

# Procena performansi satelitskog komunikacionog sistema koji koristi tehniku frekvencijskog multipleksa

Hana Stefanović  
Elektronika i Telekomunikacije  
Visoka škola elektrotehnike i računarstva  
Beograd, Srbija  
[stefanovic.hana@yahoo.com](mailto:stefanovic.hana@yahoo.com)

Dejan Milić, Daniela Milović  
Telekomunikacije  
Elektronski fakultet  
Niš, Srbija  
[dejan.milic@elfak.ni.ac.rs](mailto:dejan.milic@elfak.ni.ac.rs), [daniela.milovic@elfak.ni.ac.rs](mailto:daniela.milovic@elfak.ni.ac.rs)

Jelena Nikolić  
Univerzitet Umetnosti  
Beograd, Srbija  
[jjnikol@gmail.com](mailto:jjnikol@gmail.com)

**Sadržaj**—U ovom radu analizirane su performanse satelitskog komunikacionog sistema koji koristi FDMA (FDMA - Frequency Division Multiple Access) tehniku višestrukog pristupa u cilju efikasnijeg dodeljivanja raspoloživih resursa. Kao pokazatelj performansi određena je verovatnoća greške po bitu (BER – Bit Error Rate) u zavisnosti od različitih sistemskih parametara. Posebno je razmotren uticaj nelinearnosti pojačavača velike snage (HPA – High Power Amplifier) na pojavu intermodulacionih izobličenja (IM – Intermodulation Products), kao i uticaj povećanja broja aktivnih korisnika u predloženoj FDMA shemi. U predloženom simulacionom modelu variranje uticaja nelinearnosti pojačavača ostvareno je podešavanjem vrednosti odmaka (back-off) kao nezavisnog parametra, kojim se definiše položaj radne tačke pojačavača satelitskog transpondera u odnosu na zonu zasićenja.

**Ključne reči**—BER performanse, intermodulaciona izobličenja, tehnika frekvencijskog multipleksa, transponder satelitskog sistema

## I. UVOD

Satelitski komunikacioni sistemi (SKS), osim kao podrška i ekstenzija zemaljskim sistemima javne mobilne telefonije, predstavljaju značajan deo globalne transportne telekomunikacione mreže [1-3]. Savremeni SKS sadrže intersatelitske linkove (ISL – Inter-Satellite Links), obezbeđuju globalno pokrivanje, koriste diverzitet, uz podrazumevano procesiranje na satelitu, komutaciju, dinamičku alokaciju kanala, promenljive protoke, tajnost i sigurnost prenosa [4].

LEO (Low Earth Orbit) konstelacija obezbeđuje manja kašnjenja, kao i manja slabljenja signala u poređenju sa GEO (Geosynchronous Earth Orbit) konstelacijom, uz manje troškove lansiranja. Tipično visine LEO orbita iznose oko 1000 km, ali je za globalno pokrivanje potreban veći broj satelita. GEO konstelacija omogućava dinamičko upravljanje zonama pokrivanja, što je jedna od osnovnih prednosti [4-5]. Satelit koji se kreće po geostacionarnoj orbiti uvek je na istoj poziciji u odnosu na korisnika na Zemlji, što omogućava upotrebu

fiksiranih antenskih sistema [6-7], ali su i kašnjenja pri prenosu signala značajno veća nego u slučaju LEO konstelacije.

U cilju efikasnijeg dodeljivanja resursa u SKS se koriste različite tehnike višestrukog pristupa. Problem raspodele raspoloživih resursa se u slučaju satelitskog transpondera svodi na efikasno dodeljivanje delova komunikacionih resursa fiksno dodeljenih transponderu, odnosno velikom broju korisnika koji traže međusobnu komunikaciju posredstvom transpondera, i to sa različitim protocima i ciklusima zauzeća [8-11]. Frekvencijski multipleks (FDMA – Frequency Division Multiple Access) podrazumeva dodeljivanje određenih podopsega frekvencija, vremenski multipleks (TDMA – Time Division Multiple Access) periodično dodeljivanje određenih vremenskih intervala (slotova), kodni multipleks (CDMA – Code Division Multiple Access) dodeljivanje određenih članova iz skupa ortogonalnih sekvenci pri čemu se koristi celi raspoloživi frekvencijski opseg, dok prostorni multipleks SDMA (Space Division Multiple Access) podrazumeva višestruko korišćenje istih frekvencija na različitim pravcima veza, što u SKS implicira upotrebu vrlo usmerenih antena u cilju razdvajanja radio signala okretanjem u različitim smerovima, dok polarizacioni multipleks PDMA (Polarization Division Multiple Access) podrazumeva korišćenje dve ortogonalne polarizacije u cilju razdvajanja signala i dvostrukog iskorišćenja istog frekvencijskog opsega [1-3].

U simulacionom modelu predloženom u ovom radu korišćen je frekvencijski multipleks, uz pretpostavku jednostavnog neregnerativnog repetitora ili transpondera na satelitu. Veliki broj komunikacionih satelita i dalje koristi neregnerativne bent-pipe (pasivne) repetitore koji služe za pojačavanje signala primljenog od strane uplink zemaljske stanice (ZS), zatim frekvencijsko pomeranje (translacija na downlink frekvenciju), i ponovno emitovanje ka zemlji, bez demodulacije i ponovne modulacije, odnosno bez dodatne obrade signala [4-6]. U savremenim SKS koriste se regenerativni transponderi, a u okviru preloženog modela

pretpostavljen je neregenerativni model, zbog jednostavnosti i brzine vršenja simulacionog postupka.

Tipično sateliti imaju 12 transpondera, pri čemu je svakom transponderu dodeljen opseg od 36 MHz, uz podrazumevani zaštitni frekvencijski opseg [2-4]. Delovi spektra dodeljenog transponderu mogu biti dodeljeni različitim korisnicima, pri čemu svaki korisnik prima podatak o određenoj dodeli opsega preko kojeg pristupa transponderu. U predloženom modelu izabrana je FDMA tehnika, zbog razloga jednostavnosti, a obzirom da se ne zahteva sinhronizacija (kao u TDMA), svaki od kanala se praktično može smatrati nezavisnim od drugih kanala.

Kao pokazatelj performansi simulacionim postupkom je određena verovatnoća greške po bitu (BER – Bit Error Rate), u zavisnosti od različitih sistemskih parametara. Uzeti su u obzir gubici u obradi signala u predajniku: filtriranje signala koje ograničava širinu njegovog spektra, zatim intersimbolska interferencija (ISI – Intersymbol Interference) koja je takođe posledica ograničenja spektra signala [1-3].

Intermodulaciona izobličenja, odnosno amplitudsko/fazna konverzija (AM/PM) posledica su nelinearnosti sistema, prvenstveno pojačavača, koji je u predloženom SKS realizovan kao cev sa progresivnim talasom (TWTA – Traveling Wave Tube Amplifier). Kao rezultat ove konverzije javljaju se nove spektralne komponente prenošenog signala [4-5].

U okviru predloženog modela prvenstveno je razmotren uticaj nelinearnosti pojačavača HPA na performanse sistema, kao i povećanje broja aktivnih korisnika u predloženoj FDMA shemi.

## II. MODEL SISTEMA

U okviru predloženog modela korišćena je FDMA tehnika višestrukog pristupa, zasnovana na podeli frekvencijskog opsega na određene podopsege. Pretpostavljeno je da 48 zemaljskih stanica (ZS) šalju podatke ka 8 regionalnih centara, u okviru kojih je predviđeno po 6 kanala koji čine primarnu FDM grupu, kao u [5]. Svakoj ZS dodeljena je određena frekvencija nosioca, dok su nosioci međusobno razdvojeni zaštitnim opsezima od 400 kHz, a razmak između nosilaca iznosi 10 MHz. Podaci o učestanostima nosilaca i opsezima učestanosti koje zauzimaju odgovarajući multipleksni signali, takođe su deo predloženog frekvencijskog plana, i dostupni su svim korisnicima sistema.

U analiziranom SKS korišćena je QPSK konstelacija, dok su za filtriranje korišćeni SQRC (Square root Raised Cosine) filtri. Filtrirani signali se, nakon pojačavanja, šalju uplink-om ka satelitu. Prijem 48 uplink signala vrši se pomoću satelitske single antene, odnosno primljeni signal na satelitu može se predstaviti analitičkim izrazom [5]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{48} a_i(t - \tau_i) \cos(2\pi f_i(t - \tau_i) + \phi(t - \tau_i))$$

$$= \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^{48} a_i(t - \tau_i) \cdot \exp(j\phi(t - \tau_i)) \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau_i) \right. \quad (1)$$

$$\left. \times \exp(j2\pi(f_i - f_0)t) \cdot \exp(j2\pi f_0 t) \right\}$$

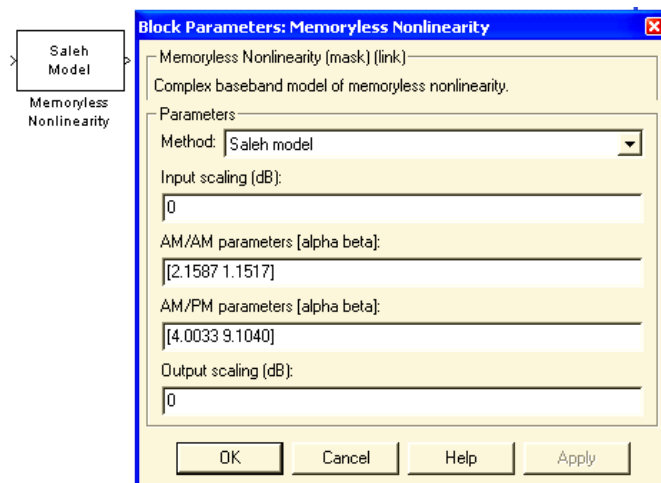
pri čemu je  $f_0$  referentna frekvencija, dok  $\tau_i$  predstavlja propagaciono kašnjenje za  $i$ -tu uplink putanju. Signal u osnovnom opsegu učestanosti, odnosno kompleksna anvelopa signala  $x(t)$ , dat je izrazom:

$$\tilde{x}(t) = \sum_{i=1}^{48} a_i(t - \tau_i) \cdot \exp(j\phi_i(t - \tau_i)) \quad (2)$$

$$\times \exp(-j2\pi f_i \tau_i) \cdot \exp(j2\pi(f_i - f_0)t)$$

Primljeni uplink signali filtrirani su ulaznim filtrima na satelitu i nakon formiranja 8 FDM grupa pojačani upotrebom TWTA pojačavača. Nakon pojačavanja signali se ponovo filtriraju u cilju potiskivanja intermodulacionih produkata, nakon čega se svaka od formiranih grupa nosilaca šalje sa satelita ka regionalnim centrima upotrebom 8 downlink veza.

U cilju što efikasnijeg rada TWTA, nivo odmaka (back-off) se uobičajeno postavlja tako da pojačavač radi u zoni bliskoj zasićenju. U okviru predloženog modela varirane su vrednosti nivoa odmaka, kao pokazatelja koliko je režim rada HPA blizak zoni zasićenja, odnosno kakvi su očekivani efekti AM/PM parazitnih konverzija i intermodulacionih izobličenja. Pri realizaciji HPA korišćen je Saleh model [5], kao što je prikazano na Sl.1, uz mogućnost variranja različitih parametara. Analiziran je slučaj zanemarljivog uticaja nelinearnosti pojačavača (Negligable Nonlinearity) čime se srednja vrednost ulazne snage postavlja na 20 dB ispod nivoa ulazne snage koji prouzrokuje ulazak u zonu zasićenja HPA, kao i slučaj izraženijeg uticaja nelinearnosti pojačavača (Severe Nonlinearity) čime se srednja vrednost ulazne snage postavlja na 5 dB ispod nivoa ulazne snage koji prouzrokuje ulazak u zonu zasićenja HPA, sa dosta izraženim parazitnim konverzijama i intermodulacionim izobličenjima. Uticaj variranja vrednosti odmaka na BER performanse prezentovan je odgovarajućim simulacionim rezultatima.



Slika 1. Realizacija HPA korišćenjem je Saleh modela

Uticaj međukanalne interferencije analiziran je u slučaju manjeg i većeg broja aktivnih korisnika u sistemu. Degradirajući uticaj povećanja broja korisnika na BER performanse prikazan je odgovarajućim simulacionim rezultatima.

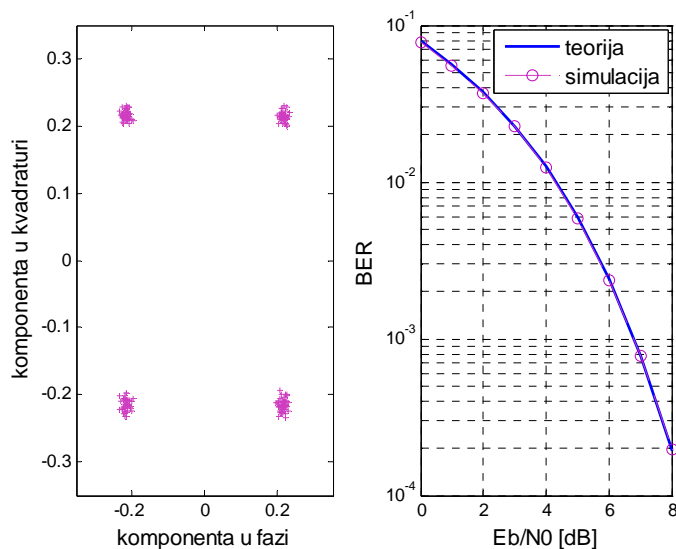
### III. SIMULACIONI REZULTATI

Konstelacioni dijagram i BER performanse sistema za slučaj jednog aktivnog kanala (nosioca) pri radu TWTA u kvazi-linearnom režimu, prikazani su na Sl.2. Ostali nosioci iz selektovane FDM grupe nisu aktivni, što je postignuto postavljanjem amplituda tih nosilaca na vrednost nula tokom simulacionog postupka, usled čega je minimiziran uticaj međukanalne interferencije.

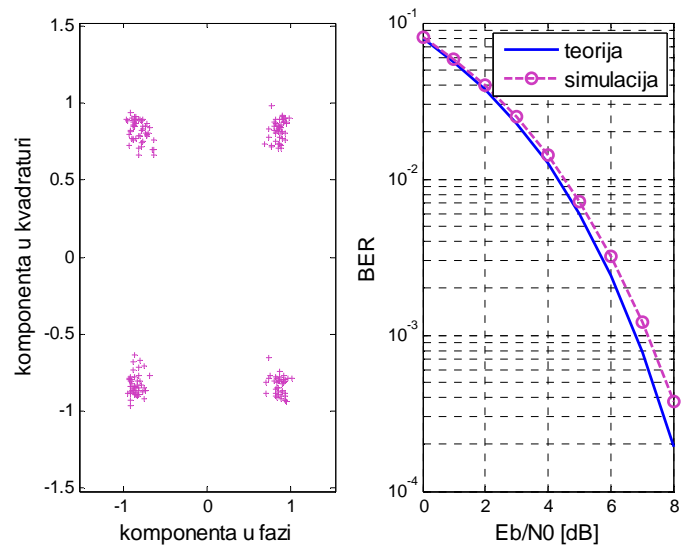
Rad TWTA, realizovanog pomoću Saleh modela [5] u kvazi-linearnom režimu postignut je postavljanjem odnosa na vrednost -20 dB, što implicira minimalan uticaj intermodulacionih produkata. Uticaj ISI takođe je minimalan, a posledica je filtriranja signala. Najizraženiji degradirajući faktor u analiziranom slučaju je aditivni Gausov šum (AWGN – Additive White Gaussian Noise). Na konstelacionom dijagramu (u okviru kojeg nije prezentovan uticaj šuma) uočljivo je rasipanje konstelacionih tačaka u maloj meri, što je posledica delimične nelinearnosti TWTA, kao i minimalnog uticaja ISI, što je prikazano u levom okviru Sl.2. BER performanse ilustrovane su u desnom okviru, uz zanemarljivu razliku između idealizovanog (teorijskog) modela i predloženog modela, što takođe potvrđuje validnost simulacionog postupka.

Konstelacioni dijagram i BER performanse sistema za slučaj jednog aktivnog kanala (nosioca) pri radu TWTA u nelinearnom režimu, prikazani su na Sl.3. Ostali nosioci iz selektovane FDM grupe nisu aktivni, kao u prethodno analiziranom slučaju. Rad TWTA u nelinearnom režimu postignut je postavljanjem odnosa na vrednost -5 dB, što implicira izraženiji uticaj intermodulacionih produkata.

Na konstelacionom dijagramu uočljivo je izraženije rasipanje konstelacionih tačaka, što je posledica nelinearnosti TWTA, što je prikazano u levom okviru Sl.3. BER performanse ilustrovane su u desnom okviru, uz uočljivu razliku između idealizovanog (teorijskog) modela i predloženog modela.



Slika 2. Konstelacioni dijagram i BER performanse u slučaju jednog aktivnog korisnika pri radu TWTA u kvazi-linearnom režimu

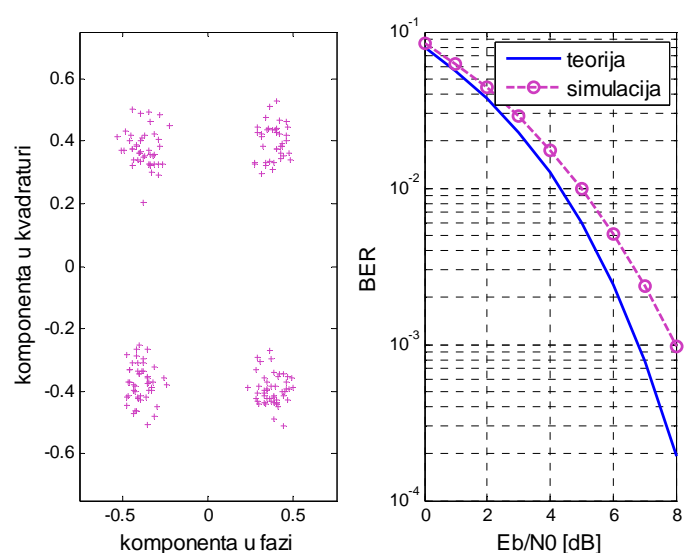


Slika 3. Konstelacioni dijagram i BER performanse u slučaju jednog aktivnog korisnika pri radu TWTA u nelinearnom režimu

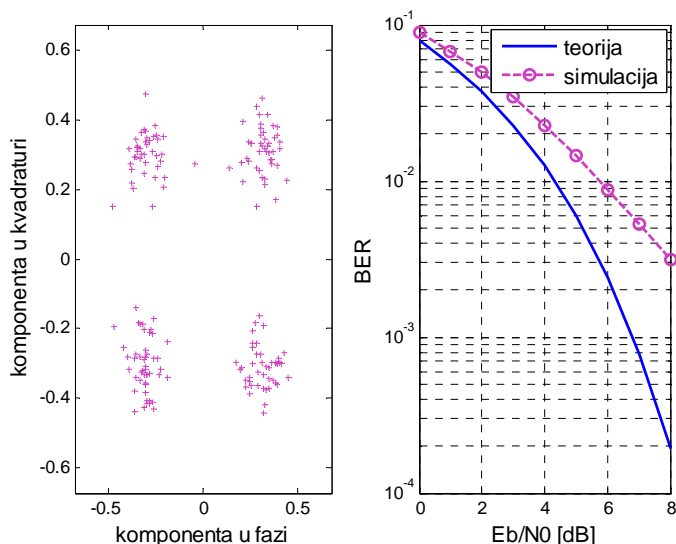
Na Sl.4 i Sl.5. prikazani su konstelacioni dijagrami i BER performanse sistema u slučaju nelinearnog režima rada TWTA, pri povećanju broja aktivnih korisnika u selektovanoj FDM grupi.

Analiziran je slučaj kada su aktivna četiri korisnika, i slučaj kada je aktivno pet korisnika u selektovanoj FDM grupi, što je prikazano na Sl.4. i Sl.5, respektivno. U simulacionom postupku vrednost odnosa postavljena je na -5 dB, što implicira nelinearni režim rada TWTA, kao u prethodno analiziranom slučaju.

Prezentovani rezultati ilustruju degradirajući uticaj međukanalne interferencije na BER performanse sistema, uz uočljivo izraženije rasipanje konstelacionih tačaka, pri fiksnoj vrednosti odnosa, ukoliko se povećava broj korisnika u selektovanoj FDM grupi.



Slika 4. Konstelacioni dijagram i BER performanse u slučaju četiri aktivna korisnika pri radu TWTA u nelinearnom režimu



Slika 5. Konstelacioni dijagram i BER performanse u slučaju pet aktivnih korisnika pri radu TWTA u nelinearnom režimu

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prezentovani su osnovni koncepti upotrebe tehnike frekvencijskog multipleksa u satelitskim komunikacionim sistemima koji koriste neregnerativne satelitske transpondere sa pojačavačima realizovanim kao cev sa progresivnim talasom. Uticaj nelinearnosti pojačavača modelovan je odgovarajućim izborom vrednosti odmaka, kao nezavisnog parametra. Analiziran je uticaj nelinearnosti pojačavača na pojavu intermodulacionih izobličenja i degradaciju BER performansi, kao i uticaj povećanja broja aktivnih korisnika na izgled konstalcionih dijagrama pri upotrebi QPSK modulacionog formata u predloženom satelitskom komunikacionom sistemu koji koristi tehniku frekvencijskog multipleksa.

#### LITERATURA

- [1] J. Proakis, M. Salehi, Digital Communications, 5<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, Boston, 2008.
- [2] M. Dukic, Principi telekomunikacija, Akademska misao, Beograd, 2008.

- [3] T. Pratt, C. Bostian, and J. Allnut, Satellite Communications, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley&Sons Inc., 2003.
- [4] D. Roddy, Satellite Communications, 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, 2006.
- [5] W. Tranter, K. Shanmugan, T. Rappaport, and K. Kosbar, Communication Systems Simulation with Wireless Applications, Prentice Hall, 2004.
- [6] B. Elbert, Introduction to Satellite Communications, 3<sup>rd</sup> ed., Artec House, 2008.
- [7] N. Neskovic, Usmerene radio veze, Akademska misao, Beograd, 2011.
- [8] M. Kolawole, Satellite Communication Engineering, Marcel Dekker Inc., 2002.
- [9] W. Y. C. Lee, Mobile Cellular Communications, McGraw-Hill Book Co., New York, 1989.
- [10] G. L. Stuber, Principles of Mobile Communications, 2<sup>nd</sup> ed, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [11] A. Abdi, C.W. Lau, M.S. Alouini, M. Kaveh: "A New Simple Model for Land Mobile Satellite Channels: First- and Second-Order Statistics", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2(3), pp. 519-528, 2003.

#### ABSTRACT

In this paper some simulation techniques that could be used for satellite communication link design, including modeling an effect of different parameters on the overall system performance are given. In proposed satellite based transponder communication link a nonlinear high power amplifier (HPA) is assumed, while its impact on intermodulation (IM) products is analyzed. Bit-Error-Rate (BER) performance in the downlink is given, including the effect of thermal noise, IM distortion, intersymbol interference (ISI), and adjacent channel interference (ACI) caused by increasing the number of carriers in proposed frequency division multiplexing (FDM) multichannel satellite communication system. QPSK modulation scheme is used and scattering of the signal points in QPSK constellation is also presented for different values of system parameters.

#### PERFORMANCE ANALYSIS OF A MULTICHANNEL SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM EMPLOYING FDMA TECHNIQUE

Hana Stefanovic, Dejan Milic, Daniela Milovic, and Jelena Nikolic