

5 AUDIO SIGNALI

Audio signali su po svojoj prirodi vrlo specifični, bez sličnog primera u elektrotehnici. Ta specifičnost je direktna posledica veličine informacionog polja zvuka određenog graničnim mogućnostima čula sluha: širinom frekvencijskog opsega i veličinom dinamičkog opsega (u nekim okolnostima i do 120 dB). Nesumnjivo je da ni u jednoj drugoj tehničkoj oblasti u kojoj se radi sa signalima ne postoji potreba za istovremenom upotrebom frekvencijskog opsega tako velike relativne širine (tri dekade, to jest 1:1000).

Kada je informaciono polje koje treba preneti kroz audio sistem tako veliko, merenje i kontrolisanje signala su relativno složen tehnički zadatak koji nema jedinstveno rešenje. Priroda zvučne slike pri tome zahteva da se kontrola signala obavlja ne samo u domenu amplituda, to jest merenjem njegovog ukupnog nivoa, već mu se moraju kontrolisati i druge osobine kao što su frekvencijski sadržaj, eventualne fazne promene, i sve to najčešće u realnom vremenu. Takvi specifični zahtevi učinili su da proces kontrolisanja audio signala ne može da se vrši samo instrumentima, što znači objektivnim mernim procedurama, već je nužno bilo uvesti postupak subjektivne kontrole slušanjem reprodukovanog signala. Čulo sluha se u audio sistemima pojavljuje kao specifičan merni instrument koji ima zadatak da prepozna fizički teško merljive dimenzije signala. To dalje otvara pitanje obučavanja čula sluha da prepozna što finije nivoe njegovog sadržaja.

U mnogim okolnostima kontrola audio signala mora se obavljati u realnom vremenu, bez mogućnosti naknadnih korekcija (na primer pri „živim“ prenosima za potrebe radija i televizije, pri ozvučavanju koncerata i slično). Kontrola audio signala van realnog vremena javlja se samo kada je on prethodno smešten na neki memorijski medij i dostupan naknadnoj detaljnoj proverbi (i naravno kad ima dovoljno vremena). Takav je slučaj, na primer, u montaži i obradi filmskog zvuka, u procesu pripreme raznih snimaka za tržište (tzv. premastering) i slično. U okolnostima velike složenosti informacionog sadržaja koji prolazi kroz sistem kvalitetno upravljanje audio sistemima u realnom vremenu zahteva apriorno poznavanje bitnih karakteristika signala. Zbog toga je ovo poglavlje posvećeno prikazu opštih osobina audio signala i postupcima njihove kontrole, a u narednom poglavlju detaljnije su prikazane njegove dinamičke osobine.

5.1 Osnovni oblici audio signala

Na svom putu od izvora zvuka do slušaoca audio signal se javlja u dva različita fizička oblika: akustičkom i električnom. U akustičkom domenu signal se posmatra kao akustički protok na izlazu iz izvora zvuka ili kao zvučni pritisak u prostoru. Signal u akustičkom domenu uvek ima analognu formu, jer je to prirodna fizička pojava. U električnom domenu audio signal je predstavljen promenama neke električne veličine: napona ili struje. Pri tome on može biti u nekom od dva osnovna oblika: analognom i digitalnom. Unutar električnog domena mogu se pojaviti lokalne transformacije električne forme signala u neki od dva prateća fizička oblika: optički, kada je predstavljen promenama intenziteta svetla (npr. u uređajima za očitavanje signala sa CD, u optičkim vlaknima za povezivanje delova sistema) i magnetski, kada je predstavljen promenama intenziteta magnećenja nekog materijala (u hard diskovima). Neelektričnim formama audio signala po pravilu se ne može spolja pristupiti neposredno jer se one javljaju u svom zatvorenom okruženju (optička vlakna, materijal magnetskog medija i slično).

U nekim fazama putovanja od izvora zvuka do slušaoca audio signal se može pojavljivati i u mehaničkom obliku. Tada je predstavljen fizičkim, odnosno geometrijskim promenama u pogodnom materijalu. To je slučaj sa zapisom na analognoj (LP) ploči i na fabrički proizvedenom CD-u. Mehanički oblik signala nema ekvivalent u drugim oblastima elektrotehnike, i specifičnost je audio sistema.

Osnovni oblici analognog signala - linijski i mikrofonski

Apsolutna veličina signala značajan je faktor za postizanje odgovarajućeg dinamičkog opsega, jer ona određuje koliko će signal biti iznad stalno prisutnog šuma i smetnji u sistemu. U opštem slučaju, audio signali dobijeni na različite načine, sa izlaza raznih pretvarača, električnih muzičkih instrumenata i drugih audio uređaja, mogu biti različitih amplituda. Ta činjenica unosi potencijalni problem pri njihovom međusobnom povezivanju. Da bi se izbegla proizvoljnost u veličinama amplituda analognih signala i omogućilo jednostavnije povezivanje uređaja, svi električni signali koji se mogu pojaviti u audio sistemima dele se u dve kategorije: na linijske i mikrofonske signale.

Linijski signali imaju relativno visok nivo, sa amplitudama koje u maksimumu dostižu veličine reda volta. Prednost signala linijskog nivoa upravo je u njihovoj velikoj amplitudi, jer se time postiže maksimalan odnos signal/šum u sistemu i povećava imunost na eventualni uticaj raznih smetnji. Zbog toga se audio sistemi organizuju tako da signali u svim njegovim delovima budu linijskog nivoa.

Mikrofonske signale karakteriše relativno nizak nivo, sa amplitudama koje su za nekoliko redova veličine manje od linijskih signala. Oni se neumitno pojavljuju na izlazima mikrofona, pa otuda potiče i njihov naziv. Sistem elektroakustičkog pretvaranja u mikrofona je takav da se pri jačoj zvučnoj pobudi dobija izlazni signal veoma malih amplituda, reda milivolta, pa i manji. Shodno tome, pri pobudi niskim nivoom zvuka izlazni napon mikrofona je reda mikrovolta.

Ovako mali signali podložni su ugrožavanju spoljnim smetnjama i sopstvenim šumom uređaja. Zbog toga se na mestima u sistemu gde se generišu signali mikrofonskog nivoa obavezno postavljaju odgovarajući pretpojačavači koji ih odmah podižu na nivo linijskog signala. Mikrofonski pretpojačavači uobičajen su sklop na ulazima svih uređaja u koje se mikrofoni neposredno uključuju, ali se u audio sistemima koriste i kao nezavisni uređaji. Zbog razlike u nivoima signala, na audio uređajima u koje se mikrofoni neposredno priključuju ulazi predviđeni za njih moraju biti posebno označeni (uobičajena oznake su „MIC“ i „LIN“ za ulaze prilagođene mikrofonskim i linijskim nivoima signala, respektivno).

Osim na izlazu mikrofona, signal mikrofonskog nivoa pojavljuje se i na izlazima klasičnih gramofona. Njihovi pretvarači (tzv. gramofonske zvučnice, gramofonske „glave“ ili gramofonski „pikap“, kako se sve nazivaju) koriste principe mehaničko-električnog pretvaranja koje na izlazu daju signale veoma niskih nivoa. Kada se u audio sistem vezuju gramofoni, moraju se koristiti posebni pretpojačavači koji signal podižu na linijski nivo.

Osim odgovarajućeg pojačanja radi podizanja na linijski nivo, signal iz gramofona zahteva i posebne frekvencijske korekcije. Naime, pre upisivanja na gramofonsku ploču audio signal se podvrgava izvesnim frekvencijskim korekcijama. Te korekcije su uslovljene mogućnostima vinilne ploče kao medija za zapisivanje mehaničkog oblika analognog signala. Da bi signal reprodukovano s gramofona bio jednak onom koji je bio na početku neophodno ga je, osim pojačanja, propustiti kroz filter s frekvencijskom karakteristikom koja je inverzna primenjenoj pre upisivanja.

Oblik karakteristike filtra koji se koristi pre upisivanja signala na ploču, kao i filtra u pretpojačavaču za gramofon, utvrđen je standardom stare esnafske asocijacije koja se skraćeno naziva RIAA (*Record Industry Association of America*). Zbog toga se pretpojačavači za gramofone koji u sebi sadrže takve filtre uobičajeno nazivaju „RIAA pretpojačavači“. Uređaji koji imaju posebne ulaze za gramofone, a to su miksete za diskoteke i kućni sistemi za reprodukciju zvuka s priključkom za gramofon, imaju u sebi

takve filtre. Ulazi za gramofon uvek su posebno označeni jer se zbog ugrađenog filtra ne mogu koristiti za druge namene.

Osnovni oblik digitalnog audio signala

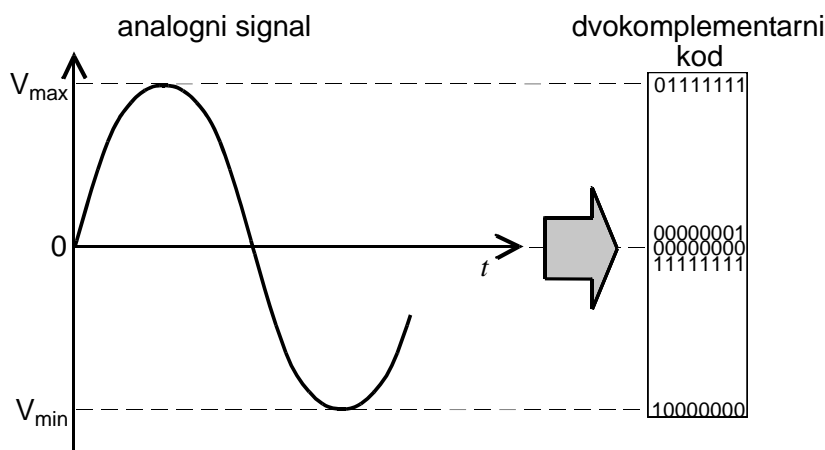
Forma digitalnog audio signala definisana je njegovom frekvencijom odabiranja i brojem bita kojim se predstavlja vrednost odmeraka. Danas je u audio sistemima u upotrebi nekoliko različitih frekvencija odmeravanja, koje su zbog kompatibilnosti audio uređaja utvrđene standardom. Istorijski posmatrano, najstarija korišćena frekvencija, uvedena na samom početku primene digitalnih audio signala, jeste 44.1 kHz. Ova neobična vrednost definisana je numeričkim postupkom na osnovu zahteva da s jedne strane bude malo viša od graničnih 40 kHz (dvostruko više od 20 kHz), a s druge da se povorka odmeraka audio signala može smestiti u kompozitni video signal, tačnije da ceo broj odmeraka stane u jednu aktivnu video liniju. Ovaj specifičan zahtev je nametnut jer su u vreme uvođenja digitalizacije u audio tehnologiju (kraj 70-ih i početak 80-ih godina dvadesetog veka) jedini snimači koji su mogli zapisivati digitalni audio signal s njegovim širokim frekvencijskim opsegom bili analogni video snimači (magnetoskopi). Pri frekvenciji 44.1 kHz u svaku video liniju smeštana su po tri odmerka (tačnije po šest: tri levog i tri desnog stereo kanala). Ova vrednost je prihvaćena u standardu CD medija koji je nastao u to vreme. Iz tih razloga standardna frekvencija 44.1 kHz opstaje i danas, iako su se tehnološke okolnosti promenile. U tim počecima digitalnog audija paralelno je u upotrebu uvedena i frekvencija odmeravanja 48 kHz.

U vreme kada je počela primena digitalnih signala u audiotehnici, brzine odmeravanja do 50 kHz bile su tehnološki maksimum za klasu konvertora čije su cene bile prihvatljive na tržištu komercijalnih audio uređaja. Daljim razvojem tehnologije A/D i D/A konvertora sukcesivno su uvođene u upotrebu više frekvencije, ali uvek kao celobrojni umnožak osnovne vrednosti 48 kHz zbog kompatibilnosti. Danas se u audio sistemima standardno koriste frekvencije 96 kHz i 192 kHz. Razlozi primene viših frekvencija, iako je frekvencijski opseg audio signala ograničen, objašnjeni su kasnije.

Audio signal je po svojoj prirodi bipolaran, što proizlazi iz činjenice da on reprezentuje zvučni pritisak koji je po definiciji naizmenična komponenta superponirana atmosferskom pritisku. Direktna digitalna predstava takvog signala podrazumevala bi da minimalni binarni kodni broj u nizu predstavlja maksimalnu negativnu vrednost, a maksimalni binarni kodni broj predstavlja maksimalnu pozitivnu vrednost analognog signala. Međutim, za predstavljanje audio signala u digitalnom obliku koristi se transformacija osnovnog binarnog koda koja se naziva dvokomplementarni kod. Ona je za slučaj četvorobitnih binarnih brojeva prikazana u Tabeli 5.1. Vidi se da je dvokomplementarni kod izveden iz osnovnog binarnog koda promenom mesta gornje i donje polovine tabele s brojnim nizom. Iz tabele se takođe vidi da se ta transformacija praktično ostvaruje tako što se invertuje najznačajnija (MSB) cifra. Da bi se talasni oblik lakše povezao s binarnim nizom koji ga predstavlja, na slici 5.1 šematski je predstavljena konverzija analognog audio signala u dvokomplementarni digitalni kod za slučaj osmobitnih binarnih brojeva.

Tabela 5.1. Ilustracija dvokomplementarnog binarnog koda

	osnovni binarni kod		dvokomplementarni kod
najveća vrednost	1111		0111
	1110		0110
	1101		0101
	1100		0100
	1011		0011
	1010		0010
	1001		0001
	1000		0000
	0111		1111
	0110		1110
	0101		1101
	0100		1100
	0011		1011
	0010		1010
	0001		1001
najmanja vrednost	0000		1000

**Slika 5.1.** Šematski prikaz konverzije analognog signala u dvokomplementarni kod na primeru osmobicne reči

Postoje izvesne praktične prednosti dvokomplementarnog koda koje su učinile da on bude primenjen u audio sistemima. Prvo, u njemu ekstremne vrednosti binarnog signala, 0000 i 1111, predstavljaju vrednosti analogne nule, tj. najmanje negativne kvantne vrednosti, respektivno. U slučaju bilo kakvog prekida u toku signala koji bi kao rezultat generisao povorku samo nula ili samo jedinica, izlazni analogni signal nakon D/A konverzije bio bi 0 V, ili bi imao najmanju moguću negativnu vrednost. Ako bi se umesto dvokomplementarnog primenio osnovni binarni kod, prekid u audio sistemu stvarao bi na njegovom izlazu maksimalne amplitude analognog signala. To bi pri svakom prekidu dovelo izlazni elektroakustički pretvarač u maksimalni položaj membrane, pozitivan ili negativan, što je događaj rizičan po integritet kretnog sistema pretvarača, a za slušaoca nije prijatan.

Digitalni audio signal kao realni fizički signal

Digitalni signal nakon konverzije predstavlja skup podataka, to jest spisak vrednosti signala izmerenih određenim, unapred usvojenim vremenskim redosledom, koji je definisan frekvencijom odmeravanja. Takav signal je sa aspekta korisnika u nematerijalnoj formi zapisanoj na nekom memorijskom mediju. Fizička forma njegovih bita nije od značaja, kao što nije od značaja fizička forma bilo kakvih podataka u računaru.

Postoje okolnosti kada se iz virtuelne forme spiska binarnih brojeva digitalni audio signal mora transformisati u fizički signal, kada postaje neka fizička veličina koja se menja u ritmu promene bita (struja, napon, intenzitet svetla, itd.). U takvoj formi signal se šalje kroz realne prenosne kanale, u kojima postoje razna ograničenja svojstvena fizičkom svetu. Ti prenosni kanali mogu biti magnetski zapis na traci, zapis na optičkim medijima kao što su CD ili DVD, telekomunikacioni prenosni sistem ili običan kabl. Njihova ograničenja treba na neki način savladati i sprečiti da se sadržaj digitalnih informacija pogrešno prenese i tako degradira signal.

Kada digitalni audio signal postane fizički signal, povorka bita s brzinama odmeravanja kakve se koriste u audio sistemima ima veoma širok frekvencijski opseg. Na primer, bitska brzina osnovnog audio signala stereo formata sa 16-bitnom konverzijom i frekvencijom odmeravanja 44.1 kHz ima protok:

$$44.1 \text{ kHz} \times 16 \text{ bita} \times 2 \text{ kanala} = 1.4112 \text{ Mbit/s.}$$

Ovo je i najmanja bitska brzina koja se može javiti u audio sistemima, jer je 44.1 kHz najniža frekvencija odmeravanja koja je u upotrebi. Pri frekvenciji odmeravanja 48 kHz bitska brzina digitalnog stereo signala je 1.536 Mbit/s, i srazmerno veća za još više frekvencije. Za običan stereo signal gornja granica brzine koja se sreće u praksi je u slučaju frekvencije odmeravanja 192 kHz pri konverziji sa 24 bita:

$$192 \text{ kHz} \times 24 \text{ bita} \times 2 \text{ kanala} = 9.216 \text{ Mbit/s.}$$

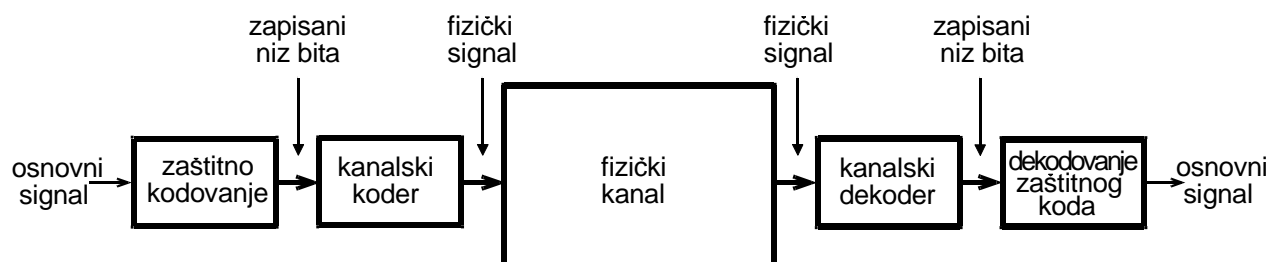
Za višekanalne signale brzine prenosa se odgovarajući broj puta multipliciraju.

Kada se takva povorka bita pretvori u fizički signal on ima svoj realan frekvencijski spektar. Gornja granična frekvencija takvog fizičkog signala menja se u vremenu i zavisi od njegovog sadržaja, odnosno od dinamike smenjivanja jedinica i nula. U tom pogledu je najgori mogući slučaj pri sukcesivnom smenjivanju jedinice i nule. Iz navedenih primera je jasno da gornja granična frekvencija digitalnog audio signala za dva reda veličine premašuje frekvencijski opseg standardnog analognog audio kanala od 20 kHz.

Ostali oblici digitalnog audio signala – zaštitni i kanalski kod

Da bi se digitalni signal prilagodio realnim mogućnostima pri slanju u neki fizički kanal za prenos, i pri tome još zaštitio od mogućih degradacija, nužno se uvode određene transformacije njegovog osnovnog koda. Te transformacije se ostvaruju kroz dva nivoa posebnog kodovanja. Oni su označeni kao zaštitno kodovanje i kanalsko kodovanje. Njihovo mesto u procesu prenosa digitalnog signala prikazani su na slici 5.2.

Cilj zaštitnog kodovanja u audio sistemima, kao i u telekomunikacijama, jeste da se nakon izlaska signala iz fizičkog kanala isprave greške nastale pri prenosu. Zaštitno kodovanje podrazumeva, po pravilu, proširivanje podataka uvođenjem dodatnih bita, čime se do izvesne mere omogućavaju detekcija i ispravljanje grešaka. Dometi takve zaštite unapred su određeni vrstom odabranog zaštitnog koda. U audio sistemima se koriste standardni zaštitni kodovi kao i u drugim oblastima telekomunikacija. Na primer, u pripremi signala za upisivanje na CD koristi se poznati Rid-Solomonov zaštitni kod.



Slika 5.2. Blok-šema prenosa digitalnog audio signala kroz neki fizički kanal sa označenim mestima zaštitnog i kanalskog kodovanja

Kada fizički kanal ne može da primi signal frekvencijskog opsega kakav ima digitalni audio signal, signal se modifikuje u proceduri koja se naziva kanalsko kodovanje. Ono mora da zadovolji dve bitne funkcije. Prva funkcija kanalskog kodovanja je da se signal pre ulaska u fizički kanal pripremi tako da u njegovoj povorci bita smenjivanje jedinica i nula bude u ritmu koji daje dovoljno nisku gornju graničnu frekvenciju. To u praksi znači da promena stanja između 1 i 0 treba da se dešava dovoljno retko. Druga funkcija kanalskog kodovanja je da se na mestu prijema olakša rekonstrukcija takta signala. Naime, u realnosti je moguća pojava dužih pauza u signalu kada nema promena u signalnim bitima. Pošto se takt na prijemu održava samo na osnovu bitskih promena u dolazećem signalu, neophodno je na veštački način povremeno unositi promene bitskog stanja da bi se očuvala sinhronizacija.

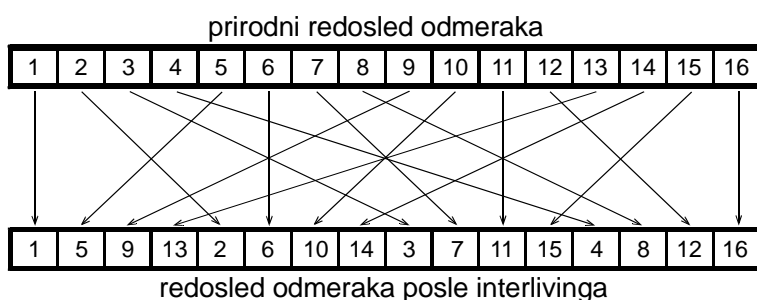
Kanalsko kodovanje se vrši proširivanjem signala izvesnim brojem dodatnih bita. To se radi tako što se blokovi originalnih signalnih bita zamenjuju po unapred zadatom ključu novim, odgovarajuće dužim blokovima koji imaju manju učestanost prelaza između bitskih stanja. Iako se time bitski protok povećava, kao rezultat dobija se smanjenje gornje granične frekvencije fizičkog signala, jer se smanjuje brzina njegovih promena.

Interliving – zaštitni kod audio signala

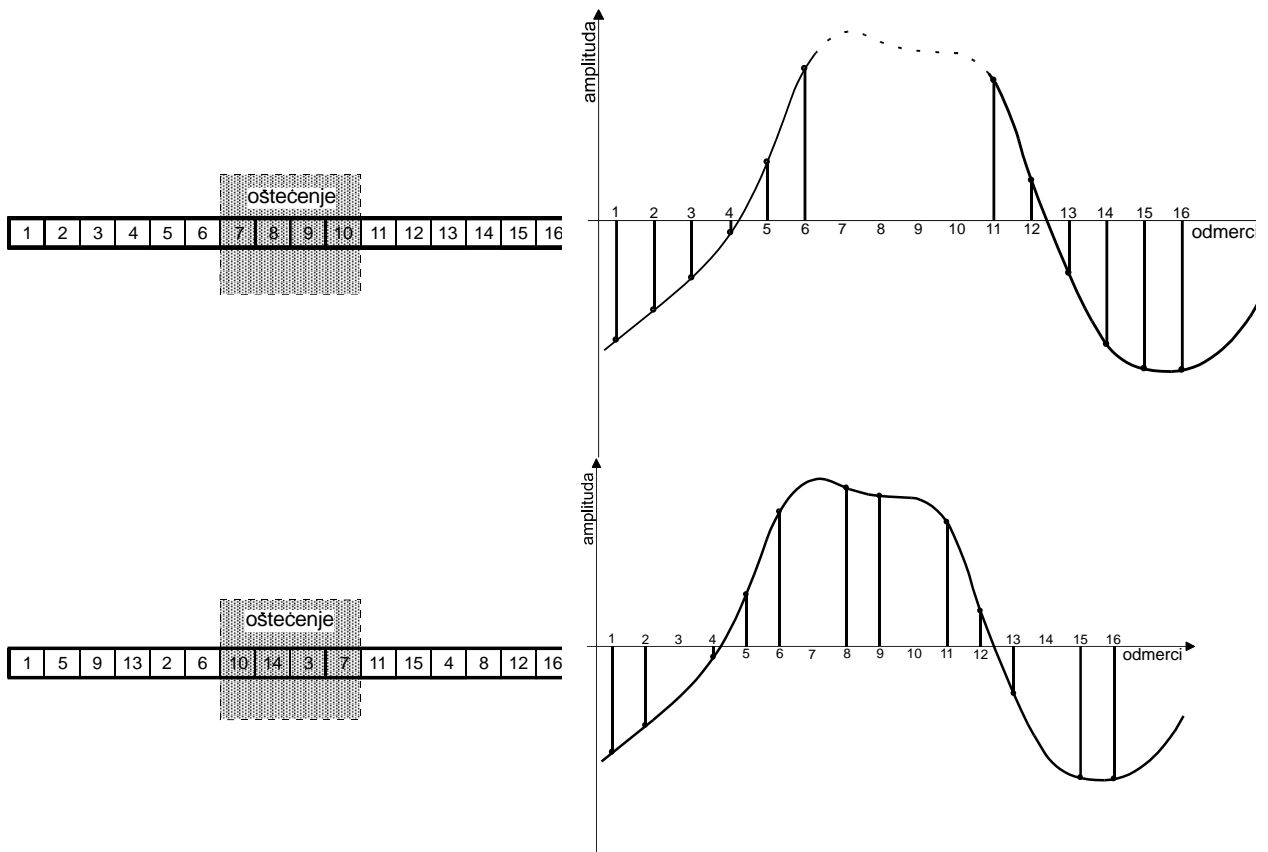
Neki fizički kanali koji se koriste u audio sistemima, na primer optički ili mehanički zapis, mogu da unesu destruktiju velike povorke bita čija rekonstrukcija daleko premašuje mogućnosti poznatih zaštitnih kodova. Na primer, svaki otisak prsta ili mehanički zarez na površini CD stvara destruktiju velikog broja bita. To je realnost koja se ne može sprečiti, pa je bilo neophodno uvesti metod kojim se takvi problemi u audio sistemima mogu prevazići.

Za razliku od zaštitnog kodovanja koje se koristi u prenosu podataka, gde je zadatak pouzdana detekcija svih pogrešno prenetih bita i njihovo ispravljanje, u zaštitnom kodovanju pri prenosu audio signala postoje izvesne specifičnosti zasnovane na karakteristikama ljudske percepcije zvučnih informacija. Naime, pri reprodukciji zvuka nije uvek i po svaku cenu neophodna potpuna rekonstrukcija svih pogrešno prenetih bita. Kvalitet prenosa treba posmatrati na nivou očuvanosti vrednosti analognih odmeraka, to jest zvučne slike u celini. Zbog toga se u domenu zaštitnog kodovanja audio signala, pored standardnih postupaka preuzetih iz telekomunikacija, koriste i metode koje umesto očuvanja potpune tačnosti signala na nivou bita imaju za cilj dovoljno tačnu rekonstrukciju analognog signala, to jest vrednosti odmeraka. Šta je pri tome dovoljno tačna rekonstrukcija procenjuje se na osnovu mogućnosti percepcije greške pri slušanju.

To je otvorilo mogućnost da se u zaštitnom kodovanju audio signala uvede poznata metoda koja se naziva interliving. On se u audiotehnici primenjuje na nivou odmeraka. Na slici 5.3 prikazana je šematska ilustracija postupka interlivinga u pripremi digitalnog audio signala na primeru bloka od 16 odmeraka. Po nekom unapred definisanom principu odmercima se menjaju mesta, to jest mešaju se u vremenskom redosledu pojavljivanja. Na kraju prenosa, na izlazu iz fizičkog kanala, odmerci se vraćaju na svoje prirodno mesto.



Slika 5.3. Ilustracija principa interlivinga na modulu od 16 odmeraka.



Slika 5.4. Šematski prikaz uticaja prekida u trajanju od četiri odmerka na signal s interlivingom i bez njega: gore – bez interlivinga; dole – sa interlivingom

Efekat interlivinga u slučaju da se dogodi oštećenje prikazan je na slici 5.4. Oštećenje znači nestanak jednog vremenskog segmenta signala u kome se nalazi izvestan broj odmeraka. To je ozbiljna degradacija koja se ne može ispraviti uobičajenim zaštitnim kodovanjem. Sa slike se vidi da u slučaju oštećenja signala sa interlivingom posle vraćanja odmeraka u početni redosled dolazi do razbacivanja greške duž signala. Pri takvom oštećenju primenjuje se interpolacija kojom se izračunavaju vrednosti pojedinačnih oštećenih odmeraka na osnovu susednih vrednosti. Jasno je da to nije apsolutna rekonstrukcija i da ostaju neke razlike između vrednosti dobijene interpolacijom i stvarne vrednosti kakva je bila pre prenosa. Ipak, pod određenim okolnostima takve razlike mogu biti neprimetne za slušaoca. Bitno je da se primenom interlivinga može u realnom vremenu nadoknaditi relativno veliki broj nedostajućih podataka, a da pri tome metoda ne zahteva povećanje broja prenesenih bita.

Kombinacija uobičajenog zaštitnog kodovanja i interlivinga odmeraka omogućava da se pri reprodukciji u realnom vremenu prevaziđu i relativno velike destrukcije signala. Na primer, postoje podaci da se u zapisu na CD-u amortizuju greške u očitavanju veličine i do 4000 bita u nizu. To odgovara oštećenjima na površini diska od oko 1 mm.

EFM kanalski kod

Principi na kojima se zasniva kanalsko kodovanje u audio sistemima mogu se ilustrovati na primeru CD zapisa. U pripremi audio signala za upisivanje na CD koristi se kanalsko kodovanje koje ima dve faze. Prva faza se naziva EFM kod, što je skraćenica od *Eight to Fourteen Modulation*. Naziv potiče od činjenice da se svaka grupa od osam signalnih bita zamenjuje novom grupom od 14 bita. Ta zamena se radi po unapred definisanom ključu. Od ukupnog broja mogućih 14-bitnih reči (što je 2^{14}) selekcijom je odabrano 256 koje zadovoljavaju uslov da je učestanost smene jedinica i nula dovoljno mala. Tako je utvrđena tabela u kojoj je svakoj od 256 mogućih vrednosti osmobicne grupe

iz audio signala dodeljena po jedna 14-bitna kodna reč. Ova faza kanalskog kodovanja obavlja se iščitavanjem iz memorije pripremljenih 14-bitnih grupa koje zamenjuju signalne bajte. Tabela konverzije definisana je standardom i taj dokument se naziva „Crvena knjiga“.

Za ilustraciju ideje proširivanja može poslužiti jedna od tih 256 različitih 14-bitskih grupa. Tako je 8-bitnom kodu binarnog broja 0111 1010 dodeljen 14-bitni kod 0000 0010 0000 10. Vidi se da u drugom delu originalnog signala postoji sukcesivna smena 1 i 0, što proširuje frekvencijski opseg fizičkog signala koji bi se od tih bita napravio. U 14-bitnoj grupi kojom se zamenjuje ovaj bajt izbegnuto je takvo smenjivanje, pa je spektar signala napravljenog od ovakvog binarnog niza uži.

Nakon EFM kodovanja, u drugoj fazi kanalskog kodovanja novoformiranoj povorci od 14 bita dodaje se još jedan blok od tri bita. Kada se u signalu pojavljuje duža kontinualna povorka jedinica ili nula, u ova tri bita se radi namerna izmena binarnog stanja da bi se obezbedila sinhronizacija na prijemu čak i kada signal proširen EFM kodom sadrži sve jedinice ili sve nule.

Prema tome, opisano kanalsko kodovanje koje se primenjuje u zapisu signala na audio CD uvodi proširenje po svakom bajtu od 8 na 17 bita. To predstavlja uvećanje bitske brzine $17/8 = 2.125$ puta. Međutim, zahvaljujući pogodnim smenama jedinica i nula gornja granična frekvencija takvog fizičkog signala smanjuje se za više od dva puta i obezbeđuje se sinhronizacija pri reprodukciji.

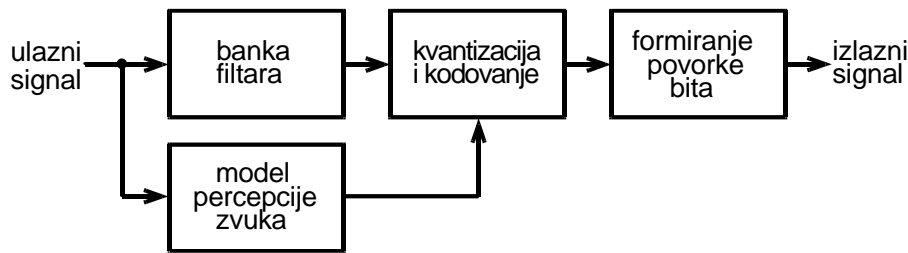
Audio signali u komprimovanom obliku

Digitalni oblik audio signala otvara mogućnost za razne transformacije koje nemaju ekvivalent u analognom domenu. Svakako najznačajnija među njima jeste kompresija, koja kao rezultat daje smanjenje količine podataka kojim je audio signal predstavljen. Kompresija se realizuje zahvaljujući činjenicama da složeni zvučni signali sadrži redundantne informacije i informacije koje čulo sluha iz raznih razloga ne može da percipira. U procesu kompresije sprovode se transformacije kojima se uklanjaju redundantne i sluhu nedostupne informacije, pa se dobitak manifestuje smanjenjem bitske brzine pri prenosu. To istovremeno smanjuje potreban kapacitet memorijskih medija za njegov smeštaj.

Pristup kompresiji audio signala može se realizovati na dva načina: kao kompresija bez gubitaka (*lossless coding*) i kao kompresija koja unosi izvesne promene u signalu, za koje se postavlja cilj da slušaocu budu što manje primetne. Kompresija bez gubitaka moguća je do granice bitskih protoka 256 kbita/s (s početnih 1.5 Mbita/s kod stereo signala pri frekvenciji domeravanja 48 kHz i 16-bitnom konverzijom). Eventualna potreba za daljom kompresijom, to jest smanjenjem bitskog protoka, povlači za sobom perceptivne promene u zvučnoj slici. Obim tih promena zavisi od karaktera signala koji se prenosi, njegovog spektralnog sadržaja i dinamičkih svojstava njegove obvojnice. Ovde pojam „kompresija bez gubitaka“ treba shvatiti uslovno, jer se to odnosi na prosečne uslove slušanja. Realno je pretpostaviti da se u vrlo kvalitetnim uslovima reprodukcije zvuka ipak može primetiti izvesna razlika između signala komprimovanog bez gubitaka i nekomprimovanog signala ako se oni slušaju naizmenično (takozvani A-B test).

Kompresija bez gubitaka zasniva se na prilagođavanju količine informacija kojom se signal reprezentuje mogućnostima percepcije zvuka. Ona se zasniva na dve važne činjenice. Prva je da u realnim audio signalima postoje delovi koji prirodno nose smanjenu količinu informacija. Na primer, ako u signalu postoji segment tišine, u standardnom obliku signala i taj deo će se kodovati istim brojem bita kao i delovi koji su informaciono bogati. Takođe, delovi signala malih amplituda mogu se predstavljati s manjim brojem bita. Najzad, pri istovremenom prenosu više signala, kao na primer u stereo sistemima, postoji redundansa usled sličnosti signala u kanalima, što takođe donosi mogućnost za smanjenje količine informacija koje treba kodovati. Druga bitna činjenica je da čulo sluha zbog svojih

ograničenja ne može da percipira sve što sadrži kompleksan zvuk. Zbog toga se rad algoritama za kompresiju zasniva na poznavanju mehanizma procesa slušanja, pa se naziva perceptivno kodovanje.



Slika 5.5. Opšta blok-šema osnovnih postupaka u procesu kompresije audio signala

Proces kompresije audio signala obavlja se u koderima čiji je osnovni princip rada prikazan šematski na slici 5.5. Ulazni signal se spektralno analizira bankom filtara koji su po svojoj strukturi izvedeni iz perceptivne rezolucije uva po frekvencijama (kritični opsezi). Nakon toga se u svakom opsegu signal analizira sa aspekta njegove čujnosti. U tom smislu su za svaki pojedinačni frekvencijski opseg bitne dve činjenice:

- koji zvučni sadržaji nisu čujni zbog efekta maskiranja iz susednih opsega i
- koliki je maksimalni dozvoljeni nivo šuma kvantizacije u svakom od opsega a da on pri tome bude perceptivno nečujan.

Nakon takve analize koduju se samo one komponente koje u složenoj zvučnoj slici slušalac može čuti, i pri tome u minimalnoj rezoluciji koja omogućava neprimetnost šuma kvantizacije.

Danas postoji nekoliko široko prihvaćenih algoritama za perceptivno kodovanje. Od 1988. godine postoji ekspertska telo formirano u okvirima međunarodnih organizacija ISO i IEC, koje je poznato pod originalnim nazivom *Moving Pictures Expert Group*, ili skraćeno MPEG. Ova grupa je 1992. definisala prvi perceptivni audio koder nazvan MPEG-1 (u originalu specificiran kao ISO/IEC 11172-3). Ovaj algoritam omogućava da se jedan 16-bitni audio signal pri frekvenciji odmeravanja 48 kHz sa početnih 705.6 kbit/s po kanalu svede na 128 kbit/s, što je smanjenje količine podataka za više od pet puta. Dalja poboljšavanja algoritama dovela su 1994. godine do kodera označenog kao MPEG-2. On je prilagođen zahtevima zvuka koji prati sliku, jer je omogućio da se komprimuje pet audio kanala punog opsega. U najširoj upotrebi je i nivo 3 koji je poznat pod skraćenicom MP3.

Paralelno s koderima iz serije MPEG, američka organizacija ATSC (*The Advanced Television Systems Committee*) napravila je koder za perceptivnu kompresiju nazvan AC-3. On se široko primenjuje za kompresiju audio signala koji prate film i video.

5.2 Predstavljanje veličine audio signala

Audio signal je nestacionarna, vremenski promenljiva veličina, pa je za njegovo merenje i za predstavljanje izmerene veličine jednobrojnim vrednostima potrebno pronaći adekvatan numerički pokazatelj. Nestacionarnost signala čini da je svaka vrednost kojom bi se veličina signala mogla predstaviti takođe promenljiva veličina i funkcija je trenutka merenja. Zbog toga je u audio sistemima važna standardizacija mernih postupaka i predstavljanja izmerenih vrednosti.

Efektivna vrednost audio signala

U okolnostima kada je vremenski oblik zvučnog signala nestacionaran, kompleksan i bez ponovljivih formi, jedini način da se prati stanje audio signala jeste pomoću nekog pogodnog procesa usrednjavanja. Kada se posmatra u dovoljno dugačkom intervalu vremena, srednja vrednost audio signala uvek je jednaka nuli. Ako to iz nekih razloga nije zadovoljeno, što znači da u signalu postoji jednosmerna komponenta (tzv. *DC offset*),

pojava se smatra tehničkim defektom i mora se otkloniti. Uzrok nastanka takve pojave može biti samo neki od elektronskih sklopova na putu signala.

Pošto je srednja vrednost audio signala uvek nula, on se radi merenja veličine može usrednjavati samo energetski, što znači praćenjem srednje kvadratne vrednosti $\overline{v^2(t)}$. Na tom osnovu je definisana efektivna vrednost audio signala:

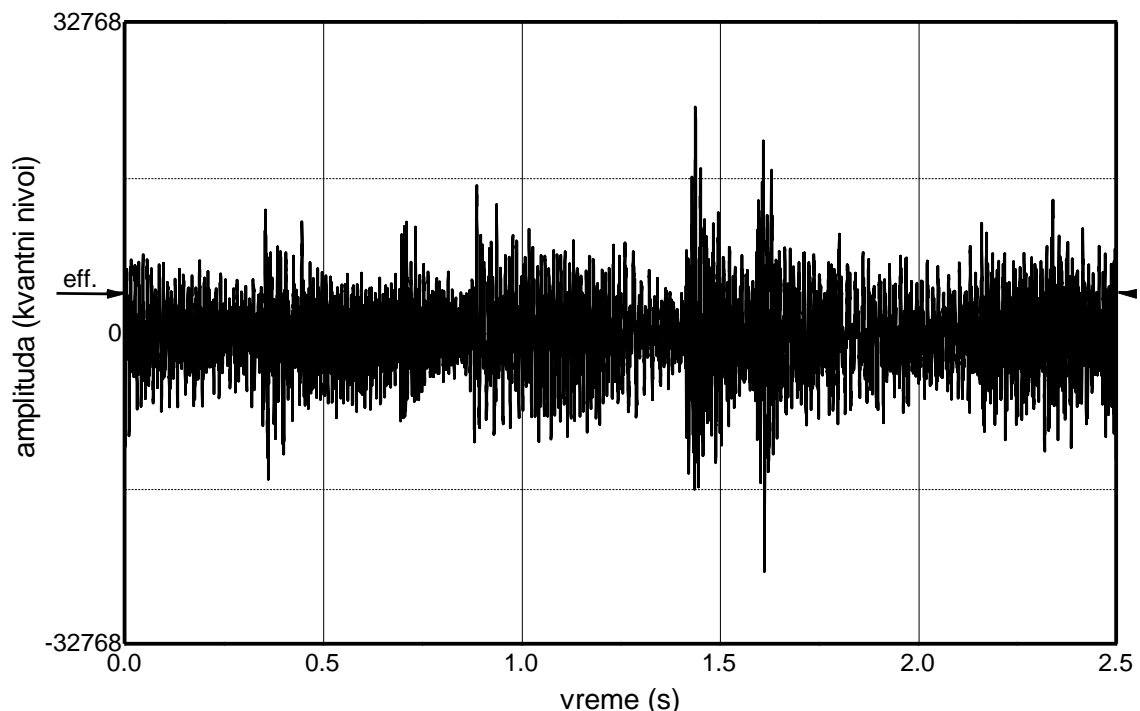
$$v_{eff} = \sqrt{\overline{v^2(t)}} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} v^2(t) dt} \quad (5.1)$$

Izraz pokazuje da se efektivna vrednost dobija vremenskim usrednjavanjem kvadrata trenutne amplitude. Efektivna vrednost se u anglosaksonskoj literaturi označava sa RMS (skraćenica od: *Root Mean Square*).

U teoriji interval usrednjavanja T pri izračunavanju efektivne vrednosti po definiciji teži beskonačnosti, kao što je naznačeno u izrazu (5.1). Međutim, kada postoji potreba da se veličina signala prati u realnom vremenu, kao što je to slučaj u audio sistemima, period usrednjavanja iz jasnih razloga ne može biti beskonačan. Zbog toga se efektivna vrednost pri merenju signala uvek definiše na nekom konačnom vremenskom intervalu T , pa je, umesto izrazom (5.1), efektivna vrednost utvrđena izrazom:

$$v_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t v^2(t) dt} \quad (5.2)$$

Ovako definisana efektivna vrednost signala takođe predstavlja vremenski promenljivu veličinu, to jest novi signal. Jasno je da veličina intervala integracije T utiče na izračunatu efektivnu vrednost.



Slika 5.6. Segment jednog signala popularne muzike. Označena je efektivna vrednost izračunata na čitavom segmentu od 2.5 s

Na slici 5.6 prikazana je jedna ilustracija značenja efektivne vrednosti. Nacrtna je kratak segment realnog audio signala trajanja 2.5 s koji je uzet iz sredine jedne kompozicije popularne muzike. Efektivna vrednost izračunata na čitavom prikazanom intervalu ($T = 2.5$ s) označena je strelicom na ordinatnoj osi sa obe strane dijagrama. Vidi se da se u signalu permanentno javljaju lokalni maksimumi koji prevazilaze izračunatu

efektivnu vrednost, a povremeno su ta premašenja velika. Ako bi se efektivna vrednost određivala na manjem vremenskom segmentu umesto na čitavom signalu, sa slike se vidi da bi ona zavisila od mesta duž vremenske ose s koga se signal uzima. Zbog toga se uvode pojmovi dugovremene i kratkovremene efektivne vrednosti. Dugovremena efektivna vrednost izračunava se na čitavom posmatranom signalu, a kratkovremena efektivna vrednost je ona kod koje je interval integraljenja kraći (u praksi su to po pravilu delovi sekunde). Kratkovremena efektivna vrednost zavisi i od vrednosti T , i menja se u vremenu kretanjem intervala usrednjavanja po vremenskoj osi

Frekvencijski sadržaj signala kratkovremene efektivne vrednosti

Frekvencijski opseg signala kratkovremene efektivne vrednosti $v_{eff}(t)$ je zbog usrednjavanja znatno redukovano u odnosu na originalni signal $v(t)$. Ako se kvadrirani signal pritiska $v^2(t)$ iz izraza (5.2) shvati kao jedan novi signal:

$$y(t) = v^2(t) \quad (5.3)$$

onda se usrednjavanje ovog signala u intervalu T može definisati izrazom:

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (5.4)$$

gde je $g(\tau)$ vremenska prozorska funkcija definisana na sledeći način:

$$g(\tau) = 1 \quad \text{za } 0 < \tau < T,$$

$$g(\tau) = 0 \quad \text{inače.}$$

Vidi se da je period u kome se vrši usrednjavanje predstavljen kao pravougaona vremenska funkcija jedinične vrednosti u intervalu usrednjavanja i sa vrednošću 0 van tog intervala. Izraz (5.4) pokazuje da usrednjavanje predstavlja konvoluciju oblika:

$$\bar{y}(t) = y(t) \otimes g(t) \quad (5.5)$$

Konvolucija u vremenskom domenu odgovara množenju odgovarajućih Furijeovih transformacija koje predstavljaju funkcije $y(t)$ i $g(t)$ u frekvencijskom domenu. Amplitudski spektar pravougaone funkcije ima formu $|\sin x/x|$, s nulama na celobrojnim umnošcima $1/T$. Prema tome, proces usrednjavanja signala u vremenskom domenu predstavlja u frekvencijskom domenu njegovo filtriranje niskopropusnim filtrom čija je granična frekvencija (-3 dB):

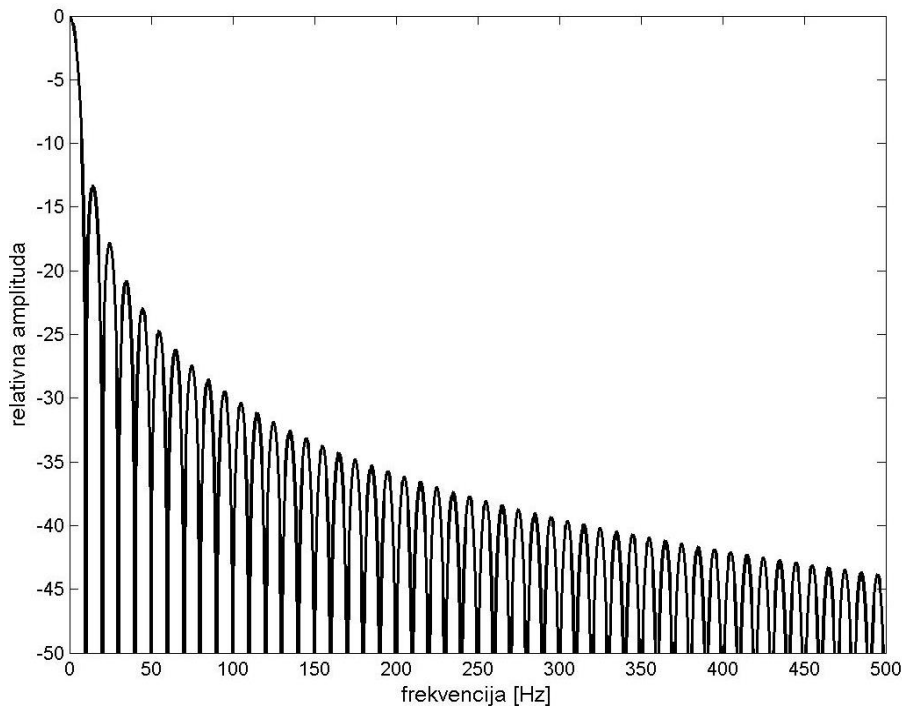
$$f_{gr} = \frac{1}{2T} \quad (5.6)$$

gde je T period usrednjavanja. Strmina u nepropusnom delu ovog filtra je 20 dB/dekadi (6 dB/oktavi). Kao ilustracija, na slici 5.7 prikazana je amplitudska karakteristika procesa usrednjavanja kada je $T = 100$ ms. Na osnovu izraza (5.6) može se izračunati da je gornja granična frekvencija ovog filtra 5 Hz. Prema tome, što je vremenski interval usrednjavanja T veći, to je frekvencijski opseg signala $v_{eff}(t)$ uži, pa vrednost T određuje brzinu reagovanja efektivne vrednosti na promene u vremenskom obliku signala $v(t)$.

Postupak usrednjavanja može se realizovati s različitim oblicima vremenskih prozora $g(\tau)$. Usrednjavanje u digitalnom domenu uobičajeno se vrši u skladu s definicijom efektivne vrednosti iz izraza (5.2), što znači da se koristi pravougaoni vremenski prozor. U analognoj tehnologiji nije moguće realizovati takvo usrednjavanje, pa se ono realizuje RC kolom integratora. To podrazumeva da se pri usrednjavanju signala primenjuje vremenski prozor eksponencijalnog oblika. Uticaj RC kola, odnosno oblik vremenskog prozora definiše njegova vremenska konstanta $\tau = RC$. Poredeći pravougaoni i eksponencijalni prozor može se pokazati da će oni imati istu graničnu frekvenciju ako važi relacija:

$$T = 2\tau = 2RC \quad (5.7)$$

Odavde se može uvesti pojam ekvivalentnog perioda usrednjavanja eksponencijalnog vremenskog prozora, koji je $2RC$.



Slika 5.7. Amplitudska karakteristika procesa usrednjavanja za $T = 100$ ms

Opšte skale nivoa signala

Praćenje veličine audio signala zasniva se na posmatranju kretanja veličine njegove efektivne vrednosti. U prvom poglavlju je pokazano da se u audio sistemima ona ne izražava u voltima, već na nekoj skali nivoa definisanoj izrazom (1.3). Vrednost nivoa u decibelima zavisi od odabrane referentne vrednosti, pa se skala nivoa definiše njenim izborom. U okviru jednog audio sistema koji izolovano obavlja neku zadataku funkciju, bez razmene signala s drugim sistemima, izbor skale za merenje veličine signala nema posebnog značaja. Tada izbor referentne vrednosti signala u izrazu (1.3) koja odgovara nivou signala 0 dB može biti praktično proizvoljan. Dovoljno je samo pri podešavanju sistema voditi računa o veličini signala i dinamičkim mogućnostima uređaja kroz koje signal prolazi, a konkretne numeričke vrednosti kojima se iskazuje ta veličina nisu od značaja.

Međutim, kada se signal razmenjuje između različitih tehnoloških celina, na primer između raznih studija, onda je izbor zajedničke referentne vrednosti vrlo bitna. Osoba koja radi sa audio sistemom o veličini signala zaključuje na osnovu numeričkih vrednosti u decibelima dobijenih merenjem kratkovremene efektivne vrednosti, i na osnovu toga vrši podešavanja. Eventualne razlike u numeričkim vrednostima zbog različito odabranih referentnih vrednosti mogle bi pri razmeni signala potencijalno dovesti do oštećenja najvećih i najmanjih amplituda (da budu suviše male ili suviše velike spram mogućnosti korišćenih uređaja).

U telekomunikacijama, a zatim i u audiotehnici, usvojeno je nekoliko opšteprihvaćenih skala nivoa signala, koje su definisane odgovarajućim standardima. To su dve skale nivoa snage čije su jedinice označene sa dBm i dBW, i dve skale naponskog nivoa označene sa dBu i dBV. U telekomunikacijama se odavno koristi skala nivoa signala čija je jedinica označena sa dBm. To je nivo snage za koji je referentna vrednost $P_{ref} = 1$ mW, što znači da na toj skali 0 dBm odgovara vrednosti snage signala 1 mW. Lako se preračunava da snaga 1 W odgovara nivou od +30 dBm, pri snazi 1 kW nivo je +60 dBm, itd. Skala dBm ustanovljena je kao industrijski standard za merenje nivoa

signala još 1940. godine. Aktivni elementi su u to vreme korišćeni vrlo ekonomično, samo gde je to zaista neophodno, pa su mnoge funkcije pri manipulaciji i obradi signala rešavane pasivnim kolima. Zato je snaga bila relevantan parametar pri svakom prolasku signala kroz audio sistem. O njenom očuvanju se vodilo računa pri izradi uređaja, a otuda i tadašnja potreba prilagođenja po snazi pri povezivanju uređaja da bi između povezanih elemenata sistema predavanje snage signala bilo maksimalno.

S razvojem tehnologije, tačnije aktivnih elektronskih komponenti, nestala je potreba da se u čitavom audio sistemu prati i meri snaga signala. Ipak, i dalje postoje tačke u sistemima gde je praćenje i merenje snage nužno. To su pojačavači snage i zvučnici koji se koriste u reprodukciji zvuka. Za prikazivanje nivoa snage danas se koristi skala čija jedinica ima oznaku dBW. Ona je definisana u odnosu na referentnu vrednost $P_{ref} = 1 \text{ W}$, pa nivou 0 dBW odgovara snaga 1 W. Jasno je da je ova skala pomerena za 30 dB u odnosu na stariju skalu nivoa snage, čija je jedinica dBm.

Kada je snaga signala prestala da bude apriorni predmet interesovanja pri kontroli rada audio sistema, za praćenje veličine signala uvedene su naponski definisane skale nivoa. Prvi mogući pristup u definisanju skale naponskog nivoa zasnovan je na preuzimanju karakteristične vrednosti napona u električnom kolu iz definicije skale dBm (0.775 V na potrošaču otpornosti 600 Ω). Ova veličina napona usvojena je kao referentna vrednost nove naponske skale nivoa signala, i njena jedinica se označava s dBu ili dBv. Na njoj nivo 0 dBu odgovara naponu 0,775 V. Danas se za merenje nivoa signala najšire koristi skala naponskih nivoa sa oznakom jedinice dBV, gde je za referentnu vrednost usvojena jedinična vrednost napona $V_{ref} = 1 \text{ V}$. Razlika između skale dBu i dBV približno je 2 dB (tačnije 2.2 dB).

Specifični audio standardi za skale nivoa signala

Tokom istorijskog razvoja audiotehnike razne specifične potrebe učinili su da se pored opisanih opštih skala nivoa signala danas u audio sistemima koriste i skale sa drugačijim referentnim vrednostima napona. Sve one, manje ili više, odstupaju od opštih skala dBu ili dBV jer su nastale iz potrebe da se položaj 0 dB na skali nivoa signala prilagodi raznim konkretnim zahtevima audio prakse, specifičnostima pojedinih uređaja i slično. Neke skale su nastale i pod uticajem netehničkih razloga, kao što su istorijsko nasleđe, tehnološka zatvorenost velikih nacionalnih radiodifuznih centara u ranim danima razvoja audiotehnike, itd. Zbog toga se može reći da u raznim audio uređajima ili sistemima danas postoji izvesno šarenilo u vrednostima napona koje odgovaraju poziciji nivoa 0 dB. Kao poseban kuriozitet može se navesti merenje signala u radiodifuznoj kući BBC, gde se na logaritamskoj skali koriste jedinice nivoa koje nisu u decibelima. Skala instrumenata je, iako logaritamska, baždarena linearnom podelom od 0 do 7. U nastavku su prikazane specifične skale nivoa signala koje se šire koriste u praksi.

1. **Standard nivoa „-10 dB“** – Ovaj standard se primenjuje u kućnim, tzv. komercijalnim audio uređajima, i u višekanalnim snimačima. Njegova referentna vrednost je $V_{ref} = 0.245 \text{ V}$. Pošto nivo 0 dB ovde odgovara nivou -10 dBu, ova skala se često označava i kao „standard -10 dB“. U tehničkom žargonu se ovaj standard često naziva „nivo 300 mV“, što očigledno predstavlja zaokruživanje stvarne vrednosti. U komercijalnim audio uređajima primena ovakve specifične skale predstavlja nasleđe prošlosti, kada su kućni uređaji iz nekih razloga bili prilagođeni radu s takvim nivoima signala. Zbog potrebe kompatibilnosti uređaja tokom evolucije tehnologije, to jest da bi se omogućilo vezivanje uređaja različite starosti u isti sistem, nivoi kakvi su bili usvojeni u starim uređajima nisu mogli biti napušteni i ostali su do danas kao standard.

Skala standarda -10 dB primenjuje se i u višekanalnim snimačima. Kod njih je to bila tehnička nužnost zbog toga što se, po definiciji, signali iz ovog snimača sabiraju u jedan zbirni signal (na primer kada se u studiju pravi finalni snimak iz prethodno formiranog

višekanalnog zapisa). Sabiranje nekoliko signala u jedan nastaje relativno povećavanje nivoa rezultantnog signala. Na primer, zbir deset potpuno nekoherentnih signala međusobno jednakih nivoa biće za oko 10 dB viši od pojedinačnih vrednosti. Ako se pretpostavi da su nivoi pojedinačnih signala po kanalima bili 0 dB (*re* 0,245 V), nivo njihovog zbirnog signala biće približno 0 dBV. Kada bi pojedinačni signali iz višekanalnog snimača imali nivo 0 dBV, rezultantni signal bi nakon sabiranja bio relativno visok za dalju manipulaciju u standardnom audio sistemu.

2. Standard u digitalnim uređajima – U digitalnom domenu ne postoji referentna vrednost u onom smislu u kome je to usvojeno u analognim sistemima. Pri merenju digitalnih signala uvek se usvaja da je referentna vrednost, to jest 0 dB na skali nivoa, najveća moguća vrednost amplitude koju konvertor može da prihvati (najviši kvantni nivo). Ovakav pristup predstavlja suštinsku razliku u odnosu na sistem merenja analognih signala kod kojih nivo može imati pozitivne vrednosti, što znači vrednosti veće od 0 dB. U digitalnim sistemima vrednosti iznad 0 dB ne postoje, pa zato ova referentna vrednost ima oznaku 0 dB FS (dodatak „FS“ je skraćenica od *full scale*).

5.3 Merenje i kontrola kvaliteta audio signala

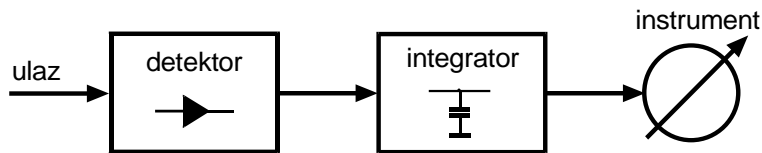
Zbog velike nestacionarnosti audio signala sasvim precizna kontrola njegove veličine u svim aspektima moguća je samo van realnog vremena. Pregledanjem signala na ekranu monitora, softverskim pretraživanjem i izračunavanjem relevantnih statističkih pokazatelja moguće je u potpunosti sagledati sve njegove osobine od značaja. Za te okolnosti postoje softverske rutine koje obavljaju statističku analizu zadatih segmenata signala i njihovo podešavanje, ako je potrebno. Neke statističke osobine audio signala prikazane su u narednom poglavlju.

Praćenje trenutne veličine signala u realnom vremenu, čak i kada bi se na neki način tehnički realizovalo, nema praktičnog značaja iz dva razloga. Prvo, čovekovo oko ne bi moglo da registruje tako brze promene koje bi merač trenutnih vrednosti pokazivao. Drugo, informacija o trenutnim vrednostima nema uvek perceptivnog značaja. Zato je kontrola dinamičkih karakteristika audio signala u realnom vremenu umesto trenutnih vrednosti ograničena na praćenje kratkovremene efektivne vrednosti. To se realizuje pomoću mernog instrumenta koji se naziva modulometar. On se postavlja na uređajima gde je merenje signala bitno, ali se izrađuje i kao nezavisni uređaji, s mogućnošću da se povežu u audio sistem u tačkama gde je potrebna kontrola.

U svakoj fazi prolaska signala kroz audio sistem mogu nastupiti izvesne degradacije. Njihovi oblici su mnogobrojni. Svaki oblik degradacije signala, ako svojom veličinom prelazi neki prag, postaje subjektivno primetan i stvara promene u zvučnoj slici. Zbog toga je u svakom audio sistemu kontrola signala važan proces. Osnovni oblik te kontrole jeste merenje veličine signala. Međutim, kompleksnost zvučne slike zahteva da se audio signal kontroliše i na višim nivoima, to jest da se osim veličine kontrolišu i druge njegove karakteristike koje utiču na kvalitet zvučne slike u celini.

Opšte osobine modulometara

Osnovna blok šema modulometra prikazana je na slici 5.7. Pošto je audio signal vremenski promenljiva električna veličina, ovi instrumenti se principijelno ne razlikuju od ostalih voltmetra za naizmenični signal koji mere efektivnu vrednost. Da bi se merenjem dobila efektivna vrednost signala koja odgovara teorijskoj vrednosti, shodno izrazu (5.1), modulometar se, kao i svaki drugi voltmetar, može podeliti na tri osnovna bloka: kolo za kvadriranje, kolo za usrednjavanje (integrator) i pokazivač (indikator).



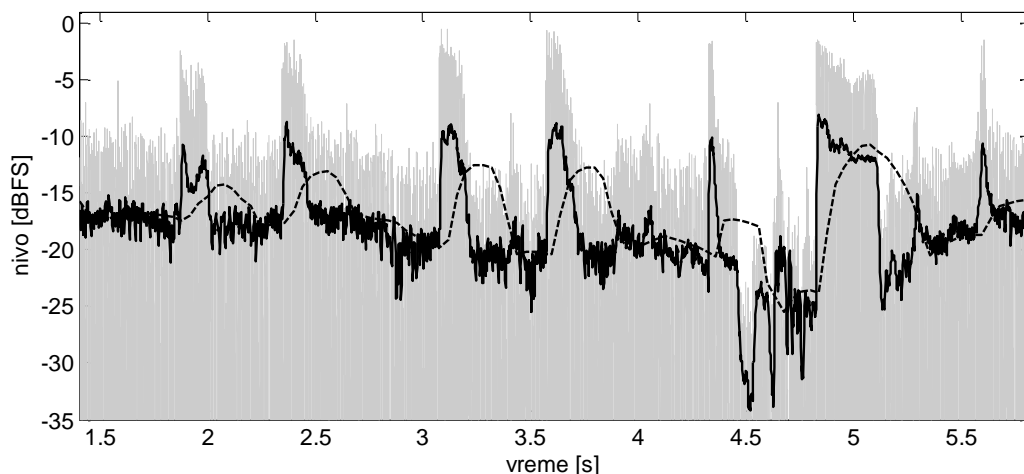
Slika 5.7. Principijelna blok-šema modulometra

Način realizacije blokova modulometra može uticati na rezultat merenja. U analognoj tehnologiji konstrukcija kola za kvadriranje, to jest precizna realizacija njegove kvadratne karakteristike, relativno je složen problem. Izrada takvog kola je tehnički problem koji ima svoja različita manje ili više dobra rešenja. Zato neki od instrumenata na tržištu nose oznaku „*true rms*“ (stvarna efektivna vrednost), da bi se istakla njihova preciznost u realizaciji. U softverskom domenu ova funkciju se rešava numerički, što znači po definiciji prema izrazu (5.1).

Da bi jedan voltmeter mogao da se koristi kao modulometar za merenje efektivne vrednosti audio signala, treba rešiti još dva bitna problema. To su:

- izbor adekvatne vremenske konstante usrednjavanja T i
- omogućavanje vizuelne percepcije pokazivanja indikatora.

Izbor vremenske konstante integraljenja u modulometrima nema apsolutno rešenje, bez obzira na način realizacije instrumenta. Njen izbor dominantno utiče na ono što će instrument pokazati. Da bi se to ilustrovalo, na slici 5.8 je prikazan jedan primer pokazivanja modulometra za dve vrednosti vremenske konstante integraljenja. Dijagram pokazuje vremensku promenu amplitude jednog audio signala čije je trajanje oko 4 s, a preko njega su ucrtane krive koje predstavljaju pokazivanja indikatora modulometara sa periodima usrednjavanja 10 ms i 200 ms. Što je vremenska perioda usrednjavanja duža, to su veća odstupanja između pokazivanja modulometra i trenutne vrednosti signala koji se meri.



Slika 5.8. Razlika u pokazivanju modulometra pri različitim vremenskim konstantama integraljenja: puna kriva predstavlja pokazivanje modulometra za $T = 10$ ms, a isprekidana kriva za $T = 200$ ms. Sivom linijom prikazana je promena trenutne amplitude signala koji se meri.

Kontrola signala modulometrom podrazumeva praćenje njegovog pokazivača čulom vida, pa se drugi problem u konstrukciji modulometra odnosi na olakšavanje vizuelne percepcije kretanja pokazivača pri brzim pokretima. Čulo vida ima svoja ograničenja, pa karakteristike pokazivača moraju biti podređeni zahtevima percepcije oka. Na primer, ako se napravi instrument ekstremno male vremenske konstante integraljenja, on će moći da prati čak i veoma kratke pojave u signalu, ali njegova brza kretanja naviše i naniže mogu ostati neprimetna za oko posmatrača. S druge strane, usporavanje pokazivanja instrumenta da bi se prilagodio mogućnosti percepcije oka učiniće neprimetnim kratkotrajne pojave u signalu.

Očigledno je da načelno postoje dva oprečna zahteva u odnosu na modulometre. S jedne strane to je što veća brzina otklona da bi se registrovale brze promene veličine signala, a s druge dovoljno mala brzina da bi oko u realnom vremenu moglo zapažati šta pokazuje indikator modulometra. Usvojena brzina pokazivanja indikatora naziva se balistika instrumenta. Rešenja balistike modulometra nisu jednoznačna, već je to vodilo formiranju dve različite vrste instrumenata. To su:

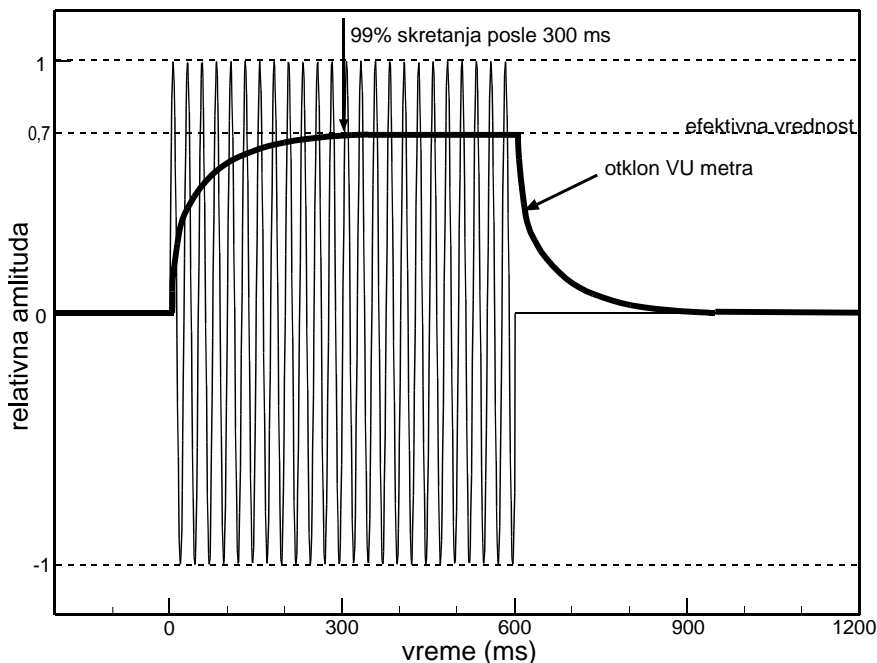
- VU metar (skraćeno od *volume unit*) i
- merač vršnih vrednosti (*peak metar*) ili PPM

U mnogim komercijalnim, to jest kućnim uređajima za široku upotrebu sreću se instrumenti čije je pokazivanje van standarda, sa svojstvima koja mogu biti negde između ova dva tipa instrumenata.

VU metar

VU metar je najstariji i najrasprostranjeniji modulometarski instrument, uveden u upotrebu četrdesetih godina dvadesetog veka. Ime potiče od engleskog naziva *Volume Unit*. Nastao je u vreme kada je takva konstrukcija bila pasivna (samo detektorsko kolo s RC kolom kao integratorom i instrument s kretnim kalemom i kazaljkom), a povezivan je na kolo koje je podešeno da mu otpornost potrošača bude 600 Oma. Kada je signal stacionaran, pokazivanje takvog pasivnog VU metra odgovara skali dBm. Međutim, kada je signal nestacionaran, njegovo pokazivanje je funkcija vremena integracije detektorskog kola. Zbog toga je uveden poseban naziv „VU“ umesto tada već postojeće skale dBm.

Nastanak ovog modulometra zasnovan je na ideji da se postigne pokazivanje koje je blisko subjektivnom doživljaju jačine reprodukovanog zvuka (*Volume*). Zato je usvojeno da njegova integraciona konstanta bude definisana na način blizak procesu vremenske integracije uva (videti sliku 2.14). To je razlog zbog čega se VU metar koristi kao osnovni merni instrument za kontrolu signala u sistemima za ozvučavanje i sistemima slične namene gde je subjektivni doživljaj jačine koji će imati slušalac jedini relevantan parametar.

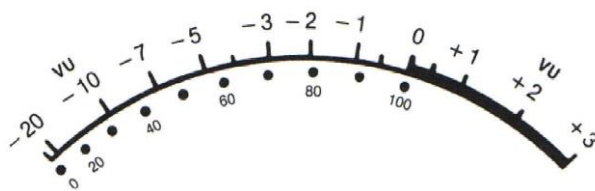


Slika 5.9. Ilustracija otklona VU metra pri nailasku signala; označeno je da 99% maksimalnog skretanja dostiže nakon 300 ms

Rad VU metra precizno je utvrđen standardom. Njegova najvažnija osobina je balistika. Ona se testira brzinom reagovanja na trenutnu pobudu nekim referentnim signalom konstantne frekvencije i amplitude. Na slici 5.9 prikazana je nominalna brzina

reagovanja VU metra. Vidi se da je vreme integracije podešeno tako da se 99% otklona instrumenta postiže za 300 ms, što na izvestan način liči na reakciju čula sluha. Može se reći da pokazivanje VU metra predstavlja kratkotrajnu efektivnu vrednost sa usrednjavanjem u intervalu od oko 300 ms. Ako se audio signal prosleđuje na predajnik ili u A/D konvertor koji imaju svoj gornji prag amplitude signala koji mogu prihvatiti, merenje VU metrom ne omogućava da se izbegne izobličenje jer ne može da pokaže kada u signalu postoje impulsne pojave koje taj prag premašuju.

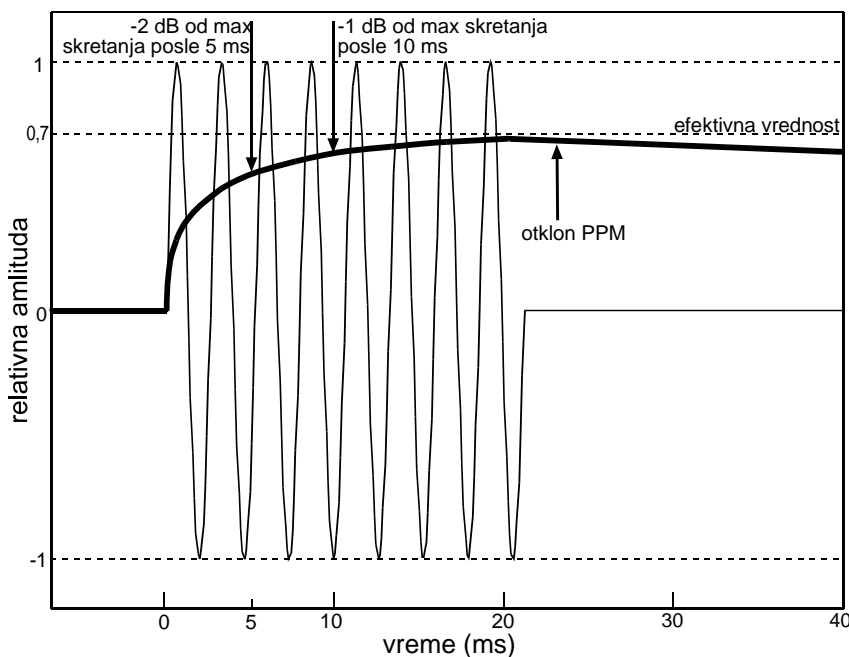
Na slici 5.10 prikazan je standardni izgled skale VU metra. U vreme kada je taj instrument nastao nije bilo tehničkih mogućnosti da mu se ugradi logaritamska karakteristika pokazivanja kazaljke. Pošto je rad VU metra relativno linearan, a skala je morala biti baždarena u logaritamskoj razmeri (u decibelima), dobijen je nelinearni raspored podeoka duž skale. Referentni podeok 0 dB postavljen je na oko 2/3 punog otklona, jer je to zona najpreciznijeg kretanja kazaljke instrumenta s kretnim kalemom. Kao posledica, dobijena je skala instrumenta na kojoj više od pola opsega zauzima raspon pokazivanja od samo 6 dB. Činjenica je da se indikatori VU metra danas ne prave s kretnim kalemom, već sa svetlećim diodama, ali je razmera na njegovoj skali ostala ista.



Slika 5.10. Standardni izgled skale VU metra

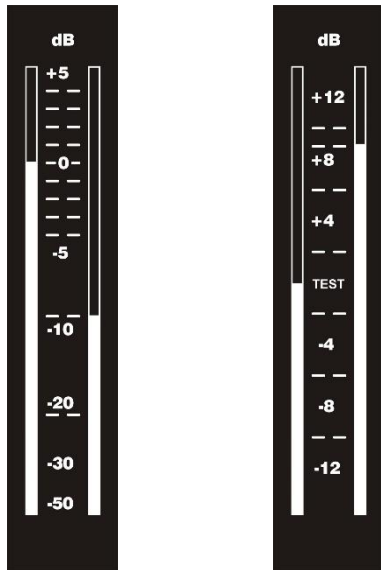
PPM

Postoje tačke u audio sistemima u kojima se mora meriti veličina kratkotrajnih pojava u signalu, a jasno je da sa VU metrom takva kontrola nije moguća. Zbog toga je posebno dizajniran modulometar koji se naziva merač vršnih vrednosti, „pik“ metar ili kratko PPM. Njegova balistika je podešena za brzo reagovanje na povećanje amplitude signala. Pri testu kao na slici 5.11, PPM će pokazati otklon -2 dB u odnosu na stvarnu veličinu signala nakon 5 ms, a -1 dB nakon 10 ms trajanja pobude. Zahvaljujući tome PPM će sa zanemarljivom greškom (-1 dB) pokazivati impulsne pojave u audio signalu čije je trajanje samo 10 ms.



Slika 5.11. Ilustracija brzine rada PPM: -2 dB od maksimalnog skretanja dostiže nakon 5 ms, a -1 dB od maksimalnog skretanja nakon 10 ms.

Priroda ovog instrumenta nametnula je i poseban oblik skale pokazivača, za koju danas postoje različiti standardi. Na slici 5.12 prikazana su dva oblika skale PPM (prema IEC i prema standardu Evropske radiodifuzne unije – EBU). Ovi instrumenti se uobičajeno postavljaju tako da se pokazivanje vrši po vertikali. Zbog neophodne brzine rada indikator se realizuje svetlećim tragovima.



Slika 5.12. Izgled dva korišćena oblika skale merača vršnih vrednosti (uobičajeno se postavljaju u vertikalnom položaju)

Percepcija pokazivanja modulometara

U konstrukciji modulometara jedna od važnih tema jeste i problem vizuelne percepcije njegovog pokazivanja. Kontrola veličine audio signala pomoću modulometra jeste proces posmatranja instrumenta, a on se odvija u realnom vremenu. Kod VU metra je brzina reagovanja takva da čulo vida uglavnom nema problem pri praćenju kretanja indikatora. Međutim, zbog male vrednosti perioda integraljenja PPM brzina kretanja njegovog indikatora prevazilazi mogućnosti vizuelne percepcije. Zbog toga je u ovom modulometru učinjen tehnički ustupak oku uvođenjem usporenog povratka indikatora. Tako je vreme reagovanja PPM instrumenta veoma kratko, ali je povratak od punog otklona na nulu relativno spor. Ova činjenica je naznačena na slici 5.11. Vreme povratka od punog otklona nije uvek precizirano standardom, ali je reda veličine 2-3 s (na primer, prema standardu EBU vreme povratka od maksimuma do minimuma skale je $2,8 \pm 0,3$ s). U digitalnim realizacijama instrumenata kod kojih je indikator sa svetlećim diodama dodatno se primenjuje zadržavanje indikacije dostignutog maksimuma u trajanju od nekoliko sekundi, nezavisno od glavnog kretanja indikatora. U potpuno softverskim realizacijama često se dodaje poseban numerički indikator na kome se ispisuje maksimalno dostignuta vrednost koja ostaje sve dok se ne resetuje.

Ono što čini VU metar i PPM, to su njihove vremenske konstante propisane standardima. To nije povezano s načinom prikazivanja, pa se oni teorijski mogu napraviti i sa digitalnim numeričkim indikatorom. Međutim, kada se kontrola vrši u realnom vremenu, onda je digitalni indikator neupotrebljiv jer je broj različitih pokazivanja koje oko može registrovati u jedinici vremena vrlo mali. Nasuprot tome, analogno pokazivanje indikatora čulo vida može veoma brzo da percipira. Bez obzira na to je li u pitanju kazaljka ili niz svetlećih dioda koje formiraju svetleći stub (što je danas uobičajeni način izrade pokazivača modulometara), u pitanju je analogno pokazivanje, jer je skretanje pokazivača na instrumentu analogno veličini efektivne vrednosti audio signala. Numerički displej može imati neke druge funkcije, ali ne i za praćenje dinamike audio signala.

Problem percepcije okom u realnom vremenu pitanje je koje nije povezano samo s modulometrima, već se preslikava i na problematiku dizajna audio uređaja u celini. Danas je većina uređaja po svojoj unutrašnjoj strukturi računar, to jest namenski procesor za obradu signala. Prirodni način upravljanja takvim uređajima je preko neke tastature i miša kroz softverski sistem s hijerarhijski organizovanim menijima.

Međutim, softverski pristup upravljanju preko menija neprimenjiv je kada se zahtevaju brze promene stanja audio sistema, što uglavnom znači brze intervencije na nekim regulatorima. Ako se upravlja audio sistemom na nekom koncertu ili u pozorištu tokom predstave, sve se dešava veoma brzo i u pojedinim situacijama potrebno je najbrže moguće shvatiti kakvo je stanje sistema i tome prilagodi reakciju. Postoje okolnosti kada se u upravljanju audio sistemom zahteva čovekova reakcija koja se meri delovima sekunde.

Funkcijama analognih uređaja upravlja se preko potenciometara, tastera i preklopnika. Pri tome, svako dugme potenciometra ili preklopnika istovremeno je analogni pokazivač stanja te kontrole. Sa analognim pokazivačima vizuelna percepcija je veoma brza, pa se jednim pogledom na veći broj regulatora može konstatovati u kakvom su oni položaju, a time i u kakvoj je funkciji čitav uređaj.

Zbog pogodnosti analognog pokazivanja u praksi se javlja zahtev da se potpuno digitalni uređaji u svom interfejsu prema korisniku prilagode tako da u celini, ili bar u jednom delu, imaju kontrole kao na odgovarajućem analognom uređaju. Razlog je pre svega moguća brzina percepcije stanja i brzina reakcije. Zbog toga se i za upravljanje računarima prave posebne konzole u formi analognih mikseta, kao alternativa tastaturi i mišu.

Kontrola kvaliteta audio signala slušanjem – monitoring

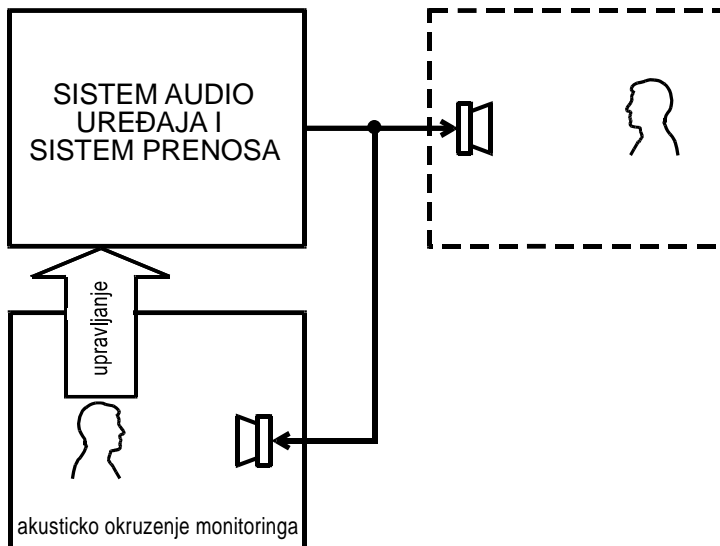
Sofisticirana kontrola audio signala ne može se rešiti bilo kakvim mernim uređajem. Osim u nekim retkim, krajnje jednostavnim okolnostima kontrolu signala u audio sistemima uvek obavlja čovek. Tako se kontrola prepušta čulu sluha obučene osobe koja upravlja sistemom, i taj proces se naziva monitoring. Jedino je čulo sluha dovoljno kompleksan analizator da u realnom vremenu može pratiti stanje signala i iz toga izvoditi zaključke o stanju njegovog kvaliteta.

Kontrola kvaliteta audio signala slušanjem podrazumeva kompleksnu proveru stanja u domenu raznih aspekata, kao što su preciznost prostorne slike, kvalitet boje zvuka, itd. Ta kontrola se radi u jednoj posebnoj grani audio sistema koja je označena šematskom predstavom na slici 5.13. Na osnovu onoga što čuje, osoba koja upravlja sistemom podešava parametre njegovog rada. Ova specifičnost rada sa audio sistemima u inženjerskom domenu može se uporediti sa okolnostima kontrole slike u video sistemima. To je takođe kompleksan proces koji se realizuje posmatranjem slike na monitoru, što znači čulom vida.

Monitoring slušanjem može imati nekoliko različitih kvalitativnih nivoa u zavisnosti od konkretnih zahteva u pogledu kvaliteta i složenosti zvučne slike. U tome se mogu prepoznati dve specifična pristupa. Prvi se javlja u okolnostima kada se slušanjem samo proverava prisustvo signala, to jest da li signal prolazi kroz audio sistem, i da li se u njemu javlja neka ozbiljnija deformacija. Ovakav pristup pojavljuje se u radiodifuziji pri emitovanju radio i TV programa. Osoba koja radi na emitovanju programa ne kreira zvučnu sliku jer se najveći deo vremena emituju gotovi snimci napravljeni na nekom drugom mestu. Izuzetak je samo uključivanje spikera iz studija, ali je to relativno jednostavan snimateljski zadatak. U takvom monitoringu najvažnija je kontrola da li uopšte postoji izlazni signal koji odlazi ka predajniku. Zbog toga se u radio stanicama često koristi poseban radio prijemnik, pa predmet monitoringa može biti signal koji se emituje u etar, a ne samo električni signal koji izlazi iz studija.

Drugi pristup u monitoringu slušanjem podrazumeva kreiranje svih detalja zvučne slike. To obuhvata podešavanje psihoakustičkih dimenzija kvaliteta zvuka i formiranje prostornih dimenzija zvučne slike. Ovakav pristup monitoringu sprovodi se u produkcionim

studijima gde se proizvode muzički snimci, u studijima za finalni miks zvučne slike filmova, itd. U takvoj produkciji monitoringom se ocenjuje i estetski aspekt zvučne slike.



Slika 5.13. Šematski prikaz mesta monitoringa u okviru strukture audio sistema

Monitoring slušanjem reprodukovano signalu obavlja se u nekakvom akustičkom okruženju koje je u audio sistemu posebno izdvojeno, kao što je prikazano na slici 5.13. Zvuk se reprodukuje pomoću zvučnika postavljenih u tom okruženju, pa zbog toga pouzdanost ocena zvučne slike dominantno zavisi od karakteristika primenjenih zvučnika i akustičkih osobina prostora.

Zvučnici koji se primenjuju za monitoring slušanjem predstavljaju posebnu kategoriju kvaliteta i u prospektnoj dokumentaciji proizvođača označeni su kao „monitorski zvučnici“. To su najkvalitetniji zvučnici u gami raznih vrsta zvučničkih sistema koji postoje na tržištu. Ono što se od njih očekuje jeste da njihov impulsni odziv bude što bliže idealnom, a sasvim sigurno mora biti bolji od odziva zvučnika koje će koristiti krajnji slušalac.

Kvalitetan monitoring zahteva striktnu kontrolu akustičkog odziva okruženja u kome se sluša. Posebno u prostorima gde se monitoring radi po najsloženijim kriterijumima, na primer pri kontroli prostornih informacija u zvučnoj slici, od velikog značaja su i detalji impulsnog odziva prostora kao što su pojedinačne prve refleksije. Akustički uslovi dizajna ovakvih prostorija detaljnije su objašnjeni u poslednjem, šesnaestom poglavlju.

Dobar kvalitet monitorskih zvučnika preduslov je za ocenu svih relevantnih slojeva informacija u zvučnoj slici. Ipak, postoje izuzeci. Kada se pravi audio snimak za tržište, ne sme se izgubiti iz vida u kakvim će sve uslovima on biti preslušavan. Zbog toga se u sistem za monitoring kada se pravi snimak za tržište, osim najkvalitetnijih monitorskih zvučnika, dodaju i druge vrste zvučnika čiji je kvalitet niži, bliže onome što se može naći kod krajnjih slušalaca. Uobičajeno se koristi jedan dodatni par zvučnika koji svojim karakteristikama treba da liče na prosečne kućne HI-FI zvučnike. U nekim studijima koji proizvode muzičke proizvode samo za najšire tržište često i nema visokokvalitetnih monitorskih zvučnika, već samo zvučnika kvalitetom bliskih kućnim. Najzad, za pomoćni monitoring često se koriste posebno konstruisani relativno mali zvučnici suženog frekvencijskog opsega. Oni treba da simuliraju prosečne uslove slušanja na malim radio prijemnicima i zvučnicima TV prijemnika.