

# Vektorska analiza telekomunikacionih signala na bazi PC računara

Petar M. Marković, Vujo R. Drndarević, Nenad J. Jevtić, Dragutin J. Kostić

**Sadržaj** — U radu je dat pregled mogućnosti za realizaciju sistema za spektralnu analizu telekomunikacionih signala na bazi PC računara. Posebna pažnja posvećena je vektorskoj analizi signala. Predloženo je PC bazirano hardversko i softversko rešenje jednostavnog vektorskog spektralnog analizatora. Realizovani sistem ima 8 ulaznih kanala. Gornja granična učestanost ulaznih signala je 200kHz. Maksimalna rezolucija koja se može postići je reda 1Hz. Na kraju rada su dati rezultati analize frekvencijski modulisanog signala.

**Gljučne reči** — Vektorska analiza signala, frekvencijski spektar, FFT, personalni računar, merenja.

## I. UVOD

POSTUPCI projektovanja i testiranja većine telekomunikacionih uređaja i sistema zasnivaju se na analizi signala u frekventnom domenu. Za frekvencijsku analizu telekomunikacionih signala tradicionalno se koriste analogni spektralni analizatori. U novije vreme analogni analizatori su zamenjeni digitalnim uređajima koji se baziraju na izračunavanju spektra signala korišćenjem brze Fourierove transformacije (FFT) i digitalnih procesora signala. Međutim, u savremenim telekomunikacionim sistemima, a posebno kod bežičnih sistema za prenos, tradicionalna analiza spektra nije dovoljna. Nedostaci ovog pristupa nabolje su vidljivi kod signala čiji se frekvencijski sadržaj brzo menja u vremenu. Vektorski analizatori spektra omogućavaju precizniju i potpuniju analizu telekomunikacionih signala i sistema posebno vektorski modulisanih signala, sistema sa vremenskim multipleksom, sistema sa frekvencijskim skakanjem i drugih.

U delu II dat je pregled principa rada i mogućnosti za realizaciju PC baziranih digitalnih spektralnih analizatora signala. Treći deo je posvećen teorijskim osnovama vektorske analize signala, dok se četvrti deo odnosi na mogućnosti za realizaciju vektorskog analizatora. U delu V prezentovani su rezultati testiranja rada spektralnog analizatora. U zaključku ovog rada analizirane su mogućnosti primene i ograničenja realizovanog vektorskog analizatora.

P. M. Marković, Saobraćajni fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-11-3091377; e-mail: [p.markovic@sf.bg.ac.yu](mailto:p.markovic@sf.bg.ac.yu)).

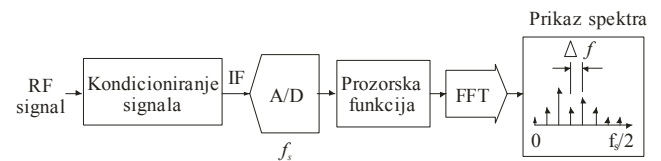
V. R. Drndarević, Saobraćajni fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-11-3091326; e-mail: [v.drndarevic@sf.bg.ac.yu](mailto:v.drndarevic@sf.bg.ac.yu)).

N. J. Jevtić, Saobraćajni fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-11-3091377; e-mail: [n.jevtic@sf.bg.ac.yu](mailto:n.jevtic@sf.bg.ac.yu)).

D. J. Kostić, Saobraćajni fakultet u Beogradu, Srbija (telefon: 381-11-3091268; e-mail: [d.kostic@sf.bg.ac.yu](mailto:d.kostic@sf.bg.ac.yu)).

## II. SISTEMI ZA SPEKTRALNU ANALIZU SIGNALA

Sa razvojem tehnologije digitalnih procesora signala analogni superheterodinski spektralni analizatori zamenjeni su digitalnim koji rade na principu izračunavanja brze Fourierove transformacije (FFT). Principna blok šema digitalnog spektralnog analizatora prikazana je na Sl. 1. Po prijemu RF signala, potrebno je izvršiti kondicioniranje: otklanjanje neželjene DC komponente signala, pojačanje ili slabljenje signala, pomeranje u IF opseg učestanosti i otklanjanje visokih učestanosti (*antialias* filtriranje). Pripremljeni signal se dalje vdi u blok za odabiranje i izračunavanje FFT, a dobijeni spektar prikazuje na odgovarajućem displeju.



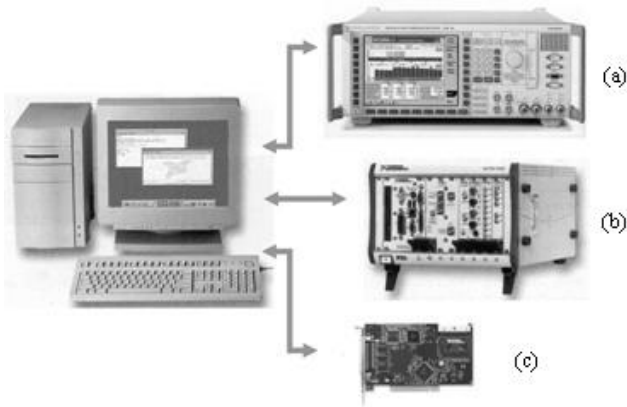
Sl. 1. Blok dijagram spektralnog analizatora na bazi FFT transformacije.

Postoji više mogućnosti da se dođe do mernog sistema pogodnog za analizu spektra telekomunikacionih signala. Na Sl. 2 prikazana su tri načina za realizaciju PC baziranog mernog sistema. Sistemi za automatizovano merenje visokog kvaliteta i velike fleksibilnosti mogu se dobiti povezivanjem programabilnih laboratorijskih ili prenosnih analizatora spektra sa PC računarem. Za povezivanje sa računarem spektralni analizator tipično poseduje standardni *Ethernet*, USB ili IEEE-488 interfejs. Zbog visoke cene kvalitetnih spektralnih analizatora ovakvi merni sistemi pogodni su pre svega za profesionalnu upotrebu.

Spektralni analizator se može realizovati i korišćenjem PXI modularne instrumentacije. PXI instrumentacioni moduli postavljaju se u odgovarajuću šasiju pri čemu jedan od modula najčešće i sam personalni računar. Za realizaciju spektralnog analizatora potreban je i odgovarajući RF modul za kondicioniranje RF signala i akvizicioni modul za odabiranje i snimanje signala. Analiza spektralnog sadržaja snimljenog signala obavlja se u specijalizovanom softveru na PC računaru.

Veoma ekonomičan merni sistem može se ostvariti povezivanjem akvizicione ktrice na PCI magistralu personalnog računara. Kao i kod PXI sistema, spektralna analiza signala obavlja se u softveru na PC računaru.

Ovakvi sistemi mogu se koristiti za analizu signala relativno niskih učestanosti a zbog pristupačne cene pogodni su za edukativnu primenu.



Sl. 2. Realizacija PC baziranog mernog sistema pomoću: (a) spektralnog analizatora, (b) PXI modula i (c) PCI akvizicione kartice.

Različite opcije za realizaciju digitalnog spektralnog analizatora pomoću PC računara opširnije su razmatrane u [1].

### III. VEKTORSKA ANALIZA SIGNALA, KONCEPT I TEORIJSKE OSNOVE

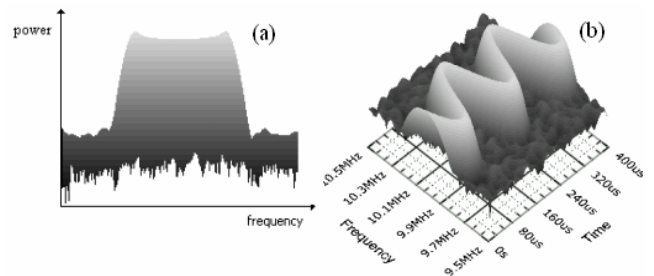
Zahvaljujući razvoju digitalne tehnologije (DSP, FPGA...), savremeni uređaji za analizu signala imaju mogućnost obrade kompleksnih podataka. Diskretna Furijeova transformacija (DFT) je operacija, data jednačinom (1), koja se izvršava nad nizom od  $N$ , u opštem slučaju kompleksnih, vremenskih odbiraka ulaznog signala,  $x[n]$ . Rezultat je frekvencijski spektar,  $X[k]$ , dat u obliku kompleksnog niza od  $N$  odbiraka iz frekventnog domena. Na osnovu toga se dobija informacija o amplitudi i fazi diskretnih spektralnih komponenti ulaznog signala.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (1)$$

Mogućnost obrade kompleksnih podataka daje uređajima za vektorsku analizu signala sposobnost izvođenja raznovrsnijih i preciznijih merenja u odnosu na tradicionalne spektralne analizatore.

Osnovni kvalitet koji vektorski analizatori signala donose u spektralnoj analizi telekomunikacionog signala, odnosi se na izvođenje tzv. *zoom* FFT analize, odnosno analize proizvoljno uskog dela spektra, sa mogućnošću, teorijski, neograničenog povećanja rezolucije spektra u frekventnom domenu.

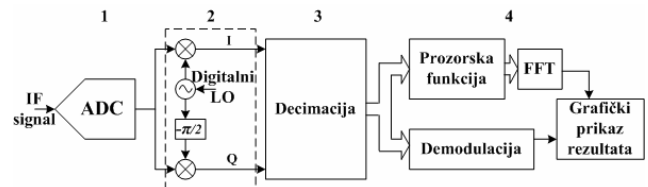
Dalje, od izuzetnog značaja je mogućnost prikaza spektra signala u 3D dijagramu, tzv. spektrogramu, izvođenjem združene vremensko frekventne analize (*Joint Time to Frequency Analysis*). Na Sl. 3 je dat uporedni prikaz izgleda spektra frekvencijski moduliranog signala, kod koga je modulacija izvršena signalom sinusoidalnog talasnog oblika.



Sl. 3. Uporedni prikaz spektra snage FM signala dobijenog primenom (a) spektralnog analizatora, (b) vektorskog analizatora signala.

Polje primene vektorske analize signala, u kome se najbolje vidi njen 'vektorski' karakter, jeste analiza kompleksno (vektorski, ili IQ) moduliranih signala. Međutim, pošto je akcenat rada na spektralnoj analizi, ova tema se dalje neće razmatrati.

Na Sl. 4. je prikazan uprošćeni blok dijagram jednog vektorskog analizatora signala. Konkretno, prikazani su samo blokovi od bitnijeg značaja za proces vektorske analize.



Sl. 4. Pojednostavljeni blok dijagram sistema za vektorsku analizu signala

Na Sl. 4 nije prikazan blok za kondicioniranje RF signala (uporediti sa Sl. 1), jer se njegovo prisustvo podrazumeva u svakom uređaju za analizu RF signala, kao i zbog činjenice da njegova uloga nema direktne veze sa pojmom vektorske analize.

Blok broj 1 je AD konvertor, koji diskretizuje ulazni signal (iz IF opsega) po vremenu i amplitudi. Na Sl. 4 nije prikazan analogni *antialias* filter čije je prisustvo ispred AD konvertora obavezno.

Blok broj 2 predstavlja ključni deo sistema za vektorsku analizu signala. Njegovo prisustvo čini ovu analizu u suštini 'vektorskom'. Ovaj blok ima dvojaku funkciju: za potrebe spektralne analize u njemu se vrši početni korak u *zoom* FFT funkciji, a u procesu vektorske demodulacije, u ovom bloku se izvršava pomeranje IF signala u osnovni opseg (*baseband*) i razdvajanje na komponentu 'u fazi' (I – komponenta) i kvadraturnu komponentu (Q – komponenta). Zbog navedenog, ovaj blok se često naziva *Quadrature detector*, ili *Mixer*.

U bloku broj 2 se, u suštini, izvršava množenje niza realnih odbiraka sa kompleksnom sinusoidom oblika  $e^{-j2\pi f_c t}$ . Na izlazu bloka se dobija kompleksni niz odbiraka iz vremenskog domena koji se sastoji od dve povorke odbiraka, obeleženih na Sl. 4 sa I i Q. Na ovaj način, deo spektra koji se nalazi oko učestanosti  $f_c$  pomera se tako da bude lokalizovan oko nulte učestanosti, što se vidi iz

$$x_{IQ}[n] = x[n] \cdot e^{-j2\pi f_c n T_s}, \quad (2)$$

$$X_{IQ}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] \cdot e^{-j2\pi f_c n T_s}) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = X[k \cdot \frac{f_s}{N} + f_c]. \quad (3)$$

Smisao pomeranja spektra ulaznog signala ka nultoj učestanosti je u pripremi signala za smanjenje učestanosti odabiranja signala, koje se izvodi u sledećem bloku.

Rezolucija spektra u frekventnom domenu data je izrazom  $\Delta f = f_s / N$ , gde je  $f_s$  učestanost odabiranja, a  $N$  broj odbiraka niza nad kojim se izvršava FFT [2]. Poboľšanje rezolucije se može izvršiti povećavanjem broja odbiraka  $N$ . Međutim, povećanjem broja  $N$  produžava se i vreme potrebno za izračunavanje FFT. S obzirom da je rad u realnom vremenu jedna od bitnih karakteristika uređaja za vektorsku analizu signala, povećanje broja odbiraka nije poželjno. Rešenje je u smanjenju učestanosti odabiranja, što se izvodi operacijom decimacije kompleksnog niza odbiraka, koja se izvršava u bloku broj 3 sa Sl. 4.

U bloku broj 4 izvodi se FFT, a nakon množenja kompleksnog niza iz vremenskog domena sa odgovarajućom prozorskom funkcijom. O ovome više detalja se može naći u [2]. Paralelno sa spektralnom analizom, u ovom koraku se može izvršavati i željeni algoritam za demodulaciju nad I i Q signalima.

#### IV. REALIZACIJA SISTEMA ZA VEKTORSKU ANALIZU SIGNALA

Jedan od načina za realizaciju PC baziranog sistema za vektorsku analizu signala je primena PXI sistema sa modularnom instrumentacijom firme National Instruments [4]. PXI sistem, osim kućišta za module i kontrolera, treba da sadrži RF modul, npr. PXI-5660. Ovaj modul se sastoji od RF-IF konvertora PXI-5600 i modula za digitalizaciju PXI-5620 u kome se odvijaju operacije vektorske analize signala prikazane na Sl.4.

Sistem je moguće realizovati i povezivanjem kartice za digitalizaciju IF signala na PCI magistralu standardnog PC računara. Kartica za digitalizaciju poseduje hardverske elemente neophodne za operaciju vektorske analize signala ali ne poseduje RF-IF konvertor. U tom slučaju opseg učestanosti ulaznog signala ograničen je brzinom rada AD konvertora. Ako se želi analiza RF signala tada se RF-IF konvertor mora posebno dodati. Uz navedena hardverska rešenja National Instruments obezbeđuje i odgovarajući skup programskih funkcija kao podršku za implementaciju sistema za vektorsku analizu signala.

Bitno je napomenuti da su cene navedenih rešenja veoma velike, što je i u skladu sa performansama sistema.

Ovde će biti prikazana jedna jednostavnija i jeftinija izvedba sistema za vektorsku analizu signala.

##### A. Hardverska realizacija

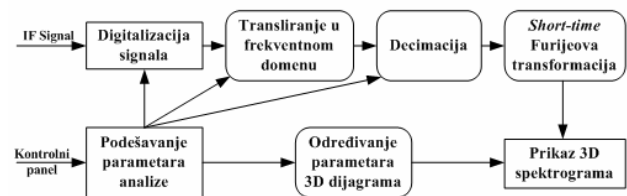
Hardverski deo sistema se sastoji od kućišta PXI-1042Q, kontrolera PXI-8196 (*Pentium based embedded controller for PXI*) i periferne akvizicione kartice PXI-6123, koja se koristi za digitalizaciju signala.

Korišćena DAQ kartica poseduje 8 analognih ulaznih kanala, a svaki od njih sadrži sopstveni 16-bitni AD konvertor maksimalne učestanosti odabiranja 500kS/s. Ona pripada S-seriji PXI akvizicionih kartica, što znači da ima mogućnost simultanog očitavanja vrednosti ulaznih kanala. U korisničkom uputstvu za ovu karticu se sugerise da je pogodna za digitalizaciju IF signala. Maksimalni naponski opseg ulaznih signala je  $\pm 10V$ .

Jasno je da ovaj sistem neće imati mogućnost kondicioniranja signala, niti pomeranja spektra iz RF u IF opseg. Akviziciona kartica se koristi samo za AD konverziju, a ostali koraci u procesu vektorske analize signala, prikazani na Sl. 4, izvode se softverski.

##### B. Softverska realizacija

Aplikacija u kojoj se realizuju dalji koraci vektorske analize signala, načinjena je u programskom paketu LabVIEW 8.2. Blok dijagram softverske realizacije sistema za vektorsku analizu signala prikazan je na Sl. 5.



Sl. 5. Prikaz hardverske realizacije sistema za vektorsku analizu signala

Preko kontrolnog panela, koji predstavlja korisnički interfejs programa za vektorsku analizu signala, zadaju se parametri analize: podaci o opsegu učestanosti koji se analizira (centralna učestanost, širina opsega, rezolucija), podaci o prozorskoj funkciji (širina, tip) i digitalnom *antialias* filtru.

Na osnovu podataka dobijenih od strane korisnika preko kontrolnog panela, određuju se parametri analize signala (blok 'Podešavanje parametara analize') koji se odnose na akviziciju signala i prikaz 3D spektra.

U bloku 'Digitalizacija signala' aplikacija pristupa resursima instalirane akvizicione kartice i zadaje učestanost odabiranja i broj odbiraka koji se analizira i očitava ulazni niz podataka.

Nakon završenog procesa akvizicije zadatog broja odbiraka, digitalizovani ulazni signal se množi sa kompleksnom sinusoidom, učestnosti jednake centralnoj učestanosti frekvencijskog opsega od interesa (blok 'Transliranje u frekventnom domenu'). Ovo je početni korak u izvršavanju *zoom* funkcije koja je detaljnije objašnjena u prethodnom poglavlju.

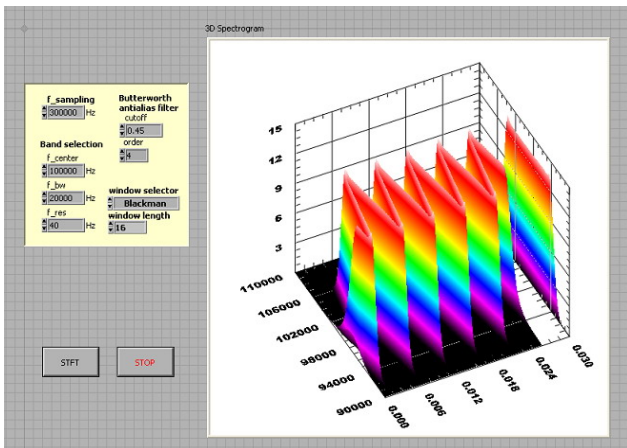
U sledećem bloku ('Decimacija') vrši se odbacivanje suvišnih odbiraka iz niza kompleksnih vremenskih odbiraka, tj. dobija se digitalizovani signal niže učestanosti odabiranja. Pre toga je neophodno ograničiti spektar signala na polovinu nove učestanosti odabiranja. To se čini primenom *Butterworth*-ovog *antialias* filtra, čiji se red i granična učestanost mogu podešavati preko korisničkog interfejsa.

Nad novoformiranim nizom se izvršava vremensko-frekventna spektralna analiza korišćenjem gotove, a nešto izmenjene, LabVIEW-ove funkcije STFT (*Short-Time Fourier Transform*) [3]. Izmene koje je trebalo izvršiti kod raspoložive STFT odnose se na omogućavanje obrade kompleksnog (umesto, prvobitno, realnog) ulaznog niza odbiraka iz vremenskog domena. Rezultat funkcije STFT je dvodimenzionalni niz koji opisuje raspodelu energije ulaznog signala u vremensko-frekventnom domenu.

Krajnji rezultat analize je trodimenzionalni prikaz spektra signala. Na  $x$ -osi se nalazi relativno vreme u [s], mereno od starta AD konverzije prvog odbirka ulaznog signala. Na  $y$ -osi je data frekvencija u [Hz], a na  $z$ -osi je snaga signala (Sl. 6).

## V. REZULTATI

Nakon što je načinjena programska aplikacija u LabVIEW-u, izvršeno je testiranje sistema dovođenjem FM signala na ulazni kanal akvizicione kartice. Ovaj tip signala je izabran za testiranje zbog činjenice da je njegov spektar, u opštem slučaju, promenljiv u vremenu.



Sl. 6. Spektar FM signala sa modulišućim signalom u obliku trougaonih impulsa

Na Sl. 6 se vidi rezultat spektralne analize FM signala, sa sledećim parametrima: signal nosilac je sinusoida učestanosti 100kHz, modulišući signal je trougaonog oblika učestanosti 200Hz, maksimalna promena frekvencije nosioca iznosi  $\pm 5$ kHz.

Osnovni parametri analize su: učestanost odabiranja iznosi 300kHz, analizira se opseg učestanosti sa centrom u 100kHz, širinom od 20kHz i rezolucijom od 40Hz.

## VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana realizacija jednog jednostavnog vektorskog analizatora signala. Osim digitalizacije signala, koja se izvršava u PXI akvizicionom modulu, ostali koraci su realizovani softverski u programskom paketu LabVIEW.

Realizovani sistem za vektorsku analizu signala je relativno niske upotrebne vrednosti u praktičnom smilu, ali velike u edukativnom i teorijskom.

Određena ograničenja se ne mogu prevazići:

- Maksimalna rezolucija koja se može postići je reda 1Hz. Pri tome je vreme potrebno za izračunavanje FFT i izvođenje ostalih operacija nad nizovima velikih dimenzija relativno veliko (nekoliko sekundi i duže). Dugačko vreme izračunavanja je posledica činjenice da su svi koraci u postupku analize realizovani softverski, u *Windows* okruženju, za razliku od hardverske implementacije vektorskih analizatora gde se složenija izračunavanja izvršavaju u DSP te je i kašnjenje u računanju spektra signala značajno manje. Gornja učestanost ulaznih signala je ograničena brzinom AD konvertra akvizicione kartice, i u ovom slučaju iznosi oko 200kHz.
- Prikaz 3D spektrograma je jako spor za veće dimenzije (već za red veličine  $10^3$ ) rezultujuće matrice i prilično zavisi od performansi računara na kome se izvodi.

Međutim, postoji prostor za dalje unapređenje ovog sistema, što će biti predmet daljih istraživanja, i to u sledećim detaljima:

- Dodavanje mogućnosti izbora više različitih vrsta digitalnih *antialias* filtara (*Chebyshev*, *Bessel*...), kao i različitih tehnika za izvođenje JTFA (*Gabor Spectrogram*, *Wavelet transform*...).
- Softversko realizovanje novih funkcionalnosti koje pripadaju procesu vektorske analize signala, a odnose se na demodulaciju analognu i digitalno moduliranih signala.

## LITERATURA

- [1] V. Drndarević, D. Kostić, N. Jevtić, *Analiza telekomunikacionih signala i sistema pomoću personalnog računara*, PosTel, Beograd, 2005.
- [2] M. V. Popović, *Digitalna obrada Signala*, Nauka, Beograd, 1997.
- [3] S. Qian, D. Chen, "Joint Time-Frequency Analysis - Methods and Applications", Prentice Hall, 1996
- [4] www.ni.com

## ABSTRACT

A review of some realizations of PC based systems for spectral analysis is presented in the paper. The accent is on vector signal analysis. Practical solution for the hardware and software architecture of a simple vector signal analyzer is offered. The system has 8 inputs, band limited to 200kHz. Spectrum resolution of 1Hz is achieved. The measurement result, derived from vector analysis of a FM signal, is presented in the paper.

## PC BASED VECTOR SIGNAL ANALYSIS

Petar Markovic, Vujo Drndarevic, Nenad Jevtic, Dragutin Kostic