

Multimedijalni sistemi

II DEO – Analogni i digitalni zvuk

Martin Jovanović
Katedra za računarstvo i informatiku
Elektronski fakultet u Nišu



Pregled gradiva

- Osnovi tehničke akustike
 - Pojam i osobine zvuka
 - Percepcija zvuka
 - Elektro-akustičke analogije
 - Snimanje zvuka
- Digitalne operacije nad zvukom
 - AD-DA konverzija
 - Digitalni zvučni efekti
 - Osnovi editovanja zvuka
 - Digitalna kompresija zvuka
 - Sinhronizacija zvuka i slike



Definicija zvuka

- Zvuk je vibracija koja se prostire kroz čvrsto telo, tečnost ili gas.
- Pojam zvuk najčešće se koristi za spektar ovih vibracija koje može detektovati ljudsko uho.
- Idealan frekvencijski opseg ljudskog uha: 20Hz – 20kHz ("čujni opseg").
- Realan čujni opseg je uži i degradira sa starenjem i akustičkim uslovima.



Medijum

- Materija kroz koju se zvuk prenosi naziva se medijum (medium).
- Medijum može biti:
 - čvrst,
 - tečan ili
 - gasovit.
- Zvuk se ne može preneti kroz vakuum.
 - Negativan primer: film Ratovi zvezda.



Tipovi zvučnog talasa

- Longitudinalan (uzdužan)
 - Naziva se još i kompresioni talas.
 - Prostire se kroz sve tri vrste medijuma.
 - Talasi stvaraju naizmenična polja povišenog i sniženog pritiska (u odnosu na ravnotežni) u medijumu.
- Transferzalan (poprečan)
 - Moguć samo u čvrstim telima.
 - Talas predstavlja izmeštanje čestica tela u odnosu na ravnotežni položaj.
- Prilikom prostiranja talasa energija osciluje između potencijalne i kinetičke.



Fizičke osobine

- Frekvencija
- Talasna dužina
- Period
- Amplituda
- Pravac
- Brzina
- Intenzitet
- Polarizacija (samo za transferzalne)



Brzina zvuka

○ Zavisi od medijuma.

- Brzina zvuka se često navodi kao jedna od fundamentalnih osobina materijala.
- Proporcionalna je kvadratnom korenu odnosa koeficijenta elastičnosti materijala i njegove gustine.
- Ove osobine materijala variraju zavisno od uslova (temperature, pritiska itd).



Primeri za brzinu zvuka

- Čist vazduh na 20°C, u nivou mora:
 - brzina zvuka \approx **1235** km/h \approx 343 m/s
- Čista voda na 20°C:
 - brzina zvuka \approx **5335** km/h
- Čelik na 20 °C:
 - brzina zvuka \approx **21456** km/h
- Brzina prostiranja zvuka zavisi i od njegove amplitude (složena zavisnost).



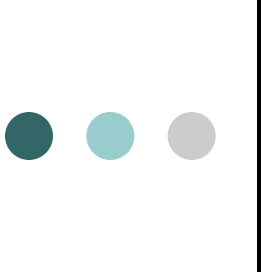
Jačina zvuka

- Fizički doživljaj jačine (glasnoće) zvuka odgovara veličini zvučnog pritiska.
 - U pitanju su oscilacije u pritisku oko atmosferskog (ravnotežnog) pritiska.
- Zvučni pritisak se često izražava preko odnosa apsolutnog i referentnog pritiska (nivo zvučnog pritiska).



Zvučni pritisak

- Apsolutna vrednost promene pritiska medijuma (npr. vazduha) u odnosu na ravnotežni varira u prostoru i vremenu.
- Kvadrat ove veličine se obično usrednjava po prostoru i/ili vremenu.
- Koren ove kvadratne srednje vrednosti naziva se **RMS** (**R**oot **M**ean **S**quare).



RMS - primer

- Posmatrajmo slučaj zvučnog pritiska od 1Pa RMS. Ovo znači sledeće:
 - Max pritisak: $1atm + \sqrt{2}Pa$
 - Min pritisak: $1atm - \sqrt{2}Pa$
- Pretvoreno u cifre:
 - Max pritisak: 101326.4 Pa
 - Min pritisak: 101323.6 Pa
- Zvuk koji ima ovu amplitudu oscilovanja pritiska, a u okviru čujnog opsega, biće zaglušujuć i izazvaće oštećenje sluha.



Nivo zvučnog pritiska

- Zvučni pritisak se često izražava ne kao apsolutna vrednost, već kao relativni – logaritamski – odnos između aktuelne i referentne vrednosti.
- Referentna vrednost zvučnog pritiska je (standard ANSI S1.1-1994):
 - $20\mu\text{Pa}$ u vazduhu, odnosno
 - $1\mu\text{Pa}$ u vodi.
- Razlog: širok spektar amplituda koje uho detektuje, kao i prirodna algoritamska osetljivost uha.



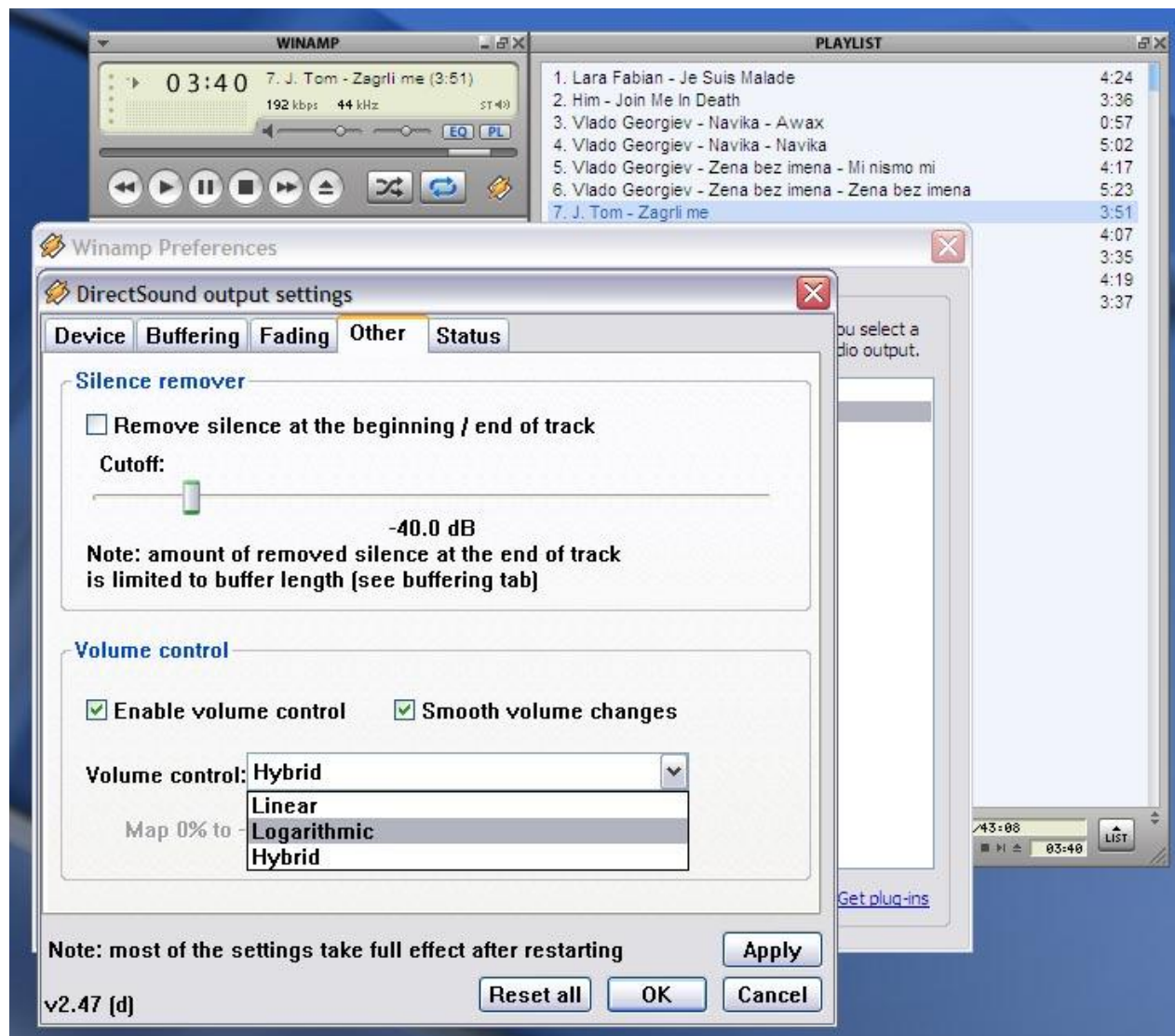
Decibel

- Algoritamski odnos između aktuelnog i referentnog pritiska definiše nivo zvučnog pritiska u decibelima (dB):

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) dB$$

- L_p – Level of Pressure
 - p – zvučni pritisak RMS
 - p_{ref} – referentni pritisak
- Čovek razaznaje subjektivnu jačinu zvuka logaritamski – tako da logaritamski odziv podešavanja jačine zvuka čoveku zvuči – linearno!

Logaritamska ili linearna?



Primeri za zvučni pritisak

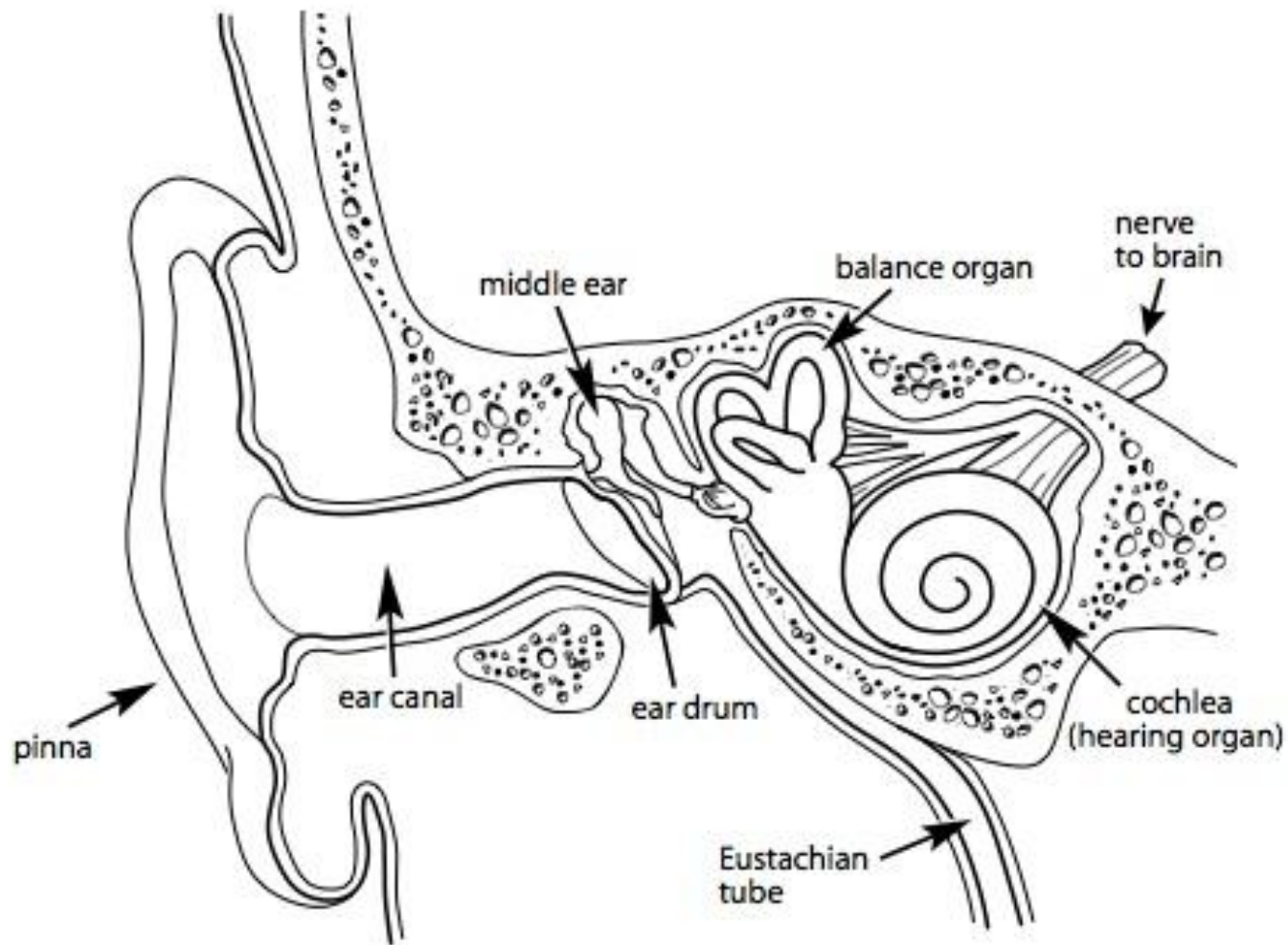
Izvor zvuka / osobina zvuka	RMS pritisak (Pa)	Nivo (dB)
Eksplozija nuklearnog oružja	–	~ 248
Erupcija vulkana	–	~ 180
Lansiranje rakete	–	~ 165
Granica bola	100	134
Oštećenje sluha nakon kratkog dejstva	20	~ 120
Mlazni motor na 100m razdaljine	6–200	110–140
Pneumatski čekić na 1m razdaljine – diskoteka	2	~ 100
Oštećenje sluha nakon dugog dejstva	0.6	~ 85
Gust saobraćaj na 10m razdaljine	0.2–0.6	80–90
Automobil u pokretu na 10m razdaljine	0.02–0.2	60–80
TV prijemnik (uobičajeno) na 1m razdaljine	0.002	~ 60
Normalan razgovor na 1m razdaljine	0.002–0.02	40–60
Veoma tiha soba	0.0002–0.0006	20–30
Tiho ljudsko disanje – lagano šuštanje lišća	0.00006	10
Prag čujnosti zdravog ljudskog uha na 2kHz	0.00002	0



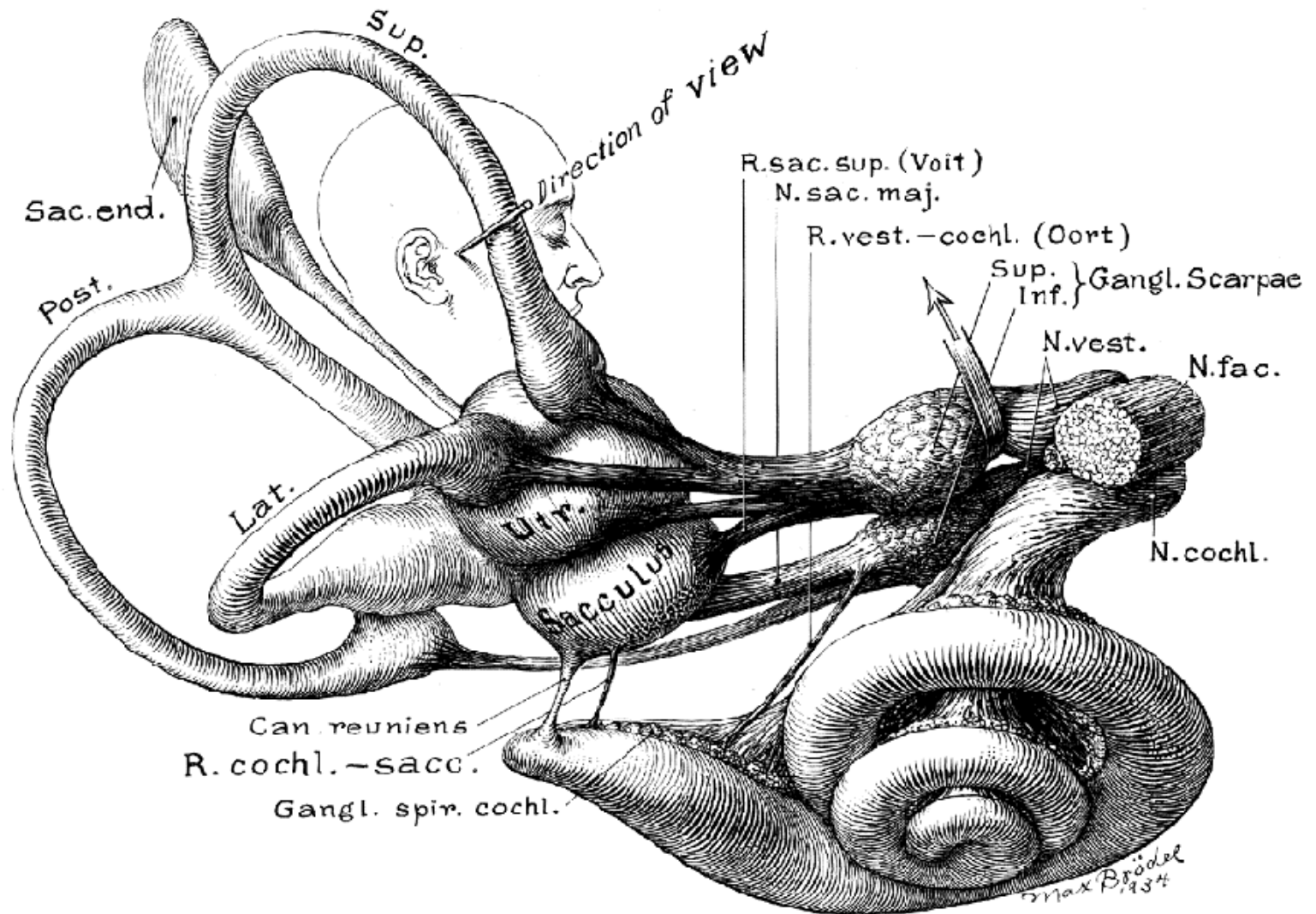
Percepcija zvuka

- Organ pomoću koga opažamo zvuk naziva se kohlea (cochlea) i nalazi se u unutrašnjem uhu.
- Ima spiralni oblik, ispunjena je tečnošću, a jedan njen zid je pokriven trepljastim ćelijama.
- Za svaku frekvenciju iz čujnog opsega postoji mesto gde treplje najviše vibriraju – na taj način čovek određuje visinu zvuka koji čuje.

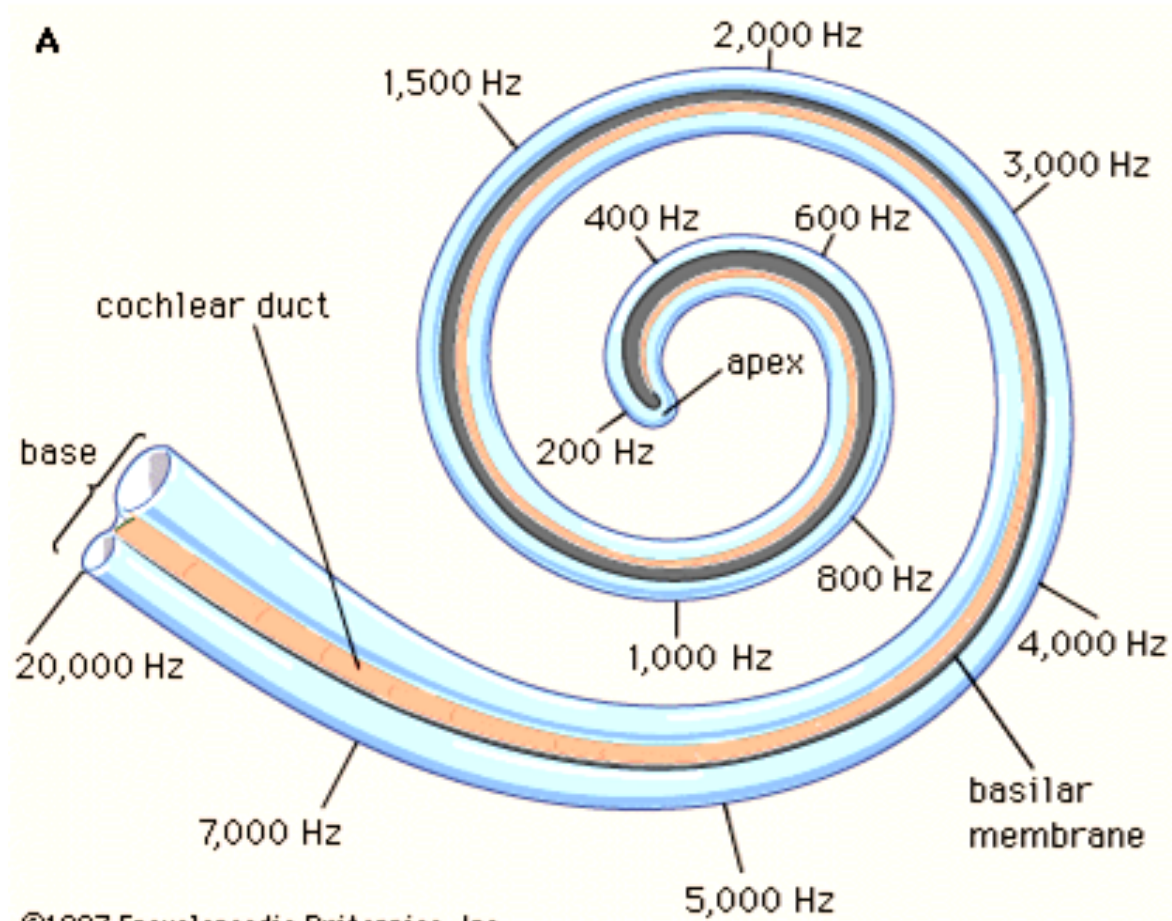
Anatomija ljudskog uha



Unutrašnje uho



Cochlea



©1997 Encyclopaedia Britannica, Inc.



Elektroakustički pretvarači

- Mikrofoni

- Služe za konverziju zvučnih talasa u električni signal.

- Zvučnici i slušalice

- Služe za konverziju električnog signala u zvučne talase.



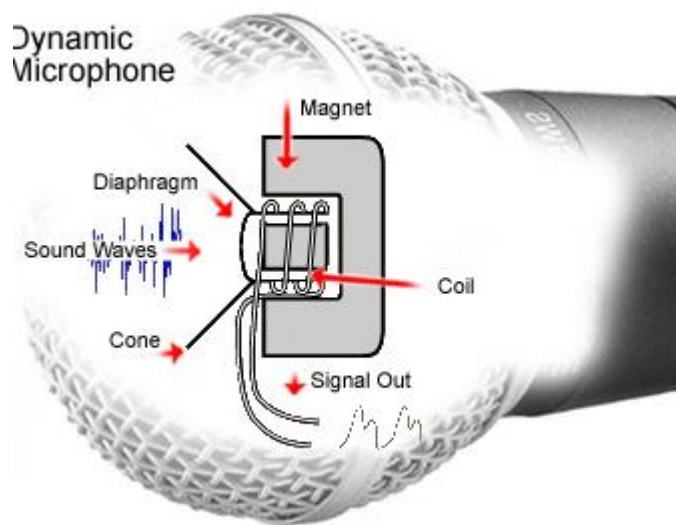
Mikrofoni

○ Podela:

- Dinamički mikrofoni
- Kondenzatorski mikrofoni
- Ugljeni mikrofoni
- Piezoelektrični mikrofoni
- ...

Dinamički mikrofon

- Radi po principu kretanja kalema u stalnom magnetnom polju, što izaziva elektromagnetsku indukciju u kalemu.



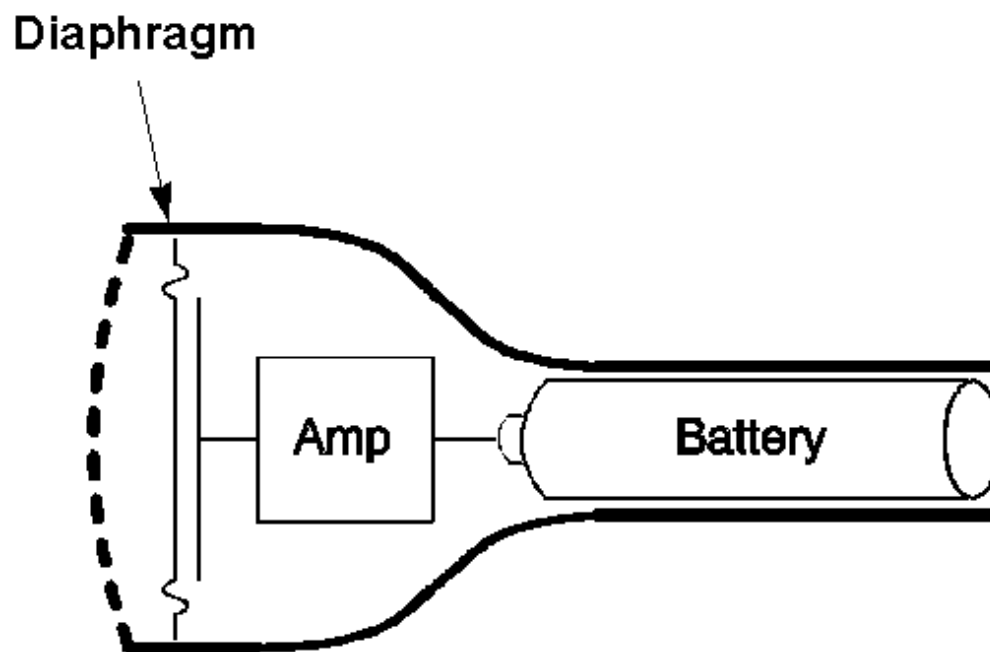


Kondenzatorski mikrofoni

- Kondenzatorski mikrofoni se sastoje od dve ploče, na koje se dovodi konstantan jednosmeran napon (tzv. *fantomsko napajanje*). Te dve ploče čine kondenzator. Kapacitivnost kondenzatora obrnuto je srazmerna rastojanju između ploča.
- Jedna od ploča je pokretna (tzv. **dijafragma**), i kada zvučni talas pomera ploču, periodično se povećava i smanjuje rastojanje između ploča, samim tim se menja i kapacitivnost kondenzatora.
- Rezultat je periodična promena napona na pločama kondenzatora. Ta promena napona se detektuje i pojačava – to je električni signal analogan zvučnom signalu na dijafragmi.

Kondenzatorski mikrofon

- Principijelna šema:



Kondenzatorski mikrofoni

- Uobičajen spoljni izgled:





Kondenzatorski mikrofon

- Posebna vrsta kondenzatorskog mikrofona zove se **elektretski** mikrofon.
- Princip je potpuno isti.
- Razlika je u tome što nema potrebe za fantomskim napajanjem, jer je statična ploča napravljena od *elektreta* (materijal koji oko sebe ima stalno električno polje – kao stalni magnet u električnom smislu).
- Elektretski mikrofoni mogu po performansama stići klasične kondenzatorske, ali zbog masovne proizvodnje i niže cene najčešće se proizvode u jeftinoj varijanti, malih dimenzija i nižeg kvaliteta.

Kondenzatorski mikrofoni

- Klasičan izgled elektretskog mikrofona (najčešća forma elektretskog mikrofona je popularna "bubica"):



- Elektretski mikrofoni se proizvode i u profesionalnijim varijantama (zbog svojih vrhunskih karakteristika koriste se i kao senzorski mikrofoni):



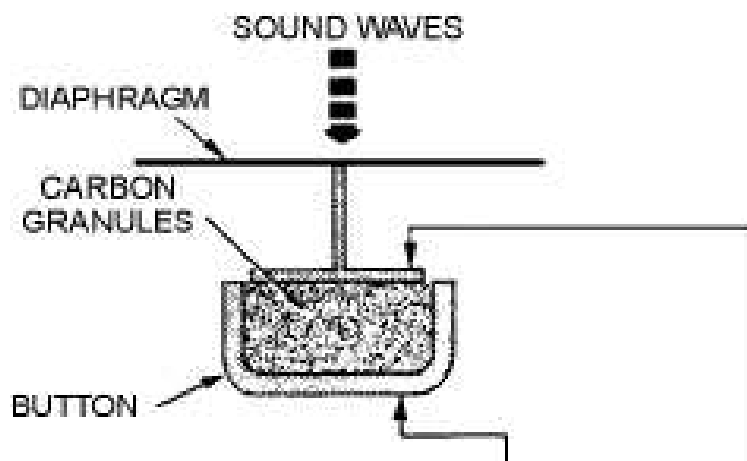


Ugljeni mikrofon

- Poznat iz telefonskih slušalica, ugljeni mikrofon radi na principu promene provodnosti ugljenog praha između dve provodne ploče na kojima je napon.
- Jedna ploča je pokretna (dijafragma), i kada vrši veći pritisak na ugljeni prah – provodnost praha je veća, i obrnuto.
- Ovakvi mikrofoni mogu da igraju i ulogu primitivnih pojačavača (služili su da pojačavaju telefonske signale na dugim linijama pre pojave vakuumskih cevi – "radio lampi").

Ugljeni mikrofon

- Principijelna šema ugljenog mikrofona:



- Tipičan izgled ugljenog mikrofona:



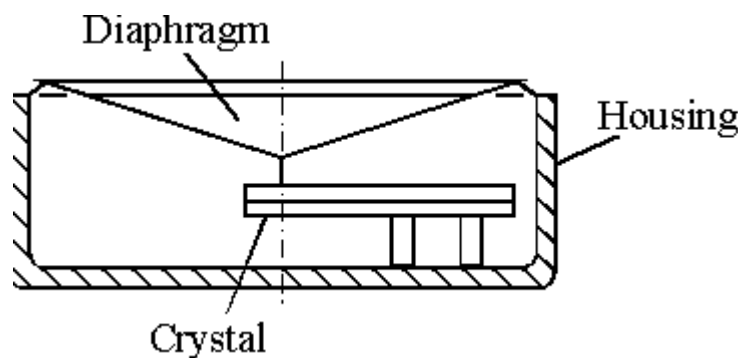


Piezoelektrični mikrofon

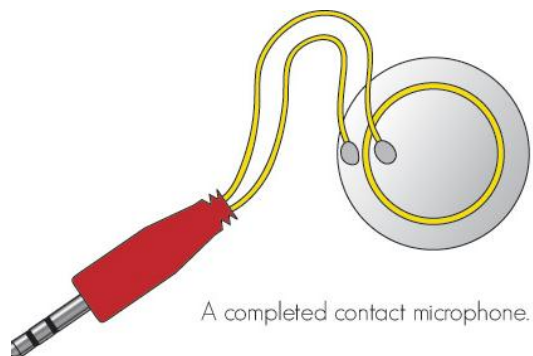
- Piezoelektrični efekat je pojava napona na izvesnim materijalima (kristalima) kada su podvrgnuti pritisku.
- Ukoliko je materijal podvrgnut pritisku čija vrednost osciluje u vremenu, na krajevima će se pojaviti napon koji ima odgovarajuće oscilacije.
- Ovaj princip posebno je pogodan za *kontaktne* mikrofone (npr. za ozvučavanje muzičkih instrumenata – u tom slučaju mikrofon je priljubljen uz telo instrumenta i beleži njegove vibracije).

Piezoelektrični mikrofoni

- Principijelna šema piezoelektričnog mikrofona:



- Tipičan izgled piezoelektričnog mikrofona:





Zvučnici

○ Podela

- Elektrodinamički
- Piezoelektrični
- Elektrostatički

○ Često se pojam zvučnika poistovećuje sa pojmom zvučne kutije.

- Nedvosmislen naziv za sâm zvučnik je engleska reč "driver" (npr. "moje zvučne kutije imaju Dynaudio drajvere").

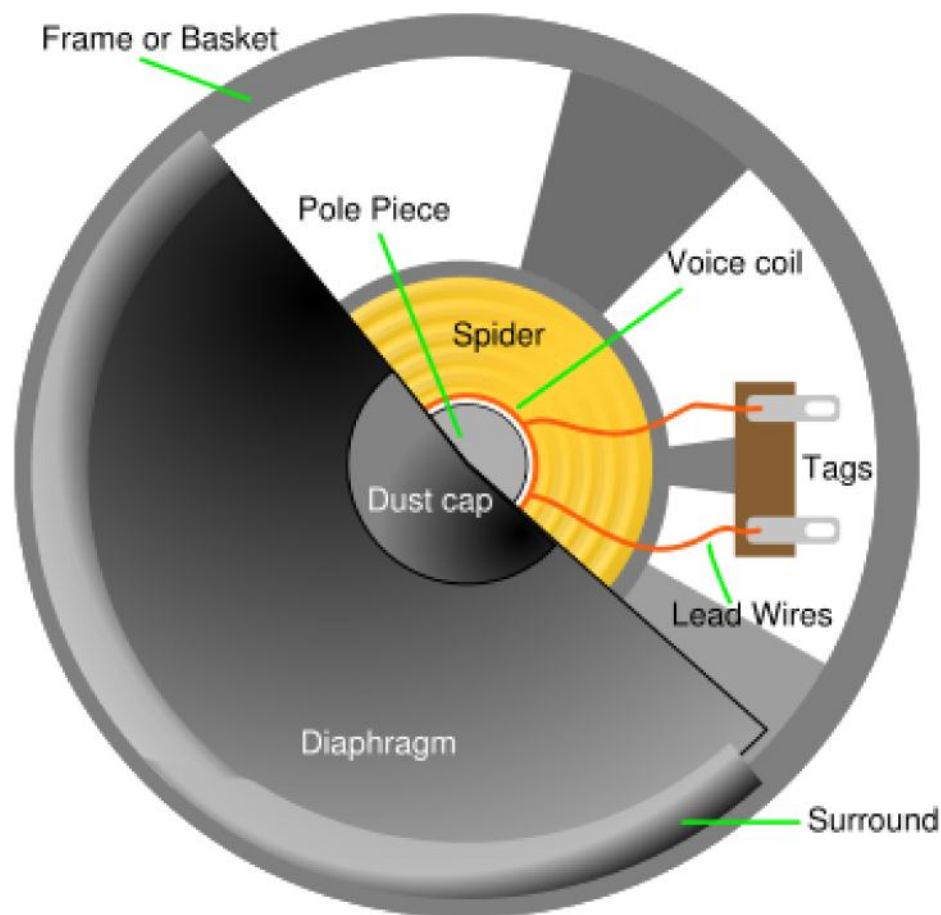


Elektrodinamički zvučnici

- Daleko najpopularnija kategorija zvučnika.
- Princip je isti kao kod dinamičkih mikrofona:
 - promenljivi električni signal prolazi kroz kalem i indukuje u njemu promenljivo magnetno polje;
 - kalem se nalazi u polju salnog magneta, pa se indukovano magnetno polje slaže ili opire u odnosu na stalno polje magneta, što pokreće kalem;
 - pokreti kalema odgovaraju promenama električnog signala, čime se električni signal konvertuje u zvučni.

Elektrodinamički zvučnik

- Konstrukcija elektrodinamičkog zvučnika:



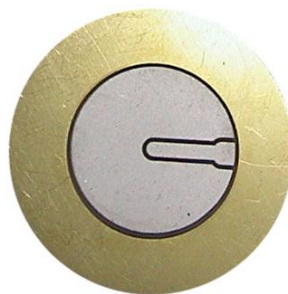
- frame/basket – korpa
- spider – pauk
- voice coil – kalem
- diaphragm – membrana
- surround – vešanje

Pauk se sastoji od talasaste mrežice koja ima ulogu da centrira i nosi kalem.

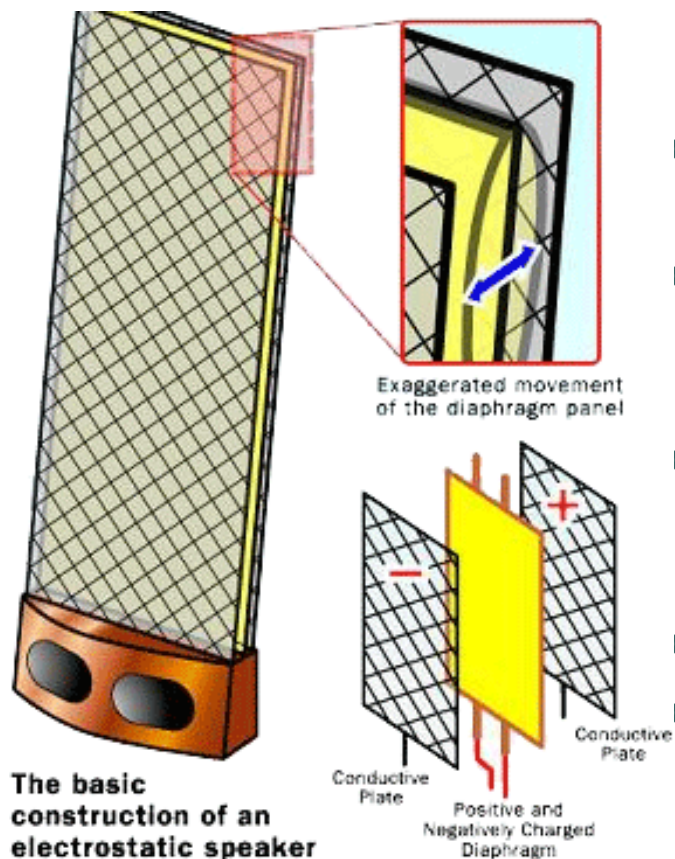
Kalem stoji stalnog magneta i u njegovom je polju.

Piezoelektrični zvučnik

- Princip je isti kao kod piezoelektričnog mikrofona.
- **Prednosti:** otporni su na preopterećenje, izdržljivi.
- **Nedostaci:** uzak frekvencijski opseg, mogu oštetiti pojačavač.
- Najčešće su malih dimenzija i služe kao "biperi".
- Ugrađuju se i u veće sisteme kao visokotonci.
- Tipičan izgled piezoelektričnih zvučnika:



Elektrostatički zvučnik



- Membrana zvučnika je provodna ploča (najčešće plastika prevučena grafitom) između dve provodne rešetke opterećene stalnim naelektrisanjem.
- Membrana je na visokom naponu, i na njoj je konstantna **količina naelektrisanja Q**.
- Na provodne rešetke se dovodi električni audio-signal, koji menja električno polje između rešetki (u skladu sa zvukom).
- Membrana se ponaša kao naelektrisana "čestica" u promenljivom električnom polju i pomera se sa promenama polja.
- **Prednosti:** izuzetno veran zvuk, čvrst precizan bas.
- **Nedostaci:** prevelika usmerenost, slabiji odziv u basovima, osetljivost na vlagu u prostoriji, skupljaju insekte i sitne provodljive predmete.

Elektrostatički zvučnik

- Tipičan izgled elektrostatičkog zvučnika:

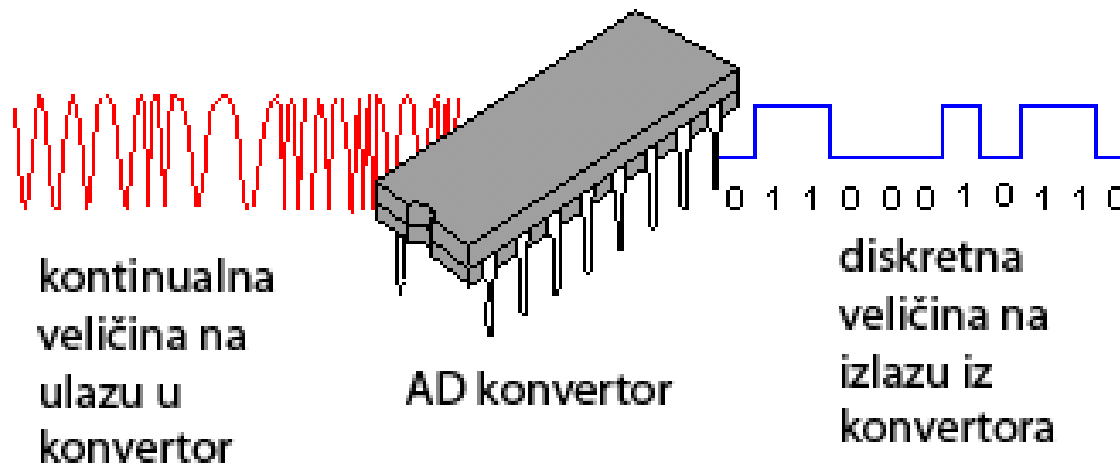




Analogno-digitalna konverzija

- Analogno-digitalna (AD) konverzija je proces pretvaranja neke kontinualne veličine u diskretne.
- Kontinualna veličina je veličina koja vrednost uzima iz kontinualnog skupa.
- Kontinualni skup je skup kod koga između svake dve vrednosti postoji beskonačno mnogo vrednosti.
 - Primer je skup realnih brojeva R . Između, recimo, 1 i 2 postoji 1,5 (i još mnogo vrednosti, naravno). Između 1 i 1,5 sigurno postoji 1,25. Između 1 i 1,25 sigurno postoji 1,125 itd. Između svaka dva elementa skupa uvek postoji beskonačno mnogo elemenata. Sve veličine u prirodi su kontinualne po prirodi (temperatura, napon, pritisak, sila itd).
- Diskretan skup je skup kod koga ovo ne važi.
 - Primer je skup prirodnih brojeva N . Između 1 i 2 nema ničega, te dve vrednosti su jasno odvojene.

- AD konverzija predstavlja preslikavanje nekog kontinualnog na neki diskretan skup.
 - Primer: pretvaranje napona, koji je čisto kontinualna veličina, u broj (sa ograničenim brojem decimala), koji je diskretna veličina.
 - U praktičnim primenama diskretan skup (brojeva) na koji se preslikava kontinualna veličina je obično skup binarnih brojeva.



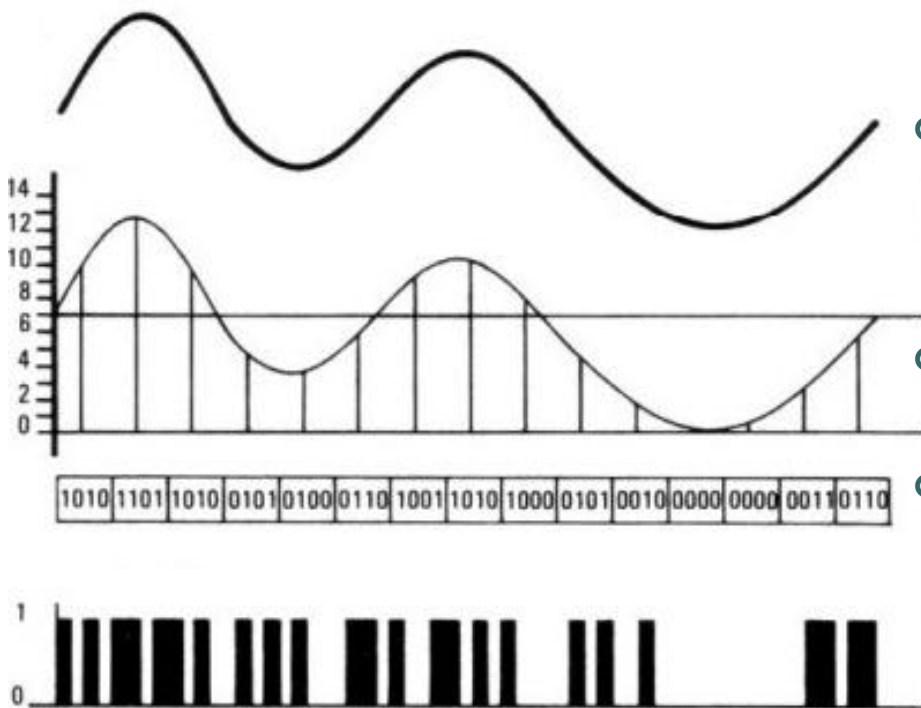


Kontinualno ili analogno?

- U praksi se za kontinualne signale često koristi izraz "analogni", za diskretne veličine izraz "digitalne" (konvertor se zove "analogno-digitalni").
- Ovo nije sasvim ispravno, ali izrazi su se odomaćili.
 - Kada govorimo o konverziji kontinualne veličine u diskretnu, obično imamo u vidu neku električnu kontinualnu veličinu (ako je u pitanju druga fizička veličina, npr. protok tečnosti, temperatura i sl, obično postoji senzor koji je pretvara u električnu; kada je u pitanju zvuk, imamo mikrofonski koji vrši to pretvaranje). Ta električna veličina doslovno prati promene te fizičke veličine, pa je njen oblik signala sličan, odnosno *analogan* obliku signala izvorne veličine. Taj epitet signala je generalizovan na sve signale koji imaju kontinualnu prirodu.
 - Izraz "digitalan" označava stvari koje se mogu predstaviti ciframa (eng. cifra - digit), što je generalizovano na sve diskretne veličine.

Princip AD konverzije

Analog to digital



- U određenim vremenskim intervalima konvertor vrši odmeravanje trenutne vrednosti ulaznog analognog signala.
- U tim trenucima on na izlazu daje **broj** koji označava trenutno odmerenu vrednost ulaznog signala.
- Izlaz konvertora je po pravilu binarni broj.
- Na slici je data principijelna šema postupka AD konverzije. Krajnji rezultat je niz binarnih brojeva koji opisuju signal na diskretan (digitalan) način.
- Na osnovu tih brojeva originalni analogni signal se može rekonstruisati obrnutim postupkom – DA konverzijom.



Osnovni parametri AD konverzije

- Frekvencija odmeravanja
- Rezolucija



Frekvencija odmeravanja

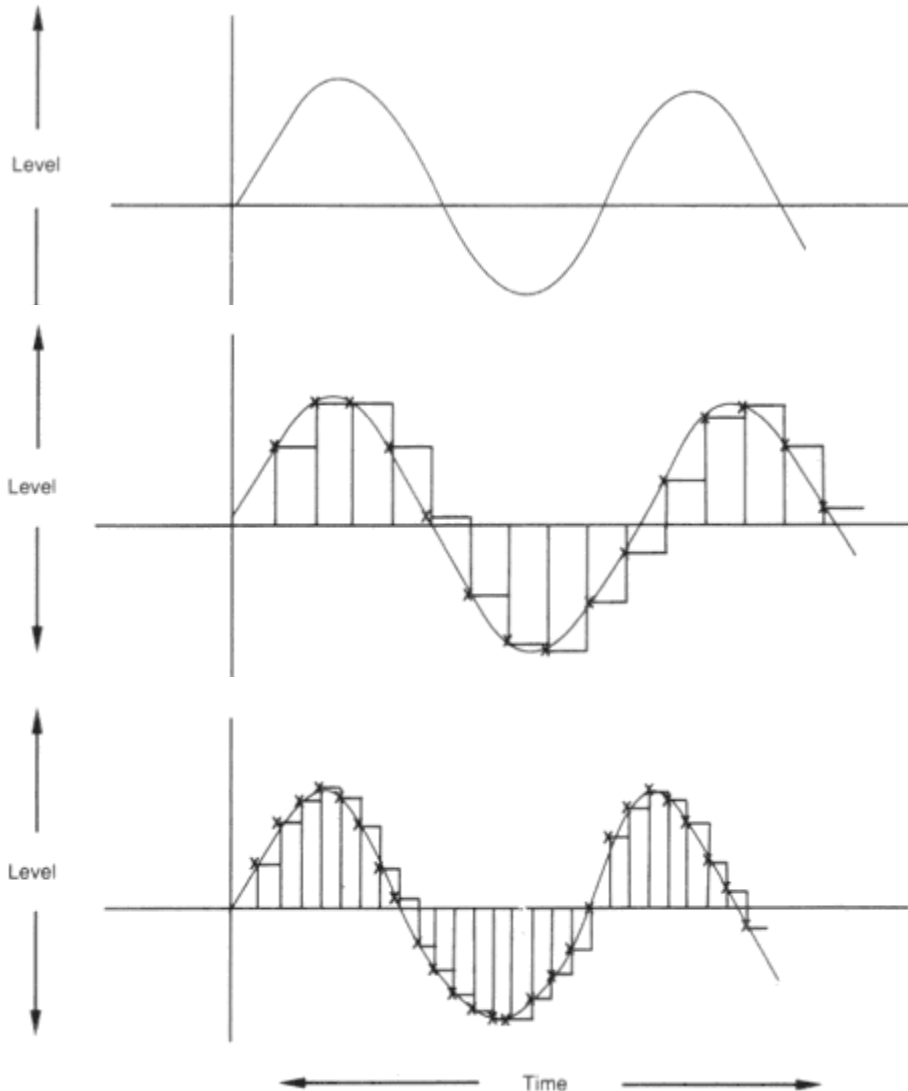
○ Frekvencija odmeravanja

- Frekvencija odmeravanja je frekvencija kojom se vrši odmeravanje nivoa ulaznog signala.
- Što je frekvencija odmeravanja veća, digitalni signal sadrži više informacija (odmerci su "češći"), preciznije opisuje originalni signal, i prilikom rekonstrukcije originalnog signala (DA konverzije) dolazi do manje odstupanja.

○ Proces odmeravanja se takođe naziva "**semplovanje**" (eng. sample – uzorak).

- Frekvencija odmeravanja zove se, u skladu sa tim, frekvencija semplovanja (engl. "sampling rate").

Različite frekvencije odmeravanja



Originalni analogni signal

Signal usemplovan nižom frekvencijom odmeravanja. Odmerci su ređi, a i razlika u vrednostima odmeraka je veća – digitalni signal je više "stepeničast".

Signal usemplovan višom frekvencijom odmeravanja. Semplovi su gušći i razlika između da susedna sempla je manja. Ovakav signal daće manje izobličenja pri rekonstrukciji.



Nikvistova teorema

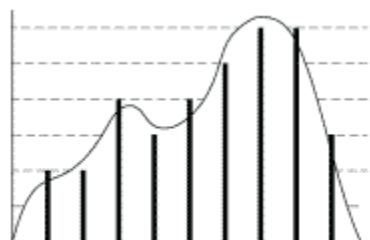
- **Pun naziv:** Nikvist-Šenonova teorema odmeravanja.
- **Uvod:** svaki složeni signal se može razložiti na niz prostoperiodičnih (sinusoidnih) signala, pomoću Furijeovog razvoja. Svaki od tih prostih signala ima svoju frekvenciju. Zato je uobičajeno da se kaže da se zvuk sastoji iz niza frekvencija (kao da su mu to komponente).
- **Teorema (neformalna interpretacija):** ako koristimo frekvenciju odmeravanja f , onda signal koji semplujemo ne sme sadržati frekvencije veće od $f/2$ (inače će seplevan signal sigurno sadržati gubitke). Nikakva frekvencija koja je višlja od $f/2$ neće postojati u digitalnom (i kasnije u rekonstruisanom analognom) signalu.
- **Drugim rečima:** najviša frekvencija koju možemo semplovati sa frekvencijom semplovanja f je $f/2$.
- **Posledica:** što nam je niža frekvencija odmeravanja, to će zvuk biti više odsečen "odozgo", u smislu viših frekvencija.



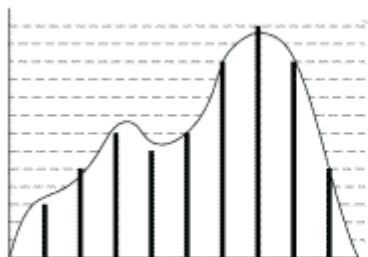
Rezolucija

- Rezolucija je broj različitih (brojnih) vrednosti koje može sadržati jedan odmerak (semp).
 - Rezolucija direktno zavisi od broja bitova koje sadrži jedan odmerak. Ako svaki odmerak sadrži **3** bita, onda jedan odmerak može imati ukupno **8** različitih vrednosti: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 i 111. Rezultat toga je da odmerak ne može fino opisati vrednost signala, već sadrži neku grubu približnu vrednost.
 - Što je veća rezolucija, to svaki odmerak sadrži precizniji opis trenutne vrednosti signala, dakle tačnije opisuje signal (manje aproksimira).
 - Ako konvertor ima rezoluciju od **16** bitova, onda svaki odmerak uzima jednu od mogućih **65536** vrednosti, i samim tim te vrednosti će biti mnogo približnije tačnim vrednostima signala u trenutku odmeravanja.

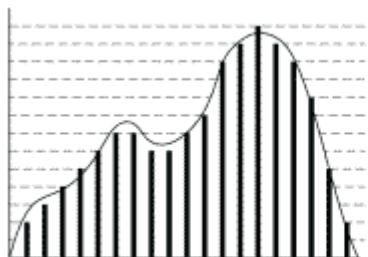
Rezolucija - primer



- Manja rezolucija – manje različitih vrednosti koje digitalni signal može imati – grublji izgled digitalnog signala



- Veća rezolucija – veći broj mogućih vrednosti koje digitalni signal može imati, samim tim on je finiji, bliži originalnom signalu, bolje ga aproksimira.



- Nevezano za rezoluciju – ako pored nje povećamo i frekvenciju odmeravanja (češće očitavamo ulazni signal) – digitalni signal još vernije opisuje ulazni analogni.

Tipične vrednosti

U standardnim hi-fi primenama (CD) standardne vrednosti su:



- Frekvencija odmeravanja: 44,1 kHz
 - Primetimo da se na CD, po Nikvistovoj teoremi, ne može snimiti nikakav zvuk sa frekvencijom višom od 22,05kHz. Iako čovek ne čuje ove frekvencije, one ipak postoje u prirodi; takođe, niže frekvencije, koje čujemo, imaju u sebi više komponente, koje ovim bivaju obrisane. To utiče na kompletnu boju zvuka, te zato CD uvek ima gubitke u zvuku.
- Rezolucija: 16 bitova

U studijskim uslovima:



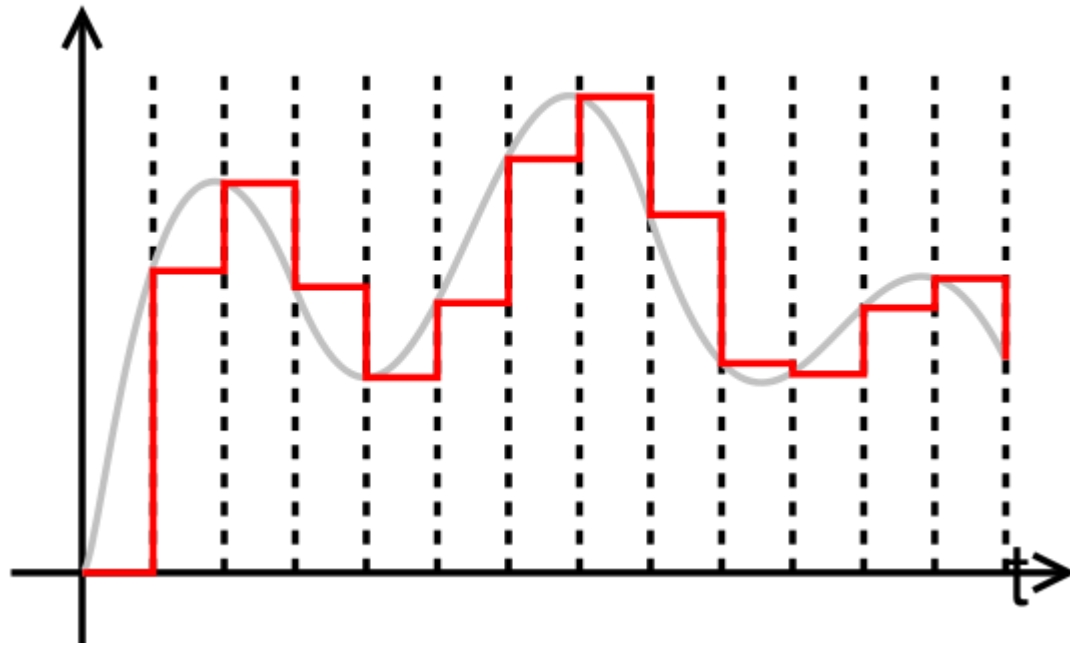
- Frekvencija odmeravanja 48 ili 96 kHz
- Rezolucija: 24 bita
 - Ovo se na uređajima označava kao 24/96



Digitalno-analogna konverzija

- Digitalno-analogna konverzija je proces suprotan analogno-digitalnoj.
- U pitanju je proces transformacije niza cifara (koje možemo zvati "digitalni signal") u neku kontinualnu fizičku veličinu, najčšće napon.
- Digitalno-analogni konvertor (DAC) sastoji se iz:
 - kola za konvertovanje brojeva u napon, i
 - filtra za rekonstrukciju analognog signala.

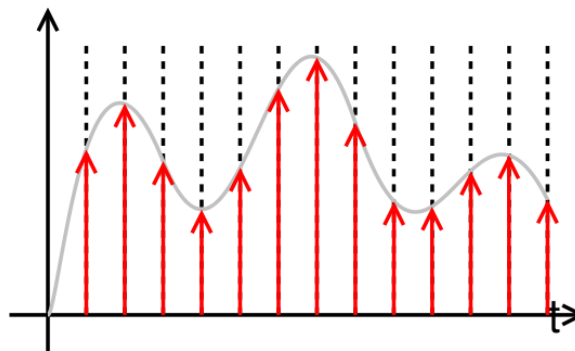
- Ukoliko bi DAC konvertovao brojeve direktno u napon, izlazni analogni signal bi izgledao "testerasto":



- Filter za rekonstrukciju služi da "zaobli" izlazni signal i učini ga što bližim originalnom.

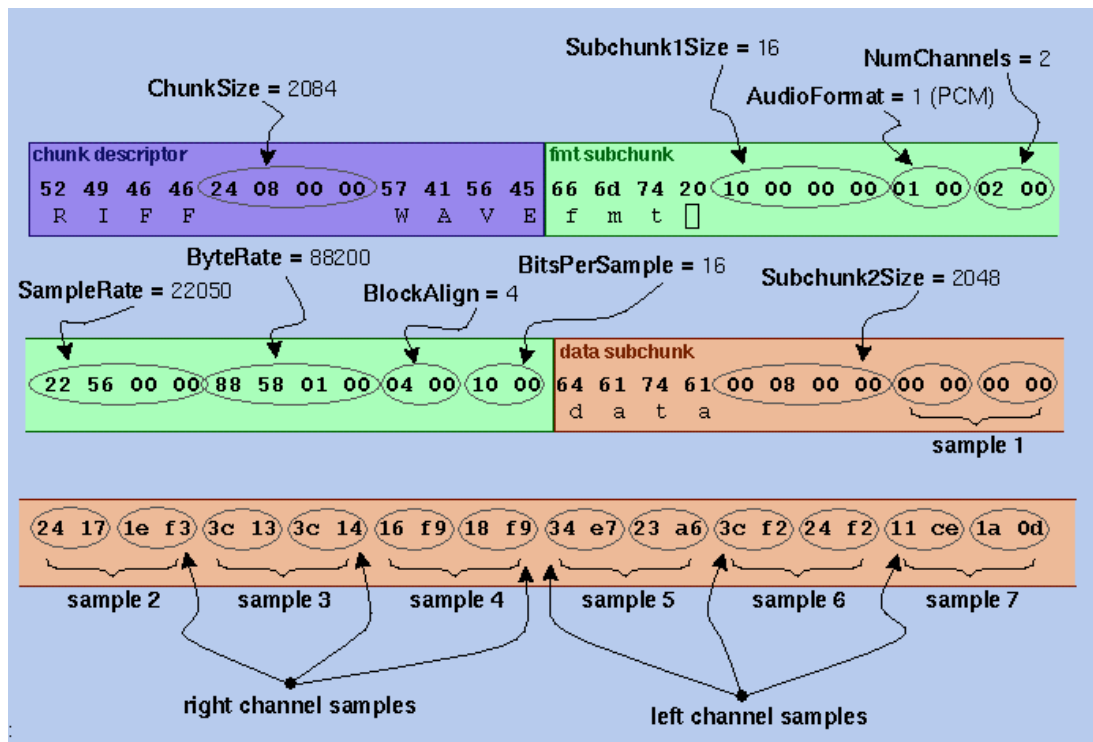
Idealni i relani DAC

- Idealni digitalno-analogni konvertor bi na izlazu kola za konverziju davao niz *impulsa*, na osnovu kojih bi kolo za rekonstrukciju rekonstruisalo polazni signal u potpunosti:

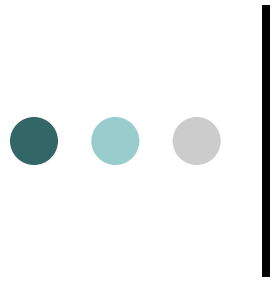


- Ovo u prirodi nije moguće, pa se pri DA konverziji uvek javljaju gubici, najčešće kao harmonijska izobličenja (promena spektra frekvencija koje učestvuju u zvuku u odnosu na originalni spektar).
- Do izobličenja takođe dolazi i zbog stepeničaste prirode digitalnog signala, jer je nemoguće rekonstruisati šta se sa originalnim signalom dešavalo "duž" jednog odmerka (stepenice), već se ima samo informacija o usrednjenoj vrednosti odmerka (videti sliku na prethodnom slajdu).

Ilustrativno: primer strukture "digitalnog signala"



- Obratiti pažnju na narandžasti deo, kraj 2. reda i ceo 3. red: u pitanju su semplovi, odnosno brojevi koji označavaju vrednost signala u svakom trenutku odmeravanja (kod ovog formata u pitanju su parovi – levi kanal, desni kanal).



The End