

PRIMENA ALGEBARSKIH RAČUNARSKIH SISTEMA ZA RAZVOJ KOMUNIKACIONIH SISTEMA KOJI SE KORISTE U VAZDUŠNOM SAOBRAĆAJU

Miroslav D. Lutovac¹, Vladimir M. Mladenović²

¹Elektrotehnički fakultet u Beogradu

²Mašinsko – elektrotehnička škola u Paraćinu

Sadržaj: *Značajno povećanje vazdušnog saobraćaja dovodi do porasta radio-komunikacija, pa je potrebno da se efikasnije koristi raspoloživi frekvencijski spektar. Novi telekomunikacioni uređaji treba da budu u skladu sa propisima koji važe u vazdušnom saobraćaju, a nova rešenja treba da omoguće bolje iskorišćenje frekvencijskog opsega kao i povećanje pouzdanosti prenosa informacija. U ovom radu su razmotrene neke mogućnosti realizacije novog telekomunikacionog sistema za potrebe upravljanja i kontrolu vazdušnog saobraćaja. Novi sistem treba da omogući poboljšanje kvaliteta, pouzdanosti i kapaciteta komunikacija u uslovima očekivanog povećanja vazdušnog saobraćaja. Razvoj novih algoritama zasnovanih na digitalnoj obradi signala treba da omogući automatizaciju celog razvojnog puta počev od teorijske postavke do koda koji će biti implementiran u ciljnom hardveru. Na primeru QAM (Quadrature Amplitude Modulation) pokazano je kako se koriste računarski alati i simboličko procesiranje u razvoju i testiranju softverskih rešenja za nove telekomunikacione uređaje kao što je komunikacioni sistem koji se koristi u vazdušnom saobraćaju. Razvojno okruženje je softverski sistem Mathematica, verzija 6, i aplikacioni softverski paket SchematicSolver verzija 2.1.*

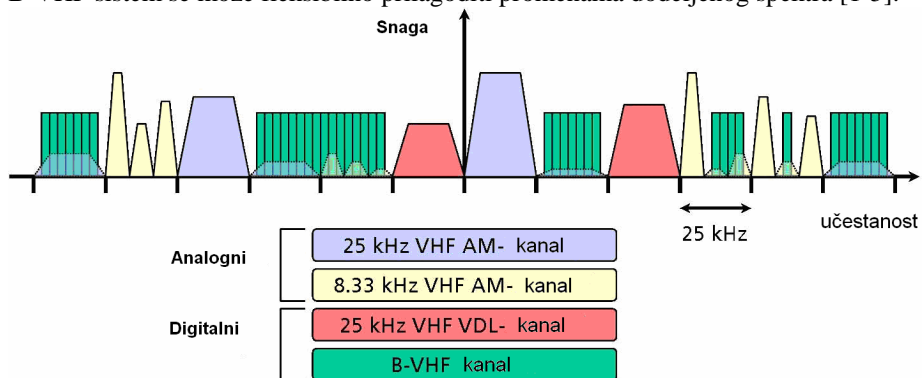
Ključne reči: *Air Traffic, računarski alati, simboličko procesiranje*

1. Uvod

Sistemi za upravljanje i kontrolu vazdušnog saobraćaja (ATM i ATC) zasnivali su se uglavnom na analognim komunikacionim sistema, pre svega na amplitudnoj modulaciji AM-2BO (engleski: DSBAM – Double - Side-Band Amplitude Modulation) u VHF opsegu. Usled dobrih propagacionih uslova u VHF opsegu, i novi komunikacioni sistem treba da radi u ovom frekvencijskom opsegu. Za nove komunikacije u vazdušnom saobraćaju planira se širokopojasni B-VHF sistem (Broadband VHF). B-VHF sistem dizajniran je kao preklapajući sistem zasnovan na ortogonalnoj frekvencijskoj raspodeli OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ovaj sistem može da se realizuje unutar postojećeg VHF sistema, s tim da bude dizajniran tako da se smanji uzajamni

uticaj između kanala.

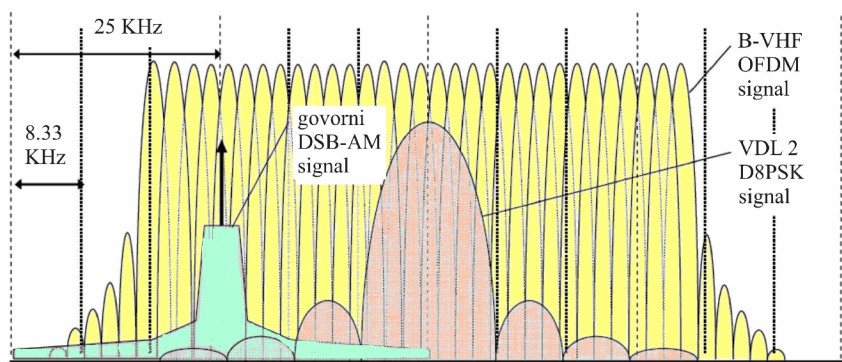
Osnovni koncept B-VHF preklapajućeg sistema prikazan je na slici 1 (modifikovana verzija slike iz [1]). Može se videti da svaki kanal u VHF opsegu zauzima tačno trenutno vreme i tačnu lokaciju. Rezultujući frekvencijski prelazi kod B-VHF sistema su ispunjeni korišćenjem OFDM zasnovani na modulacionim tehnikama pošto su zauzeti kanali isključeni iz OFDM prenosa. Jednostavnom upotrebom OFDM podnosioca B-VHF sistem se može fleksibilno prilagoditi promenama dodeljenog spektra [1-5].



Slika 1. Preklapajući koncept VHF i B-VHF sistema

2. B-VHF i preklapajući koncept kao inovacioni pristup

Analiziran je B-VHF komunikacioni sistem zasnovanih na OFDM MC-CDMA (Multi-Carrier Code-Division Multiple-Access) tehnologiji. B-VHF sistem treba da bude instaliran i korišćen u paraleli sa drugim sistemima u VHF COM opsegu. I operativni i razvojni koncept dozvoljavaju sistemu da bude razvijen i korišćen u VHF COM opsegu, kao i u drugim spektralnim opsezima predviđenim za potrebe komunikacija u vazдушnom saobraćaju.



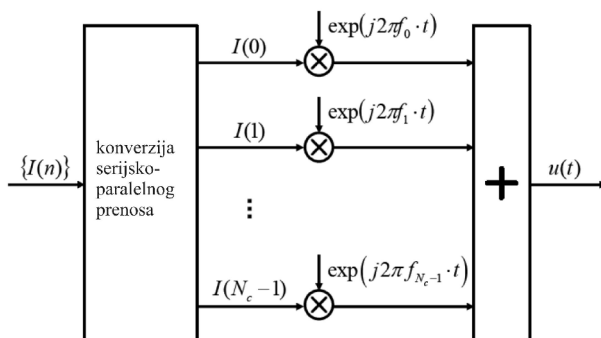
Slika 2. B-VHF opsezi sa različitim modulacijama

Očekuje se da B-VHF sistem može da obezbedi prostor za dovoljan broj odgovarajućih korisnika za projektovane buduće gustine vazдушnog saobraćaja i razmene komunikacionih zahteva. S druge strane, obezbeđivanje većeg broja kanala i servisa treba

da obezbedi bolje performanse u odnosu na VHF sisteme koji su u upotrebi. Na slici 2 je primer korišćenja različitih modulacija u B-VHF sistemu [1].

3. Principi OFDM primenjeni u B-VHF sistemu

Osnovni princip OFDM sistema sa više nosioca je podela jednog serijskog prenosa podataka velikog protoka u veći broj manjih paralelnih protoka koji se prenose simultano u podkanala. Svaki od signala u podkanalima modulisan je sa odgovarajućim podnosiocem. Na slici 3. data je osnovna šema OFDM sistema ([1], report D-06).



Slika 3. Izgled OFDM sistema

Na ulaz modulatora dovodi se niz kompleksnih vrednosti simbola $\{I(n)\}, n = 0, \dots, N_c - 1$ posle serijsko-paralelne konverzije, gde svaki simbol ima trajanje T_s . Takvi simboli su u svakoj grani korišćeni za modulaciju odgovarajućeg nosioca čija je učestanost $f_n, n = 0, \dots, N_c - 1$. Učestanosti nosioca mogu se izračunati na osnovu izraza:

$$f_n = \frac{n}{T_0}, n = 0, \dots, N_c - 1 \quad (1)$$

gde je T_0 trajanje OFDM simbola. Modulisani signali se sabiraju i tako se generiše OFDM signal $u(t)$, koji može da se predstavi izrazom:

$$u(t) = \frac{1}{N_c} \sum_{n=0}^{N_c-1} I(n) \cdot e^{j2\pi f_n t}, 0 \leq t < T \quad (2)$$

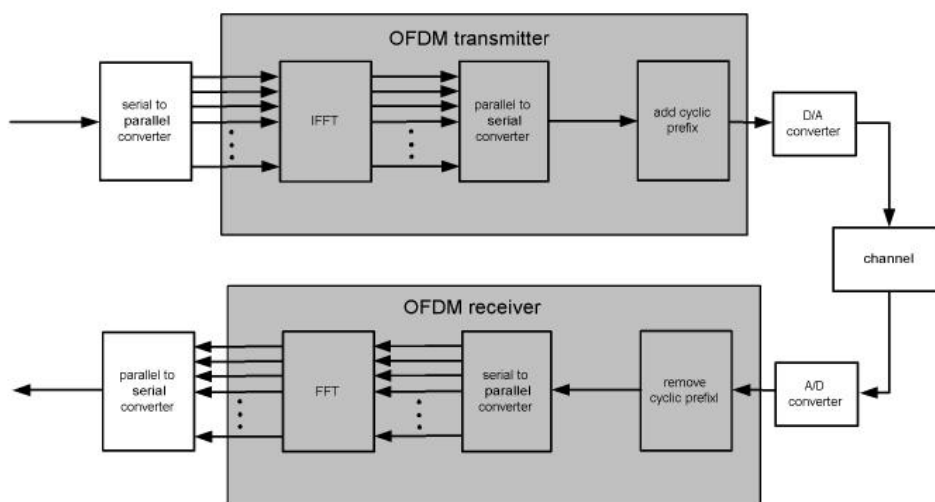
Korist ovakvog sistema ogleda se u tome da u okruženju sa prisutnim fading kanalom, prouzrokovano različitim kašnjenjima, svaki podnosioc može biti posebno analiziran i primenom adaptivnih sistema može se jednostavnije uraditi ekvilizacija kašnjenja. OFDM omogućava da se skoro potpuno izbegne intersimbolska interferencija uvodeđenjem zaštitnog (Guard) intervala na početku svakog OFDM simbola. Ovaj zaštitni interval sadrži ciklični prefiks CP (Cyclic Prefix) OFDM simbola koji može da se koristi za potrebe ekvilizacije, što je efikasnije od korišćenja impulsnog odziva kanala. Prema svojoj konstrukciji CP obezbeđuje da se umanjí uticaj intersimbolske interferencije održavajući ortogonalnost između podnosioca.

Svako rešenje ima svoje dobre karakteristika ali i nedostatke, pa tako i, korišćenje CP ima mane:

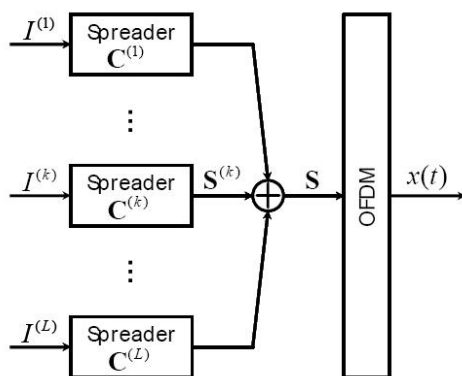
1. ukupno trajanje simbola uključujući CP može biti duže nego maksimalno kašnjenje koje je ograničeno protokom u svakom podnosiocu,

2. energija potrebna za prenos se povećava sa dužinom CP vodeći ka smanjenju odnosa signal/šum.

Na početku OFDM koristi tehniku MC-CDMA. Dok se u OFDM prenosu svaki simbol prenese pojedinačnim podnosiocem, simbol podataka je distribuiran u protoku preko nekoliko podnosioca. Pošto je sada jedan simbol podatak zauzet sa više od jednog podnosioca, protok kroz link se smanjuje. Simboli podataka prenose se preko iste grupe podnosioca.



Slika 4. Blok šema MC prenosnog sistema



Slika 5. Standardni MC-CDMA predajnik

Na slici 4 prikazana je blok šema MC prenosnog sistema, a na slici 5 prikazan je standardni MC-CDMA predajnik [1, 5]. Simboli podataka $I^{(k)}$ svakog korisnika $k = 0, \dots, K$ sa grupom od K korisnika su prvo raspodeljeni kodnim vektorom $C^{(k)}$ dužine L . Nakon raspodele, simbola podataka $I^{(k)}$ podeljen je u L grana. Grane svih korisnika se sabiraju i OFDM modulacija za $N_c = L$ je primenjena u rezultujućem vektoru S .

Interferencija između ovih simbol podataka izbegnuta je korišćenjem principa ortogonalnosti raspodeljenih sekvenci. Ponovnim korišćenjem principa ortogonalnosti, raspodeljene sekvence L korisnika mogu biti prenesene simultano korišćenjem standardnog MC-CDMA sistema.

U praksi su L i K ograničeni složenošću prijemnika i MC-CDMA sistemskim parametrima, kao na primer propusni opseg podnosioca i zaštitni interval.

4. Funkcionalni princip B-VHF

B-VHF integrisani sistem dizajniran je da obezbedi simultanu podršku za skoro sve poznate klase bezbedonosno povezanih komunikacionih servisa uključujući ATM i data link komunikacije. B-VHF je full-duplex sistem zasnovan na vremenskoj raspodeli kanala TDD (Time-Division Duplex). Kada je u pitanju modulacija, kao što je pomenuti B-VHF, sistem koristi OFDM tehniku.

Osnovna prednost B-VHF sistema je što ne koristi susedne grupe podnosioca. Pošto ne moraju da se koriste poznati susedni uskopojasni kanali, omogućeno je da se upravlja sa VHF opsegom, a time se otvara put da se sa B-VHF realizuje novi razvojni koncept. Koncept prekrivanja dozvoljava da, zavisno od trenutne pozicije B-VHF prijemnika, samo deo uskopojasnih VHF kanala bude primljen kao realna interferenca dok će ostali stići sa udaljenog izvora i biće ispod donjeg praga prijemnog šuma.

5. Primena digitalne obrade signala u implementaciji telekomunikacionog sistema

Multirate filtarske banke i Hilbertov transformator mogu da se koriste za implementaciju telekomunikacionih sistema [6]. Efikasnost primene različitih učestanosti odabiranja, u realizaciji pojedinih delova sistema, omogućava da broj računskih operacija u jedinici vremena bude minimalan. Za razliku od klasične digitalne obrade signala, gde su vrednosti odbiraka i koeficijenti realni, filtarske banke mogu da imaju kompleksne koeficijente, a i vrednosti signala su najčešće kompleksni [6]. Prednost korišćenja Hilbertovog transformatora u realizaciji modulatora i demodulatora za QAM sistem prikazana je u [7]. Za realizaciju novog telekomunikacionog sistema mogu da se koriste klasični računarski alati, kao što je MATLAB, ali i alata zasnovanih na simboličkim računarskim sistemima [8]. Funkcionalno definisani blokovi omogućavaju da se izvedu relacije između ulaznih i izlaznih signala nekog sistema u zatvorenoj formi, a ne samo kao rezultat numeričke simulacije. To važi i za adaptivne sisteme [8] koji se neizbežno koriste u radio sistemima.

6. Mathematica kao razvojno okruženje

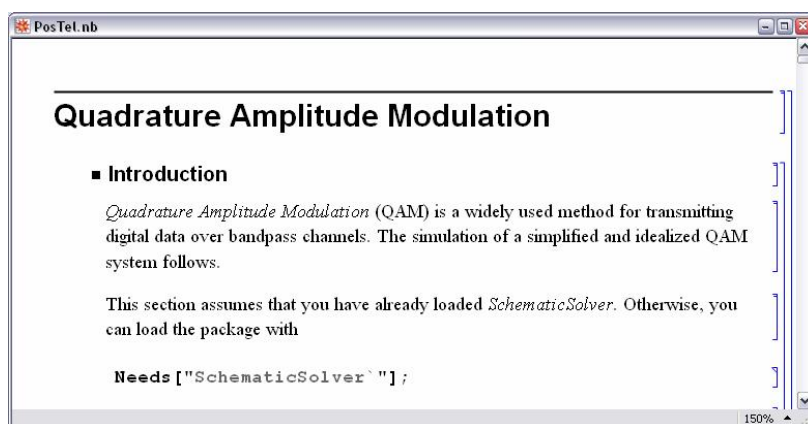
Softverski paketi Mathematica [9] i MATLAB [10] mogu da se koriste kao razvojno okruženje za projektovanje, implementaciju i testiranje algoritama potrebnih za realizaciju telekomunikacionih uređaja. Detaljan opis mogućnosti softvera Mathematica kao algebarskog računarskog sistema dati su u radu [11]. Sredinom 2007 godine, na tržištu se pojavila nova verzija softvera Mathematica koja je omogućila dodatne pogodnosti za razvoj algoritama. Neke od važnijih osobina su mogućnost generisanja dinamičkog objekta tako da je moguće posmatrati grafike koji menjaju oblik u realnom vremenu kako se menjaju parametri sistema. Uz značajno poboljšanje numeričkih karakteristika, pre svega u brzini rada, kao i korišćenje boje za označavanje funkcija i

promenljivih, i uz bogat grafički korisnički interfejs, razvojno okruženje obezbeđuje visok komfor i jednostavniju vizuelizaciju algoritma.

Istovremeno sa pojavom nove verzije softvera *Mathematica*, i aplikativni softver *SchematicSolver* je značajno poboljšao svoje karakteristike. Neke od specijalnih funkcija koje su korišćene u prethodnoj verziji sada su ugrađene u kernel tako da je i rad u softveru *SchematicSolver* postao bogatiji i komforniji.

7. SchematicSolver – softver za interaktivni razvoj algoritama

Kompletna rad u razvoju algoritma odvija se u elektronskom dokumentu koji sadrži tekstualni opis, formule, kod, rezultate procesiranja i grafike i slike za vizuelizaciju. Elektronski dokument može da bude formatiran u proizvoljnoj formi, na primer kao poslovni izveštaj ili rad za konferenciju, tako da se istovremeno sa razvojem algoritma generiše i sva prateća dokumentacija (videti kao primer sliku 6).



Slika 6. Primer dokumenta koji sadri tekstuelni opis i kod

Kada se otvori dokument u kome se razvija algoritam, Mathematica učitava osnovno znanje i omogućava rad sa ugrađenim funkcijama. Ako je potrebno da se učitava dodatno znanje, koje se nalazi u ranije pripremljenim fajlovima, ili kao dodatna aplikacija, tada se najpre mora učitati dodatno znanje iz aplikativnog softvera. Na primer, aktiviranjem komande **Needs["SchematicSolver`"]** učitava se potrebno znanje.

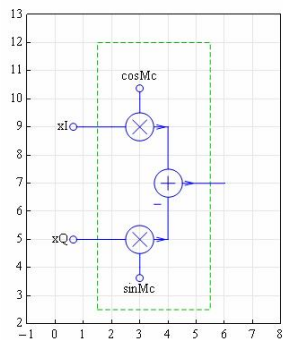
Algoritme je najlakše opisati grafički, tako što se nacrtaju blok šema u kojoj se svaka instrukcija može predstaviti svojim grafičkim elementom. Na primer, modulator za QAM se može predstaviti tekstuelnim zapisom kao na slici 7. Pojedini delovi sistema mogu biti posebno nacrtani korišćenjem grafičkog interfejsa ili mogu da se učitaju iz baze predefinisanih šema. Svaki sistem se predstavlja kao lista elemenata. Složeni sistemi se generišu povezivanjem manjih sistema tako što se od više lista pod-sistema napravi jedinstvena lista. Na primer, Na osnovu nacrtanih sistema **modulatorQAM** i **receiver1**, i uz dodavanje predefinisane liste koja sadrži opis filtra propusnika niskih učestanosti, **lowPassFilter**, dobija se složeniji sistem nacrtan na slici 8.

```
idealSystemQAM = Join[
  modulatorQAM,
  receiver1,
```

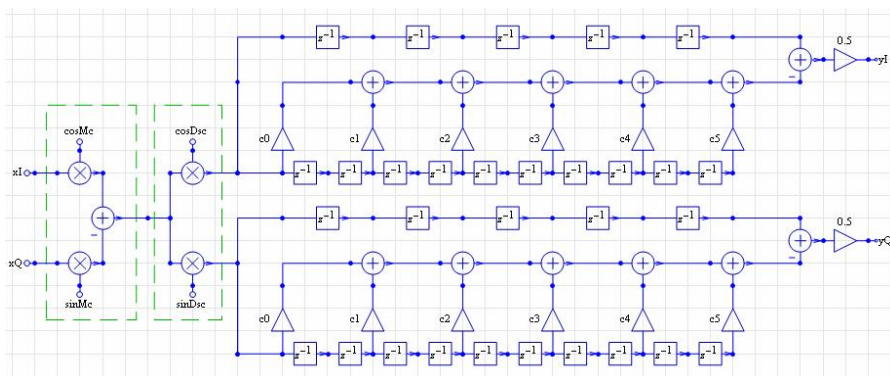
```

TranslateSchematic[lowPassFilter /. Y -> "yQ", {8, -5}],
TranslateSchematic[lowPassFilter /. Y -> "yI", {8, 3}]
];
modulatorQAM =
  {"Polyline", {{1.5, 2.5}, {5.5, 2.5}, {5.5, 12}, {1.5, 12}, {1.5, 2.5}},
   PlotStyle -> {{RGBColor[0, 1, 0]}, {RGBColor[0, .7, 0]}}},
  {"Modulator", {{2, 5}, {3, 4}, {4, 5}, {3, 6}}, {1, 1, 2, 0}},
  {"Modulator", {{2, 9}, {3, 8}, {4, 9}, {3, 10}}, {1, 0, 2, 1}},
  {"Adder", {{3, 7}, {4, 5}, {6, 7}, {4, 9}}, {0, -1, 2, 1}, ""},
  {"Line", {{1, 9}, {2, 9}}, {"Line", {{1, 5}, {2, 5}}, {"Input", {1, 5}, xQ},
  {"Input", {1, 9}, xI}, {"Input", {3, 4}, sinMc, "", TextOffset -> {0, 1}},
  {"Input", {3, 10}, cosMc, "", TextOffset -> {0, -1}}};

```



Slika 7. Primer generisanja sistema



Slika 8. Primer generisanja složenog sistema

Važno je uočiti da opis sistema sadrži samo imena promenljivih, a da su koeficijenti filtra takođe definisani samo kao simboli. Ovo je značajno zato što se algoritam rada nekog uređaja ili programa opisuje imenima promenljivih koja ne moraju biti poznata pre samog testiranja algoritma.

Nakon crtanja blok šeme sistema, potrebno je generisati kod koji radi upravo to što je i nacrtano. Kod se generiše automatski pozivom komande `DiscreteSystemImplementation[idealSystemQAM, "implementationQAM"]`; koja analizira listu koja opisuje sistem i istovremeno generiše uputstvo za upotrebu generisane funkcije `implementationQAM`, kao što je pokazano na slici 9.

Implementation procedure name: implementationQAM

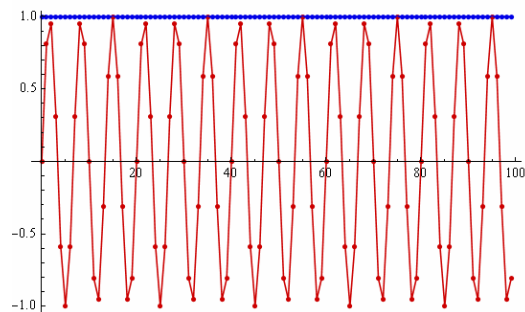
Implementation procedure usage:

```
{(Y38p6, Y38p14), (Y10p1, Y14p1, Y10p1, Y16p1, Y18p1, Y16p7, Y20p1, Y22p1, Y20p7, Y24p1, Y26p1, Y24p7, Y28p1, Y30p1, Y28p7, Y10p9, Y14p9, Y10p9, Y16p9, Y18p9, Y16p15, Y20p9, Y22p9, Y20p15, Y24p9, Y26p9, Y24p15, Y28p9, Y30p9, Y28p15)} = implementationQAM[(Y1p5, Y1p9, Y3p4, Y3p10, Y8p4, Y8p10), (Y14p1, Y16p1, Y16p7, Y18p1, Y20p1, Y20p7, Y22p1, Y24p1, Y24p7, Y26p1, Y28p1, Y28p7, Y30p1, Y32p1, Y35p7, Y14p9, Y16p9, Y16p15, Y18p9, Y20p9, Y20p15, Y22p9, Y24p9, Y24p15, Y26p9, Y28p9, Y28p15, Y30p9, Y32p9, Y35p15), (c0, c1, c2, c3, c4, c5)] is the template for calling the procedure. The general template is [outputSamples, finalConditions] = procedureName[inputSamples, initialConditions, systemParameters]. See also: DiscreteSystemImplementationProcessing
```

Slika 9. Automatizovano generisanje koda i uputstva za upotrebu

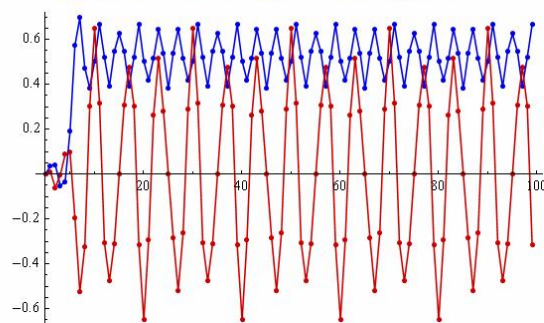
Ne samo da nije potrebno da programer koduje algoritam koji je dobijen crtanjem blok šeme, već se automatski generiše i uputstvo kako se koristi tek napravljena funkcija (slično uputstvu koje se dobija u MATLAB-u kada se pozove komanda help).

```
numberOfSamples = 100;  
Fs = 8000;  
Fy = 2400 / 2; xI = UnitSineSequence[numberOfSamples, Fy / Fs];  
xQ = UnitStepSequence[numberOfSamples];  
QIsequence = MultiplexSequence[xQ, xI];
```



Slika 10. Generisanje pobudnih signala

```
In[102]= {outputSequence, finalConditions} =  
DiscreteSystemImplementationProcessing[inputSequence, initialConditions,  
systemParameters, implementationQAM];
```



Slika 11. Prikaz signala nakon procesiranja

Za testiranje rada nekog algoritma i crtanje odziva za poznatu pobudu, neophodno je da se generišu signali kao nizovi brojeva- sekvence. Primer generisanja

pobudnih signala dat je na slici 10. Na osnovu generisanih pobudnih signala, koji se procesiraju automatski generisanim kodom `implementationQAM`, dobija se odziv sistema, kao što je primer na slici 11.

Pre procesiranja urađena je zamena simboličkih vrednosti koeficijenata i parametara kojima su dodeljene brojne vrednosti, na primer:

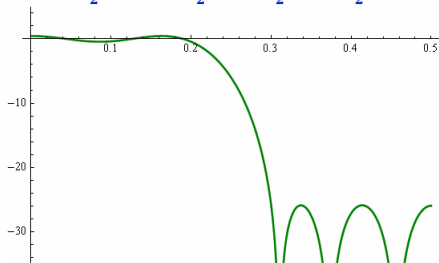
```
parameterValues = {-0.10744, 0.18315, -0.62626, -0.62626, 0.18315, -0.10744};
parameterSubstitution = parameterSymbols -> parameterValues // Thread

Out[77]= {c0 -> -0.10744, c1 -> 0.18315, c2 -> -0.62626,
          c3 -> -0.62626, c4 -> 0.18315, c5 -> -0.10744}
```

Simbolički definisani parametri dobijaju brojne vrednosti tek onda kada je to potrebno, na primer da bi bio nacrtan signal. U fazi analize rada algoritma, jedan ili više parametara može da bude definisan simbolički, tako da se njegova vrednost odredi naknadno, kao rezultat optimizacije.

Klasičan postupak projektovanja odvija se tako da se šema sistema crta programima za crtanje, a sam algoritam se koduje drugim alatima. Mnogi digitalni sistemi procesiraju signal na osnovu nacrtane šeme ali nemaju jednostavnu analizu šeme u frekvencijskom domenu. *SchematicSolver* omogućava da se ista šema, odnosno njen opis kao lista, koriste i za automatsko generisanje implementacionog koda i crtanje frekvencijskog odziva na impulsnu pobudu. Na primer, za jedan od dva filtra sa slike 8, funkcija prenosa se dobija korišćenjem komande date na slici 12.

```
In[127]= {tfMatrix, systemInp, systemOut} =
          DiscreteSystemTransferFunction[filterSubSystem /. parameterSubstitution];
tf = tfMatrix[[1, 1]] // Simplify
```

$$0.05372 + \frac{0.05372}{z^{10}} - \frac{0.091575}{z^8} + \frac{0.31313}{z^6} + \frac{0.5}{z^5} + \frac{0.31313}{z^4} - \frac{0.091575}{z^2}$$


Slika 12. Automatizovano izračunavanje funkcije prenosa

8. Zaključak

U ovom radu su opisani problemi koje se očekuju u razvoju telekomunikacionih sistema za potrebe vazdušnog saobraćaja i kako se razvoj softverskog rešenja testira korišćenjem algebarskih računarskih sistema. Dalji rad biće usmeren ka analizi mogućnosti primene savremenih tehnika digitalne obrade signala, a pre svega sistema sa više različitih učestanosti odabiranja i računarskih algebarskih sistema, u cilju implementacije efikasnih i pouzdanih algoritama obrade signala.

Literatura

- [1] B-VHF consortium, “Broadband VHF Aeronautical Communications System Based on MC-CDMA,” www.b-vhf.org, (2002-2006).

- [2] M. Schnell, E. Haas, C. Rihacek, and M. Sajatovic, "BVHF - An Overlay System Concept for Future ATC Communications in the VHF Band," Proc. 23rd Digital Avionics Systems Conf. (DASC 2004), Salt Lake City, USA, October 2004.
- [3] A. Ginesi and F. Potevin, *OFDM Digital Transmission Techniques for Broadband Satellites*, 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), pp. 1-4, June 2006, San Diego, California.
- [4] P. R. Chevillat, G. Unger Boeck, "Optimum FIR Transmitter and Receiver Filters for Data Transmission over Band-limited Channels", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-20, NO. 8, August 1982.
- [5] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," IEEE Transactions on Communications, Vol. 42, No. 10, pp. 2908-2914, October 1994.
- [6] S. Mitra, "Digital Signal processing: A Computer Based Approach", Chapter 13, Mc Graw Hill, 2006.
- [7] M. Lutovac and D. Tošić, *SchematicSolver* 2.1, online www.schematicsolver.com, <http://www.wolfram.com/products/applications/schematicsolver>,
- [8] M. D. Lutovac and D. V. Tošić, "Symbolic design of control systems using Mathematica", International Journal of Control, Vol. 79, No. 11, pp.1368–1381, Nov. 2006.
- [9] S. Wolfram, "The Mathematica Book", Cambridge: Cambridge University Press, Wolfram Media, 2003.
- [10] C. Moler, and P. J. Costa, "Symbolic Math Toolbox", The Mathworks Inc, Natick, MA 01760-2098, 1996.
- [11] M. D. Lutovac, "Obrada signala i analiza telekomunikacionih sistema korišćenjem algebarskih računarskih sistema", PosTel, str. 167-176, 2005.

Abstract: *The future aeronautical communication system will have to provide more communications capacity and increased capabilities than the existing one. These systems should be able to provide the performance required in the long term. The improvements are necessary to be able to cope with the expected air traffic growth in future. In this paper we deal with the development of new algorithms for the new generation of communication systems based on digital signal processing. The main idea is to automate the design procedure starting from the block diagram of the system and carrying out the implementation code on the target hardware. Role and importance of symbolic computation in communication systems is exemplified on QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Original approach to algorithm development is illustrated using computer algebra system. The development tools are Mathematica version 6, and application software SchematicSolver version 2.1.*

Keywords: *Air Traffic, computer tools, symbolic processing*

**DEVELOPMENT OF AERONAUTICAL
COMMUNICATION SYSTEM
USING COMPUTER ALGEBRA SYSTEMS**
Miroslav D. Lutovac and Vladimir M. Mladenović