

Dušan DRAJIĆ  
 Grozdan PETROVIĆ  
 Elektrotehnički fakultet, Beograd  
 Djuro ZRILIĆ  
 ISKRA - TOZD Usmjerjene zveze, Ljubljana

REFERAT

OSETLJIVOST IMPULSNO KODOVANOG I DELTA-KODOVANOG  
 GOVORNOG SIGNALA NA AKUMULISANI DŽITER

SENSITIVITY OF PULSE CODED AND DELTA CODED SPEECH  
 TO ACCUMULATED JITTER

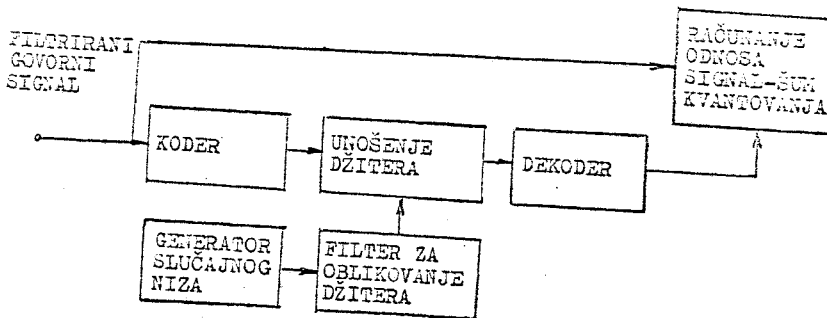
SADRŽAJ - U radu je prikazan uticaj akumulisanog džitera na odnos signal-šum kvantovanja kod impulsne kodovane modulacije s brzinom od 64 kbit/s i kod adaptivne delta-modulacije s kontinualno promenljivom strminom s brzinama od 16 i 32 kbit/s. Rezultati su dobijeni simulacijom na digitalnom računaru. Pokazuje se da džiter akumulisan u dužem lancu regeneratora ne utiče znatno na odnos signal-šum kvantovanja kod delta-modulacije, ali utiče veoma primetno na ovaj odnos kod impulsne kodovane modulacije.

ABSTRACT - In this paper the influence of jitter on signal-to-quantization noise ratio for 64 kbit/s PCM and 16 and 32 kbit/s CVSDM is investigated. The results are obtained by simulation on digital computer. The conclusion can be drawn that the jitter accumulated in a long chain of standard repeaters does not affect seriously signal-to-quantization noise ratio in CVSDM systems, but affects this ratio significantly in PCM systems.

## 1. UVOD

Značajan degradirajući faktor u digitalnom prenosu je džiter koji se akumulira duž regenerativne linije. Pored direktnog uticaja na pouzdanost regeneracije, džiter takodje izaziva i položajnu modulaciju odmeraka na izlazu dekodera, što sa svoje strane pogoršava kvalitet prenošenog signala. Cilj ovoga rada je da se dođe do početnih podataka o uticaju džitera na promenu odnosa signal-šum kvantovanja pri prenosu digitalizovanog govornog signala. Za početna istraživanja izabrane su impulsna kodovana modulacija (PCM) i adaptivna delta-modulacija s kontinualno promenljivom strminom (CVSDM). Simulacija je vršena tako što je filtrirani uzorak govornog signala preko A/D konvertora memorisan u računaru, a zatim obrađivan odgovarajućim postupkom.

## 2. OFIS MODELA



Slika 1. Model

Proučavani model prikazan je na sl. 1. Memorisani odmerci filtriranog govornog signala uvedeni su u koder (PCM ili CVSDM). Za simulaciju su odabrane PCM s brzinom od 64 kbit/s sa segmentnom karakteristikom kompresije (A-87,6/13) ili i CVSDM [2]. Kod ove poslednje razmatrane su dve brzine rada - 16 i 32 kbit/s (u delju tekstu CVSDM16 i CVSDM32 respektivno), dok je vremenska konstanta iznosila 3 ms. Kontrola strmine vršena je na osnovu tri uzastopna bita. Na osnovu ovih podataka razvijeni su programi koji potpuno simuliraju rad kodera i dekodera opisanih sistema.

Poznato je [3] da je na kvalitet prenošenog signala značajniji uticaj apsolutnog džitera nego relativnog, a da je u dužem lancu regeneratora posebno izražen uticaj sistematske komponente džitera. Zbog ovoga rešeno je da se za simulaciju izabere apsolutni sistematski džiter. Sa stanovišta prakse najinteresantnije je posmatrati prenos multipleksnog signala (kako PCM, tako i CVSDM) linijama primarne digitalne ravni. U ovim linijama, po simetričnim paricama NF kabla, pri prenosu brzinom 2.048 kbit/s, u regeneratormima čije je rastojanje približno po 2 km, najčešće se koriste prosta oscilatorna kola s faktorom dobrote reda veličine  $Q = 100$ . Zbog relativno malog rastojanja regeneratora može se očekivati i postojanje veza s relativno velikim brojem regenerativnih deonica. Imajući ovo poslednje u vidu posmatran je džiter koji se generiše na liniji koja ima 1, 10, 100 i 1000 deonica. Može se smatrati da se posmatrani džiter deneriše tako što slučajni signal s normalnom raspodelom amplituda prolazi kroz ekvivalentan NF filter. Prenosna funkcija ovoga filtra ima oblik [3]

$$G_N(jf) = \frac{(1 + jx)^N - 1}{jx(1 + jx)^N} \quad (1)$$

gde je  $N$  - broj deonica a  $x \hat{=} f/f_0$  - normirana frekvencija (za slučaj  $f_d = 2,048$  MHz i  $Q = 100$  vredí  $f_0 \approx 10$  kHz). Digitalna simulacija ovakvog filtra trajala bi veoma dugo (za velike vrednosti  $N$ ), te smo se odlučili da ovaj filter grubo aproksimiramo ekvivalentnim filtrom čija je prenosna funkcija

$$G_{Nek}(jf) = \frac{N}{1 + j\frac{f}{f_N}} \quad (2)$$

( $f_N = Nf_0$ ). Na vrlo niskim ( $x \ll 1$ ) i vrlo visokim ( $x \gg 1$ ) učestanostima ova aproksimacija je vrlo dobra. Takodje je srednja snaga džitera dobijena na izlazu ovakvog filtra ista kao i kod filtra čija je prenosna funkcija data s (1), te možemo smatrati da je korišćena aproksimacija u jednom ovakvom ispitivanju zadovoljavajuća. Efektivna vrednost ovako dobijenih odmeraka džitera u daljem radu je za CVSDM32 normirana tako da posle prvog regeneratorsa iznosi 1%. Ovako velika efektivna vrednost ne odgovara preksi, ali je usvojena da bi se u slučaju delta-modulacije bolje uočio uticaj džitera na odnos signal-šum kvantovanja. Za CVSDM16, imajući u vidu ekvivalentnu brzinu u liniji efektivna vrednost je smanjena na 0,5%, a za PCM na 0,25%.

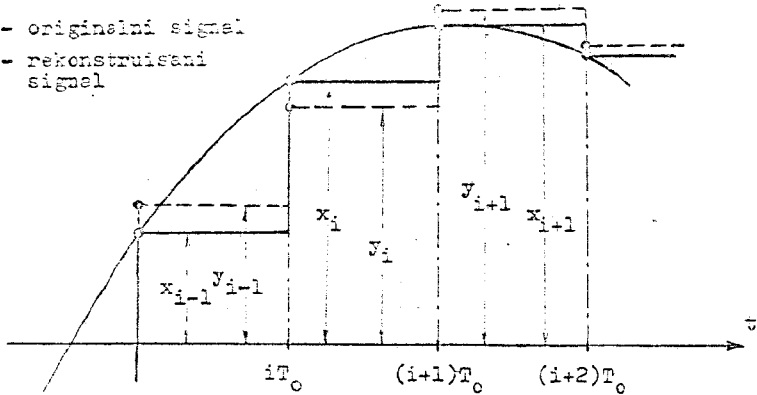
Dobijene vrednosti džitera je sada trebalo uneti u prenošene signale. Ustvari, ove vrednosti su direktno unošene u dekodeer. U slučaju sistema s delta-modulacijom dekodeer je ove vremenske pomeraje bita uzimao u obzir i pri određivanju struine, a u slučaju PCM signala oni su samo pretvarani u ekvivalentno kašnjenje ili prednjačenje rekonstruisanog odmerka.

### 3. IZRAČUNAVANJE ODNOSA SIGNAL-ŠUM KVANTOVANJA

Signal na izlazu dekodeera poredjen je s originalnim govornim signalom odmerak po odmerak i tako je računat odnos signal-šum kvantovanja. U oba slučaja (PCM i CVSDM) smatrano je da su i originalni i rekonstruisani signal aproksimirani stepenasto, tj. pravougaonim impulsima prema sl. 2. Stepenasto aproksimirani originalni signal se može napisati u obliku ( $K$  - ukupan broj odmeraka posmatranog signala,  $T_0$  - interval odmeravanja)

$$x(t) = \sum_{i=1}^K x_i u(t - T_0 - iT_0), \quad u(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_0 \\ 0, & \text{drugde} \end{cases} \quad (3)$$

$x_i$  - originalni signal  
 $y_i$  - rekonstruisani signal



Slika 2. Skica za izračunavanje odnosa signal-šum kvantovanja (bez džitera)

odakle sledi da je

$$x^2(t) = \sum_{i=1}^K x_i^2 u(t - T_0 - iT_0) \quad (4)$$

pa je srednja snaga signala ( $T = KT_0$ )

$$\overline{x^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T+T_0} x^2(t) dt = \frac{1}{KT_0} \sum_{i=1}^K x_i^2 \int_{T_0}^{T+T_0} u(t - T_0 - iT_0) dt \quad (5)$$

odnosno,

$$\overline{x^2(t)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_i^2 \quad (6)$$

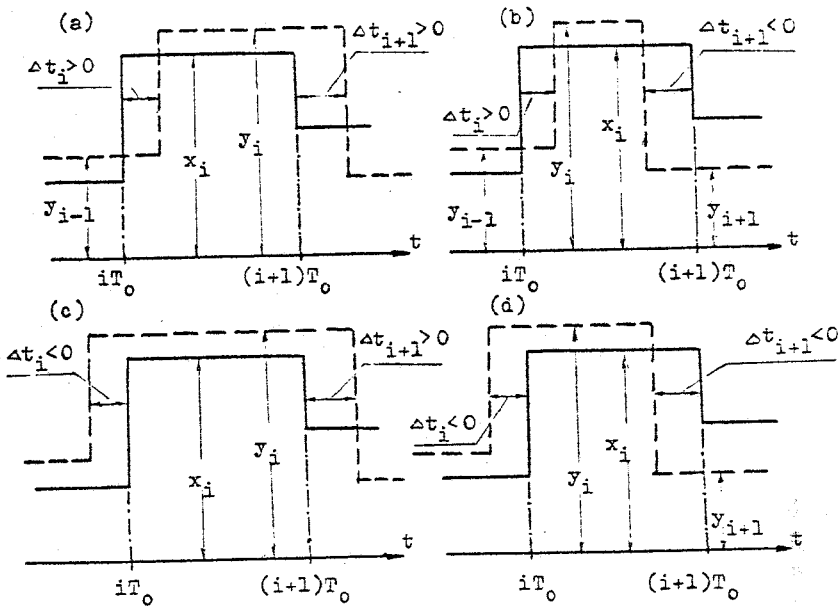
Srednja snaga šuma kvantovanja (bez džitera) lako se nalazi na sličan način i iznosi

$$\overline{e^2(t)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e_i^2 \quad (7)$$

gde je  $e_i = x_i - y_i$ , pa je odnos signal-šum kvantovanja

$$S/Q = 10 \log \frac{\overline{x^2(t)}}{\overline{e^2(t)}} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^K x_i^2}{\sum_{i=1}^K e_i^2} \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

U prisustvu džitera razlika između stepenasto aproksimiranog originalnog govornog signala i stepenasto aproksimiranog rekonstruisanog signala (tj. greška kvantovanja) zavisi od vrednosti džitera u posmatranom i narednom trenutku odmeravanja. Ove dve



Slika 3. Skica za izračunavanje odnosa signal-šum kvantovanja (u prisustvu džitera)

vrednosti džitera ćemo obeležiti s  $\Delta t_i$  i  $\Delta t_{i+1}$  respektivno. Lako se može zaključiti da postoje četiri međusobno različita slučaja od interesa (prema kombinacijama znakova uz  $\Delta t_i$  i  $\Delta t_{i+1}$ ). Ova četiri slučaja prikazana su na sl. 3.

Sada ćemo razmotriti svaki od pomenuta četiri slučaja posebno.

slučaj (a) ( $\Delta t_i > 0, \Delta t_{i+1} > 0$ )

Greška kvantovanja je u ovome slučaju definisana sa

$$e_i(t) = \begin{cases} x_i - y_{i-1}, & iT_0 \leq t < iT_0 + \Delta t_i \\ x_i - y_i, & iT_0 + \Delta t_i \leq t < (i+1)T_0 \\ 0, & \text{drugde} \end{cases}$$

te je

$$\begin{aligned} \overline{e_i^2(t)} &= \frac{1}{T_0} \int_{iT_0}^{(i+1)T_0} e_i^2(t) dt = \\ &= (x_i - y_{i-1})^2 \frac{\Delta t_i}{T_0} + (x_i - y_i)^2 \left(1 - \frac{\Delta t_i}{T_0}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

Za ostala tri slučaja analogno lako dolazimo do sledećih izraza za snagu šuma kvantovanja:

slučaj (b) ( $\Delta t_i > 0, \Delta t_{i+1} < 0$ )

$$\overline{e_i^2(t)} = (x_i - y_{i-1})^2 \frac{\Delta t_i}{T_0} + (x_i - y_i)^2 \left(1 - \frac{\Delta t_i}{T_0} + \frac{\Delta t_{i+1}}{T_0}\right) - (x_i - y_{i+1})^2 \frac{\Delta t_{i+1}}{T_0} \quad (11)$$

slučaj (c) ( $\Delta t_i < 0, \Delta t_{i+1} > 0$ )

$$\overline{e_i^2(t)} = (x_i - y_i)^2 \quad (12)$$

slučaj (d) ( $\Delta t_i < 0, \Delta t_{i+1} < 0$ )

$$\overline{e_i^2(t)} = (x_i - y_i)^2 \left(1 + \frac{\Delta t_{i+1}}{T_0}\right) - (x_i - y_{i+1})^2 \frac{\Delta t_{i+1}}{T_0} \quad (13)$$

Naravno, ukupna srednja snaga šuma kvantovanja je

$$\overline{e^2(t)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \overline{e_i^2(t)} \quad (14)$$

Napomenimo takodje da se s promenom učestanosti odmeravanja od  $F_0$  na  $F'_0$  efektivna vrednost džitera menja od vrednosti

$$\frac{\Delta t_i}{T_0} = \Delta t_i F_0 \quad (15)$$

na vrednost

$$\frac{\Delta t_i}{T'_0} = \Delta t_i F'_0 = \frac{\Delta t_i}{T_0} \frac{T_0}{T'_0} \quad (16)$$

Saglasno ovome i uzimamo da efektivne vrednosti džitera za CVSDM32, CVSDM16 i PCM stoje u istom odnosu kao i intervali odmeravanja, tj. u odnosu 1:0,5:0,25.

#### 4. REZULTATI

Na osnovu prethodnih razmatranja napravljen je kompletan skup programa za simulaciju na digitalnom računaru PDP11/34 sa A/D konvertorom. Rezultati dati u ovome radu odnose se samo na jedan srpskohrvatski logatom CVC tipa. Provera dobijenih rezultata na drugim logatomima nije dala značajnije razlike.

Zbog relativno male brzine rada računara koji je bio na raspolaganju odnos signal-šum kvantovanja računat je uz aproksimiranje i originalnog i rekonstruisanog signala pravougaonim impulsima.

a ne na odgovarajućim filtriranim verzijama. Ustvari, digitalno filtriranje rekonstruisanog signala trajalo bi znatno duže od celokupne ostale simulacije. Usled izostavljanja ovoga filtra odnos signal-šum kvantovanja kod CVSDM signala je izračunat kao znatno lošiji nego što je to slučaj u praksi (kod CVSDM32 ovaj odnos treba povećati za 9 dB, a kod CVSDM16 za 6 dB, da bi se dobile vrednosti koje odgovaraju praksi). Ovakvo pojednostavljenje ipak nije moglo značajno da utiče na dobijene rezultate - tj. na način promene odnosa signal-šum kvantovanja pri povećanju efektivne vrednosti džitera kod CVSDM.

Rezultati simulacije prikazani su u tab. 1. Kod CVSDM postupka radjeno je uz optimalnu veličinu koraka kvantovanja (koja je davala najveći odnos signal-šum kvantovanja). Inače, dodatna ispitivanja su pokazala da promena koraka kvantovanja nema skoro nikakvog uticaja na opšte ponašanje dobijenih rezultata (tj. na način smanjivanja odnosa signal-šum kvantovanja pri povećanju broja regeneratora). Kod PCM signala radjeno je sa srednjim nivoom normalnog govornika.

Tabela 1. Odnos signal-šum kvantovanja u funkciji broja regeneratora (odnosno, efektivne vrednosti džitera -  $J_{eff}$ )

VRSTA PRENOSA	BROJ REGENERATORA	0	1	10	100	1000
CVSDM32	$J_{eff}$	0	0,010	0,032	0,103	0,324
	S/Q [dB]	13,18	13,10	13,06	12,88	12,53
CVSDM16	$J_{eff}$	0	0,005	0,016	0,049	0,141
	S/Q [dB]	8,60	8,58	8,55	8,45	8,09
PCM	$J_{eff}$	0	0,0025	0,0079	0,0247	0,0705
	S/Q [dB]	37,53	29,60	25,07	20,32	16,00

## 5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Kao što se iz tabele može zaključiti, kod CVSDM postupaka čak i džiter na veoma dugačkoj regenerativnoj liniji, pod datim pretpostavkama ne utiče znatno na odnos signal-šum kvantovanja, dok je kod PCM prenosa ovaj uticaj veoma izražen.

Dobijeni rezultati se, po našem mišljenju, mogu objasniti na sledeći način. Šum nastao usled džitera i šum kvantovanja su statistički nezavisni, te se njihove snage sabiraju. Kada je šum kvantovanja manji od šuma usled džitera, tada i relativno mali šum nastao pod uticajem džitera znatno reducira ukupni odnos signal-šum. Takav je slučaj upravo kod PCM prenosa. S druge strane, kada je šum usled džitera manji od šuma kvantovanja, rezultujuća degradacija u odnosu signal-šum (u dB) nije značajna (kod CVSDM). Kod razmatranja postupaka delta-modulacije takođe treba imati u vidu i uticaj džitera na adaptivni deo dekodera. Međutim, taj uticaj nije dominantan u odnosu na direktni uticaj džitera manifestovan kroz promenu položaja odmeraka rekonstruisanog signala.

Za dalje istraživanja ostaje otvoreno polje bolje simulacije generisanja džitera, kao i rečunanja odnosa signal-šum kvantovanja na osnovu filtriranog rekonstruisanog signala. Takođe bi bilo moguće razmotriti i neke druge postupke digitalizacije govornog signala.

#### 6. LITERATURA

- [1] CCITT Orange Book, Vol. 3.2., Geneva 1977.
- [2] H. S. Lee, C. K. Un: "Quantization noise in adaptive delta modulation system", IEEE Trans. on Communication, Vol. COM-28, No. 10, Oct. 1980. pp. 1794-1802.
- [3] Lukatela, Drajić, Petrović: "Digitalne telekomunikacije", Gradjevinska knjiga, Beograd 1978.