

ANALIZA KORELACIONIH OSOBINA PSEUDOSLUČAJNIH SEKVENCI DUŽINE 255 ZA ZAŠTITU UPRAVLJAČKOG SIGNALA BESPILOTNE LETELICE*

Orlić D. *Vladimir*, Todorović M. *Branislav*, Institut za mikrotalasnu tehniku i elektroniku „IMTEL Komunikacije a.d.“, Beograd,
Dukić L. *Miroslav*, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

UDC: 623.746-519

Sažetak:

Tehnike prenosa signala u proširenom spektru sa direktnom sekvencom predstavlja efikasan metod zaštite upravljačkog signala bespilotne letelice (BL). Zaštita signala se ostvaruje primenom pseudoslučajnih (PS) sekvenci u predajniku, koje su poznate prijemniku, ali ne i neovlašćenom korisniku. Da bi se ostvario pouzdan prenos signala, PS sekvence treba da imaju dobre autokorelacione osobine. Ukoliko je prenos signala realizovan primenom nekoliko PS sekvenci, tada su od velike važnosti i njihove međukorelacione karakteristike. U radu su analizirane autokorelacione i međukorelacione osobine PS sekvenci dužine 255. Razmatrane su tri najčešće korišćene klase PS sekvenci: linearne sekvence maksimalne dužine, Goldove sekvence i Kasamijeve sekvence. Predložen je optimalan skup PS sekvenci za zaštitu upravljačkog signala BL.

Ključne reči: radio-komunikacije, prenos u proširenom spektru, direktna sekvenca, bespilotna letelica, pseudoslučajne sekvence, korelacija.

Uvod

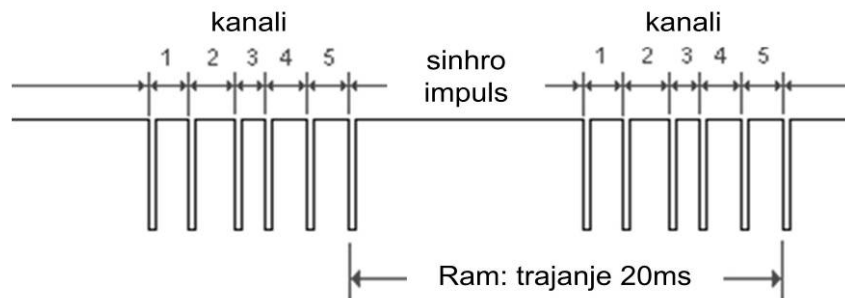
Bespilotne letelice se poslednjih godina ubrzano razvijaju za različite vojne i civilne primene. U zavisnosti od načina upravljanja, one mogu biti: (1) daljinski upravljane i (2) autonomno vođene na osnovu prethodno pro-

* NAPOMENA: Članak je nastao u okviru rada na projektu ET-11037: „Primena tehnike proširenog spektra za zaštitu signala koji prenose podatke i upravljačke komande“, finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Delovi ovog članka su bili izloženi u vidu usmenog saopštenja na sledećim skupovima:

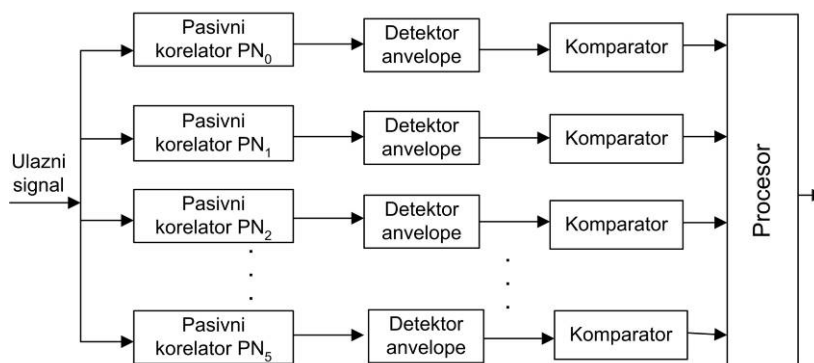
Orlić, V. D., Dukić, M. L. i Todorović, B. M.: „Izbor pseudoslučajnih sekvenci za zaštitu upravljačkog signala bespilotne letelice“, *Zbornik radova XVII telekomunikacionog foruma (TELFOR 2009)*, ISSN 978-86-7466-375-2, Beograd, 2009, str. 350–353; Orlić, V. i Todorović, B.: „Algoritam za automatsku selekciju PS sekvenci za zaštitu upravljačkog signala bespilotne letelice“, *Zbornik radova 3. Naučno-stručnog skupa odbrambene tehnologije (OTEH 2009)*, ISSN 978-86-81123-40-9, Beograd, 2009, str. 83–86.

gramiranog plana leta [1]. Jedan od najčešće korišćenih sistema za daljinsko upravljanje bespilotnim letelicama jeste onaj koji se zasniva na primeni impulsne položajne modulacije (IPM) [2]. Ovako modulisan signal može da se zaštiti od ometanja i neovlašćene detekcije primenom tehnike prenosa u proširenom spektru metodom direktne sekvence [3]. U [4] je predložena koncepcija radio-uređaja namenjenog prenosu upravljačkih komandi do bespilotne letelice u frekvencijskom opsegu od 432 do 438 MHz, kod kojeg se primenjuje upravo pomenuti metod, dok su u [5] i [6] opisane praktične realizacije pojedinih blokova radio-uređaja koji se realizuje. U usvojenoj koncepciji upravljački signal BL se formira u vidu rama fiksnog trajanja 20 ms, koji se sastoji od sinhroimpulsa i N kanala. Broj kanala N jednak je broju servo motora na letelici i promenljiv je (od 4 do 8), a tipično iznosi 5. Ovih (N+1) segmenata rama razdvojeni su međusobno pauzama jednakog trajanja 0,3 ms, dok su širine impulsa promenljive: impulsi koji odgovaraju kanalima mogu trajati između 1 ms i 2 ms, a trajanje sinhroimpulsa određuje se tako da ukupno trajanje rama bude 20 ms. Struktura rama upravljačkog signala BL, koji sadrži 5 kanala, prikazana je na sl. 1.



Slika 1 – Ram upravljačkog signala BL

Svih (N+1) osnovnih segmenata upravljačkog signala (sinhroimpuls + N kanala) u svakom ramu modulišu se u predajniku različitim PS sekvencama: $PS_0 - PS_N$. Struktura prijemnika prikazana je na sl. 2. U svakoj od (N+1) grana prijemnika nalazi se po jedan pasivni korelator (prilagođeni filter) za svaku od (N+1) različitih PS sekvenci koje se koriste za kodiranje upravljačkog signala. Analizu signala na izlazu iz pasivnog korelatora, nakon detekcije anvelope i upoređivanja sa pragom odlučivanja, vrši procesor. Uloga procesora je da prati pravilnosti u pojavljivanju vrhova autokorelacione funkcije primenjenih PS sekvenci radi odbacivanja lažnih alarma. Pod lažnim alarmom podrazumeva se premašenje vrednosti praga odlučivanja na izlazu bilo kog korelatora, koje ne odgovara osnovnom vrhu autokorelacione funkcije jedne od (N+1) PS sekvenci kojima je kodiran signal na ulazu u prijemnik.



Slika 2 – Struktura prijemnika

Ovaj metod zaštite upravljačkog signala BL detaljno je opisan u [7], a proračun performansi je prikazan u [8]. Osnovne prednosti ovog metoda su što nema potrebe za održavanjem kodne sinhronizacije PS sekvenci, kao ni za klasičnom demodulacijom. Na taj način izbegnut je problem izdvajanja takta (clock recovery) koji je karakterističan za impulsnu položajnu modulaciju. U prijemniku se vrši samo pasivna korelacija, a na osnovu korelacionih vrhova rekonstruiše se poslani signal.

Dobre autokorelacione osobine korišćenih PS sekvenci su od suštinskog značaja za ispravan rad prijemnika. Dodatno, budući da se signal na ulazu u prijemnik direktno prosleđuje ka svim pasivnim korelatorima, a da bi se minimizirala verovatnoća lažnih alarma, potrebno je da međukorelacione osobine primenjenih PS sekvenci budu što bolje. Pri izboru optimalnog skupa PS sekvenci za zaštitu upravljačkog signala BL treba voditi računa o oba pomenuta aspekta.

Izbor PS sekvenci za kodiranje upravljačkog signala BL

Svaki od $(N+1)$ segmenata upravljačkog signala BL se, zajedno sa pauzom koja mu prethodi, kodira istom PS sekvencom. Kako bi na izlazu pasivnog korelatora u odgovarajućoj grani prijemnika pojava vrha autokorelacione funkcije nastupila istovremeno sa početkom impulsa, trajanje perioda svih $(N+1)$ primenjenih PS sekvenci odabrano je tako da bude jednako trajanju signala pauze (0,3 ms). Vrednost ostvarenog procesnog pojačanja predstavlja osnovni kriterijum pri izboru dužine PS sekvenci. Usvojeno je da se koriste PS sekvence dužine $L = 255$, pa vrednost osnovne učestanosti signala takta koji se koristi pri generisanju PS se-

kvenci iznosi $f_c = 255/0,3 = 0,85MHz$. To znači da je procesno pojačanje $PG = 10 \cdot \log 255 \cong 24dB$, što je dovoljno sa stanovišta zaštite upravljačkog signala BL [4].

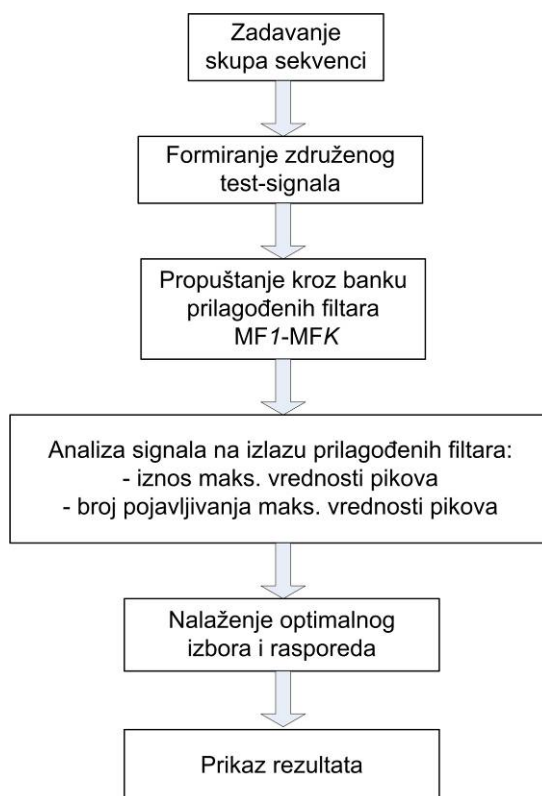
Ukupno trajanje impulsa (1–2 ms) i pauze koja mu prethodi podrazumeva ponavljanje svake primenjene PS sekvence između 3 i 6 puta. To znači da se i broj vrhova autokorelacione funkcije svake PS sekvence koji se pojavljuju na izlazu iz pasivnog korelatora u odgovarajućoj grani prijemnika pojavljuje isto toliko puta. Ovi vrhovi nalaze se na međusobnom rastojanju od 255 čipova, što procesor može da prati ukoliko su PS sekvence odabrane tako da njihove autokorelacione osobine budu dobre. Potencijalni problem predstavlja mogućnost pojave vrhova i u granama prijemnika u kojim se nalaze pasivni korelatori prilagođeni PS sekvencama različitim od one kojom je modulisan impuls koji se nalazi na ulazu u prijemnik, a koji potiču od neidealnih oblika funkcija međukorelacije PS sekvenci. Otuda međukorelacione osobine PS sekvenci predstavljaju dodatni kriterijum po kojem treba odabrati skup od (N+1) PS sekvenci za upotrebu u okviru radio-uređaja. U našem slučaju BL ima $N = 5$ upravljajućih površina, što znači da je potrebno odabrati ukupno šest PS sekvenci za modulisanje svakog od šest segmenata upravljačkog signala.

Pri izboru PS sekvenci za kodiranje dolaze u obzir različite klase sekvenci [9,10]: linearne sekvence maksimalne dužine (m-sekvence), Goldove sekvence i Kasamijeve sekvence. Budući da broj PS sekvenci u klasama koje treba analizirati može biti relativno veliki, izračunavanje svih funkcija autokorelacije i međukorelacije PS sekvenci iz tri pomenute klase može se uspešno obaviti samo pomoću računara. Sa tim ciljem razvijen je računarski program čiji je algoritam rada opisan u nastavku ovog poglavlja. Kao razvojno okruženje za realizaciju softvera upotrebljen je programski paket MATLAB.

Algoritam za automatsku selekciju PS sekvenci

Strukturu upravljačkog signala BL odlikuje pravilnost u rasporedu sinhroimpulsa i N kanala. To znači da je raspored pojavljivanja primenjenih PS sekvenci na prijemu unapred poznat, jer se svaki segment upravljačkog signala kodira uvek istom, jedinstvenom sekvencom. Pojava lažnih alarma usled izraženih vrhova funkcije međukorelacije je stoga potencijalno opasna tek ukoliko do nje dolazi u kanalu u kojem se nalazi filter prilagođen „prvoj narednoj“ sekvenci u odnosu na tekuću (onu koja odgovara segmentu signala koji se trenutno nalazi na ulazu u predajnik). U suprotnom, procesor je u stanju da detektuje pojavu odstupanja od očekivanog rasporeda PS sekvenci i lažni alarm prepozna i odbaci kao

takav. Dakle, samo susedne PS sekvence u nizu treba da poseduju što je moguće bolje međukorelacione osobine, što upravo predstavlja zadatak za program koji je razvijen – da izvrši analizu funkcija međukorelacije svih uređenih parova iz zadatog skupa PS sekvenci, i odabere onih šest kod kojih se međukorelacione funkcije uzajamno susednih odlikuju vrhovima najnižih mogućih vrednosti, i to u optimalnom rasporedu. Algoritam rada programa prikazan je na sl. 3.



Slika 3 – Algoritam za automatsku analizu i klasifikaciju PS sekvenci iz zadatog skupa

Na samom početku programa neophodno je uneti skup PS sekvenci koje se analiziraju. Zatim se formira tzv. združeni test-signal: niz nastao konkatencijom (nadovezivanjem) svih sekvenci koje se analiziraju, a koji je namenjen propuštanju kroz filtre prilagođene svakoj od sekvenci ponosob, radi analize uticaja svih sekvenci iz skupa na svaki prilagođeni filter, tj. generisanje svih mogućih funkcija međukorelacije. Pri formiranju test-signala svaka sekvenca se ponavlja po četiri puta, kako bi dobijeni rezultati što približnije odgovarali situaciji koja se realno očekuje (3 do 6 uzastopnih ponavljanja svake PS sekvence u nizu).

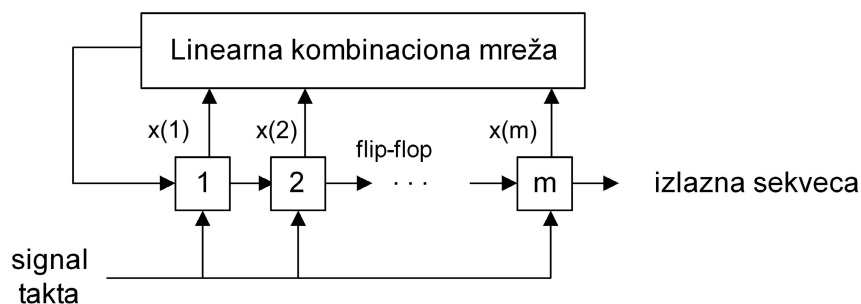
Nakon propuštanja test-signalâ kroz pasivne korelatore (ukoliko ukupan broj PS sekvenci koje se pomoću softvera analiziraju označimo sa K , pasivni korelatori se formiraju u vidu K prilagođenih filtara, označenih kao MF1 do MFK), program analizira signale dobijene na izlazu filtara deo po deo, i izračunava maksimalne vrednosti vrhova na segmentima izlaznih signala koji odgovaraju pojedinim sekvencama u test-signalu. Maksimalne vrednosti vrhova opisuju nivo „nepodobnosti“ strukture određene PS sekvence za određeni filter, što se opisuje numerički. Takođe, treba uočiti i razliku među funkcijama međukorelacije koje su karakterisane identičnim maksimalnim vrednostima vrhova, jer su sa aspekta detekcije nepogodnije one kod kojih se najviši vrhovi pojavljuju češće. Pri određivanju maksimalnih vrednosti funkcije međukorelacije softver dodaje na numerički izračunatu vrednost izvestan iznos, jednak proizvodu broja pojavljivanja maksimalne vrednosti vrha međukorelacije i težinskog faktora. Težinski faktor služi za adekvatno skaliranje člana sume koji opisuje frekventnost pojava maksimalnih vrhova. Njegovu vrednost treba odabrati tako da korekcija koja se čini ne ugrozi dominantnost maksimalne vrednosti vrhova pri formiranju sume. Vrednost težinskog faktora koju treba odabrati zavisi od klase PS sekvenci koje se analiziraju, tj. mogućih maksimalnih vrednosti vrhova svih međukorelacionih funkcija. Na osnovu iskustva određeno je da vrednost težinskog faktora bude 0,0001 u slučaju PS sekvenci analiziranih u ovom radu, jer je to sasvim dovoljno za potrebe analize, i ta vrednost je usvojena u programskom rešenju.

Zatim se pristupa analizi svih mogućih izbora šest PS sekvenci iz kompletnog skupa, u svim mogućim permutacijama, i traži se ona kombinacija izbor/raspored PS sekvenci koja rezultuje najmanjom mogućom sumarnom vrednošću ekvivalentnog nivoa maksimalnih vrhova međukorelacije kod susjednih sekvenci. Na samom kraju, program ispisuje korisniku redne brojeve PS sekvenci koje predstavljaju optimalan izbor, u odgovarajućem poretku. Radi vizuelnog uvida u ostvareni zaključak, na ekranu se prikazuju signali dobijeni na izlazu svih pasivnih korelatora. Istovremeno se prikazuju i sve određene numeričke vrednosti ekvivalentnih maksimalnih nivoa međukorelacije. Opisani softver upotrebljen je za analizu sekvenci iz različitih klasa sekvenci, radi određivanja optimalnog izbora sekvenci za zaštitu upravljačkog signala BL, sa aspekta specifičnih potreba opisanog sistema.

Linearne PS sekvence maksimalne dužine

Dobre autokorelacione osobine linearnih sekvenci maksimalne dužine (m -sekvence) upućuju na zaključak da upotreba ove klase PS sekvenci može biti dobar izbor. Jednostavna struktura generatora linearnih sekvenci, u vidu pomeračkog registra sa povratnim spregama, predstavlja dodatni motiv za izbor ovih sekvenci. Generatori linearnih PS se-

kvenci se jednostavno realizuju, jer se u kolu povratne sprege nalaze samo EX-ILI i u potpunosti se izbegava upotreba memorija za skladištenje look-up tabela iz kojih se sekvence čitaju sinhrono sa sistemskim taktom, što je nezaobilazan pristup pri realizaciji kompleksnih sekvenci koje je komplikovano formirati direktno. Tipičan izgled linearnog pomeračkog registra prikazan je na sl. 4.



Slika 4 – Generator linearnih PS sekvenci sa m ćelija.

Ukupno postoji 16 m -sekvenci precizirane dužine $L = 255$, koje se realizuju pomoću pomeračkog registra dužine $m = 8$ i različitih struktura povratne sprege sastavljene od EX-ILI kola. Ove strukture su opisane pomoću generišućih polinoma koji su prikazani u tab. 1 [9].

Tabela 1

m -sekvence dužine $L = 255$

Oktalni kod povr. sprege	Način formiranja povr. sprege	Redni broj (oznaka)
435	$x(8)+x(4)+x(3)+x(2)$	9
453	$x(8)+x(5)+x(3)+x(1)$	10
455	$x(8)+x(5)+x(3)+x(2)$	11
515	$x(8)+x(6)+x(3)+x(2)$	12
537	$x(8)+x(6)+x(4)+x(3)+x(2)+x(1)$	13
543	$x(8)+x(6)+x(5)+x(1)$	14
545	$x(8)+x(6)+x(5)+x(2)$	6
551	$x(8)+x(6)+x(5)+x(3)$	5
561	$x(8)+x(6)+x(5)+x(4)$	4
607	$x(8)+x(7)+x(2)+x(1)$	15
615	$x(8)+x(7)+x(3)+x(2)$	3
651	$x(8)+x(7)+x(5)+x(3)$	2
703	$x(8)+x(7)+x(6)+x(1)$	1
717	$x(8)+x(7)+x(6)+x(3)+x(2)+x(1)$	16
747	$x(8)+x(7)+x(6)+x(5)+x(2)+x(1)$	7
765	$x(8)+x(7)+x(6)+x(5)+x(4)+x(2)$	8

Kao rezultat analize PS sekvenci iz posmatranog skupa realizovani softver prikazuje optimalni izbor i raspored m-sekvenci dužine $L = 255$, opisanih rednim brojevima (tab. 1):

$$1, 15, 16, 6, 12, 7. \quad (1)$$

Ukoliko PS sekvence iz prethodne liste označimo kao $PS_0 - PS_5$, respektivno, pomoću realizovanog softvera mogu se odrediti vrednosti vrhova korelacije odabranih sekvenci. Ove vrednosti prikazane su u tab. 2. Kao što se može uočiti iz ove tabele, normalizovane vrednosti vrhova autokorelacije pojedinačnih sekvenci iznose 1, dok su vrednosti vrhova međukorelacije susednih sekvenci izrazito niske (oko 0,1216) – višestruko niže od maksimalnih vrednosti vrhova međukorelacije m-sekvenci odabrane dužine, koje iznose 0,3725 [10].

Izgled signala na izlazu iz korelatora prikazan je na sl. 5. Kao što se može uočiti sa ove slike, rezultat konvolucije impulsnog odziva svakog od filtara prilagođenih pojedinačnim PS sekvencama i segmenta ulaznog signala kodiranog PS sekvencom čijoj je strukturi filter prilagođen, rezultuje pojavom izraženih autokorelacionih vrhova (u seriji po 4, koliko se puta i sekvenca ponavlja), dok prolazak segmenata signala kodiranih drugim PS sekvencama rezultuje pojavom vrhova međukorelacije. Sa sl. 5 može se uočiti da su nivoi vrhova međukorelacije parova odabranih susednih PS sekvenci (1–15, 15–16, ..., 7–1) zaista minimalni: npr. odziv filtra MF1 na segment koji potiče od sekvence 15 evidentno je nižih amplituda u odnosu na odzive istog filtra na sekvence 14 i 16 (sl. 5, gore levo).

Sve vrednosti prikazane u tab. 2 određene su bez uzimanja u obzir tzv. „tranzicionog šuma“ korelatora, koji nastaje tokom tranzicija susednih PS sekvenci u svim pasivnim korelatorima [11]. Svi proračuni koji slede biće izrađeni pod istom pretpostavkom.

Tabela 2

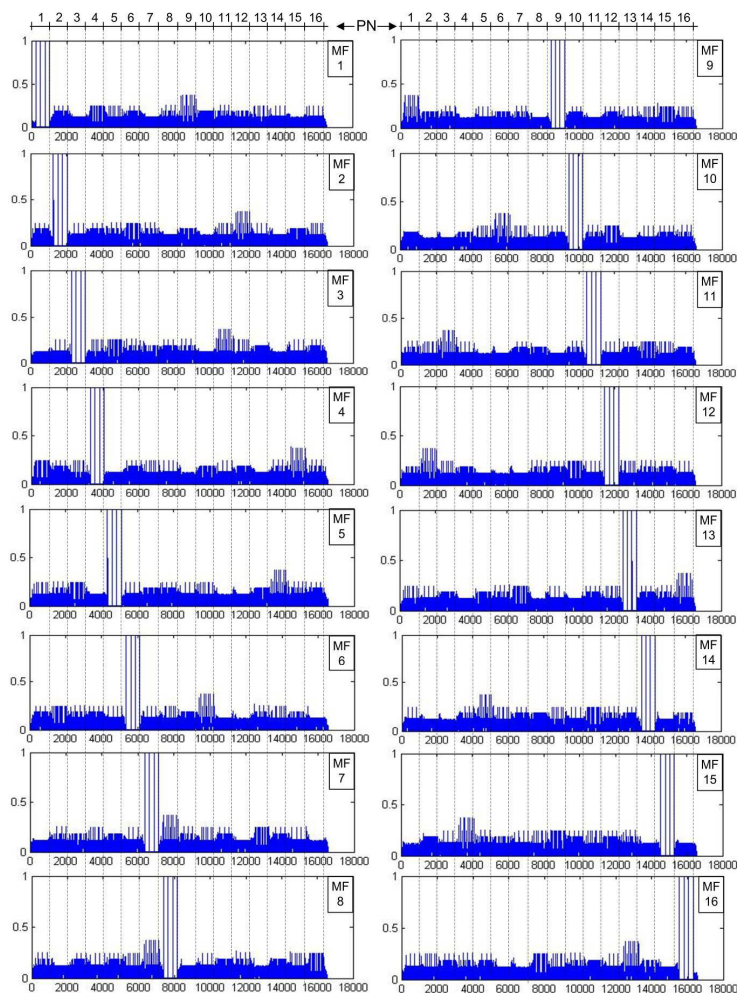
Vrednosti vrhova korelacije odabranih m-sekvenci dužine $L = 255$

	PS_0	PS_1	PS_2	PS_3	PS_4	PS_5
PS_0	1,000	0,1216	0,2471	0,2471	0,1843	0,1216
PS_1	0,1216	1,000	0,1216	0,1843	0,2471	0,2471
PS_2	0,2471	0,1216	1,000	0,1216	0,2471	0,1216
PS_3	0,2471	0,1843	0,1216	1,000	0,1216	0,2471
PS_4	0,1843	0,2471	0,2471	0,1216	1,000	0,1216
PS_5	0,1216	0,2471	0,1216	0,2471	0,1216	1,000

Goldove sekvence

Goldove sekvence predstavljaju veliki skup PS sekvenci dobrih međukorelacionih karakteristika [12]. Goldove sekvence dužine $L = 2^m - 1$ formiraju se na osnovu odabranog para sekvenci u i v , dužine L , koje se nazivaju „preferiranim parom“ sekvenci. Dve sekvence u i v čine preferirani par ukoliko zadovoljavaju uslov da su m -sekvence, čija međukorelaciona funkcija ima samo tri vrednosti: -1 , $-t(m)$ i $t(m)-2$, gde $t(m)$ predstavlja vrednost:

$$t(m) = 1 - 2^{(m-2)/2} \quad (2)$$



Slika 5 – Signali na izlazu pasivnih korelatora MF1...MF16 (segmenti signala koji potiču od različitih PS sekvenci podeljeni su isprekidanim linijama)

Skup Goldovih sekvenci izvedenih iz odabranog preferiranog para $G(u,v)$ definiše se na sledeći način:

$$G(u,v) \triangleq \{u, v, u \oplus v, u \oplus Tv, u \oplus T^2v, \dots, u \oplus T^{L-1}v\}, \quad (3)$$

gde T predstavlja operator cikličnog pomeranja vektora za jedno mesto ulevo, a \oplus označava sabiranje po modulu 2 (EX-ILI operacija). Preferirani parovi PS sekvenci postoje samo za one dužine PS sekvenci za koje ne važi $m \equiv 0 \pmod{4}$ ([13], [14]). Međutim, metoda za generisanje PS sekvenci data formulom (3) može se primeniti i kada važi $m \equiv 0 \pmod{4}$. U [10] se ove sekvence nazivaju sekvencama „nalik Goldovim sekvencama“ (*Gold-like*) i navodi se da maksimalna vrednost vrha međukorelacije ovih sekvenci iznosi koliko i kod Goldovih sekvenci: $t(m)$. U slučaju PS sekvenci dužine $L=255$ (tj. $m = 8$) izraz (2) daje vrednost $t(8) = 33$, tj. odgovarajuća normalizovana maksimalna vrednost vrha međukorelacije iznosi 0,1294.

Međutim, vrednosti međukorelacije m -sekvenci koje je softver izabrao kao optimalno rešenje, prikazane u tab. 2, upućuju na sledeći zaključak: polazeći od para susednih sekvenci iz izraza (1), i primenjujući metod formiranja dat izrazom (2), moguće je generisati skup od $L+2$ sekvence čije maksimalne vrednosti vrha međukorelacije iznose koliko i kod polaznih PS sekvenci: 0,1216. Primenjujući ovaj pristup, PS sekvence označene rednim brojevima 1 i 15 u tab. 1 uzimamo za u i v , a zatim određujemo prvih 6 PS sekvenci po pravilu (3), dodeljujući im oznake $PS_0 - PS_5$, respektivno. Vrednosti vrhova korelacije na ovaj način dobijenih PS sekvenci, izračunate pomoću realizovanog softvera, prikazane su u tab. 3. Prema očekivanju, vrednosti vrhova međukorelacije svih PS sekvenci iznose 0,1216.

Dakle, sa aspekta primenjivosti u okviru opisanog sistema za zaštitu kontrolnog signala BL, međukorelacione osobine formiranog skupa sekvenci nalik Goldovim sekvencama su podjednako dobre kao i osobine ranije odabranih m -sekvenci, jer su od interesa samo međukorelacije parova susednih sekvenci. Međutim, samo polazne PS sekvence (prve dve) iz novoformiranog skupa poseduju autokorelacione karakteristike m -sekvenci, dok kod svih ostalih sekvenci nalik Goldovim sekvencama postoje i vrhovi autokorelacije visine 0,1216, pored jediničnih, što je očekivan rezultat, [13,14]. Stoga se može zaključiti da primena odabranih m -sekvenci u ovom specifičnom slučaju predstavlja bolje rešenje. Za razliku od primene sekvenci nalik Goldovim, primena m -sekvenci iz odabranog skupa pruža mogućnost smanjenja vrednosti praga odlučivanja tokom procesa verifikacije (nakon detekcije prvog vrha autokorelacije), koja rezultuje pouzdanijom detekcijom.

Dobijeni rezultat je posledica specifičnih karakteristika opisanog sistema: posmatranja samo „prvog narednog“ kanala i korekcije praga od-

lučivanja tokom verifikacije. U klasičnom pristupu problemu detekcije, međukorelacione osobine m -sekvenci bile bi kvalifikovane kao generalno lošije u odnosu na Goldove, a njihove dobre autokorelacione osobine ne bi predstavljale tako značajnu prednost. Pogodnost odabranog skupa m -sekvenci proizlazi iz specifičnosti strukture ovih sekvenci: kod njih važi $m \equiv 0 \pmod{4}$, i njihove međukorelacione funkcije imaju samo četiri međusobno različite vrednosti, neuobičajeno niske maksimalne vrednosti vrha međukorelacije $t(m)-2$ (tj. 31 za $m = 8$, što iznosi 0,1216 nakon normalizacije). U [10] se ove sekvence nazivaju „sekvencama teoreme 2“, koju je prvi formulisao Niho [15].

Tabela 3

Vrednosti vrhova korelacije formiranih „sekvenci nalik Goldovim sekvencama“ dužine $L = 255$

	PS_0	PS_1	PS_2	PS_3	PS_4	PS_5
PS_0	1,000	0,1216	0,1216	0,1216	0,1216	0,1216
PS_1	0,1216	1,000	0,1216	0,1216	0,1216	0,1216
PS_2	0,1216	0,1216	1,000	0,1216	0,1216	0,1216
PS_3	0,1216	0,1216	0,1216	1,000	0,1216	0,1216
PS_4	0,1216	0,1216	0,1216	0,1216	1,000	0,1216
PS_5	0,1216	0,1216	0,1216	0,1216	0,1216	1,000

Kao dodatak svemu navedenom, napomenimo još i da je rezultat primene procedure opisane izrazom (3) interesantan, jer je nešto bolji od onog koji se očekuje u skladu sa [10].

Kasamijeve sekvence

Kasamijeve sekvence predstavljaju klasu PS sekvenci sa još boljim međukorelacionim osobinama u odnosu na Goldove sekvence [12]. Štaviše, maksimalne vrednosti vrhova međukorelacije Kasamijevih sekvenci odgovaraju tzv. Welchovoj donjoj granici [16], što čini Kasamijeve sekvence optimalnim u smislu međukorelacionih svojstava. U primenama kod kojih su dobre međukorelacione osobine sekvenci od naročitog interesa (poput CDMA sistema) Kasamijeve sekvence se retko primenjuju, jer je njihov broj nedovoljan – oko $2^{m/2}$ puta manji od broja Goldovih sekvenci identične dužine. Međutim, kako u sistemu za zaštitu upravljačkog signala BL opisanog u ovom tekstu postoji potreba za strogo ograničenim brojem od $N + 1 = 6$ PS sekvenci, primena Kasamijevih sekvenci dužine $L = 255$ svakako jeste jedna od opcija.

„Mali skup Kasamijevih sekvenci“, koje poseduju optimalne vrednosti vrhova međukorelacije, formira se na sledeći način [17]:

$$K_s(u) \triangleq \{u, u, T, u, T^2, \dots, u, T^{2^{m/2}-2}\}, \quad (4)$$

gde ω predstavlja PS sekvencu dobijenu decimacijom m-sekvence u za $2^{m/2} + 1$, T predstavlja operator cikličnog pomeranja vektora za jedno mesto ulevo, a \oplus označava sabiranje po modulu 2. Maksimalna vrednost vrhova međukorelacije Kasamijevih sekvenci iznosi $1 + 2^{m/2}$, a PS sekvenci iz ovog skupa ima ukupno $2^{m/2}$. U razmatranoj primeni PS sekvenci za zaštitu upravljačkog signala BL od interesa je slučaj $m = 8$, što znači da postoji ukupno 16 PS sekvenci željene dužine koje se mogu formirati u skladu sa izrazom (4).

U analiziranom sistemu angažuje se 6 PS sekvenci; polazeći od sekvence označene rednim brojem 1 u tab. 1. To je sekvenca u za izraz (4), te određivanjem prvih 6 PS sekvenci iz formule za formiranje Kasamijevih sekvenci dobijamo novi skup PS sekvenci $PS_0 - PS_5$, respektivno. Vrednosti vrhova korelacije na ovaj način dobijenih PS sekvenci, izračunate pomoću realizovanog softvera, prikazane su u tab. 4. Vrednosti vrhova međukorelacije svih sekvenci odgovaraju očekivanim maksimumima međukorelacije Kasamijevih sekvenci: $1 + 2^{m/2} \Big|_{m=8} = 17$, tj. 0,0667 nakon normalizacije.

Tabela 4

Vrednosti vrhova korelacije formiranih Kasamijevih sekvenci dužine $L = 255$

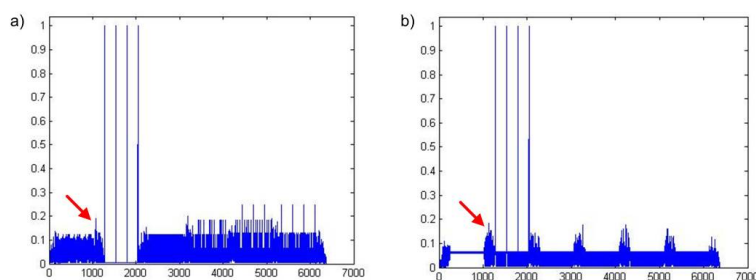
	PS₀	PS₁	PS₂	PS₃	PS₄	PS₅
PS₀	1,000	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667
PS₁	0,0667	1,000	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667
PS₂	0,0667	0,0667	1,000	0,0667	0,0667	0,0667
PS₃	0,0667	0,0667	0,0667	1,000	0,0667	0,0667
PS₄	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667	1,000	0,0667
PS₅	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667	1,000

Kao što se može uočiti iz tab. 4, međukorelacione osobine Kasamijevih sekvenci su dvostruko bolje u odnosu na međukorelacione osobine odabranog skupa m-sekvenci, sa aspekta analizirane primene PS sekvenci. Međutim, autokorelacione osobine m-sekvenci su bolje. Samo prva (polazna) PS sekvenca iz formiranog skupa Kasamijevih sekvenci poseduje autokorelacione osobine m-sekvenci, dok kod svih ostalih postoje i vrhovi autokorelacije visine 0,0667, pored jediničnog, što zahteva viši prag odlučivanja tokom verifikacije, a time se smanjuje verovatnoća detekcije. Dakle, izbor između odabranog skupa m-sekvenci i skupa Kasamijevih sekvenci, za potrebe primene u okviru analiziranog sistema, treba izraditi na osnovu detaljne analize potencijalnog dobitka u vidu smanjenja verovatnoće lažnog alarma i potencijalnog gubitka u vidu smanjenja verovatnoće detekcije, i obratno. Eventualna upotreba Kasamijevih sekvenci rezultira većom verovatnoćom detekcije prvog vrha autokorelacije, dok je verifikacija prisustva signala u određenom kanalu prijemnika pouzdanija ukoliko se koriste m-sekvence. U klasičnom pristupu problemu detekcije pomenuta dilema

ne postoji i prednost bi nedvosmisleno bila na strani Kasamijevih sekvenci. U slučaju primene Kasamijevih sekvenci u opisanom sistemu prvu (polaznu) sekvencu svakako treba pridružiti sinhroimpulsu upravljačkog signala BL, kako bi se obezbedili maksimalno pogodni uslovi za inicijalnu detekciju signala i uspešan početak rada opisanog algoritma u prijemniku.

Uticao tranzicionog šuma korelatora na izbor skupa PS sekvenci

Prethodna analiza pokazuje da dobre međukorelacione osobine Kasamijevih sekvenci predstavljaju značajnu prednost pri konačnom izboru skupa PS sekvenci za primenu u opisanom sistemu. Mogućnost primene znatno niže vrednosti praga odlučivanja pri detekciji prvog vrha, pri specifičnoj fiksnoj vrednosti lažnog alarma, rezultira veoma pouzdanom detekcijom prvog vrha. Međutim, prilikom izvođenja velikog broja eksperimenata korišćenjem softvera za analizu korelacionih osobina PS sekvenci opisanih u ovom radu, uočena je pojava kojoj se, najčešće, ne pridaje suštinska važnost pri analizi korelacionih osobina PS sekvenci. Reč je o „tranzicionom šumu korelatora“. Ovaj termin koristimo za opisivanje signala na izlazu iz korelatora pri tranzicionim stanjima, kada se segmenti različitih (uzastopnih) PS sekvenci istovremeno nalaze unutar prilagođenog filtra. Tranzicioni šum korelatora se matematički tretira kao slučajni proces Gausovske raspodele, nezavisno od primenjenog skupa PS sekvenci [11]. Rezultujući signal na izlazu korelatora, kako izvedeni testovi pokazuju, po vrednosti može nadmašiti izračunate maksimume vrhova međukorelacije susednih PS sekvenci, kako u slučaju m-sekvenci, tako i u slučaju Kasamijevih sekvenci. Opisana pojava prikazana je na sl. 6, gde su uporedo prikazani signali na izlazu pasivnog korelatora MF2, pobuđenog test-signalom koji se formira na osnovu odabranog skupa PS sekvenci $PS_0 - PS_5$, u slučaju primene m-sekvenci i u slučaju primene Kasamijevih sekvenci.



Slika 6 – Pojava tranzicionog šuma korelatora u slučaju primene:
a) m-sekvenci; b) Kasamijevih sekvenci

Sa sl. 6 se jasno može uočiti da je pojava tranzicionog šuma korelatora dominantna u odnosu na nivo međukorelacione funkcije u oba posmatrana skupa PS sekvenci. Stoga se nameće zaključak da vrednost praga odlučivanja pri detekciji prvog vrha treba dimenzionisati upravo u odnosu na nivo tranzicionog šuma korelatora, a ne u odnosu na vrednosti međukorelacija.

Kao što se iz prethodnog razmatranja može uočiti, potencijalna prednost upotrebe Kasamijevih sekvenci definitivno gubi na značaju. Vrednost praga pri detekciji prvog vrha autokorelacione funkcije PS sekvenci određuje se nezavisno od primenjene klase PS sekvenci, dok dobre autokorelacione osobine m-sekvenci omogućavaju da se tokom procesa verifikacije, koji neposredno sledi nakon detekcije prvog vrha, vrednost praga spusti na nižu vrednost nego u slučaju primene Kasamijevih sekvenci (sl. 6). Dakle, iz navedenog se može izvesti nedvosmislen zaključak da upotreba m-sekvenci u specifičnom kontekstu opisanog sistema za zaštitu upravljačkog signala BL predstavlja optimalno rešenje.

Zaključak

U radu su analizirane korelacione osobine PS sekvenci dužine 255 iz tri najčešće korišćene klase PS sekvenci, radi ocene adekvatnosti njihove primene za zaštitu upravljačkog signala BL. Realizovan je softver koji omogućava automatizovanu analizu autokorelacionih i međukorelacionih osobina PS sekvenci iz zadatog skupa. Na osnovu rezultata sprovedene analize može se zaključiti da je za zaštitu upravljačkog signala BL najpogodnije da se koristi skup linearnih sekvenci maksimalne dužine, tzv. m-sekvence. Odabrani skup m-sekvenci ima najbolje autokorelacione osobine, dok su međukorelacione osobine jednako dobre kao u slučaju Goldovih sekvenci. Pored navedenih prednosti treba naglasiti da je i realizacija generatora m-sekvenci najjednostavnija.

Literatura

- [1] Valavanis, K. P. (Ed.): *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, Springer, 2008.
- [2] Technical Note – The Model Electronics Company, MTN004, Issue 1.1, 2007.
- [3] Torrieri, D.: *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*, Springer, 2005.
- [4] Todorović, B. M., Popović, N. V., Šunjevarić, M. M.: „Konceptija UVF radio-uređaja koji koristi tehniku proširenog spektra“, *Zbornik radova 16. telekomunikacionog foruma (TELFOR)*, Beograd, 2008.
- [5] Tasić, S., Todorović, B. M., Mitrović, N.: „Jedno rešenje frekvencijskog sintetizatora UVF radio-uređaja koji koristi tehniku proširenog spektra metodom direktne sekvence“, *Zbornik radova konferencije ETRAN 2009*, Vrnjačka Banja, 2009.

[6] Gajić, Ž., Todorović, B. M., Orlić, V.: „Generisanje upravljačkog signala bespilotne letelice koji je zaštićen primenom tehnike proširenog spektra metodom direktne sekvence“, *Zbornik radova konferencije ETRAN 2009*, Vrnjačka Banja, 2009.

[7] Todorović, B. M. and Orlić, V. D.: „Direct Sequence Spread Spectrum Scheme for an Unmanned Aerial Vehicle PPM Control Signal Protection“, *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 10, October 2009, pp. 727–729.

[8] Todorović, B. M. and Orlić, V. D.: „An Application of Direct Sequence Spread Spectrum to Unmanned Aerial Vehicle PPM Control Signal Protection“, *Proc. of IEEE Conference TELSIS 2009*, Niš, 2009.

[9] Golomb, S. W.: *Shift Register Sequences*, Holden-Day Inc., San Francisco, 1967, p. 62

[10] Sarvate, D. V. and Pursley, M. B.: „Crosscorrelation Properties of Pseudorandom and Related Sequences“, *Proc. of the IEEE*, vol. 68, no. 5, May 1980, pp. 593–619.

[11] Jovanović, V. M. and Sousa, E. S.: „Analysis of Non-Coherent Correlation in DS/BPSK Spread Spectrum Acquisition“, *IEEE Trans. Communications*, vol. 43, no. 2,3,4, 1995, pp. 565–573.

[12] Proakis, J. G.: *Digital Communications*, 4th ed, New York, McGraw Hill, 2001.

[13] Gold, R.: “Optimal Binary Sequences for Spread Spectrum Multiplexing”, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 13, October 1967, pp. 619–621.

[14] Gold, R.: „Maximal Recursive Sequences with 3-Valued Recursive Cross Correlation Functions“, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 14, January 1968, pp. 154–156.

[15] Niho, Y.: “Multi-valued cross-correlation functions between two maximal linear recursive sequences”, Ph. D. dissertation, Dept. Elec. Eng., Univ. Southern California, 1972.

[16] Welch, L. R.: “Lower Bounds on the Maximum Cross Correlation of Signals”, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 20, May 1974, pp. 397–399.

[17] Kasami, T.: “Weight Distribution Formula for Some Class of Cyclic Codes”, Coordinated Science Laboratory, Univ. of Illinois, Urbana, Tech. Report no. R-285, May 1991.

ANALYSIS OF CORRELATION PROPERTIES OF PSEUDORANDOM SEANCES OF LENGTH 255 FOR THE UAV CONTROL SIGNAL PROTECTION

Summary:

The Direct Sequence Spread Spectrum technique represents an effective method for unmanned aerial vehicle (UAV) control signal protection. Signal protection is obtained by applying pseudorandom (PR) sequences within a transmitter, known by a receiver, but unknown to an unaut-

horised user. In order to achieve reliable signal transmission, PR sequences ought to have good autocorrelation properties. If the signal transmission is realized by using several PR sequences, their crosscorrelation properties are of high importance as well. In this paper autocorrelation and crosscorrelation properties of PR sequences of length 255 are analyzed. Three most frequently used classes of PR sequences: linear maximum length, Gold and Kasami sequences are considered. An optimal set of PR sequences for UAV control signal protection is recommended.

Introduction

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have recently reached high levels of growth in diverse military and civilian application domains. UAVs come in two varieties: some are controlled from a remote location while the others fly autonomously based on pre-programmed flight plans. There are several UAV remote control systems. One of the most widely used is the binary pulse position modulation (PPM) control system. The UAV PPM control signal consists of data frames. Each of them contains a synchronizing pulse followed by a number of shorter pulses which is equal to the number of channels N . At the beginning of any pulse is the pause long 0.3 ms. A PPM signal can be protected against jamming and unauthorised detection by using the direct sequence spread spectrum technique. Each of $(N+1)$ segments of the UAV control signal, along with the preceeded pause, is coded by the same pseudorandom sequence. It means that $(N+1)$ pseudorandom sequences is used, where N is varied from 4 to 8, but typically is equal to 5.

Choice of PR sequences for UAV control signal coding

Good autocorrelation properties of PR sequences are of high importance for the accurate functioning of a receiver. Besides, in order to minimize probability of false alarms, good crosscorrelation properties of applied PR sequences should be as good as possible.

Algorithm for automated selection of PR sequences

The algorithm and the softver for analysis of different classes of PR sequences are described.

Linear maximum length PR sequences

This class of PR sequences has optimal autocorrelation properties. Additionally, the structure of its generator is very simple since it is realized by using the shift register with linear feedback.

Gold sequences

Crosscorrelation properties of Gold sequences are as good as those of linear maximum length PR sequences. However, only two sequences from the set of Gold sequences have ideal autocorrelation properties while the others have autocorrelation peaks 0.1216 high, besides the main peak.

Kasami sequences

Crosscorrelation properties of the Kasami sequences are significantly better in comparison to the linear maximum length PR sequences. On the other hand, the autocorrelation properties of the linear maximum length PR sequences are better. Only one sequence from the set of the Kasami sequences has ideal autocorrelation properties, while the others have autocorrelation peaks 0,0667 high, besides the main peak.

Impact of correlator transient noise on the choice of the set of PR sequences

The software developed for the analysis of PR sequences correlation properties is used for a number of experiments. Correlator transient noise is identified as an important factor for the optimal set of PN sequences selection. Taking into account that factor, the choice of the linear maximum length PR sequences seems to be an optimal solution.

Conclusion

In this paper the correlation properties of three most often used classes of PR sequences 255 chips long are examined. A software package for the aforementioned analysis is developed. The obtained results show that the maximum length PR sequences are an optimal solution for the protection of unmanned aerial vehicle control signals. They had the best autocorrelation properties, while the crosscorrelation properties are the same as in the case of Gold sequences.

Key words: radio-communication, transmission in spread spectrum, direct sequence, unmanned aerial vehicle, pseudorandom sequences, correlation

Datum prijema članka: 11. 11. 2009.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 27. 01. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 29. 01. 2010.