

Presretanje i energetska detekcija signala sa frekvencijskim skakanjem

Dr Desimir Ž. Vučić, dipl.inž. ¹⁾

Određena je združena verovatnoća presretanja i detekcije signala sa frekvencijskim skakanjem (FH) u prisustvu uskopojasnih smetnji pri pretraživanju radio-frekvencijskog (RF) spektra. Analizirane su performanse združenog presretanja i detekcije FH signala zavisno od parametara pretraživanja RF spektra i uskopojasnih smetnji.

Ključne reči: Frekvencijsko skakanje, detekcija signala, presretanje signala, uskopojasna smetnja, pretraživanje radio-frekvencijskog spektra.

Uvod

SIGNALI sa frekvencijskim skakanjem (FH- *frequency hopping*), a generalno i signali sa prenosom u proširenom spektru (SS- *spread spectrum*), predstavljaju signale sa malom verovatnoćom presretanja (*LPI- Low Probability of Intercept*), tj. projektuju se u cilju što teže detekcije od strane neovlašćenog (neautorizovanog, nenamenjenog) korisnika (prijemnika). Srednja snaga SS signala ravnomerno se proširuje na veći frekvencijski opseg, što otežava detekciju njihovog prisustva i ometanje. Otežana detekcija FH signala se zasniva na korišćenju velikog broja različitih kanala (frekvencija) na kojima se vrši prenos informacije, a posebno na korišćenju PN sekvence (PN- *Pseudo-Noise*) za izbor frekvencija kanala, odnosno FH impulsa. Nemogućnost predikcije PN sekvence, koja određuje frekvenciju kanala na koje "skače" FH signal (*hop channels*), presudna je u povećanju zaštite od presretanja (*interception*) i detekcije ovih signala.

Uobičajeno je da se detekcija FH signala razmatra u prisustvu aditivnog belog Gaussovog šuma (*AWGN- Additive White Gaussian Noise*). Pravila detekcije se zasnivaju na odnosu verodostojnosti (*LR- Likelihood-Ratio*), ili su jednostavnijeg energetskog, odnosno radiometarskog tipa. Najčešće se FH signali sreću u prisustvu uskopojasnih smetnji, i u tom slučaju je korisno analizirati performanse detekcije.

Najčešće se detekcija FH signala razmatra na primeni širokopojasnog filtra sa energetskim detektorom (širokopojasna energetska detekcija) ili banki paralelnih uskopojasnih filtara sa energetskim detektorima (više kanalna uskopojasna energetska detekcija, ili impulsna detekcija), koji prekrivaju ceo frekvencijski opseg FH signala integralno ili po kanalima. Ovakvi složeni sistemi se namenski projektuju za detekciju FH signala i ne primenjuju pretraživanje radio-frekvencijskog (RF) spektra.

Praktično je veoma interesantno analizirati mogućnost detekcije FH signala primenom klasičnih jednodokanalnih ili višekanalnih prijemnika za pretraživanje RF spektra (*search receivers*), koji se sukcesivno podešavaju na

različite kanale ili grupu kanala unutar širokog frekvencijskog opsega FH signala. U ovom slučaju, problemu detekcije FH signala prethodi razmatranje problema presretanja signala (*signal interception*) u smislu "nalaženja" prijemnika i FH impulsa na istom kanalu ("pogađanje" FH impulsa).

Obično se, zbog jednostavnije analize, detekcija FH signala i njihovo presretanje razmatraju odvojeno [1,2]. Na ovom mestu se jedinstveno razmatra problem presretanja i detekcije FH signala. U procesu pretraživanja RF spektra radio-prijemnici se sukcesivno podešavaju na različite frekvencije (kanale) i pokušavaju da "presretnu" FH signal radi njegove detekcije. Razmatra se uskopojasna energetska impulsna detekcija sa pretraživanjem, pri čemu se u propusnom opsegu prijemnika na postavljenoj frekvencijskoj poziciji vrši detekcija presretnih FH impulsa u prisustvu *AWGN* i drugih uskopojasnih smetnji (*NBI- Narrowband Interference*). Znači, za ovaj slučaj korišćenja pretraživačkih prijemnika u detekciji FH signala analizirana je zavisnost združene verovatnoće presretanja i detekcije, za datu verovatnoću lažnog alarma, od odnosa SNR (*signal-to-noise ratio*) za FH signal i za uskopojasnu smetnju, broja uskopojasnih smetnji i parametara pretraživanja.

Principi pretraživanja RF spektra i presretanja FH signala

Radio-prijemnici za pretraživanje (*search receivers*) mogu se sukcesivno brzo podešavati na različite frekvencije (kanale) unutar širokog frekvencijskog opsega i na svakom od tih kanala oni pokušavaju "presresti" signal i na taj način ga detektovati. Kada bi se detektovani signali prikazivali u vremensko-frekvencijskom opsegu (npr. "waterfall" displej), tada bi za CW (*continuous wave*) signal bila karakteristična konstantna srednja frekvencija u vremenu, a za FH signal bio bi karakterističan oblik skokova frekvencije (*hop pattern*). Ako bi istovremeno u istom frekvencijskom opsegu bila prisutna dva FH signala, tada se ovi signali ne bi mogli razlikovati i posebno identifikovati

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

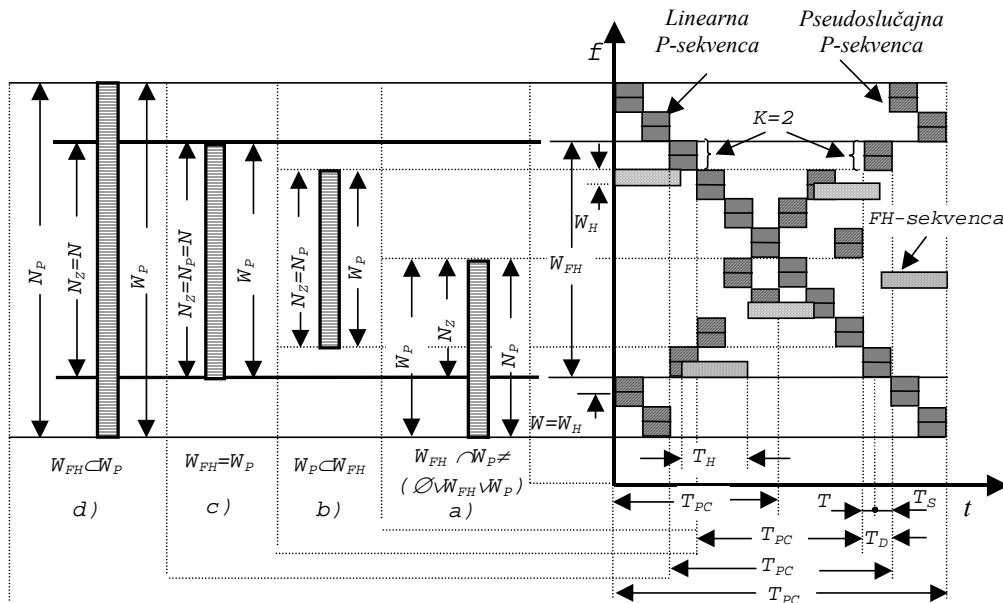
na “waterfall” displeju. Kada bi se sa pretraživanjem određivao i ugao dolaska signala (AOA- Angle of Arrival) primenom goniometra (DF- direction finder) sa pretraživanjem (SDF-scanning DF), tada bi se prikazivanjem AOA u funkciji frekvencije mogli identifikovati FH signali (predajnici), sa različitim smerom dolaska, na bazi karakterističnog “niza perli” (“string-of-pearls”) u smeru upadnog ugla [1].

Da bi se jedan FH signal primio, odnosno detektovao prijemnikom za pretraživanje ili goniometrom sa pretraživanjem (SDF), potrebno je da sekvenca skakanja frekvencije FH signala (FH sekvenca) i sekvenca pretraživanja prijemnika (P- sekvenca) budu potpuno sinhronizovane. Međutim, pri presretanju FH signala slučajna sekvenca skakanja i sekvenca pretraživanja su nezavisne (sl.1), pa se u tom slučaju može govoriti samo o verovatnoći presretanja signala.

Pretpostavlja se da se N različitih frekvencija (kanala)

određenom kanalu u slučajno odabrano vreme iznosi $1/N_P$ za svaki od N_P kanala. Trajanje jednog ciklusa pretraživanja određenog frekvencijskog opsega iznosi T_{PC} . Vreme zadržavanja prijemnika na svakoj frekvencijskoj poziciji (kanalu) iznosi T_D (dwell time) i sastoji se od vremena integracije T i nekog preostalog vremena T_S , tj. $T_D = T_S + T$. Vreme T_S sadrži vreme postavljanja sintezatora prijemnika i vreme potrebno za neku dodatnu obradu signala (npr. vreme potrebno za proračun AOA).

Vreme integracije T zavisi od vremena uspostavljanja impulsnog odziva filtera koji se koriste. Smatra se da su nedetektibilni FH signali kod kojih je $T_H \leq T$, tj. mora biti $T_H > T$ da bi se FH signal mogao detektovati (sl.1). Primljeni FH impulsi će se detektovati ako imaju dovoljnu energiju i kada bar jedan interval integracije T padne unutar T_H intervala FH impulsa, a kada su frekvencija FH impulsa i postavljena prijemna frekvencija identične.

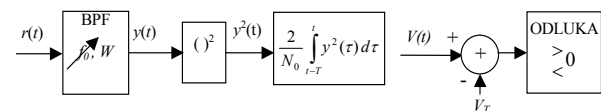


Slika 1. Medusobni položaj frekvencijskih opsega i kanala FH signala (W_{FH} , N) i pretraživačkog prijemnika (W_P , N_P) sa linearnom ili pseudoslučajnom sekvencom za pretraživanje: (a) opšti slučaj preklapanja W_P i W_{FH} ; (b) opseg W_P unutar opsega W_{FH} ; (c) W_P se poklapa sa W_{FH} ; (d) opseg W_{FH} unutar opsega W_P .

FH signala pojavljuju u skladu sa slučajnom sekvencom. Verovatnoća pojavljivanja (selekcije) svakog kanala je ista i iznosi $1/N$. Vremenski interval jednog FH impulsa iznosi T_H i predstavlja vreme zadržavanja (dwell time of the hopper) FH signala na jednoj frekvenciji. Pretraživanje se vrši višekanalnim (K -kanalni) prijemnikom (npr. $K=2$ na sl.1). Zbog jednostavnije analize se pretpostavlja da su kanali FH signala jednako razmaknuti (susedni) i da se pretraživanje RF opsega vrši frekvencijskim korakom i frekvencijskom širinom koja odgovara kanalima FH signala ($W=W_H$). Frekvencijski opseg pretraživanja W_P od N_P kanala se može delimično poklapati na N_Z kanala (sl.1a), biti potpuno prekriven (sl.1b), potpuno se poklapati (sl.1c) ili potpuno prekrivati opseg FH signala W_{FH} od N kanala. Kanali pretraživanja (N_P) mogu se postavljati na linearni ili pseudoslučajni način, potpuno nezavisno od sekvence skakanja FH signala, ali tako da se svaki od N_P kanala postavlja samo jednom u jednom ciklusu pretraživanja (sl.1). Verovatnoća da se prijemnik nalazi na nekom

Verovatnoća presretanja FH signala

Pretpostavlja se da se pretraživanje vrši višekanalnim (K -kanalni) uskopojasnim prijemnikom sa energetskim detektorima, pri čemu se kanali pretraživanja i FH signala poklapaju po frekvencijskoj širini ($W=W_H$) i mogućoj frekvencijskoj poziciji f_0 , a sekvence skakanja i pretraživanja su nezavisne i slučajne (sl.1). Jedan kanal takvog uskopojasnog energetskog detektora sa pretraživanjem je prikazan na sl.2.



Slika 2. Uskopojasni energetski detektor sa pretraživanjem

Ako je brzina skakanja FH signala $R_H=1/T_H$ [skok/s], brzina pretraživanja K -kanalnim prijemnikom $R_P=1/T_D$

[frekvencija/s] ([K-kanala/s]), vreme integracije T , može se pokazati [1,2] da srednji broj validnih pokušaja presretanja i detekcije za vreme intervala T_H jednog FH impulsa iznosi:

$$\bar{n} = R_p \left(\frac{1}{R_H} - T \right) \quad (1)$$

Maksimalni broj validnih pokušaja presretanja i detekcije iznosi $n_{\max} = R_p / R_H$ i dobija se u slučaju sinhronizacije perioda skakanja T_H i pretraživanja T_D , pri čemu je R_p celobrojni umnožak od R_H ($R_p = m \cdot R_H$, m -prirodan broj).

Kada se pretraživanje vrši K -kanalnim prijemnikom i ako se frekvencijski opseg FH signala W_{FH} od N kanala i frekvencijski opseg pretraživanja W_p od N_p kanala prekrivaju na N_z kanala (sl.1), verovatnoća presretanja P_p jednog FH impulsa za vreme jednog intervala T_H iznosi:

$$P_p = \frac{N_z}{N \cdot N_p} \cdot K \cdot \bar{n} = \frac{N_z \cdot K \cdot R_p}{N \cdot N_p} \cdot \left(\frac{1}{R_H} - T \right) \quad (2)$$

Verovatnoća detekcije FH impulsa

Kada u procesu pretraživanja dođe do presretanja FH impulsa na nekom kanalu sa verovatnoćom P_p , njegovo prisustvo se detektuje energetskim detektorom ako energija signala u detektorskoj ćeliji TW premaši prag detekcije V_T (sl.2). Pri tome FH impuls može biti sam, ili zajedno sa uskopojasnom smetnjom.

Kada je proizvod vreme – opseg TW u detektorskoj ćeliji dovoljno velik (npr. $TW > 30$), izlaz energetskog detektora $V(t) = V$ (sl.2) može se aproksimirati Gaussovom slučajnom promenljivom, čija srednja vrednost m i varijansa σ^2 imaju oblik [4]:

$$m = 2(\lambda + TW), \quad \sigma^2 = 4(2\lambda + TW) \quad (3)$$

gde je $\lambda = E_s / N_0$ odnos energije signala E_s u detektorskoj ćeliji TW i jednostrane spektralne gustine srednje snage suma N_0 . Verovatnoća (*Pr- probability*) da će izlaz energetskog detektora V premašiti prag V_T , izračunava se kao:

$$Pr\{V > V_T\} = Q\left(\frac{V_T - m}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{V_T - m}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (4)$$

gde su Q - funkcija i komplementarna funkcija greške (*erfc-complementary error function; co-error function*) definisani na sledeći način:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (5)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2} du$$

Vidi se da je:

$$\operatorname{erfc}(x) = 2Q(x\sqrt{2}), \quad Q(x) = (1/2) \cdot \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})$$

Verovatnoća lažnog alarma u TW ćeliji, tj. verovatnoća da će izlaz energetskog detektora V premašiti prag V_T kada u detektorskoj “ćeliji” nije prisutan FH signal (\overline{FH}) može se posmatrati pod hipotezom H_{00} , kada signal u kanalu $r(t)$ predstavlja samo aditivni beli Gaussov šum (AWGN) $n(t)$, ili pod hipotezom H_{01} kada je u kanalu prisutan samo AWGN sa uskopojasnom smetnjom $s_{NB}(t)$, tj.:

$$H_{0i}: r(t) = n(t) + i \cdot s_{NB}(t), \quad i = 0,1; \quad 0 \leq t \leq T_H \quad (6)$$

gde je T_H opservacioni interval koji odgovara vremenskom intervalu jednog FH impulsa. U slučaju navedene Gaussove aproksimacije signala na izlazu energetskog detektora, *verovatnoća lažnog alarma u TW ćeliji*, tj. verovatnoća da će izlaz energetskog detektora V premašiti prag $V_T^{(i)}$ ($i=0$ - NBI nije prisutna; $i=1$ - NBI prisutna) kada u detektorskoj “ćeliji” nije prisutan FH signal (\overline{FH}) može se predstaviti kao:

$$Q_{Fi} = Pr\{V > V_T^{(i)} | \overline{FH}\} = Q\left(\frac{V_T^{(i)} - 2 \cdot (i \cdot \lambda_{NB} + TW)}{2\sqrt{2i \cdot \lambda_{NB} + TW}}\right) \quad (7)$$

$$i = 0,1$$

gde su: Q_{F0} i Q_{F1} verovatnoće lažnog alarma pod hipotezom H_{00} i hipotezom H_{01} , respektivno, a $\lambda_{NB} = E_{NB}/N_0$ (E_{NB} - energija uskopojasnog signala u integracionom intervalu T). Za kanal koji ne sadrži uskopojasnu smetnju, već samo Gaussov šum, $E_{NB} = 0$. Pogodno je da verovatnoće lažnog alarma u detektorskoj ćeliji budu iste, bez obzira da li je ili nije prisutna uskopojasna smetnja, tj. $Q_{F0} = Q_{F1} = Q_F$. To se postiže adaptacijom praga detekcije V_T na osnovu procene srednje vrednosti energije signala u kanalu iterativnim postupkom [3].

Verovatnoća detekcije FH signala u TW ćeliji, tj. verovatnoća da će izlaz energetskog detektora V premašiti prag V_T kada je u detektorskoj “ćeliji” prisutan FH signal, može se posmatrati pod hipotezom H_{10} , da signal u kanalu $r(t)$ pored FH impulsa $s_H(t)$, sadrži samo AWGN, $n(t)$, ili pod hipotezom H_{11} da je u kanalu prisutna i uskopojasna smetnja $s_{NB}(t)$, tj.:

$$H_{1i}: r(t) = s_H(t) + n(t) + i \cdot s_{NB}(t), \quad i = 0,1; \quad 0 \leq t \leq T_H \quad (8)$$

Za pretpostavljenu Gaussovu aproksimaciju signala na izlazu energetskog detektora, *verovatnoća detekcije FH signala u TW ćeliji*, tj. verovatnoća da će izlaz energetskog detektora V premašiti prag $V_T^{(i)}$ kada je prisutan FH signal u detektorskoj “ćeliji”, može se predstaviti u obliku:

$$Q_{Di} = Pr\{V > V_T^{(i)} | FH\} = Q\left(\frac{V_T^{(i)} - 2 \cdot (\lambda_{FH} + i \cdot \lambda_{NB} + TW)}{2\sqrt{2 \cdot (\lambda_{FH} + i \cdot \lambda_{NB}) + TW}}\right), \quad i = 0,1 \quad (9)$$

gde su Q_{D0} i Q_{D1} verovatnoće detekcije FH signala pod hipotezom H_{10} i hipotezom H_{11} , respektivno, a $\lambda_{FH} = E_{FH}/N_0$ (E_{FH} - energija FH impulsa u detektorskoj ćeliji TW).

Iz izraza (7) dobija se vrednost praga $V_T^{(i)}$ za datu verovatnoću lažnog alarma:

$$V_T^{(i)} = 2 \cdot (i \cdot \lambda_{NB} + TW + \sqrt{2i \cdot \lambda_{NB} + TW} \cdot Q^{-1}(Q_{Fi})), \quad (10)$$

$$i = 0,1$$

gde je $Q^{-1}(x)$ inverzna funkcija od $Q(x)$. Zamenom ove vrednosti praga $V_T^{(i)}$ u (9) i uz pretpostavku da je $Q_{F0} = Q_{F1} = Q_F$, dobija se konačni izraz za *verovatnoću detekcije FH signala u TW ćeliji* pod hipotezom H_{1i} , $i=0,1$:

$$Q_{Di} = Q\left(\frac{Q^{-1}(Q_F) - \lambda_{FH} / \sqrt{2i \cdot \lambda_{NB} + TW}}{\sqrt{1 + 2\lambda_{FH} / (2i \cdot \lambda_{NB} + TW)}}\right), \quad (11)$$

$$i = 0,1$$

Združena verovatnoća presretanja i detekcije FH impulsa

Kada u procesu pretraživanja dođe do presretanja FH impulsa na nekom kanalu sa verovatnoćom P_P , njegovo prisustvo se detektuje energetskim detektorom ako energija signala u detektorskoj ćeliji TW premaši prag detekcije V_T (sl.2). Pri tome FH impuls može biti sam, ili zajedno sa uskopojasnom smetnjom. Pod usvojenom pretpostavkom normalne raspodele signala $V(t)$ u detektorskoj ćeliji TW , verovatnoća detekcije presretenog FH impulsa u kanalu u odsustvu uskopojasne smetnje, Q_{D0} , i u prisustvu uskopojasne smetnje, Q_{D1} , data je izrazom (11), pri čemu je pretpostavljeno da su verovatnoće lažnog alarma u oba slučaja jednake, tj. $Q_{F0}=Q_{F1}=Q_F$. Ako se pretpostavi da uskopojasne smetnje postoje u C od N kanala ($0 \leq C \leq N$) i da su uniformno raspodeljene, *združena verovatnoća presretanja i detekcije* FH impulsa u procesu pretraživanja RF spektra se može odrediti kao:

$$P_{PD} = P_P \cdot \left(\frac{N-C}{N} \cdot Q_{D0} + \frac{C}{N} \cdot Q_{D1} \right) \quad (12)$$

gde su Q_{D0} i Q_{D1} dati sa (11), a P_P sa (2).

Ako u L ciklusa pretraživanja ukupno vreme pretraživanja (opservacije) iznosi T_0 , pokušaji detekcije FH impulsa ponavljaju se na M frekvenzijskih skokova (FH impulsi), pri čemu se za M dobija:

$$M = T_0 \cdot R_H = \frac{N_P \cdot R_H \cdot L}{K \cdot R_P} \quad (13)$$

Očigledno je da se, kada se umesto jednokanalnog koristi K -kanalni prijemnik u pretraživanju, ukupno vreme pretraživanja T_0 skraćuje K puta za istu brzinu R_P , broj kanala N_P i broj ciklusa pretraživanja L ($T_0 = L \cdot N_P / (R_P \cdot K)$).

Praktično je najinteresantnija verovatnoća najmanje z presretanja i detekcije FH impulsa od mogućih M , $P_M(Z \geq z)$. Ako se pretpostavi da uskopojasne smetnje u svakom od C kanala ($0 \leq C \leq N$) imaju istu srednju snagu ($\lambda_{NB} = \text{const}$), $P_M(Z \geq z)$ se dobija na osnovu binomijalne raspodele:

$$P_M(Z \geq z) = 1 - \sum_{i=0}^{z-1} \binom{M}{i} \cdot P_{PD}^i \cdot (1 - P_{PD})^{M-i} \quad (14)$$

gde je M dato jednačinom (13), a P_{PD} jednačinom (12).

U slučaju kada je $M \cdot P_{PD} \approx 1$, binomijalna raspodela se može aproksimirati Poissonovom raspodelom:

$$P_M(Z \geq z) \approx 1 - e^{-M \cdot P_{PD}} \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \frac{(M \cdot P_{PD})^i}{i!} \quad (15)$$

a kada je $M \cdot P_{PD} \cdot (1 - P_{PD}) \gg 1$, aproksimacija se može izvršiti Gaussovom raspodelom sa srednjom vrednošću $m_Z = M \cdot P_{PD}$ i varijansom $\sigma_Z^2 = M \cdot P_{PD} \cdot (1 - P_{PD})$ i u tom slučaju je:

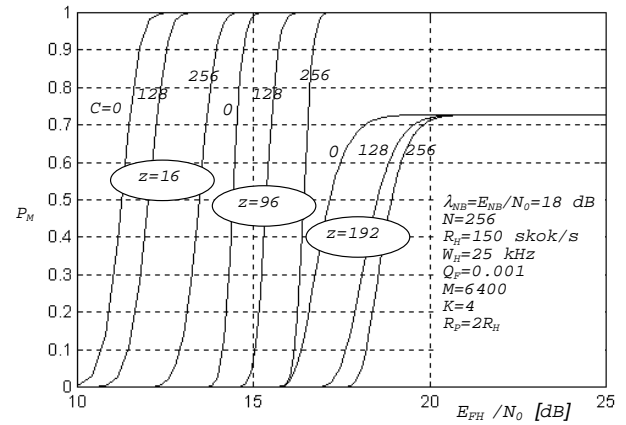
$$P_M(Z \geq z) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{z - M \cdot P_{PD}}{\sqrt{2M \cdot P_{PD} \cdot (1 - P_{PD})}} \right) \quad (16)$$

Analiza performansi združenog presretanja i detekcije

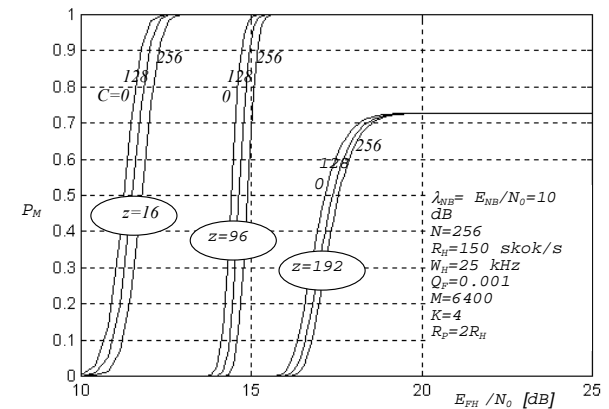
Pod pretpostavkom postojanja samo jednog FH signala u opsegu pretraživanja W_P u prisustvu uskopojasnih smetnji,

analizirane su performanse združenog presretanja i detekcije FH signala pri pretraživanju RF spektra. Svi numerički i grafički rezultati su dobijeni na bazi prethodne teorijske analize primenom programskog paketa MATLAB.

Parametri FH signala su: $N=256$, $W_H=25$ kHz, $R_H=150$ skok/s (FH uređaj *Jaguar V*). Pretpostavlja se da su periodi pretraživanja i skakanja sinhronizovani i da je $R_P = m \cdot R_H$, tj. uzima se da je $\bar{n} = n_{\max} = R_P / R_H = m$, pri čemu su širina kanala i opseg pretraživanja K -kanalnog prijemnika identični odgovarajućim parametrima FH signala ($W=W_H$; $W_P=W_{FH}$; $N_Z=N_P=N$). Za odabrano vreme pretraživanja T_0 , odnosno broj mogućih detektovanih FH impulsa M , specificiranu verovatnoću lažnog alarma $Q_F=10^{-3}$ u detektorskoj ćeliji TW , određeni odnos $\lambda_{NB}=E_{NB}/N_0$ za uskopojasnu smetnju i parametre C (broj uskopojasnih smetnji) i z (broj najmanje presretenih i detektovanih FH impulsa od M mogućih), određene su performanse združenog presretanja i detekcije FH signala, $P_M(Z \geq z)$, i prikazane na sl.3 ($\lambda_{NB}=18$ dB) i sl.4 ($\lambda_{NB}=10$ dB).



Slika 3. Združena verovatnoća najmanje z presretenih i detektovanih FH impulsa od M mogućih za $\lambda_{NB} = E_{NB}/N_0 = 18$ dB

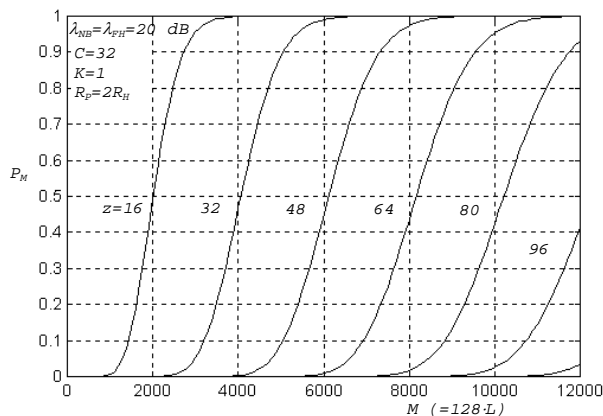


Slika 4. Združena verovatnoća najmanje z presretenih i detektovanih FH impulsa od M mogućih za $\lambda_{NB} = E_{NB}/N_0 = 10$ dB

Za date parametre pretraživanja i FH signala, na sl.3 i sl.4 se vidi da degradacija performansi detekcije, $P_M(Z \geq z)$, usled povećanja broja smetnji (C) nije velika za tipične vrednosti odnosa $\lambda_{NB}=E_{NB}/N_0$, smanjuje se smanjenjem SNR (λ_{NB}) za uskopojasne smetnje i praktično je zanemarljiva za $\lambda_{NB} \leq 10$ dB. Tako, na primer, povećanjem broja uskopojasnih smetnji od minimalne ($C=0$) do maksimalne vrednosti ($C=256$), za odnos $\lambda_{NB}=18$ dB, degradacija performansi združenog presretanja i detekcije

iznosi samo ≈ 2 dB (degradacija je manja za veće z), sl.3, a za $\lambda_{NB} = 10$ dB degradacija performansi $P_M(Z \geq z)$ sa porastom C manja je od 0.5 dB (sl.4). Isto tako, povećanje zahtevanog minimalnog broja presretanja sa detekcijom FH impulsa (z), za određenu verovatnoću P_M , ne uslovljava značajno povećanje odnosa $\lambda_{FH} = E_{FH}/N_0$. Na primer, za pretpostavljene parametre, udvostručenje z zahteva povećanje λ_{FH} za približno 2 dB. Međutim, za velike vrednosti z , maksimalna verovatnoća najmanje z presretnih i detektovanih FH impulsa od M mogućih, za nedovoljno veliko M , manja je od 1, tj. $P_M(Z \geq z) < 1$.

Iz prikazanih rezultata je očigledno da je za postizanje zadovoljavajuće verovatnoće presretanja i detekcije najmanje nekog broja FH impulsa (z) od M mogućih, potrebno da broj mogućih detektovanih FH impulsa M bude dovoljno velik. To se postiže povećanjem ukupnog vremena pretraživanja T_0 , odnosno broja ciklusa pretraživanja L (izraz (13)). Rezultati detaljnije analize zavisnosti $P_M(Z \geq z)$ od M prikazani su na sl.5. Pretpostavljeno je da se pretraživanje vrši sa jednokanalnim prijemnikom ($K=1$) brzinom $R_p = 2R_H$, pri čemu su parametri FH signala isti kao u prethodnom primeru. Broj uskopojsnih smetnji je $C=32$, a odnosi λ_{NB} za uskopojsne smetnje i FH impulse λ_{FH} su isti i iznose $\lambda_{NB} = \lambda_{FH} = 20$ dB.



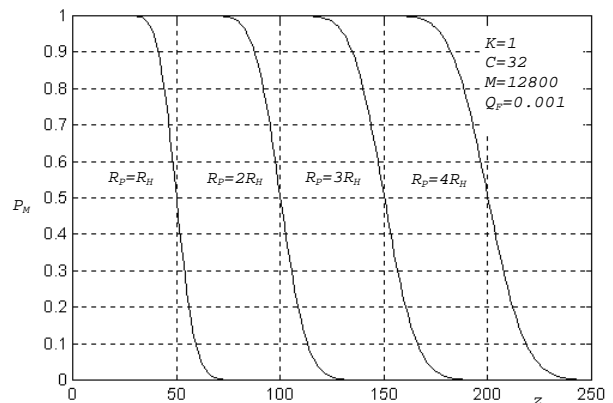
Slika 5. Zavisnost združene verovatnoće najmanje z presretanja i detekcije FH impulsa od M mogućih za $E_{FH}/N_0 = E_{NB}/N_0 = 20$ dB, $C=32$, $K=1$, $R_p=2R_H$

Iz prikazanih rezultata se vidi da ako se minimalni broj presretnih i detektovanih FH impulsa z želi povećati određen broj puta, onda broj mogućih detektovanih FH impulsa M treba povećati približno isti broj puta za istu verovatnoću $P_M(Z \geq z)$.

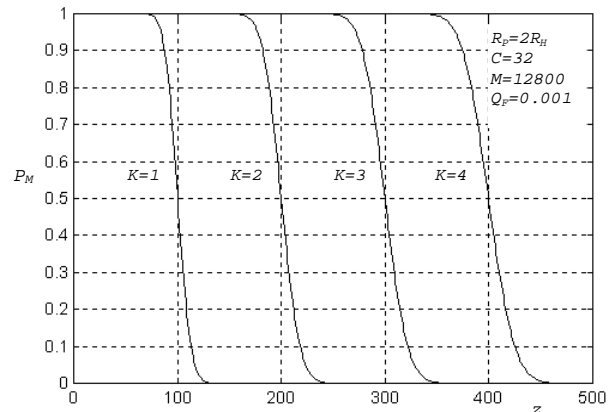
Za određeni broj kanala N_p i ciklusa pretraživanja L , ukupno vreme pretraživanja $T_0 = L \cdot N_p / (R_p \cdot K)$ se skraćuje sa povećanjem brzine pretraživanja R_p i brojem paralelnih kanala prijemnika K . Na osnovu (2) vidi se da je verovatnoća presretanja P_p proporcionalna proizvodu $R_p \cdot K$, tj. povećanje brzine pretraživanja R_p i broja paralelnih kanala prijemnika K poboljšava performanse presretanja, pa i detekcije FH signala. Uticaji R_p i K na performanse združenog presretanja i detekcije FH signala u prisustvu uskopojsnih smetnji ilustrovani su na slikama 6 i 7, respektivno.

Prema slikama 6 i 7 proizlazi logičan zaključak da za koliko puta se poveća brzina pretraživanja R_p ili broj paralelnih kanala prijemnika K , za isti broj puta se poveća

minimalni broj presretanja i detekcije FH impulsa z pri određenom vremenu pretraživanja T_0 . Ovaj način poboljšanja performansi detekcije ima određena ograničenja. Višekanalnost prijemnika i brzo pretraživanje zahtevaju složeniji sistem za detekciju. Isto tako, velika brzina pretraživanja, odnosno kratko vreme integracije (detekcije), T , zahteva fil-tre šireg propusnog opsega, što praktično ograničava verovatnoću presretanja i detekcije FH impulsa zbog smanjene selektivnosti sistema za detekciju u odnosu na uskopojsne smetnje susednih kanala i moguće širokopojsne smetnje.



Slika 6. Zavisnost združene verovatnoće najmanje z presretanja i detekcije FH impulsa od brzine pretraživanja R_p , pri pretraživanju jednokanalnim prijemnikom za $E_{FH}/N_0 = E_{NB}/N_0 = 20$ dB i $C=32$



Slika 7. Zavisnost združene verovatnoće najmanje z presretanja i detekcije FH impulsa od broja kanala prijemnika K za $R_p=2R_H$, $E_{FH}/N_0 = E_{NB}/N_0 = 20$ dB, $C=32$.

Zaključak

Analiza združene verovatnoće presretanja i detekcije FH signala pokazuje da je primenom klasičnih uskopojsnih pretraživačkih prijemnika sa energetskim detektorima moguće izvršiti uspešno presretanje i detekciju FH signala. Prisustvo uskopojsnih smetnji ne unosi značajnu degradaciju performansi detekcije, ali uslođnjava problem adaptacije praga detekcije. Povećanje brzine pretraživanja i broja kanala višekanalnog prijemnika, poboljšavaju performanse detekcije, pri čemu je povećanje brzine pretraživanja, odnosno skraćivanje vremena detekcije, ograničeno zbog smanjivanja selektivnosti sistema.

Literatura

- [1] HORING, H.C. Probability of intercept for frequency hop signals using search receivers (I). *News from Rohde & Schwarz*, 1998, no.160, p.26-29.

-
- [2] HORING,H.C. Probability of intercept for frequency hop signals using search receivers (II). *News from Rohde&Schwarz*, 1999, no.161, p. 29-31.
- [3] COOPER,G.R. Detection of Frequency-Hop signals. *Proc. MIL-COM '86*, Oct.1986, p. 10.2.1-10.2.5.
- [4] TORRIERI,D.J. *Principles of Secure Communication Systems*. Artech House, Inc., 1985.
- [5] COOPER,G.R., MCGILLEM,C.D. *Modern Communications and Spread Spectrum*. McGraw-Hill, New York, 1986.
- [6] DILLARD,R.A. Detectibility of Spread-Spectrum Signals. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, July 1979, vol.AES-15, no.4, p.526-537.

Rad primljen: 11.4.2000.god.