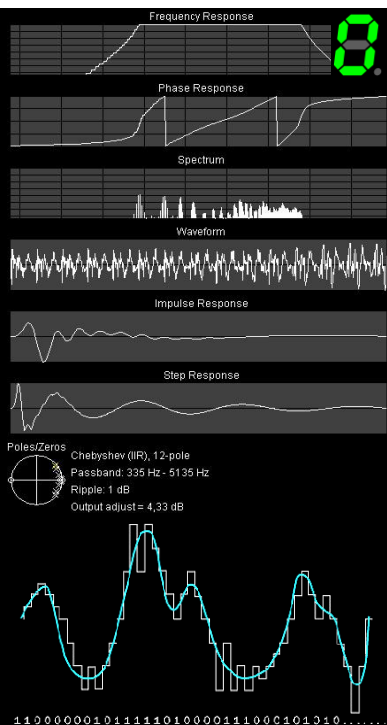


Digitalna audio tehnika

- 1 Uvod u elektroakustiku
- 2 Fiziološka i psihološka akustika
- 3 Buka i karte buke
- 4 Akustika prostorija
- 5 Mikrofoni
- 6 Elektrodinamički zvučnici
- 7 Zvučnici u kutiji i filtri
- 8 Pojačala snage
- 9 Digitalna elektroakustika
- 10 Analogno i digitalno snimanje zvuka
- 11 Projektiranje sustava ozvučenja
- 12 Mjerenja u elektroakustici

U PDF inačici nisu vidljive animacije



Što označava pojam **digitalno** ?

Pojam **digitalno** predstavlja **kvantitetu u numeričkom obliku**, a analogno označava **kontinuiranu fizikalnu količinu**.

Pojam *pretvoriti u digitalni oblik* znači pretvoriti **analognu fizikalnu količinu u numeričku vrijednost**.

Ako kontinuirano promjenjive razine zvučnog tlaka prikazemo brojevima, možemo kazati da smo razinu zvučnog tlaka prikazali digitalno.

Točnost pretvorbe ovisi o **broju diskretnih vrijednosti**, kao i o **brzini kojima opisujemo promjene analogne amplitude**.

Tako će 4 razine prikazati promjene amplitude manje točno od 256 razina. Brzina od 8 pretvorbi u numerički oblik u sekundi bit će manje točna od 10000 pretvorbi u sekundi.

DIGITALNA AUDIO TEHNIKA

Razlozi potrebe

Cjelokupno područje **analognog** (zato što je naponski valni oblik analogna slika vala zračnog tlaka) **zvučnog signala** temeljeno je na zajedničkoj premisi: **reprodukcija audio signala mehaničkim ili elektromagnetskim kontaktom s medijem**. Nakon 100 godina od početka, analogna audio tehnika došla je do vrhunca i sva unapređenja koja su se mogla primijeniti zahtijevala su izuzetna financijska ulaganja.

Vlastita priroda analognih signala dovodi do nedostataka. U analognom području **dopušten je bilo koji valni oblik** signala pa sustav reprodukcije ne razlikuje korisni signal od šuma i izobličenja. U analognom sustavu svaka kopija povećava šum, što je povezano sustavom snimanja i reprodukcije - neposredni fizički kontakt s medijem - nositeljem informacije koji se radom oštećuje. Analogni lanac za reprodukciju ima šum i izobličenja koji su jednaki sumi svih pojedinih elemenata u lancu uređaja. Analogni sustavi imaju nepravilni frekvencijski odziv, ograničeno dinamičko područje i relativno malu separaciju kanala što djeluje na prostorne slike.

Javila se potreba za novim tipom audio formata. Teoretske osnove već su postojale, ali bio je potreban razvoj tehnologije kako bi se znanje primijenilo u praksi. Za prijenos ili pohranu valova zvučnih signala koristila se promjena napona ili magnetske energije koja je bila analogna promjeni zvučnog tlaka zvučnog signala. Analogni signal u praksi se pokazao jako dobrim, ali na njega štetno djeluje niz čimbenika, od kojih najviše neželjeni šum.

Tada se netko sjetio da bi analogni signal bilo najbolje sačuvati pri snimanju, prijenosu i obradi, **tako da se prikaže nekim drugim, alternativnim načinom**.



Fonograf iz 1871.

Victor's
HORN TYPE
TALKING
MACHINES



19.00

22.9.2013.

Ozren Bilan

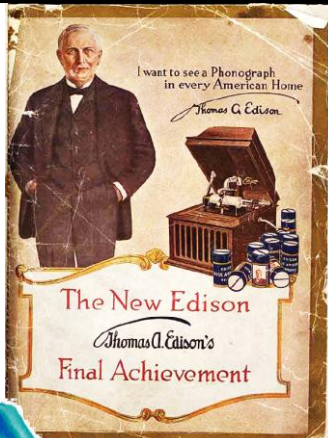
EDISON



18 μ m

1 mm

0.912 mm



I want to see a Phonograph
in every American Home

Thomas A. Edison

The New Edison

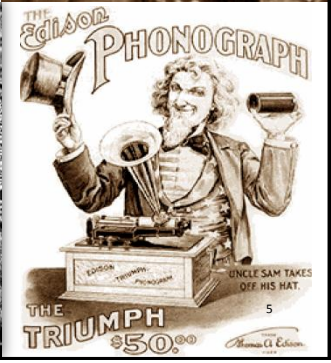
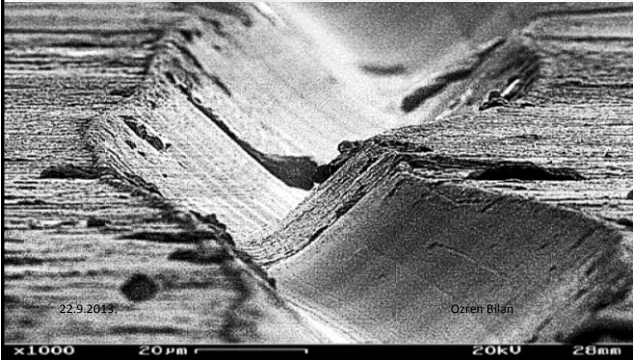
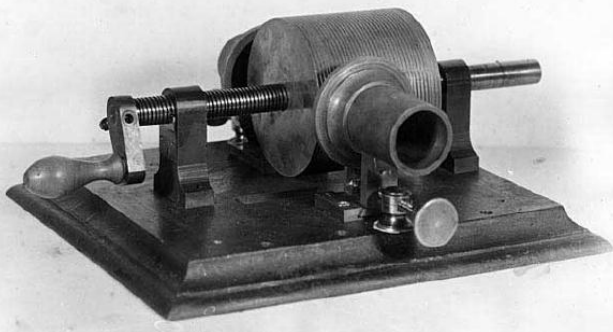
Thomas A. Edison's

Final Achievement

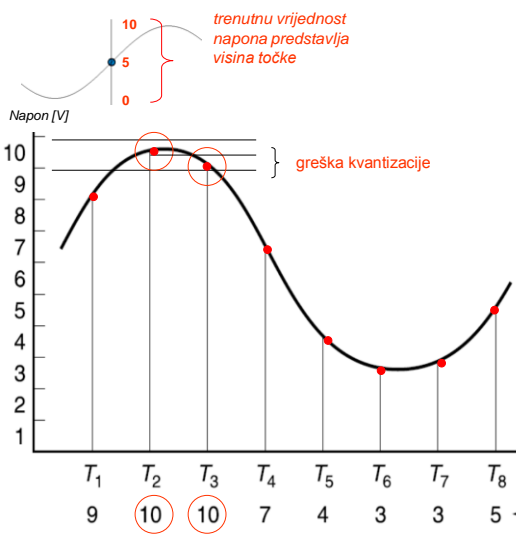
22.9.2013.

Ozren Bilan

4



Alternativni način pohrane i prijenosa



Postoji veliki broj načina prikaza audio signala u digitalnom obliku. Najviše se koristi **modulacija impulsnog koda (PCM)**. Slika prikazuje princip rada **PCM**.

Vremenska os nije kontinuirana nego diskretna jer prikazuje koračnu vremensku promjenu napona. Postupak se naziva **uzorkovanje**, a frekvencija kojom se uzimaju uzorci naziva se **frekvencija uzorkovanja f_s** .

f_s je **nepromjenjiva i neovisna o frekvenciji signala**. Održavamo li **f_s** konstantnom, svi uzorci se uzimaju u jednakom vremenskom intervalu. Tako ne dolazi do **pojave nestabilnosti ili jittera**. Ako zbog nekih smetnji, uzorci stižu na odredište u nejednakim intervalima, to se lako otkriva i situacija se može popraviti **pohranom uzoraka** u neku privremenu memoriju i njihovim čitanjem korištenjem lokalnog takta. Proces nazivamo **ispravak vremenske baze** **timebase correction** koji u potpunosti eliminira **jitter**.

Uzimanje uzorka je analogni proces. Svaki uzorak mijenja se beskonačno kao i izvorni valni oblik. Može se pomisliti kako uzorkovanje signalu nešto oduzima, jer se gubi dio signala između uzoraka. To bi bilo točno u sustavu koji ima beskonačnu širinu frekvencijskog područja ali ni jedan analogni sustav nije takav.

(PCM) Impulsnu kodni modulirani signal periodično mjeri analogni valni oblik frekvencijom uzimanja uzoraka. Napon predstavljen visinom na dijagramu opisuje se cijelim brojem. Umjesto valnog oblika onda se pohranjuju ili prijenose cijeli brojevi.

A/D pretvorba

Prvi korak pri postupku pretvaranja analognog signala u digitalni sastoji se u **uzimanju uzoraka** toga signala po **Nyquistovom teoremu**. Frekvencija uzimanja uzoraka signala, f_s , treba biti

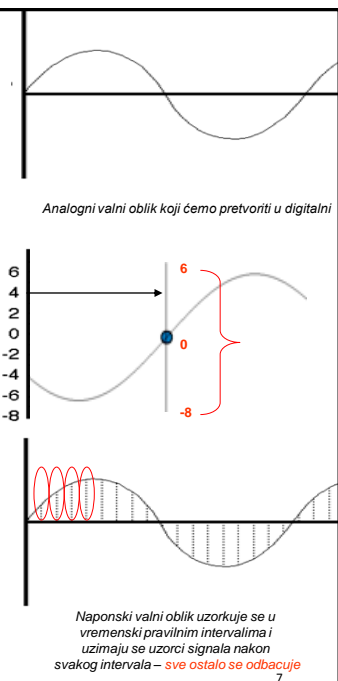
$$f_s > 2f \text{ ili } T_s < T/2$$

Izvorni analogni signal treba biti **pojasno ograničen na polovinu frekvencije uzimanja uzoraka**, a izlazni signal također treba filtrirati **idealnim nisko-propusnim filtrom**. Ako se to ne napravi, nastaju efekti **aliasa**.

Trenutna vrijednost svakog uzorka se **pohranjuje**, a sav ostali dio signala se odbacuje. Sustav koji izvršava ovu operaciju poznat je kao **sklop za uzorkovanje i zadržavanje** (*sample hold*) jer on uzima uzorke izvornog valnog oblika i zadržava razinu uzorka, sve dok se ne pojavi idući uzorak

22.9.2013.

Ozren Bilan



Mjerenje uzoraka

Uočavamo kako se sačuvao osnovni oblik izvornog vala, ali su se izgubili detalji. Konačni cilj je prikazivanje izvornog signala slijedom brojeva, koji će prikazivati izmjerenu vrijednost svakog uzorka.

Idući korak je mjerenje svakog uzorka. Problem je što mjerilo kojim ćemo obaviti mjerenje uzoraka nije apsolutno točno.

Iako s metrom možemo izmjeriti dužinu vrlo precizno, ipak s običnim metrom nije moguće točno izmjeriti dužinu nečega što je dugo npr. 2.3456789 mm. Isti problem nastaje pri digitalizaciji audio signala.

Često se govori kako analogni signali imaju beskonačnu rezoluciju. Međutim, šum unosi ograničenja i analognih signala.

22.9.2013.

Ozren Bilan



8

Kvantizacija

Kako bi svaki uzorak prikazali binarnom serijom bitova, beskonačno promjenjivoj naponskoj amplitudi analognog signala treba pridijeliti diskretnu vrijednost. Taj postupak nazva se - *kvantizacija*.

Postupke **uzimanje uzoraka i kvantizaciju** kraće nazivamo - **digitalizacija**.

U 16-bitnom (CD) audio formatu moguće je sinusoidalno promjenjivi napon predstaviti s $2^{16} = 65.536$ diskretnih razina.

Kvantizacija je ograničavajući faktor pri analogno digitalnoj pretvorbi. Jer se susrećmo s donošenjem odluke: **s koliko ćemo bitova predstaviti uzroke pri pretvorbi ?**

Na tu odluku djelovat će **kvaliteta signala** i granice **dostupnih tehnologija**, kao i **cijena sustava**. Dok je, teoretski promatrano, uzorkovanje signala teoretski idealno, **proces kvantizacije unosi greške**, bez obzira o tome koliko su idealni svi ostali dijelovi sustava.

Kvantizacijska greška

Zamislimo da mjerimo napon digitalnim voltmetrom sa samo 3 znamenke. Ako voltmetar pokazuje 220V, taj napon može biti bilo koji od 220.000 do 220.999.

Slično je i s kvantizerom digitalnih audio sustava. Pri kvantizaciji sustav određuje razinu kojoj pripada napon promatranog uzorka. **Veličina greške nikad ne prelazi polovinu napona najmanje značajnog (LSB) bita u digitalnoj riječi**. Mjera greške pri pretvaranju u digitalni oblik izražava se omjerom signala i greške, a određena je relacijom:

$$S/E = 6.02 n + 1.76 \text{ dB}$$

gdje je n broj bitova. Dakle, teoretski omjer signala i greške u 16 bitnom sustavu je oko 98 dB.

Ta vrijednost je teoretska i u praksi će biti nešto veća ili manja, već prema utjecaju niza faktora koji djeluju na nju. U većini slučajeva greška kvantizacije pokazat će se kao **šum pri visokim razinama signala**.

U okolišu **LSB** greška postaje signal

Na vrlo malim razinama, u okolišu *LSB*, greška kvantizacije postat će signal; tj. čujna komponenta izlaza.

Kako bi se greška kvantizacije što više smanjila, uvodi se *dither šum*.

Kao što je prikazano na slijedećoj slici, vrijednost uzorka vrlo se rijetko poklapa s točnom razinom mjernog sustava.

Vratimo li se na trenutak mjerilu, kojim trebamo izmjeriti nešto što je dugo 2.3456789 mm, najbolje nam je tu vrijednost zaokružiti na najbliži milimetar. Najveća greška koju u tom slučaju možemo napraviti je oko 0.5 mm. **Isto radi i sklop za mjerenje - on zaokruži vrijednost napona na najbližu, njemu poznatu vrijednost.**

Postupak zaokruživanja razine signala zove se *kvantizacija*. Signal se mijenja s beskonačne rezolucije na konačnu.



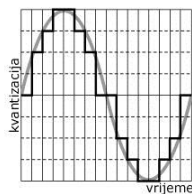
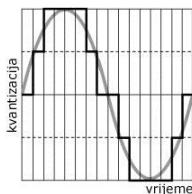
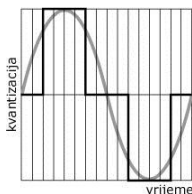
Kvantizacijski šum

Nastaje li pri tome greška u odnosu na analogni signal? Naravno da nastaje i zove se *greška kvantizacije*. Ali ako je nastala greška manja od razine šuma u analognom sustavu, sa sigurnošću možemo kazati kako signal nije ništa izgubio.

Greška kvantizacije na izlazu digitalnog sustava može se primijetiti kao šum. Taj šum naziva se *kvantizacijski šum*.

Da bi greška kvantizacija bila što manja, signal je potrebno podijeliti u što više diskretnih razina.

Tim dijeljenjem nastala greška pri zaokruživanju vrijednosti je sva manja i manja. CD pri kvantizaciji ima 65.536 mogućih razina signala, a sustav koji smo uzeli za primjer ima samo 16 mogućih razina.



Svaki bit doprinosi 6dB

Signal kvantiziran idealnim n-bitnim pretvaračem postojat će u 2^n kvantnih razina. Ako je Q korak kvantiziranja, vršna vrijednost napona bit će:

$$V_{vršno} = 2^{n-1} Q$$

Efektivna vrijednost sinusnog napona je onda:

$$V_{eff} = Q 2^{n-1} / 2^{1/2}$$

Energiju šuma kvantizacije možemo odrediti pomnožimo li energiju zadane greške s vjerojatnošću njenog pojavljivanja i integriranjem u granicama intervala kvantizacije:

$$E_{šuma} = \int_{-Q/2}^{Q/2} x^2 P(x) dx$$

Iz čega slijedi:

$$V_{šuma} = Q/12^{1/2}$$

Slijedi poznata relacija da se omjer signala i šuma izražava kao:

$$signal/šum = 6.02 n + 1.7609$$

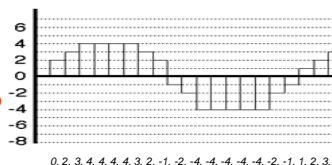
Svaki bit doprinosi približno 6 dB odnosa signal/šum.

Sada imamo digitalni signal i vrijednosti su mu:

0, 2, 3, 4, 4, 4, 4, 3, 2, -1, -2, -4, -4, -4, -4, -4, -2, -1, 1, 2, 3.

Vrijednosti se **memoriraju ili prenose sustavom kao digitalni oblik** izvornog analognog signala.

Pretpostavimo da smo prenijeli ili zapisali sve brojeve u digitalnom sustavu. **Kako ćemo dobiti analogni audio signal?** Potreban je sklop koji će pobuđen brojevima na svom izlazu dati naponski oblik jednak izlazu kvantizacijskog sklopa.



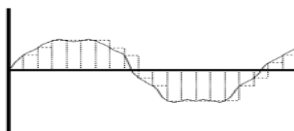
Usporedimo li oblike analognog signala i kvantiziranog digitalnog signala uočit ćemo kako je najveća razlika u zaobljenosti i nagibu valnih oblika. **Digitalni oblik ima vrlo oštre kutove, a analogni oblik je vrlo zaobljen.** Postojanje oštarih oblika u signalu ukazuje na postojanje vrlo visokih frekvencijskih komponenti u signalu. Bez visokih frekvencija nema oštarih kutova.

D/A pretvorba

Ako digitalnom signalu eliminiramo visoke frekvencije, otklonit ćemo oštre rubove. To se vrši filtrom koji ne propušta visoke frekvencije, a takav filter u teoriji sklopova zove se **nisko propusni filter**. Međutim, kako u digitalnoj tehnici ima posebnu namjenu **rekonstrukcije analognog valnog oblika**, nazivamo ga **rekonstrukcijski filter**.

Pomaže da od stepeničastog valnog oblika ponovo dobijemo zaobljeni analogni signal.

Kao što se lako može primijetiti, izlaz je kontinuirani valni oblik bez oštih bridova. Također primjećujemo kako nije potpuno identičan ulaznom valnom obliku. Ovaj primjer ima **vrlo veliku kvantizacijsku grešku zbog korištenja samo 8 razina**. U profesionalnoj tehnici ovako loši rezultati ne postoje.



Naponski oblik na izlazu rekonstrukcijskog filtera

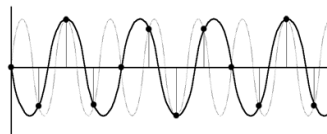
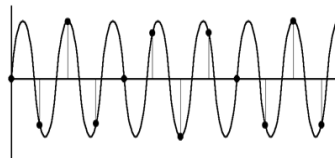
Alias

Ako valni oblik ima manje od dva uzorka po periodu vala, tj. frekvencija vala je veća od jedne polovine frekvencije uzimanja uzoraka nastaju problemi.

Za iste uzorke možemo *provući* drugi valni oblik iste amplitude, a različite frekvencije - niže od izvornog valnog oblika.

Alias je problem koji nastaje zbog toga što za isti broj uzoraka možemo dobiti dva valna oblika.

Kako se to ne bi događalo, potrebno je da frekvencija uzimanja uzoraka bude veća od dvostruke frekvencije najviše frekvencijske komponente analognog signala kojeg pretvaramo u digitalni oblik. **Nyquistov teorem** daje frekvenciju uzimanja uzoraka. Kažemo, **minimalna frekvencija uzimanja uzoraka treba biti viša od Nyquistove frekvencije.**



Kako prenijeti audio spektar?

Ako je **najviša frekvencija koju čujemo 20.000 Hz**, treba audio signalu uzimati uzorke **frekvencijom malo većom od 40 kHz**. Alias je pogreška odziva u obliku čujnog izobličenja, koja se javlja ako ne zadovoljimo uvjete *Nyquistovog teorema*. To je modulacija koja stvara nove u čujnom području prema relaciji:

$$f_* = \left| f - \frac{(k+1)f_*}{2} \right| \quad \frac{kf_*}{2} \leq f \leq \frac{(k+2)f_*}{2}$$

gdje je f_a frekvencija aliasa a, f je stvarna frekvencija, a k je neparni broj koji zadovoljava nejednadžbu. Pri frekvenciji uzimanja uzoraka od **44.1 kHz**, signal frekvencije **23 kHz** stvorit će produkte aliasa na frekvenciji **21.1 kHz**. Zbog toga digitalni elektroakustički uređaji koriste **filtre s vrlo oštom karakteristikom propuštanja**.

Potreba za propuštanjem signala kroz niskopropusni filter nakon D/A pretvorbe možda nije odmah jasna. Međutim, zamislimo situaciju u kojoj je frekvencija analognog signala jednaka polovini frekvencije uzimanja uzoraka. Nastat će dva uzorka, ali D/A pretvarač to će predstaviti kvadratnim valnim oblikom iste frekvencije.

Izlazni i ulazni niskopropusni *anti-aliasing* filter

Teorem Furierove transformacije daje da se kvadratni valni oblik sastoji od beskonačnog broja harmonika. **To znači da će D/A pretvarač generirati frekvencije koje nisu postojale u izvornom valnom obliku.**

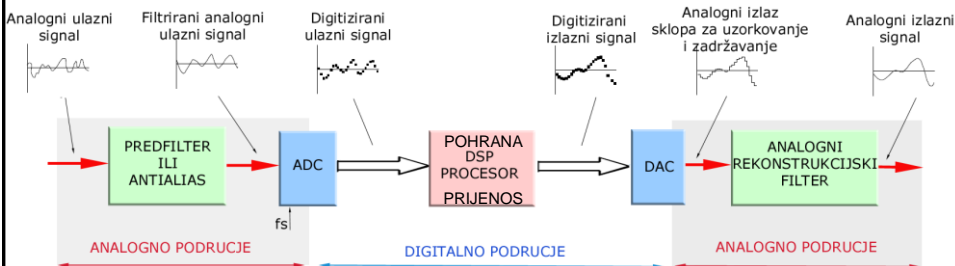
Budući da smo ulazni analogni valni oblik frekvencijski ograničili, razumno je **izlazni signal ponovno propustiti kroz isti niskopropusni filter**, koji će eliminirati sve frekvencije koje nisu postojale u ulaznom analognom signalu.

Potrebno je osigurati i to da ne bi neka neželjena frekvencija u audio signalu upala u analogno digitalni pretvarač.

Zbog toga se signali koji se digitaliziraju propuštaju PRIJE PRETVORBE kroz **vrlo oštri filter** koji se naziva *anti-aliasing* filter ili **predfilter**.

Taj filter, uslijed svoje strmine, **može unijeti vrlo velike probleme**, posebno fazne pomake.

Prikažimo cijeli opisani sustav



Prije A/D pretvarača, ulazni signal se propušta kroz **aktivni niskopropusni filter** kako bi se eliminirale sve frekvencije iznad Nyquistove frekvencije (polovina iznosa uzorkovanja). Cilj postupka je sprječavanje aliasa za vrijeme uzorkovanja pa se naziva **antialias** filter.

Kada se signal nađe u digitalnom području možemo ga lako **pohraniti, prenijeti ili obraditi**.

Na drugoj strani **digitizirani signal propušta se kroz digitalno-analogni pretvarač** i još jedan **nisko propusni filter podešen na Nyquistovu frekvenciju**. Ovaj izlazni filter naziva se **rekonstrukcijski filter**. U ovom jednostavnom modelu nastaju ozbiljni problemi jer tehnička ograničenja elektroničkih filtera mogu biti loša kao i problemi koje trebaju spriječiti.

Binarni brojevi i bit

Broj koji smo dobili **kvantiziranjem** potrebno je pretvoriti u **binarni broj** prije prijenosa ili zapisivanja. Računalni sustavi rade lakše s binarnim brojevima koji imaju samo dva stanja. U svojoj biti binarni brojevi koriste ista pravila kao i decimalni, na koje smo navikli, samo što za prikazivanje brojčane vrijednosti nemaju 10 različitih znamenki nego samo dvije; 0 i 1.

Napišemo li broj 1234, ono što kažemo je u biti

$$(1 \cdot 1000) + (2 \cdot 100) + (3 \cdot 10) + (4 \cdot 1)$$

Brojevi 10, 100, i 1000 dolaze od 10 prstiju. Na latinskom se prst kaže *digitus*. Koristimo prste kako bi prikazali količinu 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9. Kao posljedicu situacije u kojoj ima više od 9 predmeta, potrebno je početi koristiti 2 broja za prikaz brojne vrijednosti. To se rješava uvođenjem mjesta 10, 100 i 1000. Zašto baš 10, 100 i 1000? Zato jer su to potencije broja 10. Drugim riječima, pišemo:

$$(1 \cdot 10^3) + (2 \cdot 10^2) + (3 \cdot 10^1) + (4 \cdot 10^0)$$

Binary digIT = BIT

Kad bi s lijeve strane postojalo još neka znamenka, koristila bi se viša potencija broja 10. Zamislimo da postoji potpuno isti sistem, ali sa samo dva broja za prikazivanje; 0 i 1. Koja je vrijednost u dekadskom sustavu broj 100101011101:

$$(1 \cdot 2^{10}) + (0 \cdot 2^9) + (0 \cdot 2^8) + (1 \cdot 2^7) + (0 \cdot 2^6) + (1 \cdot 2^5) + (0 \cdot 2^4) + \\ + (1 \cdot 2^3) + (1 \cdot 2^2) + (0 \cdot 2^1) + (1 \cdot 2^0)$$

ili:

$$(1 \cdot 1024) + (0 \cdot 512) + (0 \cdot 256) + (1 \cdot 128) + (0 \cdot 64) + (1 \cdot 32) + (0 \cdot 16) + (1 \cdot 8) \\ + (1 \cdot 4) + (0 \cdot 2) + (1 \cdot 1)$$

ili:

$$1024 + 128 + 32 + 8 + 4 + 1 = 1197.$$

Sada umjesto desetica i stotica imamo mjesto dvojki, četvorki, osmica. Pogledajmo ponovno broj 1234. Zovemo ga četveroznamenkasti broj jer ima 4 znamenke. Broj 100101011101 ima 10 binarnih znamenki - *binary digit* pa ga zovemo 10-bitni broj.

Binary digIT = BIT.

Poboljšanje rezolucije

Dodavanjem još jedne znamenke decimalnom broju on se povećava za faktor 10. Najveći broj koji možemo prikazati s dvije znamenke je 99. Najveći broj s 3 znamenke je 999.

Slično tome binarnom najveći binarni broj koji možemo prikazati s tri znamenke je 111 (decimalno 7). Dodamo mu još jedan digit dobijemo 1111 (15 decimalno). Dakle, možemo reći da svaki put **kad binarnom broju dodamo jedan digit, on se približno podvostruči.**

Zašto je to važno? Npr. kompakt disk koristi 16 bitne brojeve za prikazivanje kvantizacijskih razina. Onda je najmanji binarni broj kompakt diska 0000000000000000, a najveći 1111111111111111. Među njima je 65.536 diskretnih razina.

Koristimo li za prikazivanje kvantizacijskih razina 24 bitni sustav, imat ćemo $2^{24} = 16.777.216$ razina.

Zamjena 16 bitnih s 24 bitnim riječima poboljšava rezoluciju 256 puta.

Računala i bit

Elektronički uređaji, a posebno digitalna računala mnogo lakše rade s dva diskretna stanja, nego s kontinuiranim skalama vrijednosti. Pretpostavimo da nekome šaljete numeričku poruku izvorom svjetla.

Za slanje, recimo brojeva do 100, potrebno je imati 100 razina različitog intenziteta svjetla. Dakle broj 100 bi predstavljalo svjetlo najvećeg intenziteta, a 1 svjetlo najnižeg intenziteta.

Osoba na prijemu imala bi intuitivnu ideju veličine broja (mali ili veliki), ali bilo bi joj potpuno nemoguće odrediti točnu vrijednost.

Binarnim prikazivanjem upaljeno svjetlo, bez obzira na intenzitet je digitalna 1, a ugašeno je 0.

(Problem ovdje nastaje s uzastopnim jedinicama i nulama, ali da se riješiti...)

Slično tome, računala za prikaz digitalnih signala koriste visoke i niske razine signala.

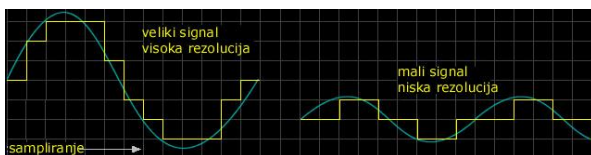
Kvantizacijski šum i dither

Veliki problem digitalnog audio su problemi koje nastaju pri signalima niske razine. Analiziramo li CD koji ima 65,536 (2^{16}) mogućih kvantizacijskih razina, vidjet ćemo da se sve razine koriste isključivo ako je signal vrlo jak.

U stvari signal treba biti maksimalan kako bi se iskoristile sve razine. Ako je signal slab, koriste se samo niže razine.

Ako maksimalnu vrijednost signala prepolovimo, posljedica je efektivno smanjenje rezolucije za 1 bit. Budući, da tipični audio signali nisu cijelo vrijeme maksimalni, potrebno je posvetiti pozornost niskim razinama.

Analizirajmo slabljenje audio signala.



Kako signal slabi, **audio signal koristi sve manje i manje kvantizacijskih razina** tj. sve manje i manje bita. **Na samom kraju dosegne se najmanje značajan bit ili LSB, a nakon toga signal padne na nulu**

Dither

Veliki problemi nastaju sa signalima vrlo niske razine. U tom slučaju kvantizacijski šum izuzetno je visok.

Za razliku od analognih sustava, gdje je šum konstantne razine, kod digitalnih sustava šum kvantizacije modulira signal. U biti, što je signal niži, to su šum i izobličenja veći. Kako se rješava ovaj problem? Tako što signalu dodajemo šum.

Međutim, ovdje moramo shvatiti da dodavanjem bijelog šuma u iznosu $\frac{1}{2}$ razine LSB, generiramo čujan, ali vrlo slab konstantan šum koji potiskuje programsko ovisan šum - izobličenja.

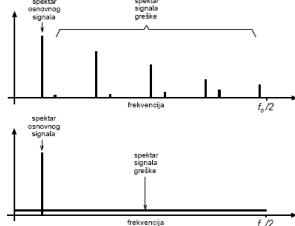
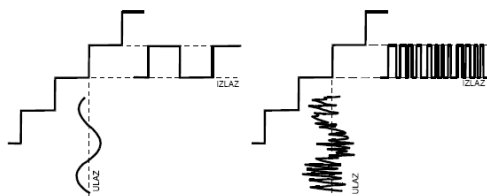
Ovaj šum koji se signalu dodaje prije filtera koji ograničava gornju graničnu frekvenciju naziva se *dither*. Njegova karakteristika definirana je matematičkom vjerojatnošću. Postoje različiti tipovi dithera.

Dither je postupak dodavanja analognog šuma vrlo niske razine, u cilju poboljšanja ponašanja kvantizera pri vrlo niskim razinama.

- ❑ U prvom redu dither omogućava kodiranje signala ispod razine LSB, jer se inače informacija signala bez dithera gubi.
- ❑ Drugo, dither potiskuje grešku kvantizacije, tj. eliminira izobličenja i šum koji nastaju pri vrlo niskim razinama signala.

Iako je koncept dithera protivan intuiciji, što znači da je teško pojmiti da se šum može potisnuti dodavanjem šuma, potrebno je poznavati neke aspekte ljudskog mehanizma sluha.

U nekim slučajevima uho lako detektira signale na srednjim frekvencijama koje su maskirane širokopoljnim šumom 10 - 12 dB više razine.

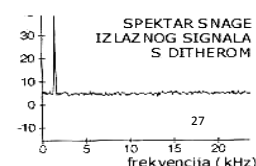
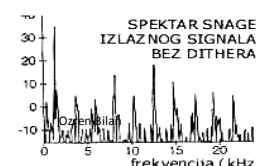
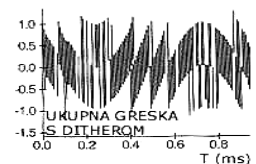
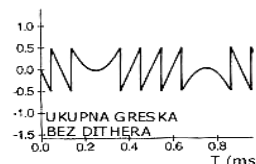
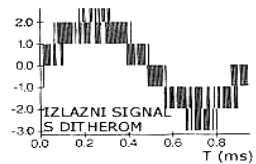
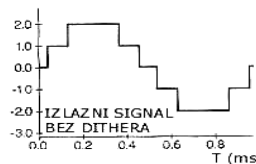
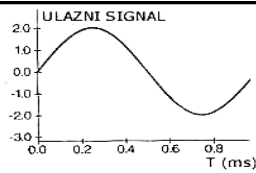
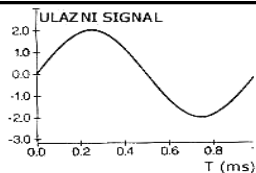


Pretpostavimo da je tekst na ovoj strani amplituda signala koju treba kvantizirati, a malo rašireni prsti ruke - kvantizacijski interval.

Postavimo li ruku iznad teksta amplitudna informacija izgubiti će se nepovratno zbog kvantiziranja.

Unesemo li **dither** tako što ćemo ruku pomicati gore dolje u ravni papira, amplitudna informacija koja je bila izgubljena bez dithera, postat će dostupna uz mali iznos šuma, a to su zamagljeni prsti.

Dakle, iako smo dodali mali šum eliminirali smo izobličenja uslijed kvantizacije i rezultat je potpuno raspoznatljiv tekst.



22.9.2013.

Komplement broja 2

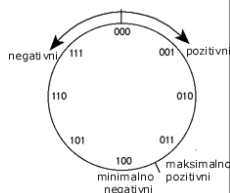
Binarnim brojevima opisujemo razine signala. To nije problem osim činjenice da su **vrijednosti analognog signala i pozitivne i negativne** tj. bipolarne. Nije problem koristiti pozitivne i negativne binarne brojeve, ali to se nikad ne primjenjuje.

Umjesto toga, koristi se sustav **komplement broja 2**. To uzrokuje dva problema. Prvo, **ako ne postoji signal, što je u glazbi relativno često, poželjno je da nulta razina analognog signala odgovara nultoj razini digitalnog.**

Drugi problem je, **kako predstaviti negativne vrijednosti?** Jedan od načina je kružno prikazivanje binarnih brojeva. Brojimo li od 0 do 7 s 3-bitnim riječima imamo slijedeći niz:

000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111.

Napišemo li ove vrijednosti u krug, tako da počinjemo od 0, vidjet ćemo da je **krajnja vrijednost 111, susjedna početnoj, 000, s lijeve strane**. U tom slučaju možemo početi od 000 u smjeru kazaljke sata za pozitivne vrijednosti, a suprotno kazaljke sata za negativne vrijednosti.



Tako prikazujemo pozitivne i negativne vrijednosti, pri kojem je jedna razina iznad nule 001, a jedna razina ispod nule 111. Istovremeno, analogna nula odgovara digitalnoj nuli, a istovremeno, svaka binarna 1 ispred binarne riječi označava negativnu vrijednost signala.

22.9.2013.

Ozren Bilan

28

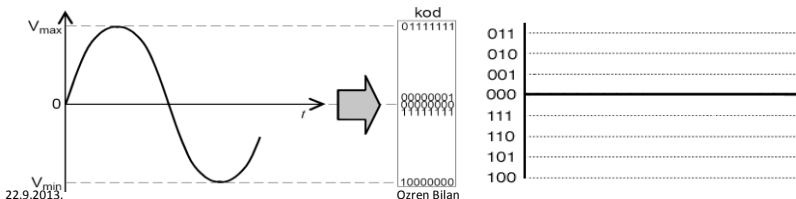
Kvantizacijska razina viška

Pogledamo li pomnjivo prethodnu sliku, primijetit ćemo kako u negativnom području signala postoji jedna kvantizacijska razina više, nego u pozitivnom dijelu signala.

Budući da je broj kvantizacijskih razina uvijek paran, jer je rezultat potenciranja eksponentom djeljivim s 2, a jedna je nulta razina, sustav je nesimetričan.

Dakle, moguće je početi izobličavati pozitivni signal prije negativnog.

Međutim, ovdje se treba podsjetiti kako je u 16-bitnom sustavu, jedna razina izuzetno mala vrijednost (cca. -96 dB), koja se može zanemariti.



29

Izbor frekvencije sempliranja za zvuk

- 8 kHz** telefon, mobilne mreže
- 11,025 kHz** PCM niske kvalitete, MPEG audio
- 22,050 kHz** PCM niže i srednje kvalitete, MPEG audio i audio analiza niskofrekvencijskog područja, dovoljno za digitalizaciju starih audio zapisa na 78 okr/min)
- 32 kHz** Mini DV digitalni video, video zapis s dodatnim audio kanalima DAT, DSR, NICAM
- 44,056 kHz** PCM adapter za NTSC video sustav
- 44,100 kHz** Audio CD, audio zapis temeljen na PAL video sustavu, najčešće korišten
- 47,250 kHz** prvi komercijalni digitalni uređaj za snimanje Denon
- 48 kHz** najniža frekvencija za profesionalnu primjenu digitalnog signala DAT, DASH, editori
- 50 kHz** idealna frekvencija uzorkovanja za audio signal, nije prihvaćena
- 88,2 kHz** u profesionalnoj primjeni masteringa CD.
- 96 kHz** DVD-Audio, kvalitetno poluprofesionalno i profesionalno snimanje
- 176,4 kHz** Profesionalna primjena masteringa CD, HD signal.
- 192 kHz** DVD-Audio, visoko-kvalitetno profesionalno snimanje i editor audio zapisa
- 384 kHz** DXD zapis i editiranje
- 2,8 MHz** SACD, 1-bit sigma-delta modulacija u postupku *Direct Stream Digital*, SONY Philips
- 5,6 MHz** Dvostruka frekvencija sempliranja DSD, *Accuphase* postupak
- 24,576MHz** 512x44,1kHz laboratorijski DSD postupak sveučilište Waseda

Matlab simulacija AD i DA pretvarača

% simulacija 8 bitnog ADC i DAC

```

% Ulazni signal
f = 10^6; % 10MHz ulazni signal
Fs = 100*f; % 100MHz f. sempliranja
amp = 1; % amplituda ulaznog signala
Dynamic_Range = 2; % dinamičko područje kvantizera
DC_Offset = Dynamic_Range / 2;
t = 0:1/Fs:1f;
    
```

```

subplot(6,1,1);
sig=DC_Offset + amp*sin(2*pi*f*t);
plot(sig); % Grafčki prikazujemo pomaknuti ulazni signal kako bi dobili samo pozitivne napone
grid;
xlabel('vrijeme (0,01 us)');
ylabel('Amplituda');
title('Ulazni signal');
    
```

```

% SAMPLE/HOLD
t = 0:1/Fs:1f;
SH_op = DC_Offset + amp*sin(2*pi*f*t); % dodajemo offset kako bi dobili samo pozitivne napone
    
```

% A/D pretvorba

% Kvantizacija

```

No_rep_levels = 256; % 2^8 = 256 razina
Stepsize = Dynamic_Range/(No_rep_levels - 1); % korak kvantizacije = 2V/255
Rep_levels = [];
for i = 0:1:No_rep_levels - 1
    Rep_levels = [Rep_levels; Stepsize]; % 256 razina udaljenih za korak kvantizacije Stepsize
end
    
```

```

end
Quantized_op = [];
for i = 1:length(SH_op)
    [minValue, minIndex] = min(abs(SH_op(i) - Rep_levels)); % Odredi razinu najblizu svakom SH_op
    Quantized_op = [Quantized_op; Rep_levels(minIndex)]; % kvantiziraj na tu vrijednost
end
    
```

```

subplot(6,1,2);
stairs(*10^6,SH_op, 'g');
xlabel('Vrijeme u us');
ylabel('Napon u V');
title('Oblik signala nakon uzorkovanja i zadržavanja (Sample/hold)');
    
```

```

subplot(6,1,3);
stairs(*10^6,Quantized_op, 'k');
grid;
xlabel('vrijeme u us');
ylabel('Napon u V');
title('Kvantizirani izlazni napon (Korak kvantizacije (Step size) = num2str(Dynamic_Range)/255 = ,num2str(Stepsize*10^3), mv)');
    
```

% pogreška kvantizacije

```

Quantization_Noise = Quantized_op - SH_op;
subplot(6,1,4);
plot(Quantization_Noise*10^3, 'r');
grid;
xlabel('broj uzorka');
ylabel('Pogreška u mV');
title('Sum kvantizacije');
Q_Noise_power = var(Quantization_Noise); % Simulirano
    
```

Q_Noise_power_th = Stepsize/12;

% Teoretski

% Generiranje digitalnog koda

```

ADC_op = [];
ADC_op = [ADC_op dec2bin(Quantized_op / Stepsize)];
    
```

% Kraj AD pretvarača

```

% D/A pretvorba
DAC_op = [];
for i = 1:length(ADC_op)
    b7 = str2num(ADC_op(i,1))*128;
    b6 = str2num(ADC_op(i,2))*64;
    b5 = str2num(ADC_op(i,3))*32;
    b4 = str2num(ADC_op(i,4))*16;
    b3 = str2num(ADC_op(i,5))*8;
    b2 = str2num(ADC_op(i,6))*4;
    b1 = str2num(ADC_op(i,7))*2;
    b0 = str2num(ADC_op(i,8))*1;
    D_to_A = (b7 + b6 + b5 + b4 + b3 + b2 + b1 + b0) * (Dynamic_Range / 255);
    DAC_op = [DAC_op D_to_A];
end
    
```

```

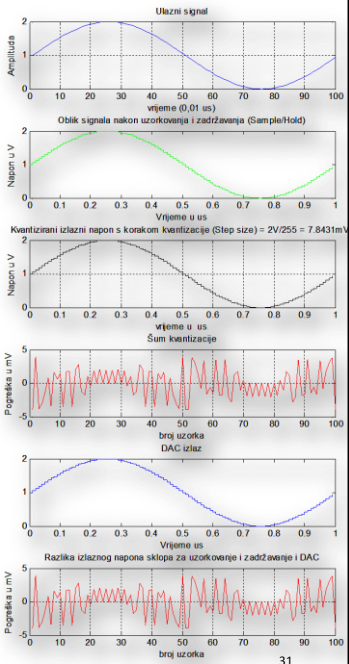
subplot(6,1,5);
stairs(*10^6,DAC_op);
xlabel('Vrijeme us');
title('DAC izlaz');
    
```

```

subplot(6,1,6);
plot(DAC_op - SH_op*10^3, 'r');
grid;
xlabel('broj uzorka');
ylabel('Pogreška u mV');
title('Razlika izlaznog napona sklopa za uzorkovanje i zadržavanje i DAC');
    
```

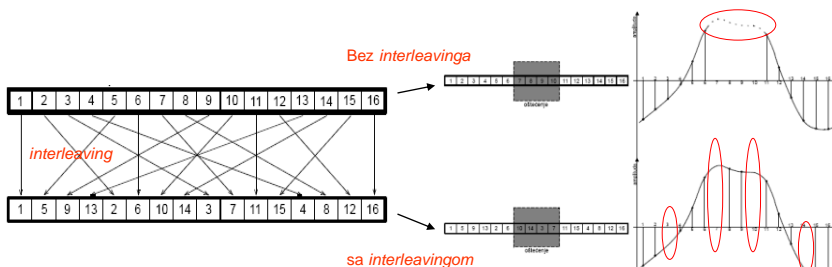
Ozren Bilan

31



Zaštita od greške interleaving

Slika pokazuje način zaštite postupkom premetanja. Ako na određenom mjestu dođe do uzastopnog gubitka informacije, nastala **greška se neće koncentrirati** na usko područje nego dolazi do njenog **rasipanja** na široko područje. Ako nestanu četiri uzastopna bita informacije u slučaju preplitanja, nestat će 10, 14, 3 i 7 bit, pa će se nedostajući bitovi iz susjednih lako interpolirati. Bez preplitanja nestat će 7, 8, 9 i 10 bit, pa je teško izvršiti interpolaciju. Digitalni audio koristi i druge jače postupke.



Frekvencijska širina pojasa i prostor na tvrdom disku

U računala ima oko 700 MB slobodnoga prostora, pitamo se koliko je to vremena?

Prvo određujemo frekvencijsku širinu pojasa signala, broj uzoraka i frekvenciju uzimanja uzoraka. Za CD kvalitetu: frekvencija uzimanja uzoraka je 44.1 kHz i 16-bitne riječi za dva audio kanala. Svake sekunde u svakom kanalu, 44100, 16-bitnih brojeva prođe kroz sustav. Onda je:

$$2 \text{ kanala} \cdot 44100 \text{ uzoraka u sekundi} \cdot 16 \text{ bit uzorak} = 1,411,200 \text{ bitova u sekundi}$$

Koliko je to prostora na disku? Da bismo to izračunali, potrebno je bitove pretvoriti u bajtove. Svaki bajt (Byte) ima 8 bita (bits).

$$1,411,200 \text{ bitova u sekundi} / 8 \text{ bitova po bajtu} = 176,400 \text{ bajtova u sekundi}$$

Podijelimo li s 1024 (bajtova po kilobajtu) dobit ćemo vrijednost kB/s tj. 172.27 kB/s. Pretvorimo to u značajniji oblik:

$$172.27 \text{ kB u sekundi} \cdot 60 \text{ sekunda u minuti} = 10,335.94 \text{ kilobajta u minuti} \\ / 1024 \text{ kilobajta po megabajtu} = 10.1 \text{ MB u minuti.}$$

Za snimanje nekomprimiranog audio signala CD kakvoće na tvrdi disk računala, treba 10 MB po minuti. Za 70 minuta glazbe bez sažimanja potrebno je 700 MB prostora.

Prijenos digitalnih signala

Želimo li prenijeti digitalni tj. binarni signal nekim kabelom, najjednostavniji način da to napravimo je da uzmemo potencijal zemlje kao referencijalnu vrijednost za digitalnu 0, a neki drugi napon, recimo 5 V, za digitalnu 1.

Znamo li pri tome vrijeme kad treba pogledati napon na kabelu, možemo odrediti primamo li 0 ili 1. Vrijeme će odrediti neki interni oscilator koji će davati takt. Opisani sistem radi u praksi, ali ima neke inherentne probleme koji onemogućavaju širu primjenu.

1980. formirana je udruga unutar društva AES koja je trebala donijeti standardni protokol za prijenos digitalnih audio signala. Na početku su odlučili da standard treba biti u skladu sa slijedećim odlukama.

- Protokol treba koristiti postojeće kabele, konektore i prespojna polja.
- Signal se treba bez promjene prenositi postojećim uređajima

AES/EBU protokol IEC-958 Type1

Ove odluke dovele su do slijedećih posljedica:

- U signalu ne smije postojati istosmjerna komponenta koja ne može proći kroz sprežne kondenzatore i transformatore uređaja. Prisjetimo li se istosmjernog napona od 5V, koji predstavlja digitalnu 1, on ne bi mogao proći kroz navedene elemente.
- Signal ne smije biti fazno kritičan. To znači ako okrenemo polaritet signala digitalne 1 ne smije se promijeniti u 0.
- Signal treba imati vlastiti takt
- Signal treba prenositi 2 audio signala jednim kabelom

Rezultat ovih zahtjeva bio je AES/EBU protokol poznat i kao IEC-958 Type 1. To je tzv. *bi-phase mark coding protocol*.

To znači da protokol **razliku između 0 i 1 ne definira s dva različita diskretna napona** (npr. 0V i 5V) nego se **digitalne vrijednosti definiraju naponskim prijelazima**. AES/EBU standard (*IEC 958 Type 1*) datira iz 1985.

AES/EBU ćelije

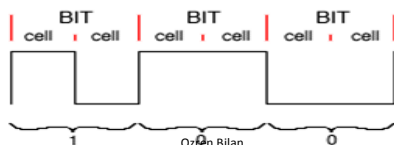
Da bi prenio digitalni signal kabelom, AES/EBU sistem oblikuje napon u dvije ćelije.

- Ako su obje ćelije iste vrijednosti napona, po definiciji to je digitalna 0.
- Ako su ćelije različite, tada predstavljaju digitalnu 1.

Pojednostavljeno, ako u ćeliji **postoji** naponski prijelaz to je **1**; ako **ne postoji**, riječ je o **0**. Referencijalna vrijednost od 0 V u ovom sustavu nije potrebna. Prijemnik AES/EBU sustav **promatra samo prijelaze u ćelijama**, a ne brine o vrijednosti napona i da li se on pri radu mijenja.

Još je ostalo samo da razmotrimo vlastiti takt takvog signala što se realizira sa sustavom fazno zatvorene petlje - *Phase-Locked Loop* ili PLL sustavom.

Sklop generira vremensku bazu temeljem iznosa promjene dolaznog naponskog signala. PLL započinje rad u tzv. *capture* modu u kojem sklop određuje frekvenciju dolaznog signala. Nakon određenja frekvencije, sklop prelazi u rad u *pull-in* modu u kojemu se podesi na ulaznu frekvenciju.



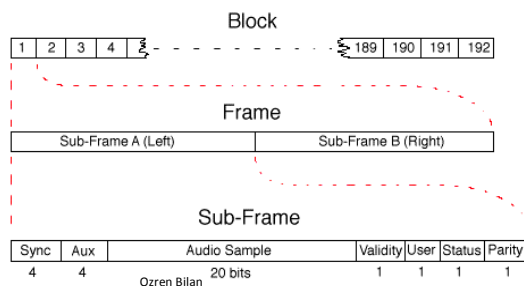
Prijenos AES/EBU signalom

AES/EBU podaci šalju se u **Blokovima**.

Svaki blok se sastoji od 192 okvira *Frame*.

Svaki okvir sastoji se od 2 *Sub-Frames*, od kojih svaki sadržava 32 bita informacije.

To grafički izgleda kao na *slici*



22.9.2013.

37

AES/EBU

- ❑ **Paritetni Bit** - Jedan bit koji osigurava da su sve preambule u fazi.
- ❑ **Source Code** - Informacija koju prenosimo.
- ❑ **Audio sample** - Sami uzorak, s maksimalno 20 bita, pri čemu se LSB *Least Significant Bit* šalje prvi.
- ❑ **Auxiliary Data** - 4 bita koja se mogu koristiti za bilo koju namjenu ili se mogu pridodati audio uzorku, što mu povećava rezoluciju na 24 bita.
- ❑ **Validity Bit** - Kontrolni podatak koji govori prijemniku da li su podaci ispravni ili nisu. Ako je validity bit jednak 1, podaci su neispravni. 0 ukazuje točan prijenos.
- ❑ **User Bit** - Bit koji korisnik može uporabiti za bilo koju namjenu, najčešće Time code.
- ❑ **Status Bit** - Bit koji se može koristiti za bilo koju namjenu. Najčešće se koristi za uključivanje ili isključivanje ili promjenu stanju uređaja. Npr.

Emphasis on / off
Sampling rate
Stereo / Mono signal

22.9.2013.

Ozren Bilan

38

Jitter

Svi digitalni uređaji s ulaznim i izlaznim priključcima mogu dodati jitter -pogrešku vremenske baze. Uzroci mogu biti različita kašnjenja i neprilagođenja na putu signala između komponenata audio lanca. Osnovni uzroci nastanku poremećaja vremenske baze, su nepravilno projektirani PLL i izobličenja valnog oblika digitalnog signala zbog neprilagođenja impedancija ili refleksija na putu signala.

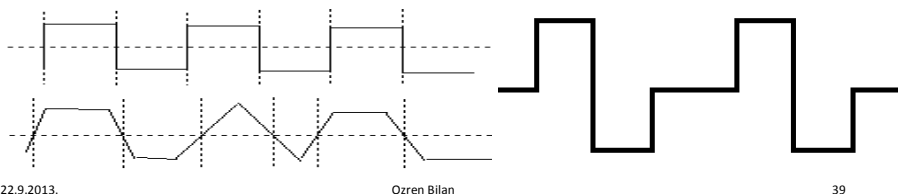
Postoje različiti tipovi jittera:

Promjene vremenske baze definirane kao jitter mogu biti pravilne i periodične

Promjene mogu biti slučajne (inkohherentne, šum)

Digitalni audio signali mogu biti uzrok čujne promjene

Jitter može biti kombinacija dva ili svih uzroka.



S/PDIF IEC 958 Type 2

S/PDIF protokol razvili su Sony i Philips (odatle dolazi S/P) prije AES/EBU.

Koristi jednostruki nesimetrični koaksijalni kabel za prijenos 2 kanala audio signala. Opisuje ga IEC 958 Type 2.

Source Code identičan je AES/EBU s izuzetkom *channel status bit* koji se koristi kao *copy prohibit flag* - sprječava neovlašteno snimanje.

Konektori su RCA. Napon je od 0V do 1V $\pm 20\%$, što nije neovisno o referencijalnom signalu kao AES/EBU protokolu.

Impedancija izvora je 75 Ω i S/PDIF ima bolju otpornost na radio frekvencijske smetnje, nego AES/EBU jer koristi koaksijalni kabel.

Može se proslijediti kao *video* signal kroz postojeće video uređaje. Gubitak pri prijenosu iznosi -0.75 dB / 35 m u video kablu.

Digitalna obrada zvučnih signala

Digitalna obrada signala uključuje signale kojima je nezavisna varijabla

❑ **vrijeme** ili

❑ **prostor**

kao u slučaju obrade zvuka i slika.

Međutim, matematička snaga digitalne obrade može se primijeniti i na signale koji su prikazani u drugim područjima.

Što je DSP, a što je signal?

DSP se razlikuje od ostalih područja računalske znanosti jer koristi posebne tipove podataka - **signale**.

Signal **opisuje** kako se jedan parametar mijenja u odnosu prema drugom parametru

Temeljni **razlog obrade signala je izdvajanje informacije**

DSP se temelji na računalskim programima pa promjenom programa mijenjamo ponašanje sklopa

Računalski programi su snažni jer mogu izvršiti više od analognog sklopovlja (iako nisu uvijek jednako brzi), pa se simulacije mogu izvršavati u računalskim programima (MATLAB, JAVA...)

Za primjene u **realnom vremenu** koriste se **DSP čipovi** - **nisu skupi i slični su μ -procesorima** gdje je moguće ugraditi veliki broj različitih funkcija u jedan čip

Točnost im možemo podesiti po volji, a **vremenski im se karakteristike ne mijenjaju** jer su vrlo stabilni

SIGNALI STVARNOG SVIJETA

Signali stvarnog svijeta mogu biti:

☐ mehanički neoscilatorni

(pomak, kutna brzina, brzina, sila, moment, tlak)

☐ akustički signali

(mehaničke vibracije, zvučni valovi, vodeni valovi)

☐ električni signali

(naponi, struje, električna i magnetska polja)

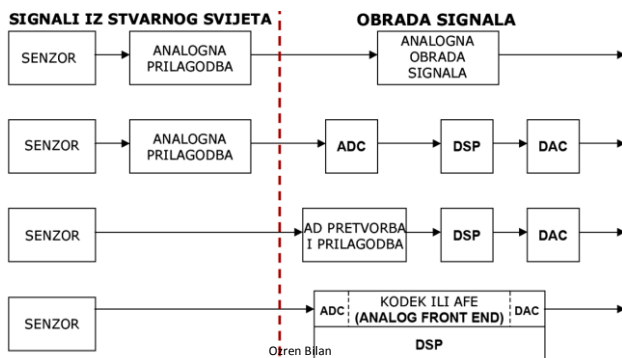
Signale mjerimo primjenom **senzora**.

Danas je skoro nemoguće obraditi analogne signale koristeći isključivo digitalne tehnike.

Svi senzori koji nam stoje na raspolaganju (mikrofoni, termoparovi, poluvodičke pretvarači, piezoelektrični pretvarači, Hallove sonde, glave za čitanje tvrdih diskova i disketa) su analogni.

Očito je potrebno, primjenom posebnog sklopa, prilagoditi (*kondicionirati*) izlaz senzora za daljnju obradu, bez obzira hoće li ona biti analogna ili digitalna.

Taj posebni elektronički sklop, koji analogno obrađuje signala, vrši funkciju pojačanja (*gain*), odvajanja (*isolation*), detekcije u prisutnosti šuma (*CMRR*, *line driver*, *line receiver*), sažimanje dinamičkog područja (*logamp*, *PGA*), aktivno i pasivno filtriranje.



Terminologija signala

Signal je **promjena koju možemo izmjeriti**, a opisuje promjenu jednog parametra u ovisnosti o drugom parametru.

Najčešći tip signala u elektronici je **vremenska promjena napona**. Budući da oba parametra mogu poprimiti kontinuirano područje vrijednosti nazvat ćemo takav signal **ustaljeni ili kontinuirani** signal.

Propustimo li signal kroz AD pretvarač **prisilit ćemo svaki parametar na kvantizaciju**. Ako je pretvorba 12 bitna s uzorkovanjem od 1000 uzoraka u sekundi. **Područje napona će se raspodijeliti na $4096 = 2^{12}$ mogućih binarnih razina**, a vrijeme će biti definirano samo u prirastima od 1 ms.

Signal formiran od tako kvantiziranih parametara nazivamo **diskretni signal ili digitizirani signal**. Kontinuirani signala najčešće postoje u prirodi, a digitizirani signali u računalima, iako ima izuzetaka. Međutim, postoje i signali kojima je jedan parametar kontinuiran, a drugi diskretan. Budući da su takvi miješani signali neuobičajeni, nemaju posebno ime, ali je potrebno eksplicitno naglasiti prirodu svakog parametra.

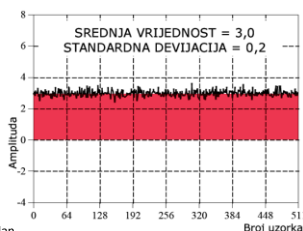
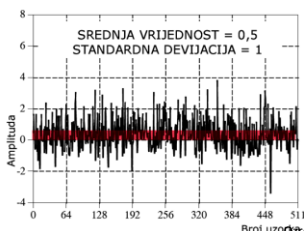
Amplituda i broj uzorka

Slika pokazuje dva diskretna signala, koja možemo pribaviti nekim digitalnim sustavom. Vertikalna os može predstavljati napon, zvučni tlak ili druge parametre. Budući da sad ne znamo koji je signal predstavljen, dati ćemo mu opće ime **amplituda**. Postoji još nekoliko imena: **y os, zavisna varijabla, područje ili domena i ordinata**.

Vodoravna os predstavlja drugi parametar signala koji nazivamo: **x os, nezavisna varijabla, domena, područje ili apscisa**.

Na vodoravnoj osi pribavljenih podataka **najčešće se pojavljuje vrijeme**, ali u specifičnim aplikacijama mogu se pojaviti i neki drugi parametri.

Kako bi zadržali općenito značenje, jednostavno ćemo vodoravnu os nazvati **broj uzorka**. Kada bi bila riječ o kontinuiranim signalima nazvali bi smo ih vrijeme, udaljenost, x, itd.



Vremenska i frekvencijska domena

Parametri koji formiraju signal ne mogu zamijeniti mjesta. Za parametar na y osi (zavisna varijabla) kažemo da je funkcija parametra na x osi (nezavisna varijabla). Drugim riječima, **nezavisna varijabla** opisuje **kako ili kada je uzet svaki uzorak**, dok **zavisna varijabla** pokazuje **stvarnu vrijednost**. Za svaku zadanu vrijednost na x osi uvijek je moguće odrediti odgovarajuću vrijednost na y osi, ali ne i obrnuto.

Posebnu pozornost posvetimo riječi: **područje** ili **domena**, koja se često koristi u DSP. Npr. za signal koji ima **vrijeme** za nezavisnu varijablu (parametar na vodoravnoj osi), kažemo da je u **vremenskom području** ili domeni. Česti drugi tip signala pri DSP koristi **frekvenciju** kao nezavisnu varijablu, što rezultira izrazom, **frekvencijsko područje** ili domena.

Slično tome, za signale koji koriste **udaljenost** kao nezavisni parametar kažemo da su u **prostornoj domeni** jer je udaljenost mjera prostora. Općenito tip parametra na vodoravnoj osi je područje ili domena signala.

Što ako je x općenito označeno?

Postavlja se pitanje, što **ako je x os najopćenitije označena, kao npr. broj uzorka?**

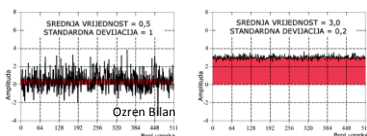
Najveći broj autora kaže da je takav **signal u vremenskoj domeni** jer je uzorkovanje u jednakim vremenskim intervalima najuobičajeniji način dobivanja diskretnog signala.

Iako su signali na slici **diskretni**, prikazani su kao kontinuirane linije. Razlog tome je što se vrlo veliki broj uzoraka ne može raspoznati ako se prikažu kao individualne oznake. Grafovi koji pokazuju kraće signale, npr. manje od 100 uzoraka, prikazani su individualnim oznakama. Kontinuirane linije koje povezuju oznake uzorka, mogu se ali i ne moraju povući, u ovisnosti o tome kako autor želi prikazati podatke. Npr. kontinuirana linija implicira što se događa između uzoraka ili može pomoći praćenju trenda podataka.

Bit svega je u tome da **moramo pogledati oznaku vodoravne osi** da bi znali da li je riječ o diskretnom ili kontinuiranom signalu. Varijabla N, često se koristi u DSP za prikaz ukupnog broja uzoraka signala; $N=512$ za signal na slici.

Podaci se organiziraju na taj način da se svakom uzorku pridijeli **indeks ili broj uzorka**.

To su brojevi koji se pojavljuju duž vodoravne osi. Koriste se dva načina pridruživanja broja uzorka. U prvom slučaju indeksi uzoraka počinju s 1 do posljednjeg, N (npr. od 1 do 512).



AD i DA pretvorba

Skoro svi signali koje susrećemo su kontinuirani. Takva je i vremenska promjena napona. Analogno-digitalna (AD) pretvorba i digitalno-analogna (DA) pretvorba su procesi koji omogućavaju digitalnim računalima interakciju sa signalima.

Digitalna informacija razlikuje se od analogne po tome što je:

- uzorkovana i
- kvantizirana

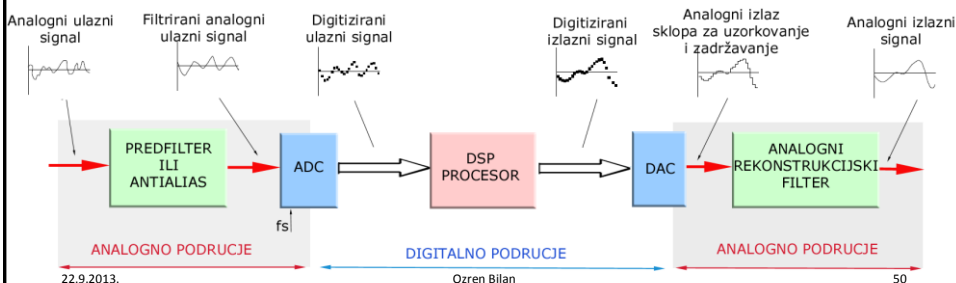
Obje karakteristike ograničavaju količinu informacije u digitalnom signalu. Važno je znati **upravljati količinom informacije**, tako što ćemo razumjeti koju količinu informaciju **zadržati**, a koliku količinu informacije možemo **izgubiti**? Odgovor na to pitanje dat će nam

- **frekvencija uzimanja uzoraka** (uzorkovanja, sampliranja ili otipkavanja)
- **broj bita**
- **tip analognog filtriranja**, potrebnog pri prijelazu iz analognog u digitalno područje.

Analogni filtri za pretvorbu podataka

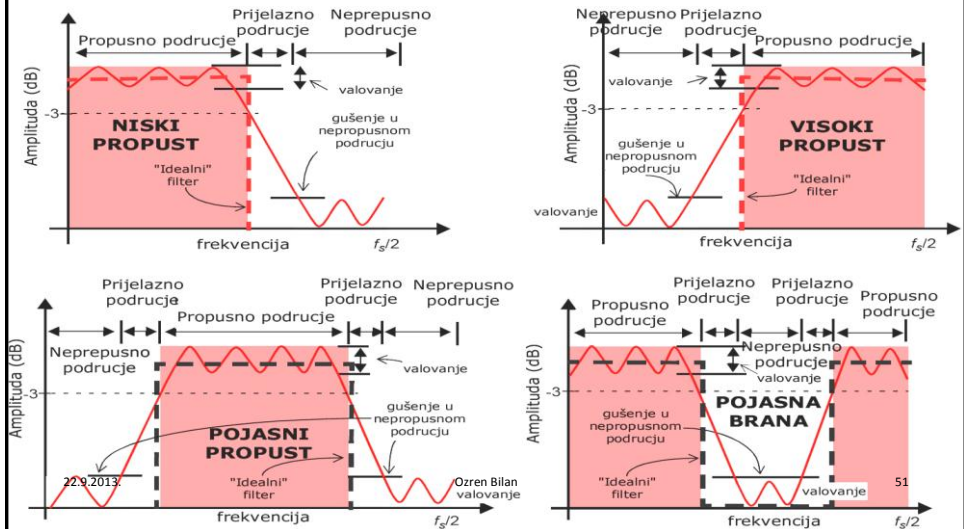
Blok dijagram DSP sustava prema teoremu o uzimanju uzoraka

Prije **AD pretvarača**, ulazni signal se propušta kroz **aktivni niskopropusni filter** kako bi se eliminirale sve frekvencije iznad Nyquistove frekvencije (polovina iznosa uzorkovanja). Cilj postupka je sprječavanje pojave aliasa za vrijeme uzorkovanja pa se naziva antialias filter. Na drugoj strani digitizirani signal propušta se kroz **digitalno-analogni pretvarač** i još jedan **nisko propusni filter** podešen na Nyquistovu frekvenciju. Ovaj izlazni filter naziva se **rekonstrukcijski filter**, a može sadržavati i pojačanje nultog reda zadržavanja. Međutim, nastaju ozbiljni problemi u prikazanom jednostavnom modelu: **tehnička ograničenja** elektroničkih filtera mogu biti loša kao i problemi koje trebaju spriječiti.



Parametri frekvencijskog područja

Slika pokazuje četiri temeljna frekvencijska odziva. Svrha filtera je dopustiti da neke frekvencije prođu nepromijenjene, a da se istovremeno potpuno blokiraju druge frekvencije. **Propusno područje** označava propuštene frekvencije, a **nepropusno područje** sadržava sve blokirane frekvencije. Između njih je **prijelazni ili tranzicijski pojas**.



Brzo odrezivanje (roll-off) označava vrlo uski prijelazni pojas. Podijela između propusnog područja i prijelaznog pojasa nazivamo **odrezna frekvencija**. Pri projektiranju analognih filtera, odrezna frekvencija se uobičajeno definira prema mjestu na kojem se **amplituda smanji za 0.707** (tj., **-3dB**). **Digitalni filteri nisu normirani** pa je uobičajeno definiranje odrezne frekvencije pri 99%, 90%, 70.7% i 50% razine amplitude.

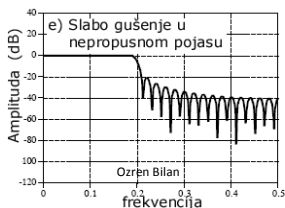
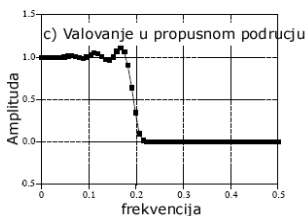
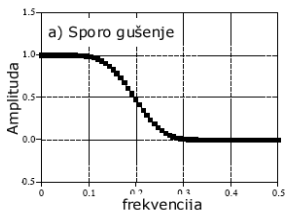
Slika pokazuje tri parametra koja pokazuju karakteristike filtera u frekvencijskom području:

□ Kako bi **odijelili bliske frekvencije**, filter mora imati **brzo odrezivanje**, što pokazuju slike (a) i (b).

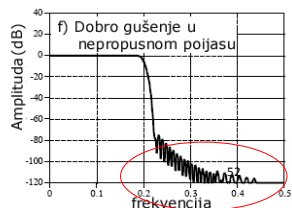
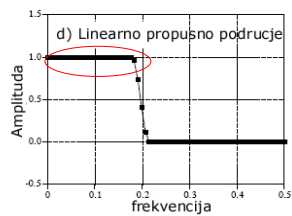
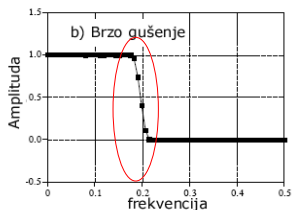
□ U propusnom području, frekvencije se moraju propuštati kroz filter potpuno nepromijenjene amplitude, što znači da ne smije nastajati **valovanje u propusnom području**, što prikazuju slike (c) i (d).

□ Kako bi se zadovoljavajuće **blokirale frekvencije u nepropusnom području**, nužno je postići dobru **atenuaciju nepropusnog područja**, što pokazuju slike (e) i (f).

LOŠE



DOBRO



Tipovi filtra

Najčešće se koriste tri tipa analognih filtera:

- Čebiševljev,
- Butterworth, i
- Besselov (koji se naziva i **Thompsonov** filter).

Svaki od njih se **projektira u cilju optimiziranja različitih parametara**.

Složenost svakog filtra podešava se izborom **broja polova i nula**. Što filter ima **više polova** potrebno je primijeniti složeniju elektroniku, a **karakteristike mu postaju bolje**.

Svako **ime filtra opisuje funkciju** filtra, a ne posebnu konfiguraciju otpornika i kondenzatora. **Šest polni Besselov filter** može se primijeniti u mnogo različitih sklopova koji će svi imati iste karakteristike. Za primjene digitalne obrade signala **karakteristike** primijenjenih filtra mnogo su važnije od **načina na koji su konstruirani**.

Opisat ćemo u kratkim crtama elektroničko projektiranje.

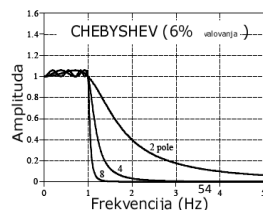
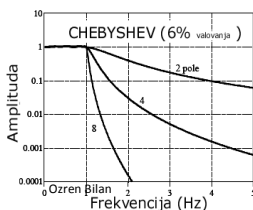
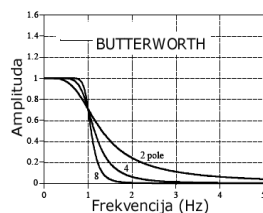
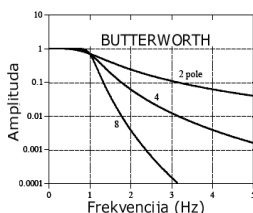
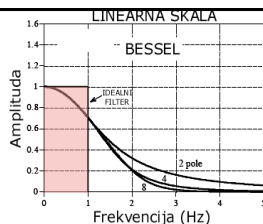
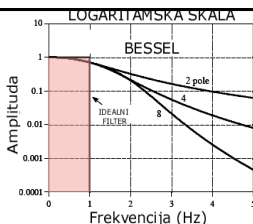
Butterworth filter je najbolji izbor ako želimo postići **najbrže slabljenje bez valovanja** u propusnom području. Obično se naziva maksimalno linearan filter, a identičan je Čebiševljevom projektiranom bez valovanja u propusnom području.

Bessel filter **nema valovanje** u propusnom području, ali mu je **gušenje mnogo lošije** od Butterworthovog filtra.

Potrebno je još procijeniti karakteristiku **odziv na step**, koja nam pokazuje kako se filter ponaša u odzivu kada se izlaz brzo promijeni s jedne vrijednosti na drugu. Slika pokazuje odziv na step svakog filtra.

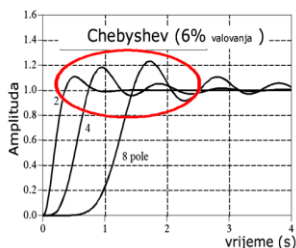
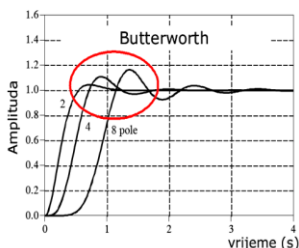
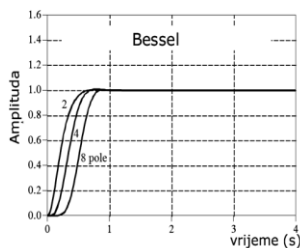
Vodoravna os pokazuje karakteristike filtera s odreznom frekvencijom od 1 Hz. Odziv je moguće skalirati za bilo koju višu odreznu frekvenciju. Npr., odrezna frekvencija 1000 Hz pokazuje odziv na step u milisekundama umjesto *sekundama*.

Butterworth i Čebiševljev filter pokazuje **prebačaj i istitravanje (ringing - titranje)** sa sporim slabljenjem amplitude. Za usporedbu, Bessel filter **ne pokazuje nijedan od spomenutih problema**.



Odziv na step tri filtra

Vrijeme prikazano na vodoravnoj osi odgovara odreznoj frekvenciji od 1 Hz.
Bessel je optimalni filter ako treba **minimizirati prebačaj i istitravanje**.



22.9.2013.

Ozren Bilan

55

Slika ilustrira ovu povoljnu karakteristiku Bessel filtra.

(a) pokazuje impulsni valni oblik, koju je moguće promatrati kao korak porasta kojeg prati korak pada.

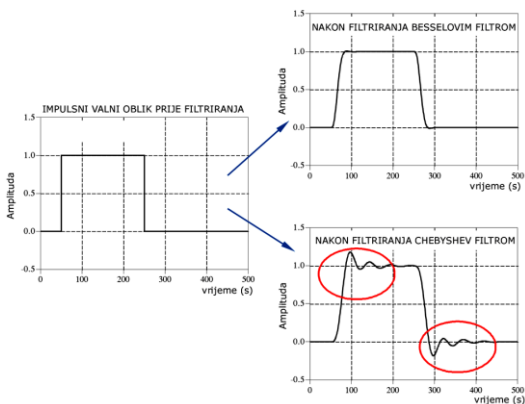
(b) i (c) pokazuju kako se ovaj valni oblik pojavljuje nakon filtriranja Besselovim i Čebiševljevim filterima.

Pretpostavimo da je riječ o video signalu. Izobličenje koje nastaje nakon Čebiševljevog filtra bilo bi :

☐ Prebačaj valnog oblika promijenio bi svjetlinu rubova svih objekata prema centru slike.

☐ Nadalje, lijeva strana svih objekata bila bi vrlo svjetla, a desna strana bila bi vrlo tamna.

Mnoge primjene ne podnose loše karakteristike odziva na step funkciju. Tu su najbolji Besselovi filteri jer je oblik simetričan bez prebačaja.



22.9.2013.

Ozren Bilan

56

RAZLOZI OBRADJE SIGNALA

Najvažniji razlog obrade signala iz stvarnog svijeta je dobivanje informacije. Informacija je najčešće u obliku amplitude signala, frekvencije, spektralnog sadržaja, faze, vremenskih odnosa s drugim signalima. Jednom kad dobijemo iz signala informaciju moguće je koristiti na različite načine.

Drugi zahtjev za obradom signala je sažimanje frekvencijskog sadržaja signala, bez značajnijeg gubitka informacije, a nakon toga formatiranje i prijenos nižim brzinama. Tako se smanjuje potrebna frekvencijska širina kanala. Brzi modemi *High speed modems* i adaptivni modulacijski sustavi impulsnog koda (*ADPCM*) intenzivno koriste algoritme sažimanja, kao i digitalni mobilni radio sustavi, MPEG sustavi za snimanje i reprodukciju, te televizija visoke razlučivosti HDTV.

RAZLOZI OBRADJE SIGNALA

- Dobivanje informacije iz signala (amplituda, faza, frekvencija, spektralni sadržaj, vremenski odnosi)
- Reformatiranje signala (telefonija)
- Sažimanje podataka (modemi, mobiteli, HDTV, MPEG)
- Generiranje upravljačkih signala (industrijsko procesno upravljanje)
- Ekstrakcija signala iz šuma (filtriranje, autokorelacija, konvolucija)
- Pribava i pohrana signala u digitalnom obliku za potrebe analize (FFT tehnika)

DSP je sadržana u matematici, algoritmima i tehnikama koje se koriste za manipulaciju signalima, nakon što smo ih pretvorili u digitalni oblik.

Korisnik tako ostvaruje svoje najvažnije ciljeve:

- prepoznavanje i generiranje govora,
- sažimanje podataka za pohranu i prijenos,
- poboljšanje slika

22.9.2013.

Ozren Bilan

57

Kontinuirani i diskretni signali

- Sve fizikalne veličine pretvaraju se sensorima u električne signale.
- Prilagođenje signala odnosi se na pripremanje signala iz realnog svijeta za obradu. Tu podrazumijevamo senzore (npr. temperature i tlaka), odvojna i instrumentacijska pojačala itd. Npr. povratni signal radara ili ultrazvučnog sustava slika je primjer signala koji su posljedica poznatog emitiranog signala.
- Različiti od njih su *digitalni signali* gdje se stvarni signal prilagođava i formatira u binarne brojeve. Ti digitalni signali mogu ali ne moraju biti povezani sa analognim varijablama realnog svijeta; kao npr. podaci u LAN ili drugim mrežama.
- U slučaju digitalne obrade signala analogni signali pretvaraju se u binarni oblik AD pretvaračem. Izlaz AD pretvarača je binarna prezentacija analognog signala, a DSP njome matematički manipulira. Nakon obrade, tako dobivena informacija može se ponovno pretvoriti u analogni oblik korištenjem DA pretvarača.
- Drugi ključni koncept uključen u definiciju *signala* je taj što signal sadrži *informaciju*. To dovodi do ključnog **razloga za obradom signala – izvlačenje (ekstrakcija) informacije**.
- Signal opisuje kako se neki parametar mijenja promjenom drugog parametra.** Npr. kako se vremenski mijenja napon u elektroničkom sklopu.
- Sustav je bilo koji proces koji generira izlazni signal kao odziv na ulazni signal pobude.**

Kontinuirani signali označeni su malom zagradom, npr $x(t)$ i $y(t)$. Diskretni uglatom zagradom, npr $x[n]$ i $y[n]$. Signali se označavaju malim slovom, dok se velika slova koriste za označavanje frekvencijskog područja. Ime signala najčešće opisuje parametar koje predstavlja.

Vremenski promjenjiv napon može biti $v(t)$.

Međutim, signali i sustavi mogu se označavati bez tog saznanja koji parametar predstavljaju. Tada se koriste varijable x i y kao u algebri, bez pridruživanja fizikalnog značenja;

kontinuirani ulazni signal označavamo $x(t)$, a izlazni $y(t)$.

Kod diskretnih sustava ulazni signal se označava $x[n]$, a izlazni $y[n]$.

Mnogo je razloga zbog kojih želimo shvatiti princip rada sustava. Često se događa da se ulazni signal prijenosnog sustava razlikuje od izlaznog. Razumijemo li prijenosni sustav moguće je kompenzirati ove nedostatke (npr. eliminirati jeku razglasnog sustava, izdvojiti šum audio signala, ...). Drugim riječima, **sustav predstavlja fizikalni proces kojeg želimo proučiti ili analizirati**. Radar i sonar

su dobri primjeri jer oba temelje rad na usporedbi emitiranog i reflektiranog signala za dobivanja informacije o udaljenom objektu. Rječnikom teorije sustava, problem se svodi na **nalaženje sustava koji obavlja transformaciju emitiranog signala u primljeni signal**.



Terminologija: sustav je bilo koji proces koji generira izlazni signal kao odziv na ulaznu pobudu

Linearni sustavi

Na prvi pogled čini se da je teško razumjeti sve moguće sustave, međutim najveći broj njih pripada kategoriji koju nazivamo - **linearni sustavi**.

Bez poznavanja koncepta linearnih sustava morali bi smo ispitivati individualne karakteristike mnogih nepovezanih sustava.

Pristupom analize linearnog sustava obuhvatit ćemo sve linearne sustave u jednu kategoriju kao cjelinu.

Prvo moramo identificirati

- svojstva koja tvore sustav linearnim i
- kako se to uklapa u naše poznavanje
 - elektronike,
 - programske podrške i
 - sustava za obradu signala.

Zahtjevi linearnosti

Sustav je linearan ako pokazuje dva matematička svojstva:

- ❑ homogenost i
- ❑ aditivnost.

Ako ne pokazuje oba svojstva dokazali smo da je nelinearan.

Treće svojstvo:

- ❑ **translacijske (pomakne) nepromjenjivosti** *shift invariance*, nije strogi zahtjev za linearnosti, ali je nužan za najveći broj DSP tehnika.

Kad god netko navede pojam **linearni sustav za DSP**, treba podrazumijevati da **ispunjava i treće svojstvo**.

HOMOGENOST

Slika pokazuje kako homogenost znači da će promjena amplitude ulaznog signala rezultirati promjenom izlaznog signala. Matematički, ako ulazni signal $x[n]$ daje na izlazu izlazni signal $y[n]$, onda će ulaz $kx[n]$ dati na izlazu $ky[n]$, za svaki ulazni signal i konstantu, k .

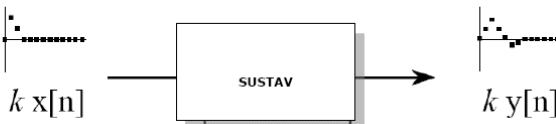
Otpornik je dobar primjer i homogenog i nehomogenog sustava. ako je ulaz sustava napon na otporniku, $v(t)$, a izlaz sustava struja kroz otpor $i(t)$, sustav je homogen. To nam jamči Ohmov zakon; povećanje i smanjenje napona će linearno povećati i smanjiti struju.

Ako je ulazni signal napon na otporu, $v(t)$ a izlazni signal je snaga na otporu, $p(t)$. Budući da je snaga proporcionalna kvadratu napona, povećamo li ulazni signal za **faktor 2**, izlazni signal će se povećati za **faktor 4**. Sustav nije homogen i zato nije linearan.

AKO



ONDA VRIJEDI



ADITIVNOST

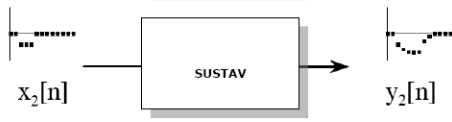
Pretpostavimo sustav kojem ulazni signal $x_1[n]$ daje izlazni signal $y_1[n]$, a drugi ulazni signal, $x_2[n]$, daje, $y_2[n]$. Sustav je **aditivan** ako ulaz $x_1[n]+x_2[n]$ daje izlaz $y_1[n] + y_2[n]$, za sve moguće ulazne signale. Signal dodan na ulazu, daje signal dodan na izlazu.

Važno je naglasiti kako sumirani signali prolaze sustavom bez interakcije. Npr. poštar pri ulazu u zgradu pozvoni na nekoliko stanova istovremeno. Može se dogoditi da je vaš susjed već započeo razgovor s poštarom u trenutku kada ste prislonili slušalicu interfona. Govore li poštar i susjed istovremeno, jasno će te razabrati i susjeda i poštara jer je zvuk kojeg čujete suma dva glasa koji bi potpuno isto zvučali da se prenose individualno.

AKO JE



I AKO JE



ONDA VRIJEDI



22.9.2013.

63

Vremenska (translacijska ili posmakna) nepromjenjivost

Slika pokazuje kako pomak ulaznog signala rezultira identičnim pomakom izlaznog signala.

Formalnim izrazom, ako ulazni signal $x[n]$ daje izlaz $y[n]$, ulazni signal $x[n+s]$ dat će izlaz $y[n+s]$, za svaki ulazni signal i za svaku konstantu, s .

Dodavanjem konstante, s , nezavisnoj varijabli, n , valni oblik može se pomaknuti unaprijed ili unazad u horizontalnom smjeru. Ako je $s=2$, signal se pomiče lijevo za dva uzorka; kada je $s=-2$, signal se pomiče desno za dva uzorka.

AKO JE



ONDA VRIJEDI



22.9.2013.

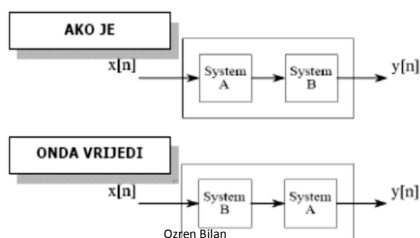
Ozren Bilan

64

Posebna svojstva linearnosti

Linearnost je komutativna. To je svojstvo koje uključuje kombinaciju dva ili više sustava. Slika pokazuje ideju komutativnosti. Pretpostavimo dva sustava u kaskadi, tako da je izlaz prvog sustava ulaz drugog sustava. ako je svaki sustav linearan tada će i ukupna kombinacija također biti linearna. Komutativno svojstvo pokazuje da se poredak sustava u kaskadi može promijeniti bez utjecaja na karakteristike cjelokupne kombinacije. Ovo svojstvo poznajemo iz elektroničkih sklopova.

Pretpostavimo sklop od dva stupnja, jedan za pojačanje, a drugi za filtriranje. Što je bolje pojačati pa filtrirati ili filtrirati pa pojačati? Ako su oba stupnja linearna redoslijed nema utjecaja i rezultat će biti isti. Pri tome moramo imati na umu kako će stvarna elektronika unijeti nelinearne efekte: interferencije, istosmjerni offset, šum i izobličenja.



22.9.2013.

65

Superpozicija i sinteza: temelj digitalne obrade signala

Pri radu s linearnim sustavima **jedini način kombiniranja signala** je **skaliranje** (množenje signala konstantom) i nakon toga **sumiranje**. Npr. signal se ne može množiti drugim signalom. Slika pokazuje primjer: dva signala: $x_1[n]$ i $x_2[n]$ sumiraju se u treći signal, $x[n]$.

Ovakav **proces kombiniranja signala skaliranjem i sumiranjem** nazivamo **sinteza**.

Dekompozicija je inverzna operacija sinteze, gdje se signal **rastavlja u dvije ili više aditivnih komponenti**.

Postupak je složeniji od sinteze jer postoji beskonačno veliki broj mogućih dekompozicija za svaki zadani signal.

Brojevi 15 i 25 mogu se sintetizirati (sumirati) samo u broj 40. Za usporedbu broj 40 može se dekompozirati (rastaviti) u: $1+39$ ili $2+38$ ili $-30.5+60+10.5$, itd.

Sad **dolazimo do same biti DSP digitalne obrade signala: superpozicije**, ukupne strategije za razumijevanje kako se signal i sustavi analiziraju.

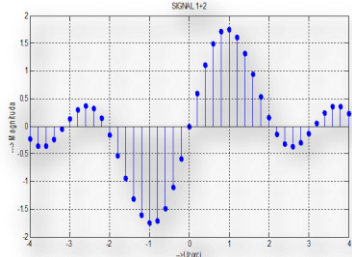
22.9.2013.

Ozren Bilan

66

Ilustracija sinteze i dekompozicije signala

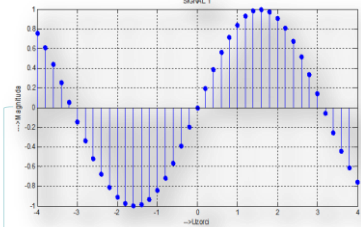
$X1[n]+X2[n]$



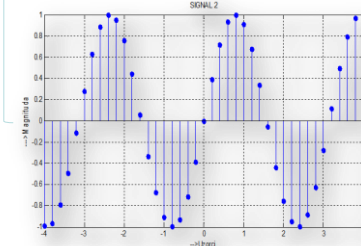
dekompozicija

sinteza

$X1[n]$



$X2[n]$



- **Sinteza:** dva ili više signala sumiranjem tvore novi signal.
- **Dekompozicija:** obrnut proces, signal se rastavlja u dva ili više aditivnih komponenti signala.

22.9.2013.

Ozren Bilan

67

Superpozicija

Pretpostavimo ulazni signal, $x[n]$, koji na izlazu linearnog sustava daje, $y[n]$.

Prema ilustraciji na slici, ulazni signal može se rastaviti u niz jednostavnijih signala: $x0[n]$, $x1[n]$, $x2[n]$, itd. Nazvat ćemo ih **komponente** ulaznog signala.

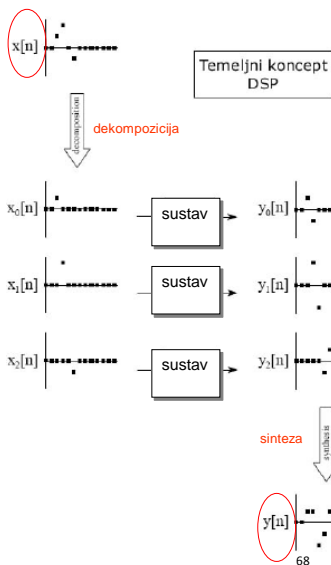
Nadalje, svaka ulazna komponenta signala individualno se propušta kroz sustav, što daje grupu izlaznih komponenti: $y0[n]$, $y1[n]$, $y2[n]$, itd. Komponente izlaznog signala **sintetiziraju** su u izlazni signal, $y[n]$.

Najvažnije je što je izlazni signal dobiven ovom metodom **potpuno identičan** signalu koji bi nastao neposrednim prolazom ulaznog signala kroz sustav.

Ovo je vrlo važna ideja. Umjesto da pokušamo razumjeti kako se složeni signali mijenjaju pri prolasku kroz sustav, sve što trebamo znati je kako se mijenjaju najjednostavniji signali.

Žargonom obrade signala, **ulazni i izlazni signali promatraju se kao superpozicija** (suma) jednostavnih valnih oblika.

Zamisao je temelj svih tehnika obrade signala.



22.9.2013.

Ozren Bilan

68

Alternative linearnosti – što ako je sustav nelinearan?

Ako je sustav nelinearan postoji samo jedna strategija koja nam je dostupna; nelinearni sustav linearizirati. To je moguće na tri načina:

1. **zanemarimo nelinearnost**. Ako je dovoljno mala sustav aproksimiramo linearnim. Greška koja iz toga proizlazi se tolerira kao šum ili se ignorira.

2. **zadržavamo vrlo male razine signala**. Mnogi nelinearni sustavi ponašaju se linearno ako su im amplitude signala vrlo male. Npr. tranzistori su nelinearni u radnom području, međutim linearno pojačavaju signale koji su reda veličine nekoliko mV.

3. **primijenimo linearnu transformaciju**. Npr., dva signala se množe kako bi dali treći:

$$a[n] = b[n] \times c[n]$$

Logaritmiranjem izraza nelinearni proces množenja postaje linearni proces zbrajanja:

$$\log(a[n]) = \log(b[n]) + \log(c[n])$$

Stručno ime ovog jednostavnog procesa je **homomorfna obrada signala**, a ima vrlo veliku primjenu.

Konvolucija

Konvolucija opisuje odnose tri signala: ulaznog signala, izlaznog signala i impulsnog odziva. To je matematička operacija koja svaku vrijednost na izlazu izražava kao sumu vrijednosti ulaza pomnoženu nizom težinskih koeficijenata – to je operacija kojom određujemo izlaz poznatog linearnog vremenski nepromjenjivog sustava na bilo koji ulazni signal.

Glavne tehnike digitalne obrade signala su **konvolucija i Fourierova analiza**. Obje tehnike temeljene su na strategiji prikazanoj u prethodnom poglavlju o linearnim sustavima:

(1) signal rastavimo na jednostavne aditivne komponente

(2) obradimo komponente na koristan način

(3) sintetiziramo komponente u konačni rezultat

To je upravo digitalna obrada signala.

Konvolucija je matematički **način kombiniranja dva signala u treći**, a predstavlja najvažniju tehniku digitalne obrade signala.

Strategijom **impulsne dekompozicije** bilo koji sustav možemo opisati impulsnim odzivom.

Konvolucija povezuje tri signala:

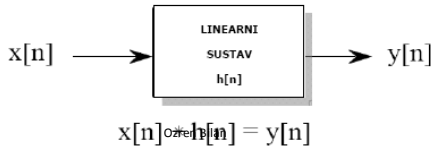
- ulazni signal,
- izlazni signal i
- impulsni odziv.

Konvolucija

Konvolucija je formalna matematička operacija, poput množenja, zbrajanja i integriranja. Sumiranje uključuje dva ili više brojeva koji nakon operacije daju treći broj. Slično tome konvolucija iz dva signala daje treći. U teoriji linearnih sustava konvolucija opisuje odnose tri signala: ulaznog signala, izlaznog signala i impulsnog odziva.

Slika pokazuje način zapisivanja kada se konvolucija koristi s linearnim sustavima. Ulazni signal $x[n]$, propušta se kroz linearni sustav s impulsnim odzivom $h[n]$ što daje izlazni signal $y[n]$.

U obliku jednadžbe $x[n]*h[n]=y[n]$. Izraženo riječima, ulaz signal konvoluiran s impulsnim odzivom jednak je izlaznom signalu. Isto tako kako se zbrajanje predstavlja znakom plus, +, a množenje, \times , konvolucija se predstavlja zvjezdicom, *. Najveći broj viših programskih jezika koristi isti znak za množenje. Zvjezdica u računalnom programu znači množenje, a zvjezdica u jednadžbi označava konvoluciju.



Svojstva konvolucije

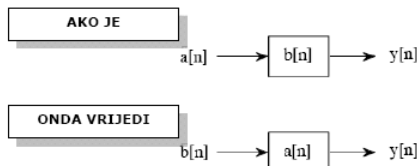
Matematička svojstva Svojstvo komutacije

Svojstvo komutacije za konvoluciju izražava se matematički:

$$a[n] * b[n] = b[n] * a[n]$$

svojstvo komutacije konvolucije definira redoslijed kojim se mogu zamijeniti signali koji se konvoluiraju.

Nije važan redoslijed kojim se dva signala konvoluiraju; rezultati su identični. Kako pokazuje slika, svakom linearnom sustavu, ulaz signal i impulсни odziv sustava mogu se zamijeniti bez da se promjeni izlazni signal. Pojava je zanimljiva ali nema fizikalni značaj. Ulazni signal i impulсни odziv su različite stvari. Samo zato što matematika nešto dopušta to ne znači da ima ikakvog smisla.



Svojstvo asocijacije

Da li je moguće konvoluirati tri ili više signala? Odgovor je potvrđan, a asocijativno svojstvo opisuje kako: **konvoluiraj dva signala da dobiješ međusignal, a tada konvoluiraj međusignal s trećim signalom.**

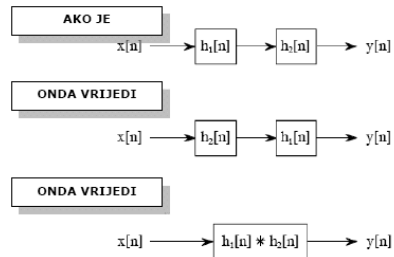
Pri tome asocijativno svojstvo jamči da redoslijed konvolucije nije važan. U obliku jednadžbe:

$$(a[n] + b[n]) * c[n] = a[n] * (b[n] + c[n])$$

Svojstvo asocijacije koristi se u teoriji sustava za opis ponašanja sustava u kaskadi. Slika pokazuje dva ili više sustava u kaskadi ako se izlaz jednog sustava koristi kao ulaz idućeg.

Iz svojstva asocijacije redoslijed sustava može se promijeniti bez da nastane promjena ukupnog odziva kaskade.

Nadalje, bilo koji broj sustava u kaskadi može se zamijeniti jednim sustavom. Impulsni odziv zamjenskog sustava izračuna se konvolucijom impulsnih odziva svih izvornih sustava.



Svojstvo distribucije

U obliku jednadžbe, distributivno svojstvo glasi:

$$a[n] * b[n] + a[n] * c[n] = a[n] * (b[n] + c[n])$$

Distributivno svojstvo opisuje rad paralelnih sustava s dodanim izlazima. Slika pokazuje kako dva ili više sustava mogu dijeliti isti ulaz, $x[n]$, i imati svoje izlaze sumirane kako bi dali $y[n]$.

Distributivno svojstvo omogućava kombinaciji sustava zamjenu s jednim sustavom čiji je impulsni odziv jednak sumi impulsnih odziva izvornih sustava.

