_s$  (*sampling frequency*) kojom se uzimaju uzorci mora biti najmanje dva puta veća od najveće frekvencije  $f_{max}$  koja se obično javlja u analognom signalu koji se uzorkuje<sup>[3]</sup>.

Upravo je na osnovama teorema uzorkovanja nastao PCM, što je u suvremenim komunikacijama prihvaćen i univerzalan princip digitalnog zapisa analognih signala. Digitalni sustavi mogu isključivo raditi s diskretnim i konačnim skupom podataka. Ako se uzorkovanjem ne gubi informacija, obradba na razini uzoraka, umjesto na razini kontinuiranog signala, znači uštedu. Sustavi koji sudjeluju u obradbi, pohrani ili prijenosu informacije uzorkovanjem mogu biti vremenski raspodijeljeni između više korisnika.

Uzorkovanje u PCM-u funkcioniра tako da analogni signal iz izvora šalje se na uzorkovanje koje se vrši u pravilnim vremenskim razmacima. Rezultantni signal se naziva PAM (*Pulse Amplitude Modulation*). Uzorci analognog signala  $x(t)$  se uzimaju u uniformnim vremenskim intervalima  $T_s$ <sup>[3]</sup>.



Slika 4. Uzorkovanje

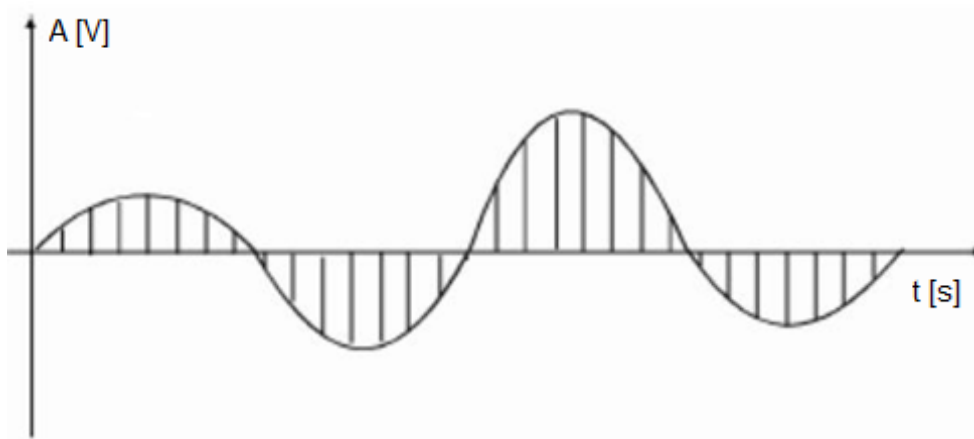
U frekvencijskoj domeni uzorkovanje rezultira periodičkom pojavom kopija spektra analognog signala na višekratnicima frekvencije uzorkovanja  $f_S$ <sup>[1]</sup>.

$$X_S(f) = \frac{1}{T_S} \sum_{l=-\infty}^{\infty} X(f - lf_S)$$

$X_S$  – spektar uzorkovanog signala

$f$  – spektar analognog signala

Signal širine  $f_B$  treba uzorkovati najmanje s  $f_S \geq 2f_B$ . Međusobno preklapanje kopija spektra signala naziva se *aliasing*, a sprječava se ograničavanjem spektra analognog signala na frekvenciju  $f_B = f_S/2$  pomoću anti-aliasing filtera<sup>[1]</sup>.



**Slika 5.** Uzorkovanje – skica

### 3.2. KVANTIZACIJA PO AMPLITUDI

Kvantizacija u obradi digitalnih signala odnosi se na postupak u kojem su kontinuirane vrijednosti amplitude predstavljene s ograničenim dijelom diskretnih vrijednosti<sup>[5]</sup>. Kvantiziranjem se svakoj vrijednosti uzorka pridružuje neka najbliža unaprijed zadana vrijednost. Kvantiziranje, odnosno diskretiziranje signala po trenutnoj vrijednosti amplitude je zaokruživanje vrijednosti uzoraka na najbližu kvantizacijsku razinu. Spektar mogućih amplituda podijeljen je na određeni broj kvantizacijskih intervala, a sredina kvantizacijskog

intervala zove se kvantizacijska razina. Prema potrebi se koristi linearno ili nelinearno kvantiziranje. Kvantizacijski intervali su tako jednake dužine kod linearnog kvantiziranja, a različiti kod nelinearnog.

Kako bi taj signal mogli obrađivati, potrebno je nakon uzorkovanja izvesti proces kvantizacije i na taj način signal postaje diskretni po amplitudi. U stvari, neograničen skup vrijednosti prilagođavamo i prikazujemo nekim od najbližih dostupnih vrijednosti pa kvantizaciju opisujemo kao proces aproksimacije kontinuiranog skupa vrijednosti<sup>[5]</sup>. Jasna posljedica tog postupka je i gubitak određenih informacija ulaznog signala zbog zaokruživanja na najbliže dostupne vrijednosti<sup>[5]</sup>. Kvantiziranje, stoga, predstavlja postupak kojim se područja kontinuirane vrijednosti amplitude transformiraju u konačan broj amplituda (to su kvantizacijski intervali – njima se dodjeljuju numeričke vrijednosti koje se kodiraju binarnim kodom).

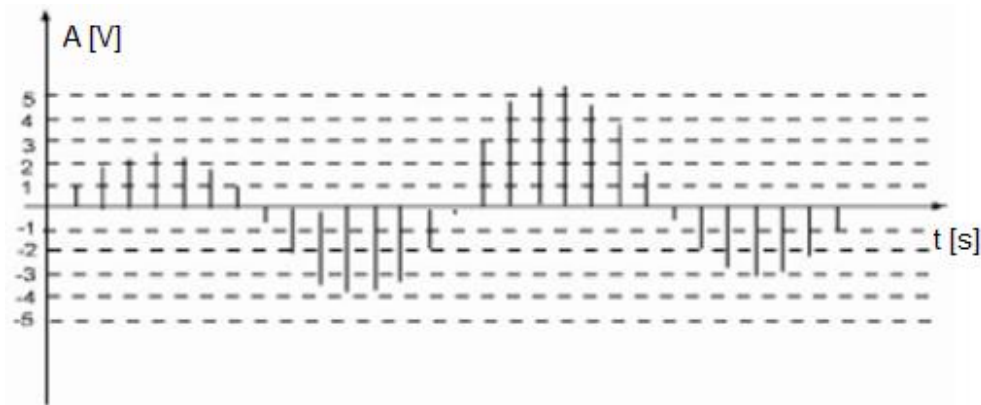
Uređaj ili algoritamska funkcija koja izvodi kvantizaciju naziva se kvantizator<sup>[5]</sup>. Kvantiziranjem  $n$  bitova raspon amplitude signala podijeljen je u  $2^n$  diskretnih nivoa. Svaki uzorak je prvo kvantiziran na najbliži nivo kvantizacije, a potom spremljen u binarni kod dodijeljen tom nivou<sup>[5]</sup>. Primjer kvantizacije može biti audio kompaktni disk (CD) koji je na 44,100 Hz kvantiziran s 16 bita te koji je jedna od 65,536 mogućih vrijednosti po uzorku<sup>[6]</sup>. Izbor broja nivoa veoma je važan u diskretnoj kvantizaciji. Najjednostavniji način kvantiziranja signala jest taj da se izabere digitalna vrijednost amplitude koja je najbliža originalnoj analognoj amplitudi. Ovo zaokruživanje na najbliži nivo dovodi do greške koja predstavlja najveći izvor smetnje u digitalnom procesuiranju signala. Kod pretvaranja analognih signala u digitalne razlika između stvarne analogne vrijednosti i kvantizirane digitalne vrijednosti zove se greškom kvantizacije<sup>[8]</sup>. Signal koji je nastao zbog ove greške ponekad je modeliran kao dodatni slučajni signal<sup>[8]</sup>. Uslijed greške kvantizacije nastaje kvantizacijsko izobličenje (šum).

Točnost kvantiziranog signala može se popraviti do željenog stupnja povećavajući broj nivoa  $L=2^n$ <sup>[5]</sup>.

Uzorke signala  $x[k]$  treba kvantizirati po amplitudi kako bi se njihova amplituda svela na konačan broj analognih vrijednosti  $y[k]$ . Za razliku od uzorkovanja, kvantizacija nije reverzibilan proces jer se za vrijeme tog procesa beskonačan broj amplituda uzorka analognog signala pridružuje konačnom broju amplitudnih vrijednosti. Kada se kodiranje provodi

istovremeno s kvantizacijom, izlazne amplitude se prikazuju digitalnim kodnim riječima s konačnim brojem bita<sup>[8]</sup>.

Kvantizacija je najvažniji korak jer utječe na kvalitetu PCM sustava<sup>[1]</sup>.



**Slika 6.** Kvantizacija – skica

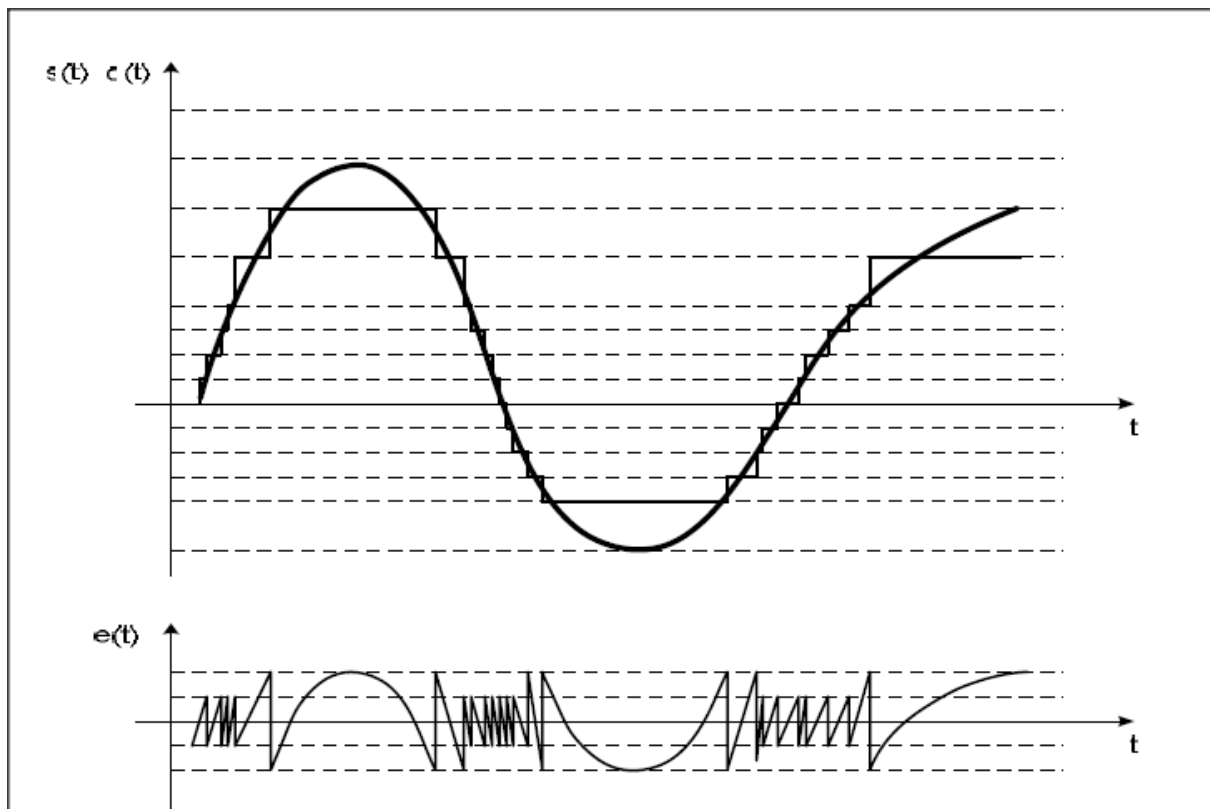
Područje definicije ulaznog napona  $x$  [k] je:  $U_{Ref} = N * \Delta U$ , gdje je  $N$  broj razina kvantizacije, a  $\Delta U$  korak kvantizacije definiran kao:  $\Delta U = \frac{y_0}{(N-1)}$ .

Kvantizacijom se ne može dobiti stvarna amplituda vrijednosti uzorka, već se ispituje i daje najbliže stanje. Razlikujemo linearno i nelinearno kvantiziranje.

### 3.2.1. ŠUM KVANTIZACIJE

Odstupanje od originalnog signala, zbog pridavanja kvantiziranih vrijednosti uzorcima, očituje se kao šum kvantiziranja.<sup>[13]</sup>

Svakoj razini kvantiziranja dodjeljuje se kodna riječ, dok se kvantiziranom uzorku dodjeljuje 8 bitova koji ga opisuju. Tako se dobiva niz kodnih riječi koje odgovaraju nizu kvantiziranih uzoraka<sup>[13]</sup>. Zaokruživanjem prilikom kvantiziranja na višu ili nižu razinu nastaje šum koji se naziva kvantizacijski šum.



**Slika 7.** Nastajanje šuma kod nelinearnog kvantiziranja

Greška kvantizacije  $e[k] = x[k] - y[k]$  nastaje kao posljedica "zaokruživanja" razine signala na neku diskretnu vrijednost. Ona je uzrok nelinearnom izobličenju primarnog kontinuiranog signala  $x(t)$ , a to je slučajna veličina izražena kao šum kvantizacije koji se pojavljuje uz koristan signal<sup>[2]</sup>. Ako je amplituda uzorka blizu granice intervala kvantizacije, pogreška može biti najveća. Pošto ne postoji predviđena veza između grešaka kvantizacije u susjednim intervalima, pogreška kvantizacije može se predstaviti kao slučajni signal jednolike distribucije.<sup>[17]</sup>

Šum kvantizacije ovisi o vrsti kvantizacije:

- $\Delta U = \text{konst.}$  - ravnomjerna
- $\Delta U \neq \text{konst.}$  - neravnomjerna



On se, kao i svaki šum, izražava kroz odnos  $S/N$  (*signal/šum*), primjerice sinusni signal.<sup>[21]</sup>

$$\frac{S}{N} = 6.02 \cdot r + 1.76 \text{ [dB]}$$

$S$  – srednja snaga signalab

$N$  – srednja snaga kvantiziranog šuma

$r$  – broj bita po uzorku

U FDM (*Frequency division multiplex*) sustavima šum se pojavljuje u elektroničkim sklopovima (pojačala, modulatori, filteri, demodulatori), dok u digitalnim sustavima (PCM) specifični šum nastaje tijekom A/D konverzije.<sup>[17]</sup>

Formiranje šuma najzastupljenije je u analogno-digitalnoj i digitalno-analognoj pretvorbi gdje se upotrebljava obojeni šum kako bi se zadržala velika rezolucija signala. Ovu tehniku moguće je primijeniti na smanjenje spektralne gustoće snage šuma u frekvencijskim područjima najveće osjetljivosti ljudskog uha, što naposljetku rezultira povećanjem spektralne gustoće snage u ostalim frekvencijskim područjima.

Glavni nedostatak oblikovanja šuma je velika osjetljivost. Na primjer, pojačavanje digitalnih signala može dovesti do pojave novog kvantizacijskog šuma superponiranog signalu koji značajno premašuje iznose izvornog oblikovanog šuma na frekvencijama najvećeg pojačanja filtra.<sup>[17]</sup>

### 3.2.2. DITHERING

*Dithering* (podrhtavanje) predstavlja proces namjernog dodavanja šuma analognom signalu, s ciljem da greška kvantizacije poprimi oblik šuma. *Dithering* se često koristi u obradi signala. Primjenjuje se kod kvantizacije u analogno-digitalnim pretvornicima, rekvantizacije digitalnih podataka na računalo, kao i kod smanjivanja utjecaja nelinearnosti kod filtera s frakcionalnom aritmetikom.<sup>[17]</sup> Cilj *ditheringa* je kod kvantizacije osigurati neovisnost kvantizacijskog šuma od ulaznog signala, zapravo upravljati statističkim svojstvima ukupne kvantizacijske greške i njezine povezanosti sa ulaznim signalom sustava. Svrha *ditheringa* je dodati ulaznom signalu širokopojasni signal šuma malog nivoa, sa statističkom raspodjelom energije čije vršne vrijednosti odgovaraju upravo jednom intervalu kvantizacije.

Koncept dodavanja šuma kako bi se smanjio šum ne zvuči vrlo smisleno. Istini za volju, ovakvim se postupkom šum ne „smanjuje“ već se, tako rečeno, maskira. Kod audio ili video signala se rade modifikacije nad šumom da bi signal bio bolji ljudskim osjetilima. Općenito, *dithering* je postupak dodavanja šuma signalu da bi se randomizirala pogreška kvantizacije i na taj način spriječio šum na diskretnim frekvencijama u audio snimci.<sup>[16]</sup>

*Dithering* se koristi u kvantizaciji signala kako bi se uklonila pojava distorzije signala uzrokovana kvantizacijom uz minimalno smanjenje SNR-a (signal to noise ratio). Ova nam operacija omogućuje neovisnost kvantizacijskog šuma o ulaznom signalu, a to se svojstvo može primijeniti na mnoga područja, od digitalne obrade signala, komunikacijskih sustava, do audio sustava, te nam daje mogućnost razvoja drugih algoritama koji se zasnivaju upravo na tom svojstvu.

Upotrebom ditherovanja povećava se rezolucija procesa A/D i D/A konverzije (ispod nivoa bita najmanje vrijednosti LSB – least significant bit ), smanjuju se izobličenja te se poboljšava kvaliteta signala govora/audio signala. Kvalitetno ditherovan digitalni audio sustav u pogledu performansi odnosa signal-šum daleko nadilazi analogni audio sistem.

### 3.3. KODIRANJE

Kodiranje je pretvaranje kvantiziranog signala u binarno kodnu grupu tj. proces pretvaranja podataka u traženi format, za potrebe procesuiranja informacija<sup>[9]</sup>.

To uključuje:

- Sastavljanje i pokretanje programa
- Prijenos podataka, pohrana i kompresija/dekompresija
- Primjena obrade podataka<sup>[9]</sup>

Kod kodiranja se podrazumijeva upotreba kodova pri promjeni originalnih podataka u neki drugi format. Signal mora biti obrađen na način da sadrži prepoznatljive promjene i za pošiljaoca i za primaoca.<sup>[9]</sup>

Pošto postoje dvije vrste signala: digitalni i analogni, postoje četiri mogućih tehnika šifriranja:

- Digitalno u digitalno
- Digitalno u analogno
- Analogno u analogno
- Analogno u digitalno.

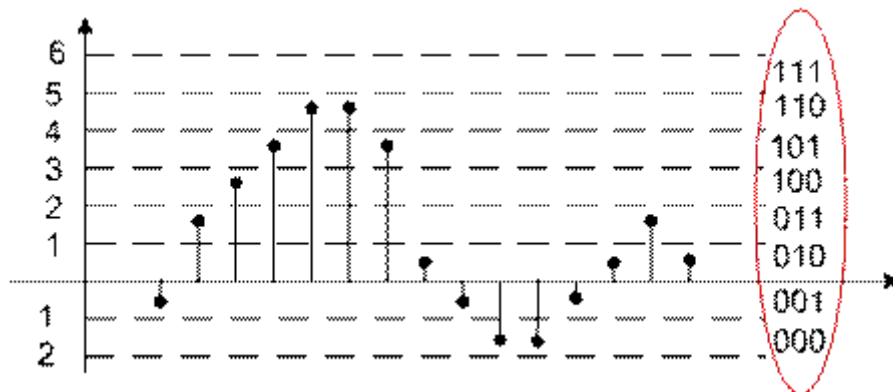
Digitalni signal predstavlja niz diskretnih impulsa. Svaki puls je jedan element signala. Binarni podaci se prenose šifriranjem. Prijemnik treba prepoznati vrijeme svakog bita, odnosno njegov točan početak i kraj.

A/D pretvarač s  $N$  izlaznih razina ima  $n$ -bitnu rezoluciju:  $n = \log_2(N)$  tj. potrebno je  $n$  bita za kodiranje  $N$  kodnih riječi za  $N$  diskretnih izlaznih razina. Razlika između digitalnih kodova dviju susjednih razina signala na izlazu kvantizatora/kodera je najmanje značajan bit (LSB – *Least Significant Bit*)  $n$ -bitne kodne riječi, tako da razlika dviju susjednih razina  $\Delta U$  odgovara LSB razlici digitalne kodne riječi<sup>[1]</sup>.

Prema formuli  $n = \log_2(N)$ , može se zaključiti da je za 8 bitnu informaciju potrebno 256 razina (amplituda) jer je  $2^8 = 256$ <sup>[2]</sup>.

Na slici je prikazao kodiranje kvantizacijskih razina. Kodna riječ se dodjeljuje svakoj razini kvantiziranja, pa se kvantiziranom uzorku dodjeljuje određeni broj bita, u ovom slučaju 3 bita

koji ju opisuju zato jer ima 8 kvantizacijskih razina. Tada se dobiva niz kodnih riječi koje odgovaraju nizu kvantiziranih uzoraka.



**Slika 8.** Kodiranje kvantizacijskih razina – skica

t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17
0001	0010	0010	0010	0010	0010	0001	1111	1110	1101	1100	1100	1101	1110	0000	0011	0101

**Slika 9.** Kodiranje- binarni izlaz

### 3.4. ITU-T G.711

Svi koderi obrađuju govor do frekvencije od 4 KHz. Svi ti koderi pokušavaju dosegnuti *toll quality* kvalitetu zvuka koja je karakteristična u klasičnoj telefonskoj mreži. MOS (*Mean Opinion Score*) predstavlja srednju vrijednost ocijene, a naziva se srednja iskustvena vrijednost.<sup>[22]</sup>

Razlikuju se tri vrste koderi govora: koderi valnog oblika (*waveform*), vokoderi i hibridni koderi. Koderi valnog oblika nisu kompleksni i osiguravaju visoku kvalitetu govora. Njihova najveća mana je ta da trebaju veliki frekvencijski pojas u odnosu na druge kodere. Ukoliko se ovi koderi koriste na suženom pojasu, kvaliteta im drastično pada. Tipični predstavnici ovih koderi su ITU-T G.711, poznatiji i kao PCM i G.726, poznatiji kao ADPCM (Adaptive Differential PCM).

Javni telekomunikacijski sustavi su 70-tih godina postajali sve veći i složeniji; tako su postali jedan od glavnih pokretača razvoja digitalne obrade govora. Dotadašnji pristup temeljen na

analognom prijenosu govornog signala više nije bio odgovarajući za sve veće potrebe, pa je digitalizacija sustava telekomunikacija postala neophodna. Složenost analognih centara postala je prevelika te je prijetilo zagušenje sustava. Digitalizacija se najprije provodila u telefonskim centralama, a s vremenom su i analogni telefoni zamijenjeni digitalnim. Nakon pojave digitalizacije telefonije došlo je do pojave mobilne telefonije- GSM i VoIP.

Poznati standardi kodiranja su PCM i ADPCM, a brzina prijenosa za PCM je od 64 kbit/s i za osnovni mod rada ADPCM kodera 32 kbit/s. Ti standardi se vode pod oznakama G.711 (PCM) i G.721, G.723, G.726, G.727 (ADPCM) i standardizirani su od strane međunarodnog tijela za standardizaciju telekomunikacijskog sektora ITU-T (*The Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunication Union*) [14].

Naime, diferencijalna pulsno kodna modulacija koristi visok stupanj korelacije među amplitudama susjednih uzoraka signala u slučaju govora, budući da isti sadrži visok stupanj zalihosti, te se može predvidjeti vjerojatna amplituda signala u promatranom trenutku na temelju poznavanja amplitude signala u dovoljno dugom, prethodnom vremenskom intervalu.

Važna karakteristika tih sustava kodiranja je ta da su to algoritmi koji žele valni oblik govornog signala što je moguće bolje prikazati i prenijeti na prijemnu stranu s ciljem vjerne reprodukcije. U tom smislu, kod tih kodera nije specijalno korištena činjenica da se radi o govornom signalu koji ima vrlo specifična svojstva, već se ti koderi kao takvi mogu koristiti i za prijenos drugih signala.

G.711 je definiran u dve varijante:

- a) *A law* – Europa i ostale zemlje osim Sjeverne Amerike i Japana
- b)  *$\mu$  law* – Sjeverna Amerika i Japan

U obje varijante se koristi neuniformna kvantizacija.

<b>A-law</b>	<b><math>\mu</math>-law</b>
$F(x) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(x) \frac{A \cdot  x }{1 + \ln(A)} & 0 \leq  x  \leq \frac{1}{A} \\ \operatorname{sgn}(x) \frac{1 + \ln(A \cdot  x )}{1 + \ln(A)} & \frac{1}{A} \leq  x  \leq 1 \end{cases}$	$F(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{\ln(1 + \mu \cdot  x )}{\ln(1 + \mu)} \quad -1 \leq  x  \leq 1$
<b>A = 86.7</b>	<b><math>\mu = 255</math></b>

**Slika 10.** A law i  $\mu$  law

Po preporuci ITU-IT G.711 oba kvadranta se aproksimiraju pomoću 8 linearnih segmenata s po 16 kvantizacijskih razina po segmentu. Budući da je širina prvog segmenta 1/128 pune ulazne dinamike, a širina posljednjeg segmenta 1/2 pune ulazne dinamike, očito je da se male amplitude puno gušće kvantiziraju <sup>[17]</sup>.

G.711 radi na 64 kbps i ima MOS (*Mean Opinion Score*) 4,3. Značajka govora je ta da se relativno polako mijenja tijekom vremena, pa je moguće procijeniti vrijednost uzorka govora na temelju prošlih uzoraka. Taj način govora koristi ADPCM. I prijemna i predajna strana rade predviđanje uzorka govora, s time da predajna strana računa i grešku između predviđenog i stvarnog uzorka. Ta greška se kvantizira i šalje na prijemnu stranu. Budući da su predviđanja govora prilično točna, potrebno je manje bitova za prijenos greške nego stvarnog signala. Druga strana koristi informaciju o greški s ciljem popravljivanja predviđenog signala. ADPCM na 32 kbps ima MOS 4,0. Koderi valnog oblika ne stvaraju algoritmično kašnjenje.

Prije obrade u G.711 koderu, govorni signal se filtrira (NF filter) i odabire frekvencijom od 8kHz po Nikvistovom kriteriju, jer je za prijenos govornog signala predviđen frekvencijski opseg od 4kHz. Naime, govornom signalu iz opsega 300-3400Hz pridodaju se zaštitni opsezi 0-300Hz i 3400-4000Hz. Odmjerci govornog signala (praktično impulsi govornog signala) se kodiraju s 8 bita, pa otuda i naziv PCM - impulsna kodna modulacija. A zakon kompresije podrazumijeva kodiranje odmjeraka s po 8 bita. Kao rezultat se dobiva digitalizirani govorni signal protoka 64kb/s (8 bita na svakih 125 $\mu$ s). <sup>[17]</sup>

ITU-IT G.711 propisuje širinu pojasa govornog signala od 4000Hz (300Hz - 3400Hz). Frekvencija uzorkovanja je određena kao dvostruka vrijednost širine pojasa, pa iznosi 8000Hz (dodani su pojasevi koji olakšavaju izvedbu antialiasing filtara). Množenjem 8000Hz s 8-bitama po uzorku (A-law ili  $\mu$ -law) dobije se zahtijevana propusna moć kanala za prijenos govora od 64 kbit/s<sup>[17]</sup>.

Kad se govorni signal digitalizira, tad se binarna digitalna predstava govornog signala može staviti u paket i to u korisni dio paketa. Kako bi se paketizirani govorni signal ispravno prenio na određite i tamo dekodirao, neophodno je koristiti usluge nižih slojeva (transportni, mrežni, sloj link podataka, fizički sloj). Stoga je potrebno definirati i adekvatne protokole, kao i koristiti već postojeće protokole koji će omogućiti ispravan prijenos paketiziranog govora kroz mrežu baziranu na komutaciji paketa.<sup>[20]</sup>

Tablica 2. prikazuje usporedbu standarda G.711 s ostalim standardima prema parametrima kompresije govora.

Metoda kompresije	Protok [kb/s]	Kompleksnost obrade [MIPS]	Veličina DSP okvira [ms]	MOS
G.711 PCM	64	0,34	0,125	4,1
G.726 ADPCM	32	14	0,125	3,85
G.728 LD-CELP	16	33	0,625	3,61
G.729 CS-ACELP	8	20	10	3,92
G.729 x2 encoding	8	20	10	3,27
G.729 x3 encoding	8	20	10	2,68
G.729a CS-ACELP	8	10,5	10	3,7
G.723.1 MPMLQ	6,3	16	30	3,9
G.723.1 ACELP	5,3	16	30	3,65

**Tablica 2.** Usporedba standarda prema parametrima kompresije govora

Kvaliteta govora za različite kodere obično se mjere subjektivnim testiranjem u kontroliranim uvjetima uz sudjelovanje većeg broja slušalaca te određivanjem subjektivne mjere za kvalitetu različitih kodera - MOS (*Mean Opinion Score*).

<b>Osjet kvalitete / Perception of quality</b>	<b>Ocjena / Rating</b>
<i>Izvrсна / Excellent</i>	5
<i>Dobra / Good</i>	4
<i>Zadovoljavajuća / Fair</i>	3
<i>Slaba / Poor</i>	2
<i>Loša / Bad</i>	1

**Tablica 3.** ITU skala za ocjenu kvalitete govornih signala

Neki od čimbenika koji imaju najviše utjecaja pri određivanju MOS-a za određene kodere su: efekt šuma okoline, efekt degradacije kanala (gubitak paketa) i efekt transkodovanja (digitalno-digitalna konverzija) uslijed rada s drugim mrežama, kako žičnim tako i bežičnim. MOS je najveći za PCM i iznosi 4,1 a smanjuje se povećanjem složenosti algoritma kompresije, tako da recimo za G.729 (CS-ACELP) iznosi 3,92, za G.723.r53 iznosi 3,65.



#### 4. PRIMJENE G.711

Primjena pulsno kodne modulacije koristi se već desetljećima u fiksnoj telefonskoj mreži.

Primjeri pulsno kodne modulacije: <sup>[3]</sup>

- LPCM (*Linear pulse-code modulation*) se koristi za uzorkovanje bez gubitaka zvučnog signala na kompaktnom disku.
- LPCM i PCM na računalu označava format koji se koristi u AIFF (*Audio Interchange File Format*) i WAV (*Waveform Audio File Format*) zvučnim formatima.
- LPCM je definira kao dio DVD i Blu-ray standarda.
- HDMI također koristi LPCM za prijenos nekomprimiranog digitalnog sadržaja.

Unatoč raznolikom korištenju PCM-a postoje problemi svakog sustava: <sup>[3]</sup>

- Izbor diskretne vrijednosti koja je blizu, ali nije identična jačini analognog signala za svaki uzorak može prouzročiti kvantizacijsku grešku.
- Obzirom da su uzorci ovisni o vremenu, potrebno je imati točno vrijeme za točnu reprodukciju. Ukoliko vrijeme uzorkovanja ili dekodiranja nije stabilno, frekvencijski pomak će direktno utjecati na izlaznu kvalitetu iz uređaja.

Kodiranje	kb/s	MOS	uporaba
LPC-10	2.4	2.3	robotika, sigurna telefonija
G.711	64.0	4.5	telefonija (A, u-law)
G.722	64.0		7kHz codec (subband)
G.723.1	5.3/6.3	3.8	videotelefon (ostatak kanala za video)
G.726	16-40		niska kompleksnost (ADPCM)
G.726	32	4.1	niska kompleksnost (ADPCM)
G.728	16.0	4.0	malo kašnjenje
G.729	8.0	4.0	mobilna telefonija
GSM	13.0	3.5	GSM (mobilna telefonija, Europa)
GSM EFR	12.2	4.0	GSM 2.5G
GSM HR	5.6	3.5	GSM 2.5G
IS 54/136	7.95	3.5	TDMA (Sj. Amerika mobile (stari std.))
IS 641	7.4	4.0	TDMA (Sj. Amerika mobile (novi std.))
MPEG L3	56-128.0	N/A	CD stereo
DVI	32.0	toll-quality	(Intel, Microsoft)
16 bit/44.1 kHz	1411		compact disc

**Tablica 4.** Pregled kodera govora i zvuka

## 4.1. MULTIPLEKSIRANJE

U elektronici, telekomunikacijama i računalnim mrežama multipleksiranje je proces u kojem se više analognih ili digitalnih signala kombinira u jedan signal i prenosi nekim prijenosnim medijem do željenog prijemnika. Temeljna zamisao multipleksiranja je korištenje jednog komunikacijskog kanala za prijenos većeg broja podatkovnih tokova istovremeno kako bi se povećala propusnost komunikacijskog kanala i iskoristivost medija prijenosa podataka. Kao i pri modulaciji, i kod multipleksiranja se iskorištavaju svojstva medija kojim se prenose podaci.

U slučaju kad postoji više signala koje treba prenijeti, vremensko multipleksiranje radi tako da od svakog uzme po malo. Na primjer, znači da 20  $\mu$ s uzima i prenosi signal broj jedan kroz prijenosni medij. Potom dolazi na red drugi signal. Multiplekser uzima 20  $\mu$ s i prenosi drugi signal. Tako stalno "uslužuje" svaki signal, dok od svakog signala ne bude prenešeno 20  $\mu$ s. Ciklus se ponavlja sve dok multiplekser potpuno ne prenese sve signale bez obzira na njihovo ukupno trajanje<sup>[10]</sup>.

Postoji asinkroni i sinkroni prijenos. Danas se u glavnini digitalnih komunikacijskih sustava koristi sinkroni prijenos pošto on omogućava prijenos bloka ili okvira podataka kao kontinuirani slijed bitova bez kašnjenja između njih.<sup>[12]</sup>

Multipleksiranje je prijašnjih godina dominantno korišteno u komunikacijama na velikim udaljenostima (long-haul communications), dok je danas prisutno čak i u nekim lokalnim mrežama LAN (*Local Area Network*) te u poslovnim mrežama (enterprise network).<sup>[12]</sup>

## 4.2. PDH - PLEZIOKRONA DIGITALNA HIJERARHIJA

Temeljem binarnog oblika informacija i njihovog vremenskog multipleksiranog odnosa između frekvencije taktova digitalnih pritoka koji dolaze u multipleksor razvija se digitalna hijerarhija PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*).

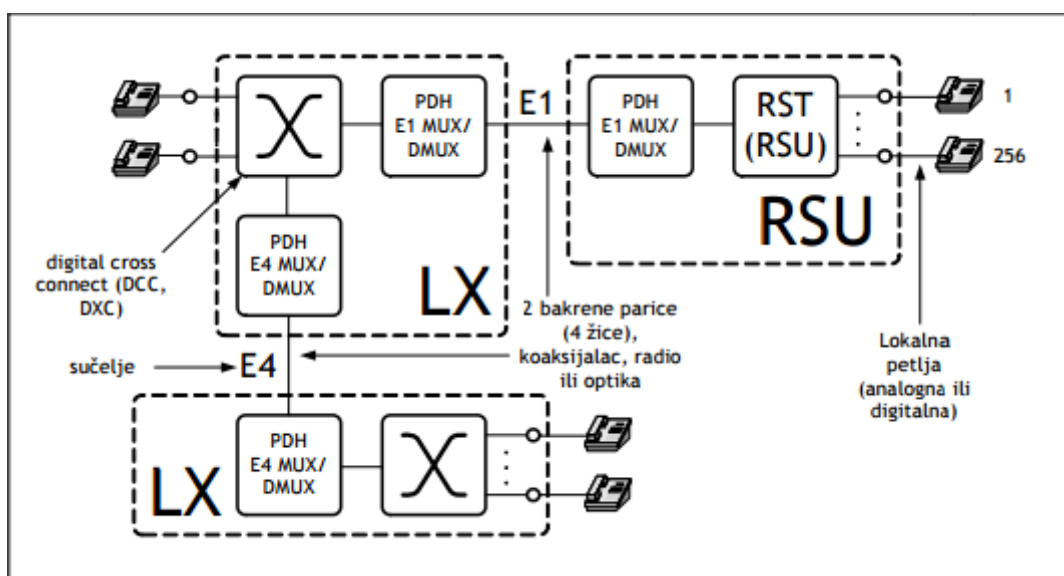
PDH se zasniva na vremenskom multipleksu, što znači da se dolazni signali smještaju u vremenske odsječke (okvire), tj. svaki signal koji dolazi sadrži posvećeni vremenski odsječak<sup>[13]</sup>. PDH je prvi sustav projektiran za prijenos digitalnog govora. Koristi se za vremensko multipleksiranje govornih kanala "bit po bit" radi zajedničkog prijenosa. On omogućuje prijenos podataka bez obzira na način na koji su nastali (prenosi i govor i podatke).<sup>[12]</sup>

PDH definira:

- Različite razine prijenosa,
- Brzine prijenosa podataka za svaku razinu,
- Broj govornih kanala po razini.

Niže razine su namijenjene spajanju korisničke opreme na mrežu, dok su više razine namijenjene prijenosu podataka unutar mreže. PDH je prvenstveno namijenjen prijenosu govornog prometa, a danas, u suvremeno doba, koristi se i za prijenos podataka.

Slika u nastavku donosi primjer uporabe PDH tehnologije.



**Slika 11.** Primjer uporabe PDH tehnologije

Multipleksiranje se odvija između susjednih razina. Osnovna vremenska jedinica standardnog sustava s vremenskim multipleksiranjem te prvobitnom namjerom za prijenos govornih kanala kodiranih s PCM-om je vremenski okvir od 125  $\mu$ s. Početna brzina prijenosa je brzina prijenosa digitalnog govornog signala od 64 kbit/s (svaki znak ima 8 bita)<sup>[10]</sup>.

Principi multipleksiranja su bit po bit (*bit interleaving*) ili kanal po kanal (*channel interleaving*).

Po naznačenim informacijama se može izvesti zaključak da druga razina multipleksiranja (E2) u europskoj PDH hijerarhiji nastaje multipleksiranjem četiri E1 kanala. Brzina prijenosa je 8.448 Mbit/s. U multipleksirani signal dodaju se biti za sinkronizaciju, signalizaciju i oporavak u slučaju gubitka sinkronizacije, pa je brzina prijenosa veća.<sup>[12]</sup>

Treća razina multipleksiranja (E3) nastaje multipleksiranjem četiri E2 kanala. Brzina prijenosa je 34.368 Mbit/s. Četvrta razina multipleksiranja (E4) nastaje multipleksiranjem četiri E3 kanala. Brzina prijenosa je 139.264 Mbit/s.<sup>[12]</sup>

PCM-ove višeg reda moguće je prikazati tablicom 5.

Sustav	Brzina prijenosa [ <i>Kb/s</i> ]
E1 (32*64 Kb)	2048
E2 (4*E1)	8448
E3 (4*E2)	34368
E4 (4*E3)	139264
T1	1544
T2	6312
T3	44736

**Tablica 5.** PCM-ovi višeg reda

### 4.3. SDH – SINKRONA DIGITALNA HIJERARHIJA

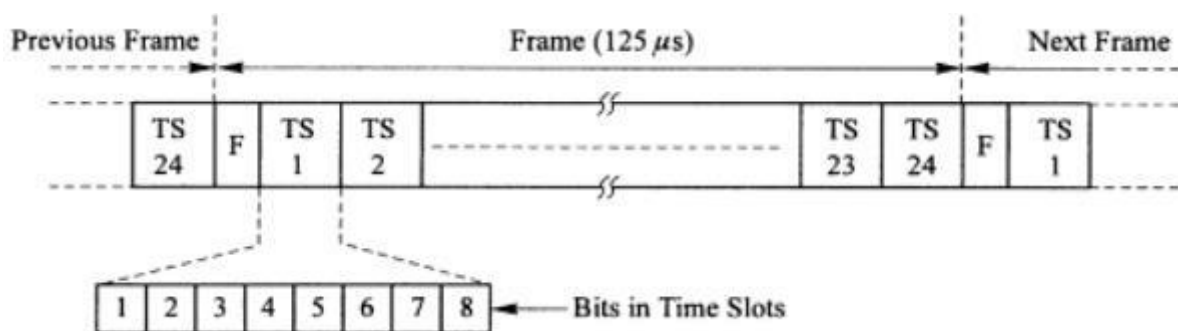
Sinkrona digitalna hijerarhija nadmašuje većinu problema i nedostataka pleziokrone digitalne hijerarhije (PDH). SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) podržava: kontrolu veza s kraja na kraj, jednostavnije multipleksiranje i demultipleksiranje umetanjem okteta, uvijek moguć pristup do pojedinog kanala, omogućujući pritom i centralizirani nadzor mrežnih elemenata, što osobito može biti korisno pri detekciji i rješavanju problema kvarova u mreži. <sup>[18]</sup>

Važna prednost SDH je ta da se temelji na direktnom sinkronom multipleksiranju te je zato pogodna za ekonomičan i fleksibilan rad u mreži. SDH omogućuje fleksibilan transport signala te rad u mreži uređajima različitih proizvođača.

### 4.4. PCM-OVI VIŠEG REDA

PDH 0. razina je osnovna jedinica u tom digitalnom prijenosnom sustavu gdje se koristi 64 kbit/s kanal. Taj prijenosni sustav u europskom standardu nazivamo E0. Imaju dva standarda za transmisijske sustave prvog reda: T1 sustav koji se uglavnom koristi u SAD-u, i E1 sustav koji se koristi u većini drugih zemalja svijeta<sup>[12]</sup>.

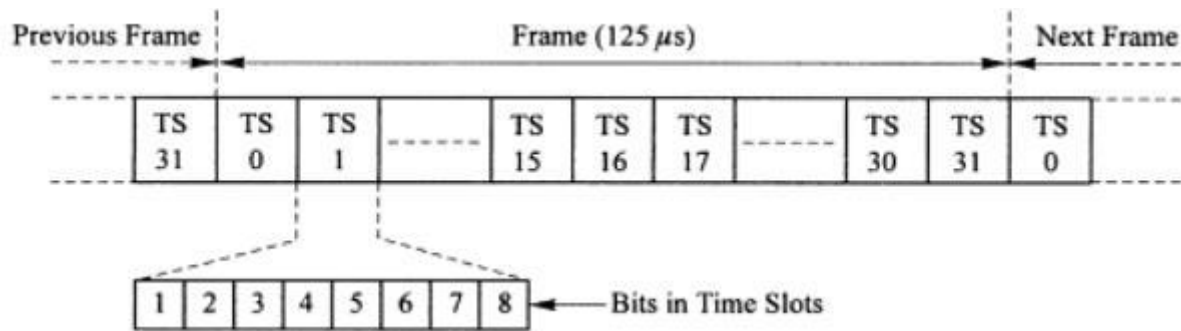
Svaki okvir je podijeljen u određeni broj 8 bitnih vremenski podijeljenih kanala koji se zovu time slots (TS). Ti kanali sadrže PCM uzorke u individualnim odjeljcima<sup>[12]</sup>.



Slika 12. T1 sustav

**T1 okvir** sastoji se od 24 time slota i okvirnog bita (F). Duljina okvira je  $1 + 8 * 24 = 193$  bita, a transmisijska stopa je  $193 * 8000 \text{ b/s} = 1544 \text{ Kb/s}$ <sup>[10]</sup>.

E1 okvir sadrži 32 8-bitna „*Time slot*“ je vremenski okvir. Nulti vremenski okvir se koristi za sinkronizaciju okvira, a šesnaesti je predviđen za prijenos signalizacijskih informacija. Ako se šesnaestim vremenskim okvirom ne prenose signalizacijske informacije, onda se koristi kao govorni kanal. Prema tome, E1 okvir ima  $32 \cdot 8 = 256$  bita, i transmisijsku stopu  $8000 \cdot 256 = 2048$  Kb/s. <sup>[12]</sup>



Slika 13. E1 sustav

## 5. ZAKLJUČAK

Preporuka G. 711 definira postupke kojim se analogni izvorni signal pretvara u digitalni i obratno. Ona se primjenjuje se već duže vrijeme u telekomunikacijskim sustavima, što ne znači da je zastarjela. Prednosti uvođenja digitalnog prijenosa su brojne, poput imunosti na smetnje i neovisnosti o udaljenosti.

Pulsno kodna modulacija (PCM), kao metoda pretvorbe signala, prilagođena je karakteristikama govornog signala. U radu je prikazano kako se postupak nastanka PCM-a odvija u tri osnovna koraka: uzorkovanje, kvantiziranje i kodiranje. Svaki od tih triju koraka opisan je u zasebnom poglavlju. Što se uzorkovanja tiče, ono se provodi prema teoremu uzorkovanja. Tim se postupkom analogni kontinuirani signal može pretvoriti u slijed vremenski diskretnih impulsa i obrnuto. I dok uzorkovanje predstavlja diskretiziranje signala po vremenskoj bazi, kvantiziranje obuhvaća diskretiziranje signala po trenutnoj vrijednosti amplitude. Treba istaknuti da prilikom prenošenja signala iz procesa uzorkovanja u proces kvantiziranja dolazi do gubitka određenih informacija ulaznog signala, što je i logično zbog uzimanja najbliže, unaprijed zadane vrijednosti. Zadnji od triju predstavljenih koraka sa sobom donosi upotrebu kodova, kako mu i sam naziv govori. Poglavlje pod naslovom „Kodiranje“ otkriva da se kvantizirani signal pretvara u binarno kodnu grupu, a diskretna vrijednost signala u binarni broj.

Primjene G. 711 ne mogu se odvojeno promatrati bez multipleksiranja, plesiokrone i sinkrone digitalne hijerarhije. Multipleksiranje podrazumijeva višestruki prijenos po istom mediju na način da svaki signal smjestimo u dio dimenzije informacijskog prostora. Može se reći da je to proces kombiniranja više signala (analognih ili digitalnih) za prijenos po jednom fizičkom mediju. PDH se zasniva na vremenskom multipleksu te je kao takav prvi sustav projektiran za prijenos digitalnog govora. Prate ga različiti nedostaci koje, s druge strane, rješava SDH. SDH omogućuje fleksibilan transport signala te rad u mreži uređajima različitih proizvođača.

Možemo zaključiti da je pulsno kodna modulacija koristan proces za suvremenu tehnologiju. Premda je u upotrebi preko 40 godina i ima brojne prednosti, budućnost joj je osigurana.

## LITERATURA

- [1] Materijali sa predavanja i laboratorijskih vježbi
- [2] [http://eskola.hfd.hr/pc\\_kut/tuzork/](http://eskola.hfd.hr/pc_kut/tuzork/)
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-code\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-code_modulation)
- [4] [http://marjan.fesb.hr/~radic/ksip\\_0708/ksl\\_0708ch5.html](http://marjan.fesb.hr/~radic/ksip_0708/ksl_0708ch5.html)
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization\\_%28signal\\_processing%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantization_%28signal_processing%29)
- [6] [http://care.iitd.ac.in/Academics/Courses/crp\\_718/exp\\_sp\\_2.pdf](http://care.iitd.ac.in/Academics/Courses/crp_718/exp_sp_2.pdf)
- [7] <https://www.techopedia.com/definition/948/encoding>
- [8] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kvantizacija>
- [9] <https://bs.wikipedia.org/wiki/Kodiranje>
- [10] John G. Von Bosse – Signaling in Telecommunication Networks
- [11] <http://documents.tips/documents/02multipleksiranje.html>
- [12] [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/%5Blab01%5D\\_PDHLab\\_Script\\_-\\_prosirena.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/%5Blab01%5D_PDHLab_Script_-_prosirena.pdf)
- [13] Hižak D., Mikac M. Razvoj jednostavnog alata za analizu zvuka na mobilnoj Android platformi, Tehnički glasnik Vol. 7, No. 2, 2013., str. 177-181.
- [14] <http://dog.zesoi.fer.hr/predavanja/pdf/skripta.pdf>
- [15] [http://www.audiologs.com/ozrenbilan/03\\_DSP.pdf](http://www.audiologs.com/ozrenbilan/03_DSP.pdf)
- [16] [https://www.fer.unizg.hr/download/Koristenje\\_podrhtavanja\\_u\\_poboljsanju\\_signala.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/Koristenje_podrhtavanja_u_poboljsanju_signala.pdf)
- [17] <http://pvprm.zesoi.fer.hr/1999-00-web/1999-00-seminari/vvisnjic/adpcm/index.html>
- [18] <https://bib.irb.hr/datoteka/51115.Mikac.pdf>
- [19] <http://www.informatika.buzdo.com/s055-kod-kodiranje.htm>
- [20] [telekomunikacije.etf.rs/predmeti/te4ks/docs/KS/KS\\_08.pdf](http://telekomunikacije.etf.rs/predmeti/te4ks/docs/KS/KS_08.pdf)
- [21] <http://www.fpz.unizg.hr/ztos/PRSUS/Modulacija.pdf>
- [22] <http://www.gradimo.hr/clanak/tehnike-kodiranja-glasa/25448>



## POPIS KRATICA

PCM	Pulse Code Modulation
A/D	analog/digital
DM	Delta Modulation
PAM	Pulse amplitude modulation
CD	compact disk
SNR	signal to noise ratio
LSB	least significant bit
ADPCM	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
ITU-T	The Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunication Union
MOS	Mean Opinion Score
LPCM	Linear pulse-code modulation
AIFF	Audio Interchange File Format
WAV	Waveform Audio File Format
LAN	Local Area Network
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
FDM	Frequency division multiplex

## POPIS SLIKA I TABLICA

### Stranica:

<b>Slika 1.</b> Komunikacijski sustav	4
<b>Slika 2.</b> Pulsno kodna modulacija (PCM)	7
<b>Slika 3.</b> PCM komunikacijski sustav	9
<b>Slika 4.</b> Uzorkovanje	10
<b>Slika 5.</b> Uzorkovanje – skica	11
<b>Slika 6.</b> Kvantizacija – skica	13
<b>Slika 7.</b> Nastajanje šuma kod nelinearnog kvantiziranja	14
<b>Slika 8.</b> Kodiranje – skica	18
<b>Slika 9.</b> Kodiranje- binarni output	18
<b>Slika 10.</b> A law i $\mu$ law	20
<b>Slika 11.</b> Primjer uporabe PDH tehnologije	25
<b>Slika 12.</b> T1 sustav	27
<b>Slika 13.</b> E1 sustav	28
<b>Tablica 1.</b> Primjena PCM-a	8
<b>Tablica 2.</b> Usporedba standarda prema parametrima kompresije govora	21
<b>Tablica 3.</b> ITU skala za ocjenu kvalitete govornih signala	22
<b>Tablica 4.</b> Pregled kodera govora i zvuka	23
<b>Tablica 5.</b> PCM-ovi višeg reda	26

## **SAŽETAK**

G.711 definira postupke kojim se analogni izvorni signal pretvara u digitalni i obratno, a primjenjuje se već dugo u telekomunikacijskim sustavima. Pulsno kodna modulacija (PCM), kao metoda pretvorbe signala, prilagođena je karakteristikama govornog signala. PCM se odvija u tri osnovna koraka, a to su uzorkovanje, kvantiziranje i kodiranje. Kod uzorkovanja analogni kontinuirani signal se može pretvoriti u slijed vremenski diskretnih impulsa i obrnuto. Kvantiziranje obuhvaća diskretiziranje signala po trenutnoj vrijednosti amplitude. Kodiranje nam pokazuje da se kvantizirani signal pretvara u binarno kodnu grupu, a diskretna vrijednost signala u binarni broj. Primjena G.711 se ne može promatrati bez multipleksiranja u vremenu, plesiochrone i sinkrone digitalne hijerarhije.

## **SUMMARY**

G.711 defines the procedures by which the original analog signal is converted to digital and vice versa, and applies for a long time in telecommunication systems. Pulse code modulation (PCM) as a method of converting the signal, adapted to the characteristics of the speech signal. PCM takes place in three steps, namely sampling, quantization and coding. When sampling a continuous analog signal can be converted into a sequence of discrete pulses, and vice versa. Quantitation includes discretization signal at the current value of the amplitude. The coding shows that the quantized signal is converted into a binary code group, a discrete value of the signal into a binary number. Application G.711 can not be viewed without time division multiplexing, plesichronous and synchronous digital hierarchy.

## **ŽIVOTOPIS**

Tin Stakor rođen u Zagrebu 05. veljače 1994. godine. Osnovno obrazovanje stekao u OŠ „Matija Gubec“ Gornja Stubica u razdoblju od 2000, do 2008. godine. Srednju školu pohađao u Oroslavju, smjer Računalni tehničar za strojarstvo. Po završetku srednje škole 2012, godine zapošljava se u firmi „EPO“ (energetsko procesna oprema) kao CNC operater. Elektrotehnički fakultet u Osijeku, smjer Informatika upisuje 2013. godine, kojeg trenutno i pohađa.