

VEROVATNOĆA OTKRIVANJA SIGNALA SA FREKVENCIJSKIM SKAKANJEM KORIŠĆENJEM SAVREMENIH IZVIĐAČKIH RADIO-PRIJEMNIKA

– nastavak iz broja 1/2001 –

UDC: 355.535.2:621.396.62

Verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika

Najpre će se razmatrati verovatnoća otkrivanja samo jednog skoka radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem. Razmatranje se, u stvari, odnosi na detekciju bilo kojeg skoka, tj. bilo kojeg radio-signalu trajanja T_h , koji se pojavljuje samo jednom u periodu posmatranja.

Verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika u jednom pokušaju

Kao što se može videti sa slike 7, radio-predajnik može koristiti bilo koji od ukupno M_{FH} kanala, a radio-prijemnik može biti na jednom od ukupno M_{SC} kanala tako da broj mogućih kombinacija iznosi $M_{FH} \cdot M_{SC}$. Predajnik radio-signalu sa frekvencijskim skakanjem i izviđački radio-prijemnik mogu se naći na jednom od M_g zajedničkih kanala.

Ako M_g , broj mogućih podudaranja između predajne i prijemne frekvencije, zavisi od broja mogućih kombinacija, tada je verovatnoća otkrivanja jednog skoka iz jednog pokušaja [9]:

$$P_1 = \frac{M_g}{M_{FH}M_{SC}} \quad (2)$$

U daljem tekstu razmotriće se primena ove formule kada se za otkrivanje jednog skoka radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem koristi višekanalni radio-prijemnik.

Ako je K broj paralelnih filtera sa pridruženim detektorima koji se primenjuju u višekanalnom radio-prijemniku, koji sa svoje strane definišu broj kanala za svaku postavljenu frekvenciju, onda se verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika u jednom od K kanala radio-prijemnika povećava sa faktorom K (slika 8), to jest:

$$P_1 = \frac{M_g K}{M_{FH}M_{SC}} \quad (3)$$

Ova formula važi kada je broj navedenih paralelnih kanala prijemnika K manji od broja podudarnih kanala predajnika i radio-prijemnika M_g , to jest, kada je $K < M_g$.

U slučaju kada je $K \geq M_g$, onda se u formuli (3) K može zameniti sa M_g . Nadalje, u članku će biti analizirana primena opšte formule (3) za višekanalne radio-prijemnike, za neke specijalne slučajeve, pri čemu se za jednokanalni radio-prijemnik uzima da je $K = 1$.

U tom smislu dva su specijalna slučaja:

– kada je frekvencijski opseg radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem veći od frekvencijskog opsega izviđačkog radio-prijemnika i u potpunosti ga prekriva, to jest $M_{FH} > M_{SC}$ (slika 7b). Uzimajući u obzir da je tada $M_g = M_{SC}$, primenom formule (3) dobija se:

$$P_1 = \frac{K}{M_{FH}} \quad (4)$$

Pri tome za jednokanalni izviđački radio-prijemnik važi da je:

$$P_1 = \frac{1}{M_{FH}} \quad (5)$$

Može se zaključiti da u slučaju kada je odnos frekvencijskog opsega radio-predajnika i frekvencijskog opsega radio-prijemnika kao na slici 7b, verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika jednim pokušajem ne zavisi od ukupnog broja kanala izviđačkog radio-prijemnika M_{SC} .

– kada je frekvencijski opseg izviđačkog radio-prijemnika veći od frekvencijskog opsega radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem i u potpunosti ga prekriva, to jest $M_{SC} > M_{FH}$ (slika 7c). Uzimajući u obzir da je tada $M_g = M_{FH}$, primenom formule (3) dobija se:

$$P_1 = \frac{K}{M_{SC}} \quad (6)$$

Može se zaključiti da u ovakvom slučaju nepotrebno pretraživanje van frekvencijskog opsega radio-predajnika utiče na smanjenje verovatnoće otkrivanja jednog skoka radio-predajnika jednim pokušajem, u odnosu na verovatnoću datu u formuli (4). Pri tome se podrazu-

meva da je vrednost M_{FH} konstantna (jednaka u oba slučaja).

Verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika u nekoliko pokušaja

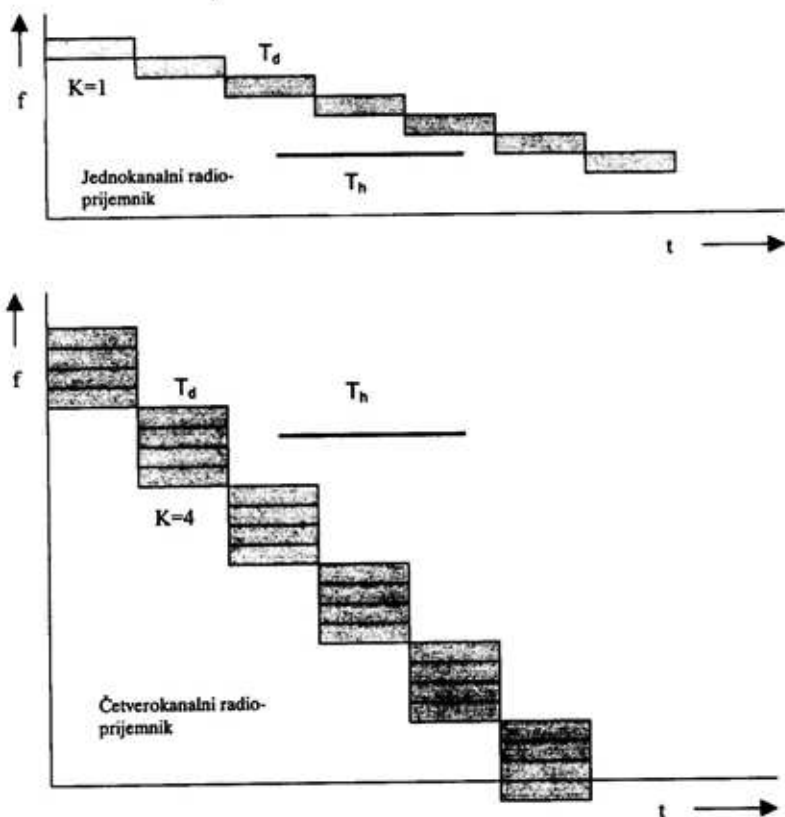
Nekoliko pokušaja na otkrivanju frekvencije radio-predajnika, za vreme trajanja jednog skoka, može se vršiti izviđačkim radio-prijemnikom sa pretraživanjem, onda kada je vreme zadržavanja prijemnika na specificiranoj frekvenciji dovoljno malo u poređenju sa vremenom trajanja skoka radio-predajnika (slika 8) odnosno kada je $T_d < T_h$. U okviru perioda T_h , izvrši se nekoliko ispravnih pokušaja otkrivanja n , koji traju nekoliko uzastopnih vremenskih intervala zadržavanja T_d . Pokušaj otkrivanja smatra se ispravnim kada je vreme integracije T_i potpuno prekriveno skokom, tj. ako nije bilo promene frekvencije i prekida skoka radio-predajnika za vreme trajanja integracije detektora T_i .

Broj pokušaja otkrivanja n zavisi od vremena trajanja skoka T_h i od vremena zadržavanja prijemnika na određenoj frekvenciji T_d .

Srednja vrednost broja ispravnih pokušaja otkrivanja \bar{n} , za vreme trajanja skoka T_h , data je sledećom formulom [6]:

$$\bar{n} = \frac{T_h - T_i}{T_d} = \frac{T_h - T_i}{T_{syn} + T_i} \quad (7)$$

Za vreme pretraživanja izviđačkim radio-prijemnikom svaki pokušaj otkrivanja vrši se na različitoj frekvenciji, tako da verovatnoća otkrivanja skoka, za vreme njegovog trajanja, raste sa brojem pokušaja odnosno iznad $n = 1$. Verovatnoća otkrivanja skoka sa \bar{n} ispravnih



Sl. 8 – Prikaz sekvenci pretraživanja jednokanalnog i četverokanalnog radio-prijemnika sa definisanim vremenom trajanja skoka T_h radio-predajnika signala sa frekvencijskim skakanjem

pokušaja otkrivanja u okviru vremena T_h definisana je kao:

$$P_{1h} = P_1 \cdot \bar{n} = \frac{M_g}{M_{FH}M_{SC}} K \cdot \bar{n} = \frac{M_g K}{M_{FH}M_{SC}} \left(\frac{T_h - T_i}{T_d} \right) \quad (8)$$

Primena formule (8) ima sledeća ograničenja:

- mora biti ispunjen osnovni preduslov da je $\frac{T_h}{T_i} > 1$, odnosno skok radio-

-predajnika može biti detektovan samo ako je vreme njegovog trajanja veće od vremena detekcije prijemnika;

- teoretski, verovatnoća definisana formulom (8) može imati vrednost veću od 1 ($P_{1h} > 1$) ako se obezbedi uslov da odnos $\frac{T_h - T_i}{T_d}$ bude dovoljno veliki, od-

nosno T_h bude dovoljno veliko.

Međutim, ako je vreme trajanja skoka T_h veliko, najveća verovatnoća otkrivanja $P_{1hmax} \leq 1$ postiže se kada je izviđački radio-prijemnik sposoban da

pretraži sve M_{SC} kanale za vreme trajanja jednog skoka, to jest kada je vreme trajanja skoka veće od ukupnog vremena pretraživanja $T_h > T_{SC}$ (slika 9). Daljim povećanjem T_h verovatnoća otkrivanja jednog skoka neće rasti preko P_{1hmax} .

Ako je $T_h > T_{SC}$, onda je $\bar{n} = M_{SC}/K$, pa se dobija jedinstveni izraz za uslove koji definišu ograničenja za primenu formule (8):

$$T_i < T_h \leq \left(\frac{M_{SC}}{K} T_d + T_i \right) \quad (9)$$

Maksimalna verovatnoća otkrivanja, koja se može dobiti u slučaju „dugih skokova“, zavisi od stepena preklapanja između opsega frekventijskog skakanja radio-predajnika i opsega pretraživanja izviđačkog radio-prijemnika.

Moguće je razmatranje raznih slučajeva preklapanja:

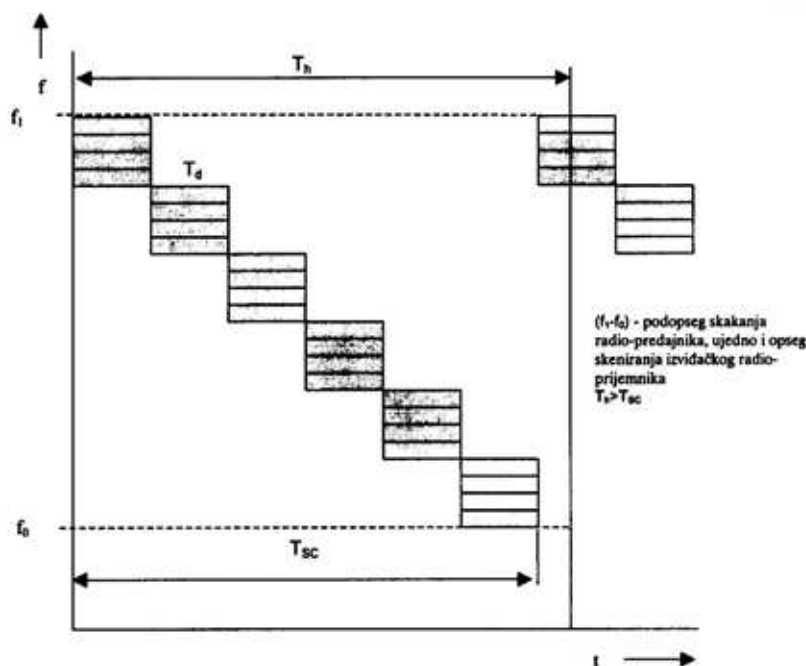
– u opštem slučaju kada je $M_g < M_{SC}$ i $M_g < M_{FH}$ (slika 7a), maksimalna verovatnoća je, po formuli (8):

$$P_{1hmax} = \frac{M_g}{M_{FH}} \quad (10)$$

– u slučaju kada je opseg frekventijskog skakanja potpuno prekriven opsegom pretraživanja $M_{SC} \geq M_{FH}$ (slika 7c i 7d) maksimalna verovatnoća je:

$$P_{1hmax} = 1 \quad (11)$$

– u slučaju kada je opseg pretraživanja potpuno prekriven opsegom frekventijskog skakanja $M_{FH} > M_{SC}$ (slike 7b i



Sl. 9 – Prikaz dugog trajanja skoka za koje vreme izviđački radio-prijemnik pretraži sve kanale iz podopsega skakanja $f_1 - f_0$

7d), za maksimalnu verovatnoću, po formuli (8), dobija se:

$$P_{ihmax} = \frac{M_{SC}}{M_{FH}} \quad (12)$$

Upoređenjem formula (8) i (3) dolazi se do zaključka da se veća verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika može postići samo sa dovoljno velikim brzinama pretraživanja, to jest:

$$\bar{n} \geq 1 \text{ za } (T_d + T_i) \leq T_h \quad (13)$$

Ako je ispunjen samo osnovni uslov za primenu formule (8), to jest da je $T_i < T_h$, a nije ispunjen i uslov (13), moguće je da se za vreme trajanja skoka prosečno ne napravi nijedan ispravan pokušaj. U tom slučaju verovatnoća otkrivanja jednog skoka smanjuje se prema formuli (8), na vrednost koja je data formulom (3).

Prijemnik u režimu čekanja

Ako se pretpostavi da je frekvencijski opseg radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem poznat izviđačkom radio-prijemniku, tada radio-prijemnik može biti fiksno podešen na jedan od kanala radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem, odnosno da se nalazi u režimu čekanja. U tom slučaju radio-predajnik sa frekvencijskim skakanjem detektovan je onda kada se njegova trenutna noseća frekvencija poklopi sa podešenom frekvencijom izviđačkog radio-prijemnika.

Da bi jedan skok signala detektovao izviđački radio-prijemnik, njegovo trajanje T_h mora biti veće od T_i ($T_h > T_i$). U režimu čekanja („zamka za skakača“) vreme potrebno za podešavanje sintetizatora u radio-prijemniku i obradu signala

ne utiče na verovatnoću otkrivanja, tako da u ovom slučaju važi da je $T_d = T_i$. To znači da se pri obezbeđenju već opisanih uslova $T_i < T_h$ dešava tačno jedna detekcija emitovanog FH signala kada se poklope frekvencija skakanja radio-predajnika i frekvencija izviđačkog radio-prijemnika. Sa dolaskom signala skoka nivo praga se prekoračuje čim se podese filter za detekciju, a na kraju skoka, posle odgovarajućeg kašnjenja, nivo ponovo opada ispod praga, dozvoljavajući tako procenu trajanja skoka.

U režimu čekanja verovatnoća otkrivanja ne zavisi od trajanja skoka T_h i vremena dolaska signala skoka do prijemne antene, kao što je to slučaj sa izviđačkim radio-prijemnikom u režimu pretraživanja, tako da važi da je $\bar{n} = 1$. Slika 7b, gde je $M_g = M_{SC} = 1$, i jednačine (5) i (4) važe za verovatnoću otkrivanja, bilo da se radi o primeni kod jednokanalnog ili višekanalnog izviđačkog radio-prijemnika.

Ako je kod dovoljno brzog izviđačkog radio-prijemnika, srednja vrednost broja ispravnih pokušaja detekcije po skoku veća od 1 ($\bar{n} > 1$), tada je verovatnoća otkrivanja veća nego u režimu čekanja (jednačina 8). Međutim, verovatnoća otkrivanja u režimu pretraživanja može, takođe, biti manja nego u režimu čekanja, i to:

– kada je pretraživanje radio-prijemnika isuviše sporo u poređenju sa trajanjem skoka ($T_i < T_h < (T_d + T_i)$), onda je broj ispravnih pokušaja $\bar{n} = (T_h - T_i) / T_d$ u jednačini (8) manji od 1;

– ako izviđački radio-prijemnik unapred ne poseduje informaciju o opsegu frekvencijskog skakanja, što je bila pretpostavka u režimu čekanja, može se desiti da izviđački radio-prijemnik vrši pretraživanje i u frekvencijskom opsegu koji

radio-predajnik ne koristi (slike 7a i c). U tom slučaju je odnos M_g/M_{SC} u jednačini (8) manji od 1, dok je u režimu čekanja $M_g = M_{SC} = 1$.

Izviđanje radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem ponavljanjem pokušaja

Do sada je razmatrana verovatnoća otkrivanja jednog skoka. Ako se signal radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem može posmatrati u nekom intervalu skakanja T_t (vreme predaje radio-predajnika ili ukupno vreme rada radio-prijemnika), pokušaj otkrivanja može biti ponovljen u N skokova radio-predajnika, gde je:

$$N = T_t \cdot f_H \quad (14)$$

Pri tome f_H^* predstavlja brzinu skakanja predajnika, izraženu brojem frekvencijskih skokova u jedinici vremena.

Pri svakom od N pokušaja verovatnoća otkrivanja skoka je P , odnosno $P = P_1$, kako je to dato u jednačinama (3) do (6), ili P_{1h} , kako je dato u jednačini (8).

Verovatnoća P_N da se u ukupno N pokušaja desi $Z = k$ otkrivanja, izračunava se prema formuli za binomnu raspodelu verovatnoća [12]:

$$P_N(Z = k) = \binom{N}{k} P^k (1 - P)^{N-k} \quad (15)$$

gde je

$$\binom{N}{k} = \frac{N!}{k! (N - k)!},$$

* f_H nije jednako $1/T_t$, jer se mora uzeti u obzir vreme potrebno za podešavanje sintetizatora radio-predajnika.

dok je srednja vrednost broja otkrivanja

$$\bar{k} = N \cdot P \quad (16)$$

Od posebnog interesa su verovatnoće, dobijene iz jednačine (15), da se broj otkrivanja Z nalazi baš unutar definisanog intervala. Razmotriće se tri moguća slučaja:

- verovatnoća najmanje jednog otkrivanja u N pokušaja je:

$$P_N(Z \geq 1) = 1 - (1 - P)^N \quad (17)$$

- verovatnoća od k_1 do k_2 otkrivanja u N pokušaja je:

$$P_N(k_1 \leq Z \leq k_2) = \sum_{l=k_1}^{k_2} \binom{N}{l} P^l (1 - P)^{N-l} \quad (18)$$

- verovatnoća najmanje k otkrivanja u N pokušaja je:

$$P_N(Z \geq k) = \sum_{l=k}^N \binom{N}{l} P^l (1 - P)^{N-l} = 1 - \sum_{l=0}^{k-1} \binom{N}{l} P^l (1 - P)^{N-l} \quad (19)$$

Sa povećanjem broja kanala skakanja M_{FH} verovatnoća otkrivanja jednog skoka P često je veoma mala, tako da i sa velikim brojem pokušaja N srednja vrednost broja otkrivanja, to jest proizvod $N \cdot P$, nije mnogo velika (reda jedinice).

U tom slučaju binomna raspodela data jednačinom (15), za k koje je reda veličine $N \cdot P$, može biti aproksimirana pomoću Poasonove formule za raspodelu verovatnoća [12]:

$$P_N(Z = k) \approx \frac{e^{-NP} (NP)^k}{k!} \quad (20)$$

U tom smislu, za primenu ove formule vredi spomenuti specijalni slučaj: neka je dat veliki broj kanala skakanja M_{FH} , opseg pretraživanja jednodokanalnog radio-prijemnika koji se poklapa sa opsegom skakanja radio-predajnika ($M_{SC} = M_{FH}$, slika 5 d) i neka izviđački radio-prijemnik izvršava L kompletnih pretraživanja [10]. Radio-prijemnik je sposoban da izvrši, u proseku, samo jedan ispravan pokušaj detekcije po frekvencijskom skoku radio-predajnika ($\bar{n} = 1$).

Prema jednačini (5) verovatnoća detekcije jednog skoka je $P = P_1 = 1/M_{FH}$, a ukupan broj pokušaja je $N = L \cdot M_{FH}$. Uzimajući u obzir da je $N \cdot P = L \cdot M_{FH} \cdot (1/M_{FH}) = L$ i koristeći jednačine (19) i (20), dobija se da je raspodela verovatnoća najmanje k otkrivanja data formulom:

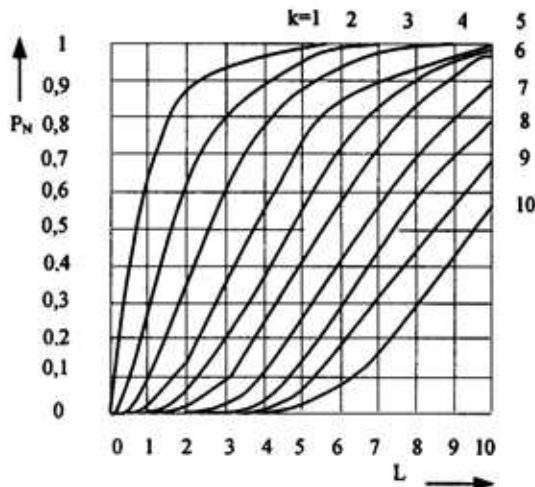
$$P_N(Z \geq k) = 1 - \sum_{I=0}^{k-1} P_N(Z = I) \approx 1 - e^{-L} \sum_{I=0}^{k-1} \frac{L^I}{I!} \quad (21)$$

Na slici 10 dat je grafički prikaz raspodele verovatnoća najmanje k tačnih otkrivanja za L izvršenih pretraživanja izviđačkog radio-prijemnika. Znači, prema formuli (21), najmanje jedno otkrivanje skoka radio-predajnika (kriva $k = 1$ na slici 10) desiće se sa verovatnoćom:

$$P_N(Z \geq 1) = 1 - e^{-L} \quad (22)$$

Ako je broj pokušaja N dovoljno veliki da se dobije

$$N \cdot P \cdot (1 - P) \gg 1 \quad (23)$$



Sl. 10 – Verovatnoća P_N najmanje k otkrivanja za vreme L pretraživanja

binomna raspodela, data jednačinom (15), može se aproksimirati pomoću Gausove raspodele verovatnoća po De Moor-Laplasovoj teoremi [12]:

$$P_N(Z = k) \approx \frac{e^{-(k - NP)^2/2NP(1-P)}}{\sqrt{2\pi NP(1-P)}} \quad (24)$$

Tada se za ukupnu verovatnoću broja uspešnih otkrivanja u intervalu između k_1 i k_2 , prema jednačini (18), dobija sledeća raspodela verovatnoća:

$$P_N(k_1 \leq Z/k_2) \approx \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{k_2 - NP}{\sqrt{2NP(1-P)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{k_1 - NP}{\sqrt{2NP(1-P)}} \right) \right] \quad (25)$$

gde je

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy \quad (26)$$

Na osnovu jednačine (25), i uzimajući u obzir jednačinu (19), verovatnoća najmanje k otkrivanja za N pokušaja je:

$$P_N(Z \geq k) \approx \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{N - NP}{\sqrt{2NP(1-P)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{k - NP}{\sqrt{2NP(1-P)}} \right) \right] \approx \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{k - NP}{\sqrt{2NP(1-P)}} \right) \right] \quad (27)$$

Na osnovu iznetog jasno je pokazano da je broj ponovljenih pokušaja N za detekciju radio-predajnika sa slučajnom raspodelom frekvencijskih skokova presudan parametar za određivanje verovatnoće otkrivanja (jednačine 15 do 27).

Odnos između ukupnog broja pokušaja N i broja pretraživanja radio-prijemnika L dobija se na osnovu pretpostavke da vreme zadržavanja radio-prijemnika na frekvenciji iznosi T_d . Za sistematično pretraživanje svih frekvencijskih pozicija M_{SC} jednokanalnog radio-prijemnika, za jedno pretraživanje potrebno je vreme

$$T_{SC,1} = M_{SC} \cdot T_d$$

Prema jednačini (14) broj pokušaja N za vreme L pretraživanja definiše se kao:

$$N_{L,1} = M_{SC} \cdot T_d \cdot f_H \cdot L$$

U slučaju višekanalnog radio-prijemnika sa K paralelnih kanala vreme pretraživanja se redukuje i iznosi $T_{SC,K} = M_{SC} \cdot T_d / K$, pa se za vreme L pretraživanja može izvršiti samo $N_{L,K} = (M_{SC} \cdot T_d \cdot f_H \cdot L) / K$ pokušaja. Zbog toga će i verovatnoća otkrivanja jednog skoka sa višekanalnim radio-prijemnikom biti veća za faktor K od verovatnoće otkrivanja sa jednokanalnim radio-prijemnikom (jednačine 3 i 8). Pri tome je srednji broj otkrivanja \bar{k} isti za

jednokanalni i višekanalni radio-prijemnik, za isti broj pretraživanja L . Takođe, vreme opservacije koje zahteva višekanalni radio-prijemnik kraće je od vremena koje je potrebno jednokanalnom radio-prijemniku za faktor $1/K$.

Praktičan primer primene dobijenih verovatnoća

Pretpostaviće se da se opseg otkrivanja izviđačkog radio-prijemnika i frekvencijski opseg radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem poklapaju (slika 5d), i da radio-predajnik i radio-prijemnik imaju svaki po 2000 skokova ($M_{FH} = M_{SC} = 2000$).

U tom slučaju, verovatnoća otkrivanja jednog skoka jednim pokušajem sa jednokanalnim radio-prijemnikom, u skladu sa jednačinom (5), iznosi:

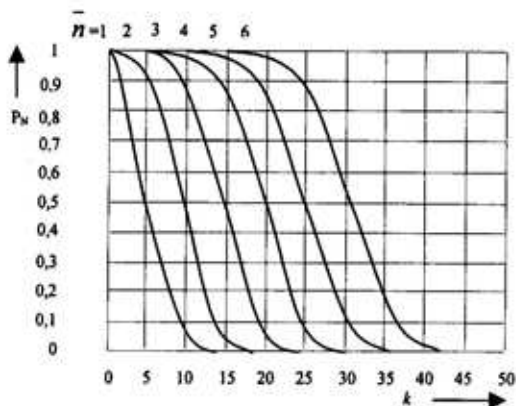
$$P_1 = 1/M_{FH} = 1/2000.$$

Primena Poasonove teoreme

Ako je broj kompletnih pretraživanja radio-prijemnika $L = 3$, i ako se pretpostavi da radio-prijemnik izvršava u proseku jedan ispravan pokušaj otkrivanja za vreme jednog skoka predajnika, verovatnoća da će radio-predajnik biti otkriven najmanje jednom u toku tri pretraživanja iznosi 95%, prema jednačini (22) i prema krivoj za $k = 1$ na slici 11.

Primena De Moor-Laplasove teoreme

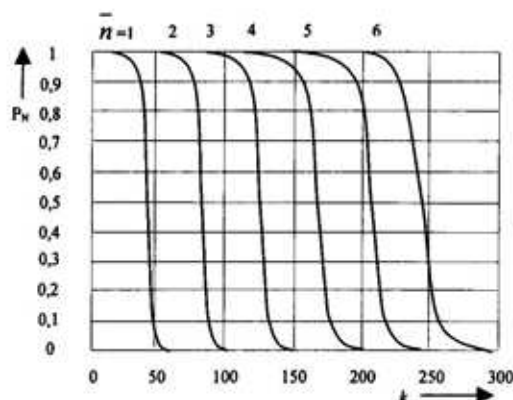
Neka je vreme rada T_r dovoljno dugo da se, prema jednačini (14), dobije $N = 10^4$ ponovljenih pokušaja. Iz jednačina (16, 8 i 7) srednji broj otkrivanja iznosi:



Sl. 11 – Jednokanalni radio-prijemnik: verovatnoća P_N najmanje k otkrivanja u $N = 10^4$ ponovljenih pokušaja sa srednjim brojem \bar{n} ispravnih pokušaja otkrivanja za vreme jednog intervala skakanja

$\bar{k} = N \cdot P_{1h} = 10\,000 \cdot \bar{n}/2000 = 5 \cdot \bar{n}$,
gde je $\bar{n} = (T_h - T_i)/T_d$.

Verovatnoća najmanje k otkrivanja može se aproksimirati korišćenjem izraza (27). To je prikazano na slici 12 za jednokanalni radio-prijemnik i promenljiv srednji broj \bar{n} ispravnih pokušaja otkrivanja radio-prijemnika za vreme intervala jednog skoka T_h (odnosno sa



Sl. 12 – Devetokanalni radio-prijemnik: verovatnoća P_N najmanje k otkrivanja za $N = 10^4$ ponovljenih pokušaja sa srednjim brojem \bar{n} ispravnih pokušaja otkrivanja za vreme jednog intervala skakanja

različitom brzinom pretraživanja). Kriva $\bar{n} = 1$, takođe, važi i za jednokanalni radio-prijemnik u režimu čekanja. Ista relacija za devetokanalni radio-prijemnik prikazana je na slici 12.

Ovde je srednji broj otkrivanja, u skladu sa jednačinom (16) i uzimajući u obzir da je $P = P_{1h}$ iz jednačine (8), veći za faktor 9 u poređenju sa jednokanalnim radio-prijemnikom.

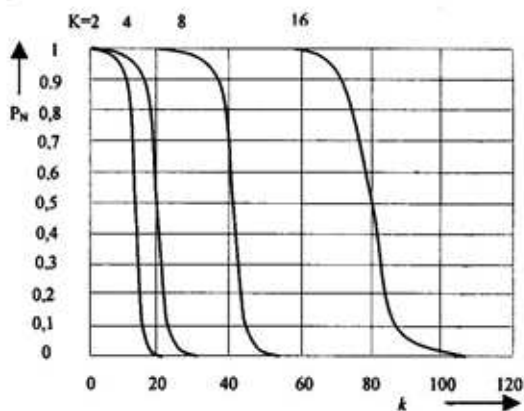
Kriva za faktor $\bar{n} = 1$ takođe važi i za devetokanalni radio-prijemnik u režimu čekanja.

Na slici 13 prikazan je efekat koji se dobija za srednji broj otkrivanja kada se poveća broj paralelnih kanala izviđačkog radio-prijemnika, ako se pretpostavi da je izvršen samo jedan ispravan pokušaj detekcije po intervalu skakanja ($\bar{n} = 1$, $(T_h - T_i)/T_d = 1$ ili režim čekanja).

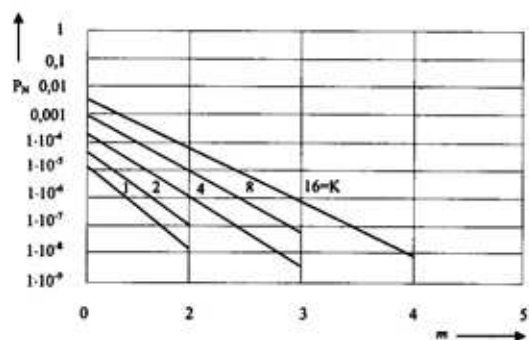
Za verovatnoće otkrivanja izračunate na osnovu izraza (27) i koje su prikazane na slikama 11–13, efekti koji se postižu primenom specifičnih mera (paralelni kanali, brže pretraživanje) mogu biti lako procenjeni pomoću srednjeg broja otkrivanja prema jednačini (16). Proračunata verovatnoća $P_N(k)$ dobija vrednost 0,5 kada je minimalni postignuti broj otkrivanja jednak srednjem broju otkrivanja ($k = \bar{k}$). Porastom vrednosti \bar{k} kriva se konsekvntno pomera proporcionalno većem minimumu broja otkrivanja.

Uzimajući K -kanalni prijemnik i zamenu izraza za verovatnoću (8) u (16), dobija se srednji broj otkrivanja, za slučaj kada se poklapaju frekvencijski opsezi skakanja i otkrivanja (prikazan na slici 7d), koji je dat sledećim izrazom:

$$\bar{k} = N \cdot P_{1h} = N \frac{K_n}{2M_{FH}} = N \frac{K}{M_{FH}} \left(\frac{T_h - T_i}{T_d} \right) \quad (28)$$



Sl. 13 – Radio-prijemnik sa K paralelnih kanala, $\bar{n} = 1$:
verovatnoća P_N najmanje k otkrivanja za $N = 10^4$
ponovljenih pokušaja



Sl. 14 – Radio-prijemnik sa K paralelnih kanala, $\bar{n} = 1$:
verovatnoća P_N najmanje m otkrivanja za $N = 10^4$
ponovljenih pokušaja

Primena binomne raspodele verovatnoća

Ako su odnosi između broja pokušaja otkrivanja, broja uspešnih otkrivanja i broja kanala izviđačkog radio-prijemnika kao na slici 13, i ako se pri tome radi o malom broju pokušaja, binomna raspodela mora se koristiti bez aproksimacije.

Dijagram na slici 14 dobijen je iz jednačine (19) za samo 10 ponovljenih

pokušaja. U vezi s tim, verovatnoća otkrivanja je korespondentno mala.

Zaključak

Prema izvedenim i opisanim uslovima može se zaključiti da je verovatnoća otkrivanja jednog skoka radio-predajnika u režimu sa FH proporcionalna sa proizvodom broja kanala K i srednje vrednosti broja ispravnih pokušaja \bar{n} izviđačkog prijemnika u intervalu trajanja jednog skoka T_h (8, 28).

Što se tiče primene mera tipa „više-kanalni prijemnik“ i „brzo pretraživanje“, može se zaključiti da one imaju isti efekat na verovatnoću otkrivanja, pa su, prema tome, međusobno zamenjive. Obe mere za povećanje verovatnoće otkrivanja su takve da zahtevaju savremene i kvalitetne performanse izviđačkih radio-prijemnika. To znači da izviđački radio-prijemnik, optimiziran za otkrivanje dovoljno jakih signala, treba da radi sa maksimalnim mogućim brojem paralelnih kanala K , i minimalnim vremenom zadržavanja, to jest sa najkraćim mogućim vremenom za detekciju T_i , vremenom za podešavanje sintetizatora i obradu signala.

Međutim, kratka vremena otkrivanja traže primenu širokopojasnih filtera u izviđačkim radio-prijemnicima.

S druge strane, kada je vreme detekcije T_i kratko, verovatnoća otkrivanja je ograničena redukovanom selektivnošću za uskopojasne signale susednih kanala i širokopojasnim signalima interferencije. Zbog toga, ako je signal interferencije širokopojasni šum, zahtevano polje direktno raste proporcionalno sa $\sqrt{1/T_i}$ za kraće vreme detekcije T_i .

Ako se signal radio-predajnika sa frekvencijskim skakanjem može posma-

trati u nekom specifičnom intervalu vremena T_1 , pokušaji detekcije se mogu ponavljati i tada po opisanim raspodelama verovatnoća broj uspešnih otkrivanja raste.

Sprovedena teoretska analiza, prikazane krive za konkretnu primenu i izvedeni zaključci mogu da posluže svima koji se u praksi bave radio-izviđanjem, na više načina:

– da na pravi način odaberu najpogodniju vrstu digitalnog izviđačkog radio-prijemnika pri nabavci nove opreme, uvažavajući sve izložene relevantne performanse (broj kanala, brzinu pretraživanja, mogućnost promene opsega i brzine skakanja i drugo);

– da u skladu sa širim mogućnostima izviđačkih radio-prijemnika i njihovom prilagodljivošću odaberu najpogodniji način za primenu postupka radio-izviđanja signala sa FH;

– da u skladu sa objektivnom situacijom, na realan način mogu da procene

sa kojom verovatnoćom će moći da se izvrši uspešno otkrivanje konkretnog radio-predajnika koji vrši radio-emisiju signala sa ekspanovanim spektrom primenom metode FH.

Literatura:

- [1] Glišić, S.: Prenos signala sa ekspanovanim spektrom, SSNO-UV 1981.
- [2] Dukić, M.: Predavanja na PDS ETF Beograd 1989/90.
- [3] Jovanović, V.: Frekvencijsko skakanje, VTG 5 i 6/86.
- [4] Todorović, B.; Šunjevarić, M.: Novi metod protivelektronske zaštite radio-veza u kanalima sa fedingom, VTG 6/96.
- [5] Hans-Cristoph Höring: Probability of intercept for frequency hop signals using search receivers, News from Rohde & Schwarz, № 160 (1998/TV).
- [6] Oberbuchner, E.: Search Receiver ESMA – The ideal frontend for VHF-UHF monitoring systems News from Rohde & Schwarz, № 149 (1995).
- [7] Demmel, F.; Genal, W.; Unselt, U.: Digital Skanning Direction Finders DDFOxS – Fast direction finding of broadband and shortterm signals, News from Rohde & Schwarz, № 158 (1998).
- [8] Hömmerle, R.: Peilung von Frequenzsprung-signalen, In Grabau, R.: Pfaff K.: Funkpeiltechnik. Franckh'sche Verlagshandlung (1989).
- [9] Jandral, F.: Erfassung von Frequenzsprung-sendern, In Jandral, F.: Funksignalanalyse. Teubner (1991).
- [10] ISKRA-SPARK Radio-uređaj sa frekvencijskim skakanjem, ISKRA Elektrozveze, Ljubljana 1988.
- [11] Papoulis, A.: Probability, Random Variables and Stehastic Processes, McGraw-Hill (1965).