Ivan Miletić,
dipl. inž.
VP 2822 Prokuplje

KORIŠĆENJE FAZNE PETLJE ZA POTISKIVANJE PROSTOPERIODIČNE SMETNJE KOD SISTEMA SA DIREKTNOM SEKVENCOM

UDC: 621.391.883:621.376.6

Rezime:

Razmatran je problem potiskivanja prostoperiodične smetnje kod DS-SS sistema (Direct sequence Spread Spectrum System). Problem se može rešiti uz pomoć metoda fazne petlje, transferzalnih filtera i adaptivnih antenskih sistema. Analiziran je metod fazne petlje kojim se može dobiti željeni odnos snaga korisnog signala i prostoperiodične smetnje.

Ključne reči: fazna petlja, korisni signal, prostoperiodična smetnja, efektivna smetnja, ekvivalentni šum, varijansa fazne greške.

PHASE-LOCKED LOOP APPLICATION FOR SIMPLE PERIODIC INTERFERENCE SUPPRESION IN DIRECT SEQUENCE SYSTEMS

Summary:

The problem of simple periodic interference suppression in DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum) systems is considered. It can be solved using the method of phase-locked loop, transverse filters and adaptive arrays. The paper analyses the method of phase-locked loop by which a desired useful signal to simple periodic interference strength ratio can be obtained.

Key words: phase-locked loop useful signal, simple periodic interference, effective interference, equivalent noise, phase error variance.

Uvod

Sistemi za prenos signala u proširenom spektru, koji predstavljaju jednu klasu telekomunikacionih sistema, razvijeni su usled potrebe da se obezbedi pouzdan prenos informacije u uslovima izuzetno visokog nivoa smetnje.

U realnim uslovima primene komunikacionih sistema postavlja se zahtev za prenos informacije u situacijama u kojima je nivo smetnje znatno viši od nivoa korisnog signala. Ovakva situacija nastaje bilo zbog aktivnog ometanja, bilo zbog toga što se u blizini prijemnika nalazi jak predajnik nekog

drugog komunikacionog sistema koji radi na istoj ili bliskoj frekvenciji. Činjenica je da je zauzetost frekventnog opsega danas toliko velika da su ovakve situacije moguće, kako u civilnim, tako i u vojnim komunikacijama.

Pored ometanja, kod vojnih komunikacija javlja se još jedan njima svojstven problem — problem elektronskog izviđanja.

Primenom tehnike proširenja spektra signala postiže se veoma efikasna protivelektronska zaštita sistema. Mogućnosti praktične realizacije sistema zasnovanih na ovoj tehnici su raznovrsne.

Jedna od najčešće korišćenih praktičnih realizacija je DS-SS sistem (Direct Sequence Spread Spectrum System) ili sistem za prenos signala u proširenom spektru korišćenjem direktne sekvence.

Analiza i rezultati

U bilo kojoj konfiguraciji sistema, pa samim tim i kod DS-SS sistema, poželjno je da sistem ima mogućnost da potisne smetnju nezavisno od vrednosti njegovih parametara.

Potiskivanje prostoperiodične smetnje može se ostvariti korišćenjem sledećih metoda:

- fazna petlja [2],
- transverzalni filtri [1, 3],
- adaptivni antenski sistemi [5].

U ovom slučaju razmatraće se metod fazne petlje, čija konfiguracija je prikazana na slici 1 [1, 2].

Ukupni ulazni signal, u ovom slučaju, može da se predstavi u sledećem obliku:

$$r_1(t) = S_{DS}(t) + A_i \cdot \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (1)$$

gde je:

$S_{DS}(t)$ — primljeni DS-SS signal ukupne snage S , centralne učestanosti ω_0 i širine spektra, W_{DS} .

Drugi sabirak u relaciji (1) predstavlja prostoperiodičnu smetnju snage $I = A_i^2 / 2$.

Pošto se u ovom slučaju razmatra prostoperiodična smetnja koja je znatno većeg nivoa u odnosu na nivo korisnog signala, korišćenjem fazne petlje može se generisati signal iste faze kao što je faza smetnje.

Ako se izvrši još i dodatna regulacija amplitude signala fazne petlje, dobiće se signal koji ima približno iste parametre kao i smetnja. Oduzimanjem ovako generisanog signala od ukupnog ulaznog signala, u preostali deo DS-SS sistema će, umesto smetnje, dospeti razlika originalne smetnje i njene estimacije.

Naravno, što je estimirani signal sličniji originalnoj smetnji, razlika ova dva signala će biti manja i težiti nuli. Ova razlika naziva se *efektivna smetnja*.

Neka su $\hat{\omega}_i$ i $\hat{\theta}_i$, učestanost i faza signala na izlazu iz fazne petlje, a $\hat{A}_i$ amplituda tog signala nakon prolaska kroz blok za estimaciju.

Sl. 1 — Blok šema kola za potiskivanje prostoperiodične smetnje kod sistema sa direktnom sekvencom

Ulazni signal u preostali deo DS-SS prijemnika, koji je na slici 1 obeležen sa $r_2(t)$, može se predstaviti u sledećem obliku:

$$r_2(t) = r_1(t) - \hat{A}_i \cdot \cos(\hat{\omega}t + \hat{\Theta}_i) = S_{DS}(t) + A_i \cdot \cos(\omega_i t + \Theta_i) - \hat{A}_i \cdot \cos(\hat{\omega}t + \hat{\Theta}_i) = S_{DS}(t) + i_2(t) \quad (2)$$

Sa $i_2(t)$ je označena efektivna smetnja, koja je definisana sledećom relacijom:

$$i_2(t) = A_i \cdot \cos(\omega_i t + \Theta_i) - \hat{A}_i \cdot \cos(\hat{\omega}t + \hat{\Theta}_i) = A_i \cdot \cos(\omega_i t + \Theta_i) - \hat{A}_i \cdot \cos(\omega_i t + \alpha) \quad (3)$$

gde je ugao α definisan relacijom:

$$\alpha = (\hat{\omega}_i - \omega_i) \cdot t + \hat{\Theta}_i = \Delta\omega_i + \hat{\Theta}_i \quad (4)$$

Korišćenjem jednostavnih trigonometrijskih transformacija, efektivna smetnja može se predstaviti u sledećem obliku:

$$i_2(t) = (A_i \cdot \cos\Theta_i - \hat{A}_i \cdot \cos\alpha) \cdot \cos\omega_i t - (A_i \cdot \sin\Theta_i - \hat{A}_i \cdot \sin\alpha) \cdot \sin\omega_i t = \sqrt{A_i^2 + \hat{A}_i^2 - 2 \cdot A_i \hat{A}_i \cos(\Theta_i - \alpha)} \cdot \cos(\omega_i t + \beta) \quad (5)$$

Ekvivalentni ugao β definisan je relacijom:

$$\beta = \arctg \left(\frac{A_i \cdot \sin\Theta_i - \hat{A}_i \cdot \sin\alpha}{A_i \cdot \cos\Theta_i - \hat{A}_i \cdot \cos\alpha} \right) \quad (6)$$

Amplituda signala $i_2(t)$ u relaciji (5) predstavlja *meru efikasnosti potiskivanja smetnje*:

$$A_{ir} = \sqrt{A_i^2 + \hat{A}_i^2 - 2 \cdot A_i \hat{A}_i \cos\Phi_e} \quad (7)$$

Sa $\Phi_e = \Theta_i - \alpha$, obeležena je *greška estimacije ukupne faze ulazne smetnje u faznu petlju* (razlika između faza smetnji na ulazu i izlazu fazne petlje).

Na osnovu ovoga, snaga efektivne smetnje može se označiti sa:

$$I_2 = A_{ir}^2 / 2 \quad (8)$$

Da bi se dobila vrednost estimirane amplitude smetnje $\hat{A}_i$, potrebno je izvršiti NF filtriranje proizvoda ukupnog ulaznog signala sistema $r_1(t)$ i izlaznog signala fazne petlje $\cos(\hat{\omega}_i t + \hat{\Theta}_i)$. Proizvod ta dva signala $y_1(t)$, na osnovu slike 1, je:

$$y_1(t) = r_1(t) \cdot 2\cos(\hat{\omega}_i t + \hat{\Theta}_i) = 2r_1(t)\cos(\omega_i t + \alpha) = 2S_{DS}(t)\cos(\omega_i t + \alpha) + 2A_i \cos(\omega_i t + \Theta_i)\cos(\omega_i t + \alpha) \quad (9)$$

Primenom trigonometrijskog pravila:

$$\cos\alpha\cos\beta = \frac{\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)}{2}$$

na drugi sabirnik u relaciji (9) i koristeći uvedenu jednakost $\Phi_e = \Theta_i - \alpha$, relacija (9) može se napisati kao:

$$y_1(t) = 2S_{DS}(t)\cos(\omega_i t + \alpha) + A_i \cos\Phi_e + A_i \cos(2\omega_i t + \Theta_i + \alpha) \quad (10)$$

Posle NF filtriranja ovog signala, dobija se:

$$y_1(t) = A_i \cos\Phi_e + E_a(t) = \hat{A}_i \quad (11)$$

Ukoliko se faznom petljom održava mala vrednost greške estimacije ukupne faze ulaznog signala Φ_e , prvi član u relaciji (11) predstavlja dobru estimaciju amplitude smetnje.

Drugi član u relaciji (11), koji je obeležen sa $E_a(t)$, predstavlja *ekvivalentni šum* koji se dobija NF filtriranjem signala:

$$E_i(t) = 2S_{DS}(t)\cos(\omega_i t + \alpha) \quad (12)$$

Ako se u relaciji (7) zameni vrednost za $\hat{A}_i$ iz relacije (11), i primeni trigonometrijsko pravilo $\cos 2\alpha = 2\cos^2 \alpha - 1$, dobiće se sledeća relacija:

$$A_{ir} = \sqrt{A_i^2 + (A_i \cos\Phi_e + E_a)^2} \cdot \sqrt{(-2A_i(A_i \cos\Phi_e + E_a)\cos\Phi_e)} = \sqrt{A_i^2 - A_i^2 \cos^2 \Phi_e + E_a^2} = \sqrt{A_i^2(1 - \cos^2 \Phi_e) + E_a^2} = \sqrt{A_i^2(1 - \cos 2\Phi_e)/2 + E_a^2} \quad (13)$$

Kada se primeni formula za razvoj kosinusne funkcije u red:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2!} + \frac{\alpha^4}{4!} - \dots, \text{ na funkciju } \cos 2\Phi_e,$$

dobija se:

$$\cos 2\Phi_e = 1 - \frac{(2\Phi_e)^2}{2!} + \frac{(2\Phi_e)^4}{4!} - \dots$$

Ako se pretpostavi da je $2\Phi_e \ll 1$, dobiće se:

$$\cos 2\Phi_e \approx 1 - 2\Phi_e^2 \quad (14)$$

Uvođenjem ovog izraza u relaciju (13), dobija se:

$$A_{ir} = \sqrt{A_i^2 \Phi_e^2 + E_a^2} \quad (15)$$

Zamenom izraza za A_{ir} iz relacije (15) u relaciju (8) kojom je definisana snaga efektivne smetnje, dobija se:

$$I_2 = \overline{A_{ir}^2} / 2 = (\overline{A_i^2 \Phi_e^2 + E_a^2}) / 2 = \Phi_e^2 (\overline{A_i^2} / 2) + \overline{E_a^2} / 2 \quad (16)$$

Pošto je snaga prostoperiodične smetnje $I = \frac{A_i^2}{2}$, relacija (16) poprima sledeći oblik:

$$I_2 = I \Phi_e^2 + \overline{E_a^2} / 2 \quad (17)$$

Da bi se odredila snaga ekvivalentnog šuma, tj. izraz za $\overline{E_a^2}(t)$, neophodno je razmotriti relaciju (12), tj.:

$$E_i(t) = 2S_{DS}(t) \cos(\omega_i t + \alpha)$$

$S_{DS}(t)$ je primljeni DS-SS signal. Ako se on predstavi u uobičajenoj formi [4]:

$$S_{DS}(t) = A \tilde{\mu}(t, T_m) \tilde{e}(t, T_e) \cos \omega_0 t,$$

gde je:

A — konstantna amplituda signala,
 ω_0 — konstantna učestanost,

$\tilde{\mu}(t, T_m) = \tilde{\mu}(t) = \pm 1$ — bipolarni informacioni signal u kome je perioda simbola jednaka T_m ,

$\tilde{e}(t, T_e) = \tilde{e}(t) = \pm 1$ — pseudoslučajna sekvenca dužine $L = T_m/T_e$ gde je $T_e \ll T_m$, perioda bipolarnog simbola, relacija (12) poprima sledeći oblik:

$$E_i(t) = A \tilde{\mu}(t, T_m) \tilde{e}(t, T_e) \cdot \{\cos[(\omega_i - \omega_0)t + \alpha] + \cos[(\omega_i + \omega_0)t + \alpha]\} \quad (18)$$

Drugi član u ovoj relaciji biće eliminisan NF filtrom, a deo spektra prvog člana ove relacije proći će kroz NF filter i formirati ekvivalentnu smetnju $E_a(t)$.

Snaga ovog signala biće maksimalna u slučaju kada je $\omega_i \approx \omega_0$, što se vidi sa slike 2 [4].

Imajući u vidu da je spektar pseudoslučajne sekvence $W_{DS}/2$ mnogo širi od propusnog opsega NF filtra B_a , može se smatrati da će deo snage prve komponente signala $E_i(t)$ biti proporcionalan količniku $B_a / (W_{DS}/2) = 2B_a / W_{DS}$.

Na osnovu ovoga, snaga ekvivalentnog šuma $E_a(t)$ biće:

$$\overline{E_a^2}(t) = S(2B_a / W_{DS}) = 2SB_a / W_{DS} \quad (19)$$

Uvođenjem ove relacije u relaciju (17), dobija se:

$$I_2 = I \Phi_e^2 + SB_a / W_{DS} \quad (20)$$

Potrebno je odrediti izraz za Φ_e^2 . Iz oblasti linearne teorije faznih petlji [4], poznato je da varijansa fazne greške $\sigma^2_{\Phi_e}$ u faznoj petlji, na čijem se ulazu nalazi signal oblika $\sqrt{2}A \cos(\omega_0 t + \Theta)$, u prisustvu belog Gausovog šuma spektralne gustine N_0 , iznosi:

$$\sigma^2_{\Phi_e} = N_0 B_L / A^2 \quad (21)$$

gde je:

B_L — ekvivalentni propusni opseg zatvorene fazne petlje.

U slučaju koji se analizira, na ulazu fazne petlje nalazi se signal koji predstavlja sumu prostoperiodične smetnje $A_i \cos(\omega_i t + \Theta_i)$ i širokopojasnog DS-SS signala, snage S i opsega W_{DS} .

Ovaj DS-SS signal, sa stanovišta uskopojasne fazne petlje, predstavlja beli Gausov šum spektralne gustine snage S / W_{DS} [3].

Za slučaj koji se razmatra, varijansa fazne greške može se predstaviti kao:

$$\sigma^2_{\Phi_e} = \frac{(S / W_{DS}) B_{\Phi}}{(A_i / \sqrt{2})^2} = \frac{2SB_{\Phi}}{A_i^2 W_{DS}} = \frac{B_{\Phi}}{W_{DS}} \cdot \frac{S}{I} \quad (22)$$

Kada se u sistemu koristi fazna petlja kojom se postiže sinfaznost, važi jednakost $\sigma^2_{\Phi_e} = \bar{\Phi}_e^2$.

U realnim situacijama je $S / I \ll 1$ i B_{Φ} / W_{DS} je reda veličine 10^{-6} .

Zbog toga $\bar{\Phi}_e^2$, dato relacijom (22), može imati tipičnu vrednost reda 10^{-8} do 10^{-12} . Odavde se vidi da je pretpostavka $2\bar{\Phi}_e \ll 1$, na osnovu koje je aproksimirana relacija (14), bila opravdana.

Kombinovanjem relacija (20) i (22) dobija se:

$$I_2 = I \cdot \left[\frac{B_{\Phi}}{W_{DS}} \cdot \frac{S}{I} \right] + \frac{SB_a}{W_{DS}} = \frac{B_{\Phi} + B_a}{W_{DS}} \cdot S \quad (23)$$

Konačno, na osnovu ove relacije, određuje se odnos snage korisnog signala i efektivne smetnje na ulazu DS-SS sistema:

$$S / I_2 = W_{DS} / (B_{\Phi} + B_a) \quad (24)$$

U praksi se nikada ne sreće prostoperiodična smetnja, već je to samo gruba aproksimacija *realne uskopojasne smetnje*.

S tim u vezi, treba istaći da analizirani sklop sa faznom petljom ne bi dao rezultate kada bi se primenio na uskopojasnu smetnju.

Naime, za eliminaciju uskopojasne smetnje u sistemima sa proširenim spektrom, koriste se uskopojasni filteri nepropusnici opsega učestanosti. To su takozvani *Notch-filtri*.

Pri tome se centralna učestanost filtra i njegova širina podese tako da u ukupnom primljenom signalu što je

Sl. 2 — Grafički prikaz funkcija gustine spektra snage korisnog (CPSK) signala i ekvivalentne smetnje

moguće više oslabe onaj deo spektra u kome je locirana smetnja.

Naravno, treba imati u vidu da se javlja problem nepoznavanja parametara uskopojasne smetnje.

Međutim, razvoj savremene tehnologije omogućio je realizaciju *notch* filtera kome se centralna učestanost menja u zavisnosti od spektra smetnje. Ovo rešenje se zasniva na primeni akustičnih filtera sa površinskim talasom (SAW — Surface acoustic wave filters) [1].

Zaključak

Razmatrano je korišćenje fazne petlje da bi se potisnula prostoperiodična smetnja kod DS-SS sistema.

Ukoliko bi se posmatrao DS-SS sistem bez korišćenja fazne petlje za potiskivanje prostoperiodične smetnje, dobio bi se sledeći izraz za odnos snaga korisnog signala i prostoperiodične smetnje:

$$S / I = S / (A^2_i / 2)$$

Literatura:

- [1] Chklarsky, D., Das, P., Milstein, L. B.: Adaptive Narrowband Interference Suppression, Proceeding of National Telecommunication Conference, pp. 15.2.1—15.2.4, Washington, November 1979.
- [2] Bouvier, M. J.: The Rejection of Large CW Interferers in Spread Spectrum Systems, IEEE Transactions on Communication, Vol. COM-26, No.2, pp. 254—256, February 1978.
- [3] Hsu, F., Giordano, A.: Digital Whitening Techniques for Improving Spread Spectrum Communications Performance in the Presence of Narrowband Jamming and Interference, IEEE Trans. Comm. Technology, Vol. COM-26, No.2, pp. 204—216, February 1971.

Poredeći ovaj izraz i izraz (24) koji daje odnos snaga korisnog signala i efektivne smetnje dolazi se do sledećih zaključaka:

— bez primene kola fazne petlje za potiskivanje prostoperiodične smetnje, dobijena relacija za odnos snaga korisnog signala i prostoperiodične smetnje direktno zavisi od snage prostoperiodične smetnje,

— primenom kola fazne petlje dobija se relacija iz koje se vidi da odnos snage korisnog signala i prostoperiodične smetnje *ne zavisi od apsolutne snage smetnje na ulazu celokupnog sistema*, već od širine spektra korisnog DS-SS signala W_{DS} , propusnog opsega fazne petlje B_ϕ i propusnog opsega NF filtra B_n .

Izborom odgovarajućih vrednosti ovih parametara dobiće se željeni odnos snaga korisnog signala i prostoperiodične smetnje.

- [4] Glišić, S.: Prenos signala sa ekspanovanim spektrom, VINC, Beograd, 1981.
- [5] Rodgers, W. E., Compton, R. T.: Adaptive Array Bandwidth with Tapped Delay-Line Processing, IEEE Transactions, Vol. AES-15, No.1, January 1979.