

Mr Igor S. Simić,
kapetan I klase, dipl. inž.
VP 4522 Batajnica
Dr Aleksa J. Zejak,
docent, dipl. inž.
Institut IMTEL,
Novi Beograd

SOFTVERSKI RADIO

UDC: 681.324.06:623.61/62

Rezime:

Digitalna obrada signala, i njena sve šira primena u komunikacijama, dovela je do redefinisavanja arhitekture radio primo-predajnika. Novi trend koji bitno utiče na promene u radio-komunikacijama nazvan je »softverski radio«. Osnova tehnologije softverskog radija jeste potpuna programabilnost svih sklopova uređaja. Komponente kojima se to postiže su: analogno-digitalni i digitalno-analogni konvertori, digitalni procesori signala, digitalni konvertori frekvencije i mikroprocesori opšte namene. U komercijalnim aplikacijama ova tehnologija brzo je našla primenu u mobilnim komunikacijama. Zbog fleksibilnosti koju pruža, koncept softverskog radija našao je široku upotrebu i u vojnim komunikacionim sistemima i sistemima za EI i PED.

Ključne reči: softverski radio, softverski prijemnik, elektronsko izviđanje, radio-komunikacije, digitalna obrada signala, digitalni proces signala.

SOFTWARE RADIO

Summary:

Digital signal processing and its wide application in communication systems redefined radio transceiver design. New direction which considerably affects the field of radio-communication is called »software radio«. The basic nature of the software radio technology is the total programmability of all radio devices. The software radio consists of the following components: analog to digital and digital to analog converters, digital signal processors, digital down converters and general purpose microprocessors. In commercial applications this technology rapidly finds its use in mobile communications. Because of its flexibility the software radio technology is widely applied military communication and electronic warfare systems.

Key words: software radio, software receiver, electronic surveillance, radio communication, digital signal processing, digital signal processor.

Uvod

Koncept softverskog prijemnika i, generalno, softverskog radija počeo se razvijati sredinom sedamdesetih godina u američkim vojnim istraživačkim ustanovama. Naziv »softverski« često se prenaplašeno koristi u komercijalne svrhe. U ovom slučaju termin »sof-

tverski« odražava osnovnu prednost i tehnološke novine koje se primenjuju u prijemnicima. Jedna od najznačajnijih prednosti jeste mogućnost realizacije različitih uređaja i funkcija bez promena hardvera.

Softverski radio nastao je kombinacijom tehnika koje obuhvataju: RF konverziju širokopojasne analogno-

-digitalne (A/D) i digitalno-analogne (D/A) konvertore, digitalnu obradu signala primenom programabilnih procesora signala (DSP) i procesora opšte namene. Ovako procesorski programabilno definisan prijemnik deo je evolucije hardverskih digitalnih sklopova. Softverski kontrolisani digitalni prijemnik generalno ne predstavlja i softverski prijemnik. Ključna razlika je totalna programabilnost softverskog prijemnika koja podrazumeva i modulaciju, mod višestrukog pristupa, i sl. [1].

Fleksibilnost programabilnih implementacija omogućava rapidne promene modulacionih tehnika i upotrebu talasnih oblika kakvi u tradicionalnim analognim tehnikama nisu mogući.

Komunikacija u vojnim sistemima obavlja se na različitim udaljenostima i sa više komandnih nivoa, pa su za njeno uspostavljanje potrebni različiti RF (radiofrekvencijski) opsezi, energetski i spektralno efikasni tipovi modulacija, algoritmi za kodovanje govora, algoritmi za zaštitu predajnog signala i algoritmi za zaštitu same informacije (kriptozaštita). U ovakvim primerima fleksibilnost koncepta softverskog radija ima velikih prednosti.

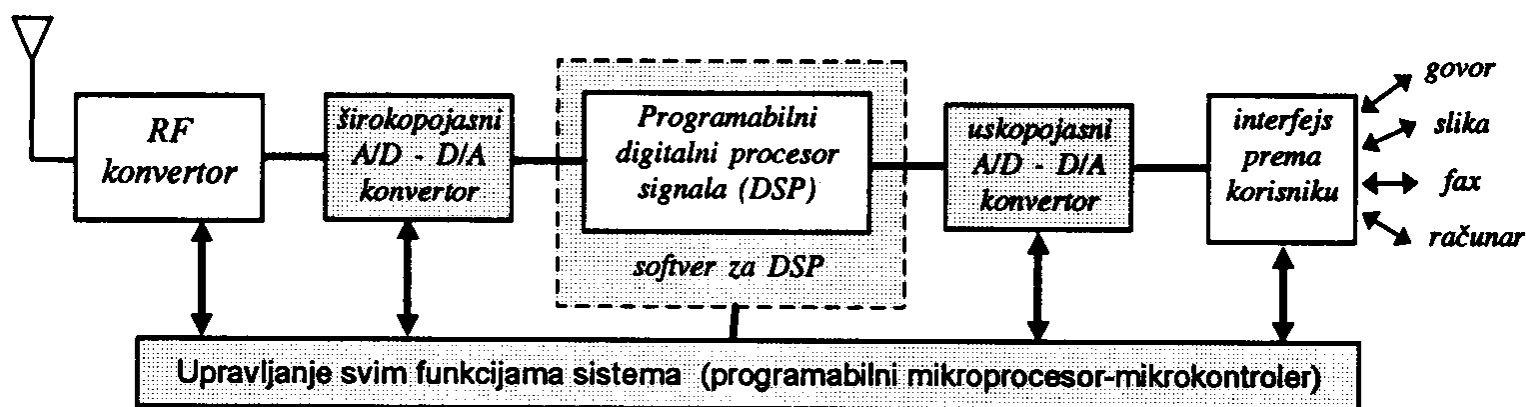
Struktura softverskog radija

Softverski radio čini niz programskih sklopova. Blok-šema na slici 1 prikazuje osnovnu strukturu softver-

skog radija. Dostupne tehnologije dozvoljavaju da se odabiranje obavlja frekvencijom 500 MHz, čime je ulazni RF opseg prijemnika ograničen na ~ 200 MHz. To znači da je za neke RF opsege (KT, VKT) moguće obezbediti A/D i D/A konverziju signala na samoj anteni. Ako se želi prijem na frekvencijama višim od 200 MHz potrebna je konverzija frekvencije analognim sklopovima. Iza širokopoljanskih A/D i D/A konvertora sva obrada i kodovanje signala obavlja se primenom digitalnih procesora signala sa algoritama za digitalnu obradu signala.

Korisnik preko odgovarajućeg interfejsa šalje i prima informacije kao što je govor, slika, fax, podaci i sl. Analogni signali u osnovnom opsegu (govor i slika) na prijemu pretvaraju se iz digitalnog oblika pomoću uskopoljanskih D/A konvertora, dok se u predaji analogni signali od korisnika prethodno digitalizuju A/D konvertorom, a zatim u DSP prilagođavaju (modulišu, koduju) prenosu radio-kanalom.

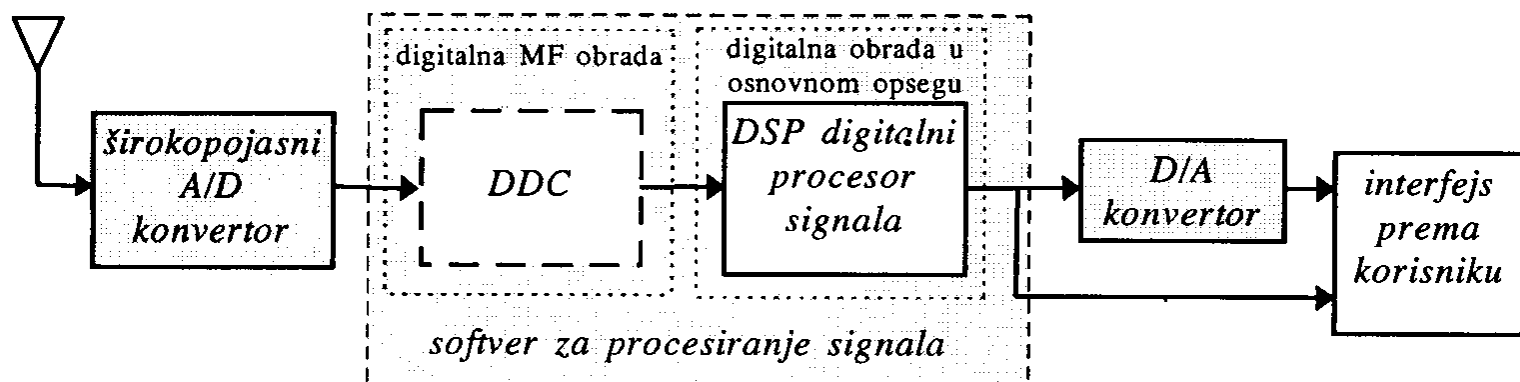
Struktura softverskog prijemnika prikazana je na slici 2. Signal sa antene dovodi se, u opštem slučaju, na širokopoljanski A/D konvertor. Iza A/D konvertora sve obrade u prijemu obavlja se digitalnom obradom signala na programabilnom hardveru.



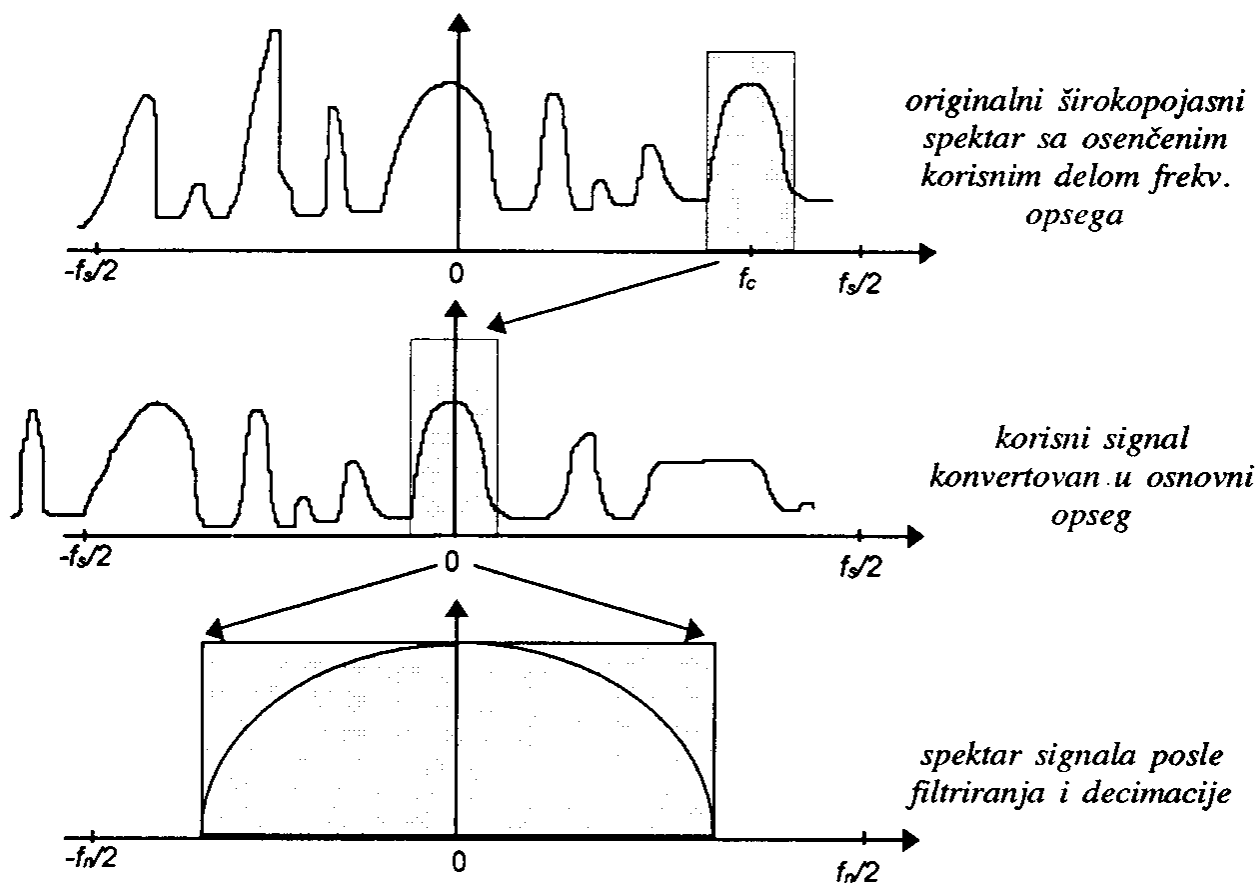
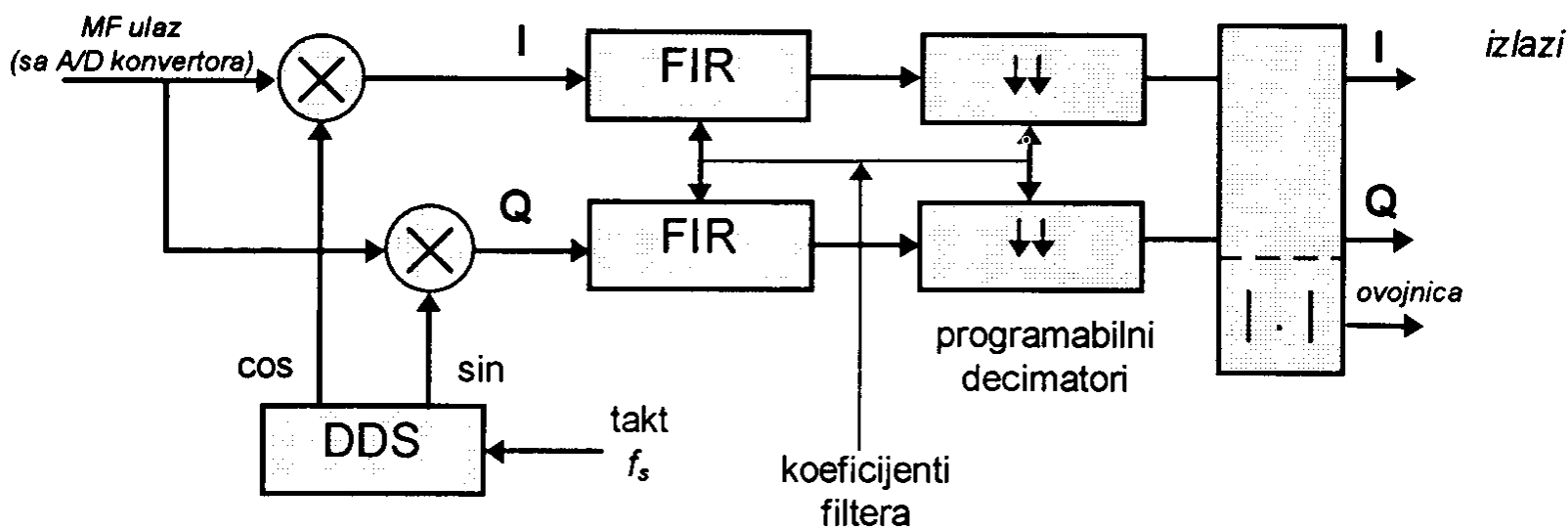
Sl. 1 — Blok-šema softverskog radija

Da bi se prevazišla trenutna tehnološka ograničenja i efikasnije iskoristila raspoloživa procesorska snaga, u prijemnik se iza A/D konvertora dodaju sklopovi za digitalnu obradu MF

(među-frekvencijskih) signala. Jedan od tih sklopova jeste digitalni konvertor frekvencije (DDC — Digital or Decimating Down Converter).



Sl. 2 — Struktura softverskog prijemnika



Sl. 3 — Blok-šema i princip rada digitalnog konvertora frekvencije

Translacija frekvencije, filtriranje i decimacija zahtevaju oko 100 instrukcija procesora po odbirku, što za frekvenciju odabiranja od 30 MHz daje oko 3000 MIPS (miliona instrukcija u sekundi). Ove funkcije zahtevaju značajnu procesorsku snagu, pa se u prvim generacijama softverskog prijemnika predobrada ili obrada MF signala, obavlja primenom DDC čipa (npr. HSP 50016 proizvođača Harris). Suština primene DDC jeste da se potrebna procesorska snaga smanji i svede na meru u kojoj je potrebna samo za obradu signala u osnovnom opsegu frekvencija.

Na slici 3 prikazana je blok-šema i princip rada DDC. RF signal sa A/D konvertora dovodi se na kompleksni množač. Prostoperiodične signale (\sin/\cos) za kvadraturne grane množača generiše direktni digitalni sintezator frekvencije (DDS). Na taj način vrši se translacija željenog segmenta frekvencijskog spektra u osnovni opseg. Primenom niskopropusnih programabilnih filtera, sa konačnim trajanjem impulsnog odziva (FIR) i decimatora, željeni segment frekvencijskog opsega se filtrira, a frekvencija odabiranja se smanjuje ($nf_n=f_s$).

Na svom izlazu DDC daje kompleksan signal u osnovnom opsegu sa n puta manjim brojem odbiraka. Vrednost faktora decimacije n direktno zavisi od odnosa ukupne širine spektra signala na ulazu u A/D konvertor i širine spektra korisnog signala.

Programabilnost svih elemenata DDC (FIR, decimatori, DDS) omogućava realizaciju I/Q demodulatora. Neki proizvođači nude i programabilne demodulatore koji se mogu upotrebiti za MF obradu u softverskom prijemniku umesto DDC.

Digitalna obrada signala u osnovnom opsegu obavlja se primenom digitalnih procesora signala. Procesorska snaga DSP čipova dozvoljava realizaciju vrlo složenih algoritama za obradu signala u vremenskom, frekvencijskom i prostornom domenu.

Digitalni procesori signala

Programabilni procesori signala (DSP) jesu specijalizovani mikroracunari, projektovani za implementaciju računski intenzivnih operacija i funkcija digitalne obrade signala. Sve funkcije DSP čipa odvijaju se pod kontrolom programa, pri čemu su setovi instrukcija prilagođeni realizaciji algoritama za digitalnu obradu signala. Drugim rečima, DSP svojom hardverskom arhitekturom i programskim instrukcijama omogućava implementaciju algoritama, kao što su: digitalno filtriranje (FIR, i IIR), brza Furijeova transformacija (FFT), adaptivna digitalna obrada signala, sinhronizacija frekvencije, simbola i vremenskog slot-a), ekvalizacija, linijsko i kanalsko kodovanje i dekodovanje signala i sl.

Osnovni element hardverske arhitekture svakog DSP jeste brza jedinica za množenje, pa je vreme za izvršenje instrukcije jednako taktu samog DSP. Detaljnije informacije o DSP mogu se naći u [2, 3, 4]. U tabeli 1 prikazan je pregled danas najznačajnijih digitalnih procesora signala.

Jedan od kriterijuma za ocenu snage DSP jeste brzina izvršavanja instrukcije množenja i akumulacije $a=a+b \cdot c$. Optimizacijom ovog tipa instrukcije postiže se brzo računanje odziva FIR filtera.

Primene koncepta softverskog radija u izviđačkim sistemima

U oblasti protivelektronske borbe, a naročito u segmentu koji se bavi izviđanjem komunikacionih sistema, softverski prijemnici našli su široku primenu. Razlog za to je potreba za univerzalnim sistemom za presretanje, detekciju, analizu, prijem i eksploataciju različitih signala.

Promene koje se dešavaju u oblasti komunikacionih sistema potencijalnih protivnika teško je pratiti bez odgovarajući tehnički i tehnološki sa-

Pregled najznačajnijih procesora signala

Procesor	Proizvođač	Brzina	Opis
ADSP 21 xx familija ADSP 21062 SHARC ADSP 21065 SHARC	Analog devices Analog devices Analog devices	10,2—33 MIPS ¹ 40 MFLOP; 120 MIPS 180 MFLOP	11 bit, fiksni zarez 32 bit, pokretni zarez, multiproc. 32 bit, pokretni i fik- sni zarez
DSP56000 DSP56100 DSP56300 DSP5600 DSP96002	Motorola Motorola Motorola Motorola Motorola	20 MIPS 30 MIPS 80—100 MIPS 60 MIPS 60 MFLOP; 20 MIPS	24 bita, fiksni zarez 16 bita, fiksni zarez 24 bita, fiksni zarez 16/24 bita fiksni zarez 32 bita, pokretni zarez
DSP32C	AT & T	25 MFLOP; 12,5 MIPS	32 bita, pokretni zarez
DSP16 xx familija DSP16000	Lucient Technilo- gies Lucient Technilo- gies	26—120 MIPS 200 MIPS	16 bita, fiksni zarez 32 bita, fiksni zarez
TMS320C1 x familija TMS320C2 x familija TMS320C3 x familija TMS320C4 x familija TMS320C5 x familija TMS320C62 x familija TMS320C67 x familija TMS320C80	Texas Instruments Texas Instruments Texas Instruments Texas Instruments Texas Instruments Texas Instruments Texas Instruments Texas Instruments	5 MIPS 10—12 MIPS 40 MFLOP; 20 MIPS 50 MFLOP; 25 MIPS 40—50 MIPS 1,6 GIPS 1 GFLOP; 1,333 GIPS 200 MFLOP	16 bita, fiksni zarez 16 bita, fiksni zarez 32 bita, pokretni zarez 32 bita, pokretni zarez, multiproc. 16 bita, fiksni zarez 32 bita, fiksni zarez, VelocitiTI 32 bita, pokretni zarez, VelocitiTI 32 bita, pokretni zarez, DSP+RISC

vremenih izviđačkih sistema. Uspešno otkrivanje, analiza, praćenje i eksploatacija signala neprekidno zahteva razvoj i nabavku novih ili modifikaciju postojećih izviđačkih prijemnika i analizatora. Koncept softverskog radija dozvoljava znatno brži razvoj i modifikaciju postojećih, a često eliminiše potrebu za nabavkom novih sredstava. Suština je u promeni programa (softvera) koji određuje funkciju prijem-

nika. Na primer, ako je cilj razvoj algoritama za prijem novog tipa modulacije ili kodovanja signala problem se može rešiti na više načina:

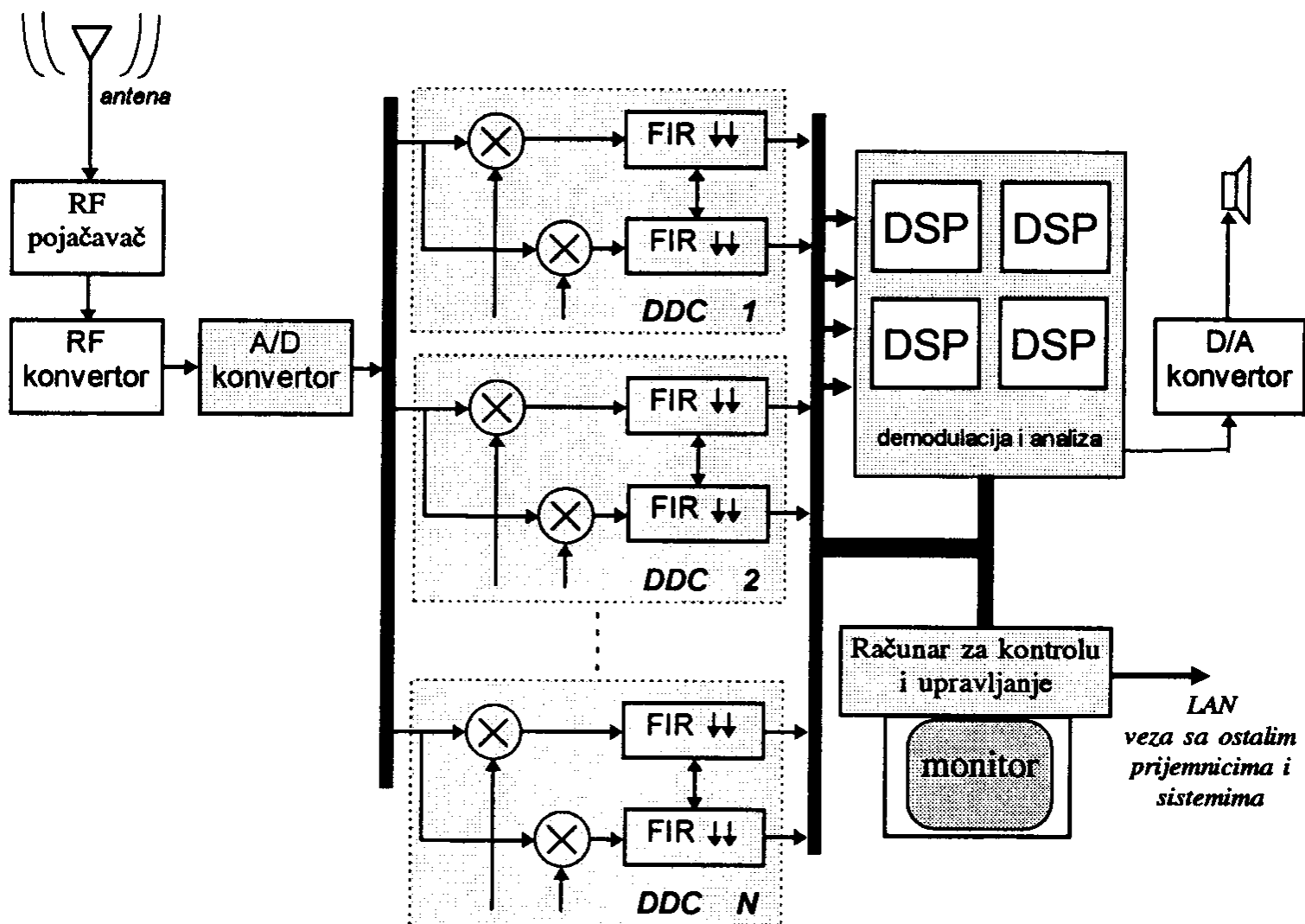
1. razvojem kompletno novog prijemnika,
2. razvojem novog demodulatora, ako postojeći prijemnik omogućava prijem signala odgovarajućeg frekventijskog opsega,
3. primenom digitalne obrade signala na razvojnoj DSP ploči, a zatim učitavanje razvijenog programa u memoriju softverskog prijemnika.

¹ MIPS je oznaka za milion instrukcija u sekundi, dok je MFLOP kod procesora sa pokretnim zarezom oznaka za milion operacija sa pokretnim zarezom (Floating point Operations) u sekundi.

Za prva dva načina potrebno je znatno više vremena, a nivo tehnologije treba da omogući razvoj i izradu hardverskih sklopova. Treći način podrazumeva primenu softverskog prijemnika kao osnove na kojoj se, izmenom softvera, dobijaju nova, za izmenjenu situaciju u elektromagnetskom spektru, pogodna rešenja. Osnovni preduslov za uspešan razvoj trećim načinom jeste znanje iz oblasti digitalne obrade signala. Troškovi opreme i re-promaterijala svedeni su na materijalna sredstva potrebna za nabavku razvojnog okruženja i DSP (razvojne) ploče.

Na slici 4 prikazana je blok-šema višekanalnog izviđačkog prijemnika realizovanog tehnologijama softverskog

radija. RF signal sa antene se pojačava i konvertuje u opseg uslovljen brzinom A/D konvertora,² Širokopolasni signal na izlazu A/D konvertora u digitalnom obliku, preko zajedničke magistrale, vodi se na ulaz banke digitalnih konvertora frekvencije. Svakom DDC računom se zadaju koeficijenti³ niskopropusnih filtera, faktor decimacije i frekvencija DDS. Time se zadaje segment frekvencija koji se na njihovom izlazu dobija u kompleksnom obliku. Izlazi banke DDC mogu se posmatrati kao niz frekvencijskih kanala koji se paralelno transliraju u osnovni opseg. Dalja obrada odvija se u procesorima signala prema zadatom algoritmu.



Sl. 4 — Blok-šema višekanalnog softverskog izviđačkog prijemnika

² Prema Nikvistovom (Nyquist) kriterijumu frekvencija odabiranja A/D konvertora mora biti najmanje dva puta viša od najviše frekvencijske komponente signala koji se odabira. U praksi se uzima da frekvencija odabiranja bude 2,6 do 5 puta veća od frekvencije signala.

³ Koeficijentima FIR filtera zadaje se njegov impulsni odziv, a time i propusni opseg. Od dužine filtera (broja koeficijenata) zavisi kvalitet karakteristike digitalnog filtera u propusnom i nepropusnom opsegu.

Funkcije softverskog prijemnika mogu biti unapred razvijene prema zadatku i konkretnoj situaciji, i iz računara prosleđene programabilnim sklopovima. Novi algoritmi, još u fazi testiranja, mogu se proveravati u realnim uslovima protivelektronske borbe. Računar, pored upravljanja prijemnikom, obavlja komunikaciju sa drugim sistemima putem modema, lokalne mreže, komunikacionog linka i sl.

Prednosti softverskog prijemnika u odnosu na klasičan superheterodinski izviđački prijemnik su sledeće:

- programabilnost MF filtera; banka fabrički projektovanih MF filtera sada je zamenjena FIR filterom u DDC čiji se koeficijenti mogu jednostavno menjati učitavanjem iz memorije,
- veći broj demodulatorskih funkcija i njihova implementacija u formi programskih dodataka,
- skraćeno vreme od analize do prijema i eksploatacije signala,
- brža implementacija i provera novih algoritama obrade signala,

— povećane mogućnosti automatske identifikacije,

— implementacija funkcija za prepoznavanje modulacije i kodovanja signala,

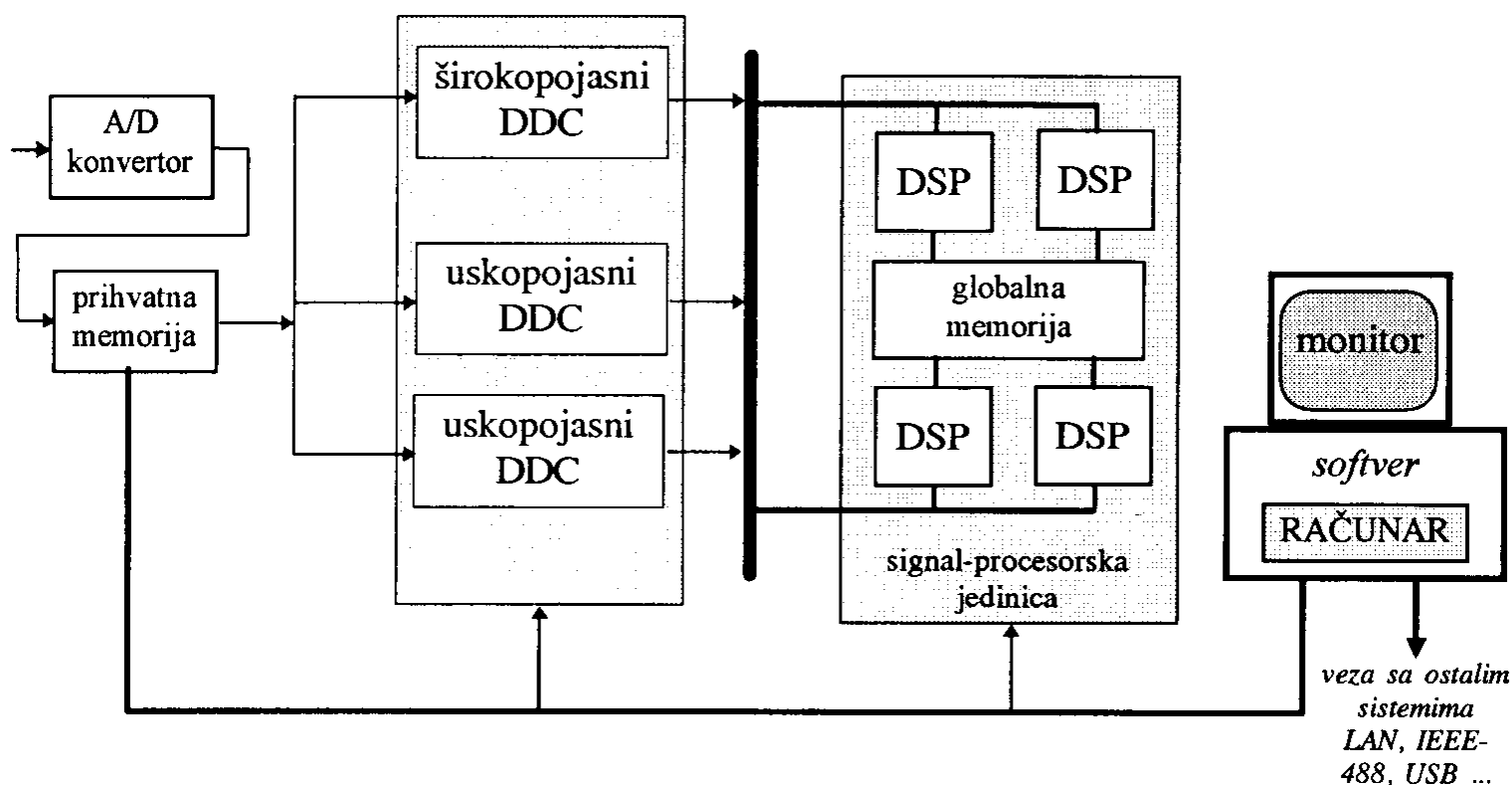
— veći broj analizatorskih funkcija (spektralna analiza, konstelacioni dijagrami) ugrađen je u sam prijemnik,

— bolja veza sa računarom i drugim prijemnicima u sistemu.

Tipični predstavnici softverskih prijemnika, namenjeni za izviđanje komunikacionih sistema, prema dostupnoj literaturi su: TRC-8025 proizvođača THOMSON-CSF, E-2000 LH/VU/LU i E-2010 LH/VU/LU proizvođača AEG, Collins 95S-1A proizvođača Rockwell.

Jedna od čestih aplikacija softverskog izviđačkog prijemnika jeste otkrivanje i praćenje komunikacija sa frekvencijskim skakanjem (FH-frequency hopping). Na slici 5 prikazana je blok-šema takvog softverskog prijemnika.

Signal-procesorska jedinica, sastavljena od više paralelno povezanih DSP, predstavlja glavni blok ovog prijemnika. Jedan od DSP unutar signal-



Sl. 5 — Blok-šema softverskog izviđačkog prijemnika za otkrivanje i praćenje komunikacija sa frekvencijskim skakanjem

-procesorske jedinice određuje amplitudni spektar (FFT) širokopolasnog signala. Upoređenjem spektralnih komponenti između sukcesivnih rezultata analize, drugi DSP određuje frekvenciju na kojoj je došlo do skoka predajnika izviđanog uređaja. Upravljanje sa dva uskopolasna DDC obavlja treći DSP i njihovu frekvenciju podešava prema rezultatima analize drugog procesora. Time je ostvareno praćenje predajnika sa frekvencijskim skakanjem. Podatak o trenutnoj frekvenciji može se proslediti ometaču ili beležiti u memoriju računara.

Da bi se ostvarilo praćenje celokupne komunikacije i omogućila eksploatacija signala, četvrti DSP procenjuje kašnjenje koje nastaje prilikom obrade i vrši korekciju pokazivača trenutnog odbirka unutar prihvatne memorije. Uskopolasni DDC tako dobija odbirke signala od početka emitovanja predajnika na trenutnoj frekvenciji. Ovakav prijemnik ima zadovoljavajuće karakteristike kada se prati jedan predajnik sa frekvencijskim skakanjem. Međutim, kada se u neposrednom okruženju pojavljuje mreža sinhronizovanih FH predajnika javlja se problem identifikacije pojedinačnog skoka. Drugim rečima, prijemnik ne može od više skokova koji se detektuju u jednom trenutku odabrati onaj koji odgovara željenoj stanici. Da bi se i ovaj problem otklonio prethodna šema realizuje se u višekanalnoj varijanti. Time se dobija mogućnost prostorne obrade signala i određivanja pravca izvora zračenja, odnosno, izviđačkom prijemniku se dodaje mogućnost goniometrisanja i prostornog selektovanja (filtriranja) signala.

Primena softverskog prijemnika u sistemima veze

Nekada su vojni radio-uređaji razvijani za period eksploatacije od 30 godina, a funkcije su im bile optimizirane za specifičnu oblast primene. To je primarno bilo uslovljeno spo-

rom evolucijom tehnologije. Današnja komercijalna primena radio-uređaja, pre svega ogromna ekspanzija mobilne telefonije, dovela je do znatnog skraćanja veka komponenti. Takvi trendovi zahtevaju od proizvođača da znatno skрати vreme od puštanja jedne do pojave druge generacije uređaja.

Osnovna dilema koja se danas javlja pri primeni radio-uređaja u vojne svrhe jeste — kako zaštititi komunikaciju od protivelektronskih dejstava i ujedno ostvariti globalnu podršku i kompatibilnost različitih jedinica i snaga. Važno pitanje jeste i kako pratiti rapidne promene u tehnologiji i nauci, a smanjiti budžet na razumnu meru. Pred sličnim dilemama našlo se i američko ministarstvo odbrane pred projektom prvog vojnog softverskog radio-uređaja »Speakeasy«.

Projekat »Speakeasy« započeo je 1990. godine, a prva faza završena je avgusta 1994. [3]. Tada su demonstrirane mogućnosti prvog vojnog softverskog radija. Uređaj je realizovan tako da može emulirati prethodne generacije radio-uređaja: KT modem prema standardu MIL-STD-188-110A, KT frekvencijsko skakanje sa prenosom govora i podataka (STAJ), klasična KT komunikacija (PACER BOUNCE), VKT frekvencijsko skakanje sa prenosom govora i podataka (SINCGARS), UKT frekvencijsko skakanje sa prenosom govora i podataka (HAVE-QUICK I/II).

Druga faza projekta »Speakeasy« započeta je 1995. godine, a predviđeno je da se skup funkcija proširi dodatnim standardima [3], kao što su:

— bežični pristup lokalnoj računarskoj mreži (WLAN) u L-opsegu sa paketskim prenosom podataka;

— prijemnik za globalni pozicioni sistem GPS u L-opsegu;

— povećana brzina prenosa prema standardu SINCGARS SIP u VKT opsegu;

— SATCOM DAMA u UKT opsegu;

— prenosi američkim T1 standardom za digitalni prenos (1,5 Mbit/s);

— celularni mobilni telefonski sistem;

— tehnike LPI (male verovatnoće presretanja).

Još u prvoj generaciji uređaja »Speakeasy« razvijen je programabilni uređaj za zaštitu informacije (INFO-SEC), koji čine dva bloka: COMSEC za kriptozastitu poruke i TRANSEC za zaštitu koja se primenjuje u prenosu signala (sekvenca za frekvencijsko skakanje ili sekvenca za širenje spektra faznom modulacijom DS-SS).

Veliki broj radio-uređaja u vojsci ima svoje specifične modulacione postupke. Softverski radio daje mogućnost da se modulacija čuva kao izdvojen programski modul. Planiranjem operacije planira se i skup softverskih modula koji će se u uređajima aktivirati. Program može aktivirati (učitavati, engl. download) korisnik i to za ograničen zajednički skup modova softverskog radija ili ovlašćeno lice za prošireni skup.

Literatura:

- [1] Mitola J.: The Software Radio Architecture, IEEE Communication magazine, May 1995, pp. 26—38.
- [2] Baines R.: The DSP Bottleneck, IEEE Communication magazine, May 1995, pp. 46—54.
- [3] Lackey R. J., Upmal D. W., Speakeasy: The Military Software Radio, IEEE Communication magazine, May 1995, pp. 56—61.

Zaključak

Sa trenutnim nivoom tehnološkog napretka u oblasti A/D i D/A konvertora, i sve većim brzinama digitalnih signal-procesorskih čipova, moguće je znatno unaprediti postojeće vojne radio-uređaje, kao i prijemnike za izviđanje komunikacionih sistema. Životni vek komunikacionog sredstva i izviđačkog prijemnika arhitekturom softverskog radija znatno se povećava, a da bi se ostvarila nova funkcija uređaja potrebna je samo promena programa na postojećem hardveru.

Osnovni preduslov za uspešan razvoj jeste znanje iz oblasti digitalne obrade signala, a vreme od pojave novog algoritma u teoriji do njegove implementacije u uređaju znatno je kraće.

- [4] Kostić Z., Seetharaman S.: Digital Signal Processors in Cellular Radio Communications, IEEE Communication magazine, Decembar 1997, pp. 22—35.
- [5] Worthman E., Digital Radio: implementation and application, RF design, april 1998, pp. 55—65.