

SOFTVER ZA PROCENU KVALITETA ADSL SERVISA

Bratislav Milovanović, Mladen Ranđelović, Aleksandar Atanasković, Nebojša Dončov
Elektronski fakultet Niš

Sadržaj – U ovom radu je opisan postupak za procenu performansi ADSL servisa. Postupak je baziran na poboljšanom analitičkom modelu koji, uzimajući u obzir skin efekat, efekat upredanja i druge fizičke i elektromagnetske parametre parice, opisuju realno ponašanje njenih primarnih podužnih parametara u frekvencijskom opsegu od interesa. Ovaj model kao i odgovarajući modeli preslušavanja između parica u telefonskom kablju su implementirani u softver, razvijen u MATLAB programskom okruženju, omogućavajući proračun nekih od bitnih karakteristika, kao što su broj bitova po kanalu i kapacitet prenosa, za procenu kvaliteta ADSL servisa. Mogućnosti softvera su ilustrovane na primeru pretplatničke parice koja je bila dostupna poređenjem modelovanih i merenih rezultata.

Ključne reči – ADSL, softver, telefonska parica, kapacitet prenosa.

1. Uvod

U poslednjoj deceniji proteklog veka, sa ekspanzijom Interneta i novih servisa (video na zahtev, video konferencije, učenje na daljinu, interaktivne mrežne igre, radio i TV preko interneta, mrežna kupovina), javila se potreba za širokopoljnim pristupnim tehnologijama koje omogućavaju velike brzine prenosa podataka od i ka krajnjem korisniku usluge. Uzimajući u obzir ogromna ulaganja u izgradnju nove infrastrukturu, logična je bila želja da se razvoj servisa odvija u pravcu iskorišćenja postojeće široko prisutne bakarne infrastrukture. Ovim zahtevima je odgovorila nova xDSL tehnologija.

ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) je najpopularniji i najzastupljeniji DSL servis u svetu za potrebe rezidencijalnih korisnika. ADSL podržava asimetričan servis, sa većom brzinom prenosa od centrale ka korisniku (*downstream*) nego u suprotnom smeru (*upstream*) što se poklapa sa zahtevima najvećeg broja korisnika interneta. ADSL za prenos koristi dva dela frekvencijskog opsega koja su iznad opsega koji se koristi za prenos govornog signala (do 4 kHz). Donji deo frekvencijskog opsega za ADSL prenos se koristi za prenos podataka od korisnika ka centrali, dok je gornji deo

opsega rezervisan za prenos od centrale ka korisniku. Oba opsega su podeljena na frekvencijske kanale širine 4.3125 kHz, kako bi se u okviru kanala spektralne gustine snage signala i šuma mogle smatrati konstantnim. Kao standard za ADSL servis, koristi se DMT (*Discrete Multi Tone*) modulacija sa različitim tehnologijama raspodele kanala. FDD (*Frequency Division Duplexing*) tehnologija je zastupljenija u praksi i podrazumeva da su frekvencijski opsezi za različite smerove prenosa međusobno razdvojeni. EC (*Echo Cancelling*) tehnologija ima osobinu da se deo opsega preklapa za oba smera prenosa, ali je na ovaj način osim kapaciteta prenosa povećano i preslušavanje po kanalima. ADSL2+ servis se nametnuo kao nadogradnja klasičnog ADSL-a u svrhu povećanja kapaciteta prenosa u downstream smeru. Kod ovog servisa frekvencijski opseg je proširen od 1.104 MHz (kod ADSL-a) na 2.208 MHz.

Kako telefonske parice predstavljaju ključni prenosni medijum za svaki DSL servis, od izuzetnog je značaja ispitivanje njihovih karakteristika, radi procene primenljivosti i brzine DSL pristupa. Ova vrsta analize zahteva preciznu predikciju strukture lokalnih petlji kao i preciznu identifikaciju parametara parica.

U cilju precizne karakterizacije primarnih parametara, različiti modeli telefonskih parica su izvedeni korišćenjem modela transmisiona linije [1]. Iako je većina modela dostupnih u literaturi empirijskog karaktera [2], u novije vreme posebno popularni postaju modeli koji su zasnovani na fizičkim i elektromagnetskim karakteristikama telefonske parice. Jedan od ovakvih modela, koji uključuje skin efekat uzimajući u obzir kružnu geometriju žičanih provodnika, efekat upredanja i druge fizičke i elektromagnetske parametre parice [3], je implementiran u softver razvijen za potrebe karakterizacije parica na fizičkom nivou. Ovaj model u nešto pojednostavljenoj verziji primenjen je u referencama [4,5] u cilju eksperimentalne provere proračunatih primarnih i sekundarnih parametara. Korišćenjem ovog modela, kao i modela preslušavanja između parica u telefonskom kablju, moguće je proračunati karakteristike prenosa različitih xDSL sistema. U ovom radu su za procenu performansi ADSL servisa, pored ovih modela korišćene i procedure za analizu preslušavanja definisane u ITU-T G.996.1 preporuci [6]. Broj bitova po kanalu i kapacitet prenosa telefonske parice su neke od izlaznih karakteristika realizovanog softvera koje su prikazane u ovom radu. Softver je razvijen u MATLAB programskom okruženju [7]. Zavisno od ulaznih parametara softver vrši proračun karakteristika parice, a nudi i mogućnost njihovog poređenja sa dostupnim merenim rezultatima. Verifikacija softvera je izvedena za telefonsku paricu koja je bila dostupna u frekvencijskom opsegu od interesa za ADSL servis (do 1.104 MHz).

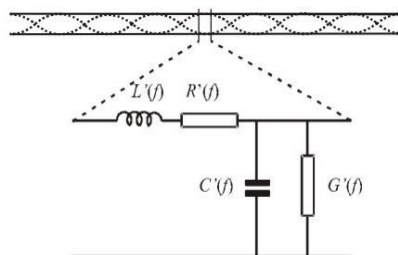
2. Modelovanje telefonskih parica i proračun kapaciteta prenosa

Primarni i sekundarni parametri

Električne karakteristike telefonske parice mogu se definisati koristeći model transmisiona linije. Ovaj model uključuje skup od četiri primarna parametra po jedinici dužine tj. rednu induktivnost i otpornost, i šantnu kapacitivnost i provodnost. Redna induktivnost predstavlja ukupnu sopstvenu induktivnost dva provodnika, dok je šantna kapacitivnost posledica blizine dva provodnika. Redna otpornost je rezultat konačne provodnosti provodnika parice, a šantna provodnost postoji zbog dielektričnih gubitaka u izolacionom materijalu između dva provodnika. Model segmenta telefonske parice prikazan je na Sl.1.

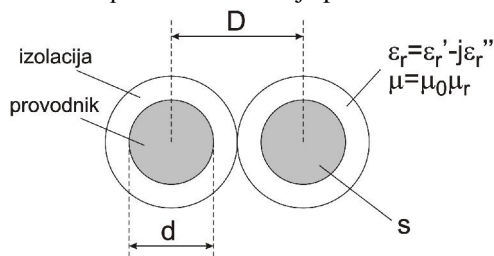
Iako je modelovanje na osnovu fizičkih karakteristika poželjno, većinu danas dostupnih modela čine empirijski modeli [2]. Ovi modeli su izvedeni empirijski na

osnovu merenja velikih sekcija homogenih kablova i ekstrakciji njihove ekvivalentne dvoprilazne mreže pomoću četiri primarna podužna parametra. Međutim, ovi modeli nisu u stanju da daju realni impulsni odziv te stoga njima nije moguće analizirati telefonske kablove u vremenskom domenu. Takođe, ovi modeli uključuju i izvesni grešku kao posledicu nepreciznosti u eksperimentalnom merenju primarnih parametara na nižim frekvencijama. Ipak, njihov glavni nedostatak predstavlja činjenica da nisu bazirani na fizičkim karakteristikama bakarne parice.



Sl.1. Segment telefonske parice modelovan transmissionom linijom

Upravo iz tih razloga u referenci [3] je predložen analitički izveden model telefonske parice. Model najpre polazi od aproksimacije telefonske parice preko dva paralelna žičana provodnika i uniformnog skin efekt modela primenjivog za proračun podužne induktivnosti i otpornosti samo na visokim frekvencijama. Žičani provodnici su prečnika d , a njihovi centri su na međusobnom rastojanju D . Specifična provodnost provodnika je σ , a relativna dielektrična konstanta izolacionog materijala $\epsilon_r - j\epsilon_r''$ (Sl.2). Proračun primarnih parametara po ovom modelu je prikazan u referencama [4,5].



Sl.2. Presek telefonske parice

Uzimajući u obzir neuniformnu raspodelu struje za proračun impedanse žičanih provodnika, kakva je ona u stvarnosti na žicama kružnog poprečnog preseka, moguće je dobiti nove poboljšane širokopoljasne modele za proračun podužne induktivnosti i otpornosti [3]:

$$\begin{aligned}
 L'(f) = & \frac{\mu_0}{\pi} \cosh^{-1}(D/d) + \\
 & + \frac{\sqrt{2}R_s(f)}{\pi^2 fd} \left[\frac{\text{Ber}(q)\text{Ber}'(q) - \text{Bei}(q)\text{Bei}'(q)}{[\text{Ber}'(q)]^2 + [\text{Bei}'(q)]^2} \right] \frac{D/d}{\sqrt{(D/d)^2 - 1}} + \\
 & + n \frac{\mu_0 D}{2} \left(\ln \frac{8D}{d} - 2 \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$R'(f) = \frac{4R_s(f)}{\sqrt{2\pi d}} \left[\frac{Ber(q)Bei'(q) - Bei(q)Ber'(q)}{[Ber'(q)]^2 + [Bei'(q)]^2} \right] \frac{D/d}{\sqrt{(D/d)^2 - 1}} \quad (2)$$

Parametar R_s u jednačinama (1) i (2) predstavlja površinsku otpornost koja je frekvencijski zavisna na sledeći način:

$$R_s(f) = \sqrt{\pi f \mu / \sigma} \quad (3)$$

Oznake Ber i Bei predstavljaju realni i imaginarni deo *Bessel*-ove funkcije nultog reda $Jo(j^{1/2}q)$. Parametar q može se proračunati na sledeći način:

$$q = d \sqrt{\pi f \mu \sigma / 2} \quad (4)$$

Treći član u jednačini (1) predstavlja dodatnu induktivnost koja se javlja kao posledica upređanja žičanih provodnika čime se formira helikoidna struktura. Pri tome parametar n u trećem članu predstavlja broj upređanja parica po jedinici dužine. Ostala dva primarna pođužna parametra se proračunavaju na način:

$$C'(f) = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r'}{\cosh^{-1}(D/d)} \quad (5)$$

$$G'(f) = \frac{2\pi^2 f \epsilon_0 \epsilon_r''}{\cosh^{-1}(D/d)} \quad (6)$$

U zavisnosti od primarnih parametara po jedinici dužine, sekundarni parametri parice, kompleksna karakteristična impedansa Z_c i kompleksna konstanta prostiranja $\gamma = \alpha + j\beta$, mogu se proračunati kao:

$$Z_c(f) = \sqrt{[R'(f) + j2\pi f L'(f)] / [G'(f) + j2\pi f C'(f)]} \quad (7)$$

$$\gamma(f) = \sqrt{[R'(f) + j2\pi f L'(f)][G'(f) + j2\pi f C'(f)]} \quad (8)$$

Proračun spektralne gustine snage signala

Segment telefonske parice dužine l može biti modelovan kao dvoprilazna mreža, gde su napon V_1 i struja I_1 na levom prilazu povezani sa naponom V_2 i strujom I_2 na desnom prilazu preko tkz. ABCD modela:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Vrednosti A, B, C i D zavise jedino od sekundarnih parametara, a nezavisni su od završne impedanse. Uneti gubici mogu biti proračunati na sledeći način:

$$H_{iloss}(f) = \frac{Z_S(f) + Z_L(f)}{Z_S(f)(CZ_L(f) + D) + AZ_L(f) + B} \quad (10)$$

gde su $Z_s(f)$ i $Z_L(f)$ ulazna i završna impedansa na krajevima petlje. Spektralna gustina snage (*Power spectral density - PSD*) signala na prijemu je:

$$S_p(f) = S_x(f) |H_{iloss}(f)|^2 \quad (11)$$

gde je $S_x(f)$ PSD signala koji se prenosi.

Proračun spektralne gustine snage preslušavanja

Preslušavanje predstavlja primarni izvor šuma u DSL sistemima. U svrhu procene performansi DSL sistemima, spektralna gustina snage preslušavanja, $S_n(f)$, mora biti proračunata, u većini slučajeva korišćenjem modela prezentiranih u referenci [6]. Preslušavanje je modelovano kao aditivni *Gauss*-ov šum i ako je spektralna gustina snage ometajućeg signala $S_d(f)$, onda je spektralna gustina snage preslušavanja:

$$S_{x-talk}(f) = S_d(f) |H_{x-talk}(f)|^2 \quad (12)$$

gde je $|H_{x-talk}(f)|^2$ prenosna funkcija snage preslušavanja i može se proračunati na sledeći način u zavisnosti od tipa preslušavanja:

$$|H_{NEXT}(f, N)|^2 = N^{0.6} * 0.8536 * 10^{-14} (f / 1Hz)^{1.5} \quad (13)$$

$$|H_{FEXT}(f, L, N)|^2 = N^{0.6} K_{FEXT} f^2 L |H_{channel}(f, L)|^2 \quad (14)$$

gde je L dužina linije, $H_{channel}(f, L)$ je prenosna funkcija ometene petlje, N je broj ometajućih parica, a K_{FEXT} je konstanta koja za evropske kablove iznosi:

$$K_{FEXT} = 10^{-4.5} \frac{1}{MHz^2 km} = 10^{-19.5} \quad (15)$$

Proračun kapaciteta

Za ADSL i drugu generaciju VDSL (VDSL2), DMT (*Discrete Multi Tone*) tehnologija modulacije sa više nosilaca je standardizovana. U DMT sistemima, diskretna *Fourier*-ova transformacija se koristi da bi se više uskopojasnih signala kombinovale u jedan širokopojasni signal. Za svaki uskopojasni kanal (svaki podkanal ili ton), signal i šum se mogu smatrati belim u okviru tog dela frekvencijskog opsega. Zbog ove osobine, ukupni kapacitet prenosa podataka se može proračunati kao suma kapaciteta prenosa za sve pojedinačne kanale:

$$C = \sum_{k=K_0}^{K_1} C_k = \frac{1}{T} \sum_{k=K_0}^{K_1} \log_2 \left(1 + \frac{SNR_k}{\Gamma} \right) \quad (16)$$

pri čemu je $1/T$ kapacitet prenosa simbola za svaki podkanal, SNR_k je srednja vrednost odnosa signal-šum u k -tom podkanalu, a Γ je ukupno ograničenje *Shannon*-ovog kapaciteta za željenu verovatnoću greške. Ako pođemo od pretpostavke da je spektar signala i šuma ravan u okviru svakog kanala, odnos signal-šum SNR za svaki kanal može biti aproksimiran kao:

$$SNR_k = \frac{S_p(f_k)}{S_n(f_k)} \quad (17)$$

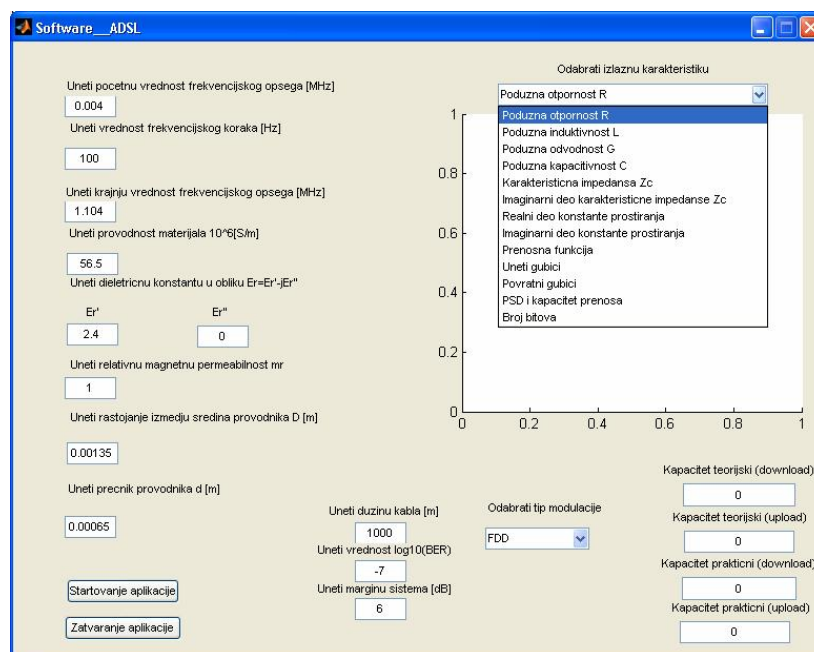
gde je f_k pod-nosilac tj. centralna frekvencija za svaki podkanal. Ako DMT sistem ima marginu šuma ili ako se koristi kodiranje, onda se margina i pojačanje usled kodiranja mogu uključiti u okviru Γ faktora na sledeći način:

$$\Gamma = \frac{\Gamma(P_e) \cdot \gamma_m}{\gamma_c} \quad (18)$$

gde je $\Gamma(P_e)$ konstanta koja se odnosi na Shannon-ov limit (za verovatnoću greške od 10^{-7} ova konstanta je približno $\Gamma(P_e) = 9.89$), γ_m je margina šuma (tipična vrednost 5-6 dB), a γ_c se odnosi na pojačanje dobijeno kodiranjem (u slučaju treliš kodiranja tipična vrednost se kreće od 3 dB do 5 dB).

3. Softver za karakterizaciju telefonskih parica

U cilju proračuna parametara bakarne parice i procene performansi ADSL servisa, realizovan je odgovarajući softver. Za izradu softvera korišćena je mogućnost kreiranja grafičkog korisničkog interfejsa u programskom paketu MATLAB. Analitički model opisan u sekciji 2, baziran na fizičkim karakteristikama i elektromagnetskim svojstvima telefonske parice je implemetiran u softver. Kao ulazne parametre za odabranu izlaznu karakteristiku potrebno je uneti karakteristike telefonske parice koje su prikazane na Sl.2. Izlazne karakteristike mogu biti: primarni i sekundarni parametri parice, prenosna funkcija, uneti i povratni gubici, broj bitova po kanalu, spektralne gustine snage signala i preslušavanja i kapacitet prenosa kao što je prikazano u vidu padajućeg menija na osnovnom ekranu softvera na Sl.3.



Sl. 3. Osnovni ekran realizovanog softvera

U slučaju da se za izlaznu karakteristiku odabere *PSD* i *kapacitet prenosa*, osim pomenutih karakteristika parice kao ulazne parametre je potrebno uneti i dužinu linije za prenos, marginu sistema, verovatnoću greške i pojačanje kodiranja. Za procenu kapaciteta prenosa neophodno je znati koji sistemi mogu ometati prenos na liniji od interesa. Kao posebnu mogućnost softver daje poređenje modelovanih i merenih rezultata za karakteristiku od interesa

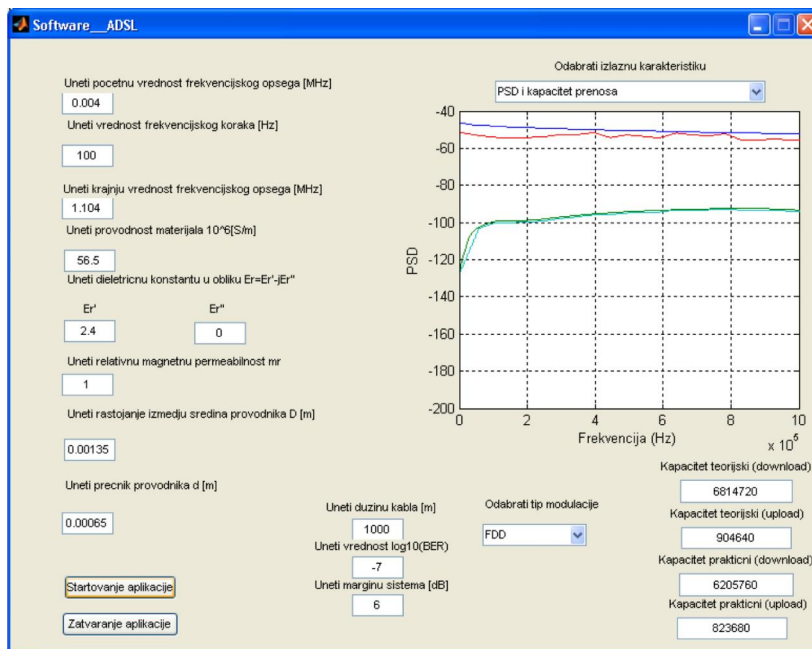
4. Numerička analiza

U cilju ilustracije mogućnosti realizovanog softvera opisanog u sekciji 3, analizirana je dostupna telefonska parica sledećih fizičkih dimenzija: $d=0.65$ mm i $D=1.35$ mm. Provodnici parice su od bakra specifične provodnosti $\sigma=5.65 \cdot 10^7$ S/m. Realni deo relativne dielektrične konstante izolacionog materijala je $\epsilon_r' = 2.4$. Da bi se verifikovali modelovani parametri, izvršena je eksperimentalna analiza parice u frekventijskom opsegu do 10 MHz na način koji je detaljnije opisan u referenci [5]. Poređenje modelovanih i merenih rezultata za neke od izlaznih karakteristika za od interesa su prikazane na Sl.4-6. Numerička analiza je izvršena za ADSL servis u frekventijskom opsegu do 1.104 MHz.

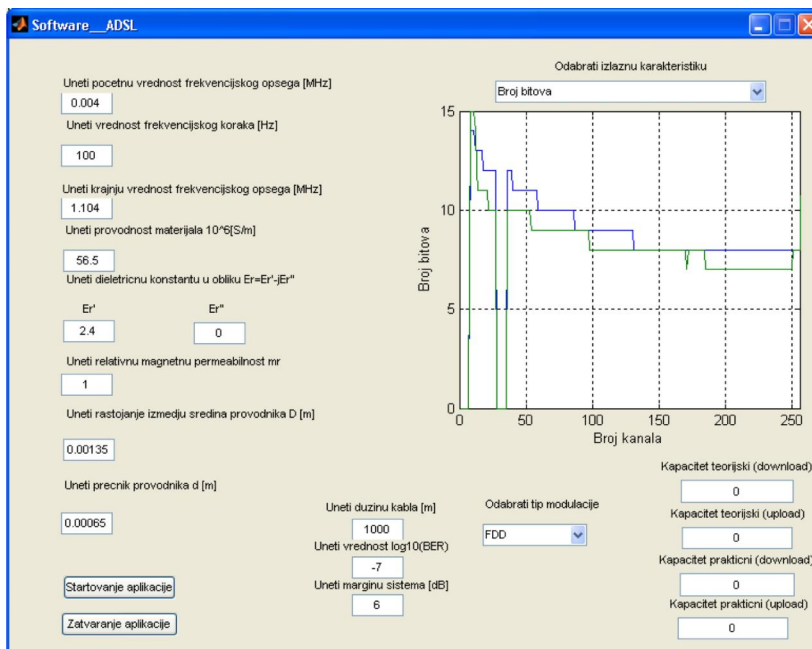
Na Sl.4 su prikazane spektralne gustine snage signala i šuma i kapaciteti prenosa za ADSL servis sa FDD i EC tehnikama raspodele kanala, respektivno. Kapaciteti prenosa koji se procenjuju i za modelovane i za merene rezultate se proračunavaju za sistem koji ima verovatnoću greške $BER=10^{-7}$ i marginu od 6 dB. Dužina linije je $l=1000$ m. Za FDD tehniku, karakteristike dobijene za modelovane parametre su prikazane plavom i zelenom bojom za realni i imaginarni deo respektivno, dok su merene karakteristike ilustrovane crvenom i svetloplavom bojom. Kapaciteti prenosa dobijeni prema analitičkom modelu su 6.50 Mbit/s za download i 883 kbit/s za upload smer prenosa, dok se na osnovu merenih rezultata dobijaju brzine prenosa od 5.92 Mbit/s i 804 kbit/s za download i upload smer prenosa, respektivno. Za EC tehniku kapaciteti prenosa iznose 7.74 Mbit/s i 1090 kbit/s za modelovane rezultate odnosno 7.08 Mbit/s i 993 kbit/s za merene rezultate, za download i upload smerove prenosa, respektivno.

Sl.5 i Sl.6 prikazuju broj bitova po kanalu za FDD i EC tehnike raspodele kanala. Za FDD tehniku (Sl.5), plavom bojom su prikazani modelovani, a zelenom bojom mereni rezultati. Za prenos podataka u upload smeru se koriste kanali od 8 do 27 a u download smeru prenosa se koriste kanali od 36 do 256. Za EC tehniku (Sl.6), modelovani rezultati su prikazani crvenom i plavom bojom, dok su svetloplavom i zelenom bojom prikazani rezultati dobijeni na osnovu merenih rezultata za upload i download smer prenosa, respektivno. Kod ove tehnike, kanali 8-31 se koriste za upload, a kanali 8-256 za download smer prenosa.

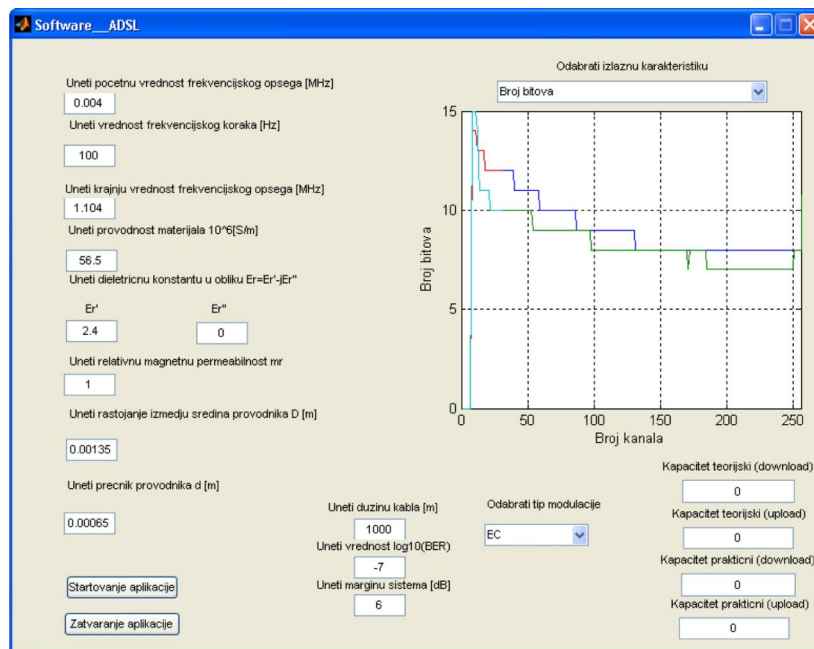
Na Sl.7 je prikazana zavisnost brzina downstream i upstream smera prenosa za ADSL servis od dužine linije. Može se primetiti da je za dužinu linije od dva kilometra, kapacitet prenosa umanjen na vrednosti 4 Mbit/s. Za veće dužine linija, performanse servisa su još drastičnije umanjene što ukazuje da je primena ADSL servisa uglavnom rezervisana za kraća rastojanja. Za upload prenos, kapacitet prenosa je umanjen sa 850 kbit/s za liniju od 500 metara na 400 kbit/s za liniju dužine 4000 metara.



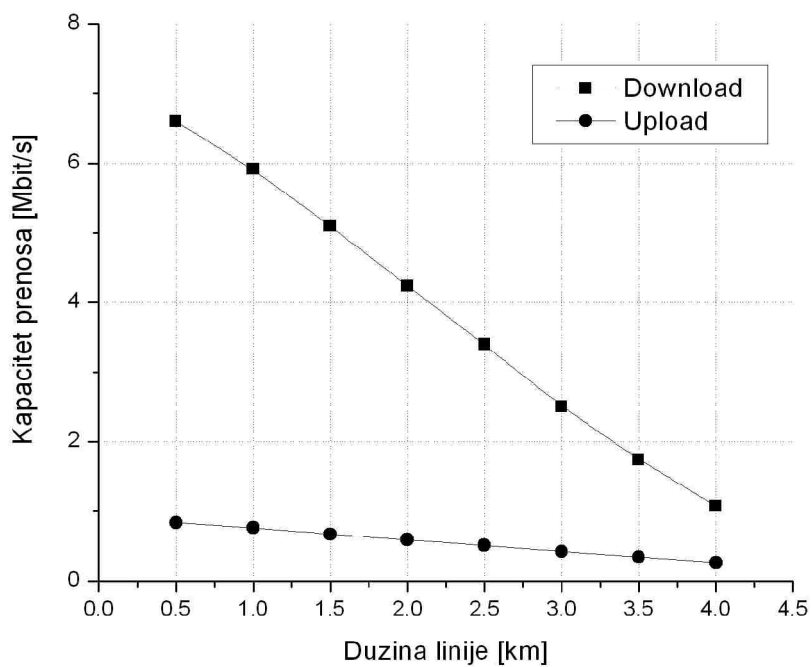
Sl. 4. Spektralne gustine snage signala i šuma i kapacitet (FDD tehnika raspodele kanala)



Sl 5. Broj bitova po kanalu (FDD tehnika raspodele kanala)



Sl. 6. Broj bitova po kanalu (EC tehnika raspodele kanala)



Sl.7. Zavisnost kapaciteta ADSL prenosa od dužine linije

6. Zaključak

U ovom radu je prezentovana procena performansi telefonske parice kao ključne komponente za ADSL servis. U svrhu modelovanja parice, korišćena je teorija transmisionih linija i poboljšani analitički model koji je baziran na fizičkim i elektromagnetnim karakteristikama same parice. Proračuni spektralnih gustina snage signala i presušavanja kao i kapaciteta prenosa su bazirani na ITU-T preporukama. Ove preporuke su, zajedno sa poboljšanim analitičkim modelom, implementirane u odgovarajući softver namenjen za procenu kvaliteta ADSL servisa. Verifikacija softvera je izvršena poređenjem modelovanih i eksperimentalno dobijenih rezultata za dostupnu telefonsku paricu. Korišćenjem razvijenog softvera operateri servisa mogu dobiti kvalitetnu procenu performansi na postojećim telefonskim paricama, ne samo kada je reč o ADSL tehnologiji već i ostalim DSL tehnologijama baziranim na DMT modulaciji.

Literatura

- [1] P.F.Combes, Microwave Transmission for Telecommunications, John Wiley & Sons, 1991.
- [2] P.Golden, H.Dedieu and K.Jacobsen, Fundamentals of DSL Technology, Auerbach Publications, Taylor & Francis Group, 2006.
- [3] J.J.Yoho, Physically-Based Realizable Modeling and Network Synthesis of Subscriber Loops Utilized in DSL Technology, PhD Thesis, Faculty of the Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2001.
- [4] Mila Stojanović, Aleksandar Atanasković, Mladen Randelović, Nebojša Dončov, Bratislav Milovanović, "Karakterizacija telefonskih parica za potrebe xDSL servisa", ETRAN 2006, Vol. 2, Beograd, Srbija, pp. 325-328, 2006.
- [5] Bratislav Milovanović, Mladen Randelović, Aleksandar Atanasković, Nebojša Dončov, "Softverska realizacija i eksperimentalna verifikacija modela xDSL kablova", POSTEL 2006, Beograd, Srbija, pp. 277-287, 2006.
- [6] ITU-T G.996.1 (06/1999), Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers, ITU-T Recommendation, 1999.
- [7] S.E.Lyshevski, Engineering and Scientific Computations Using MATLAB, John Wiley & Sons, 2003.

Abstract – In this paper, procedure for estimation of ADSL service performances is presented. This procedure is based upon improved analytical model which, calculating skin effect, twisting effect and other physical and electromagnetic parameters of twisted pair, describes primary parameters per unit length in frequency band of interest. This model and models of crosstalk between twisted pairs in telephone cable, implemented in software developed in MATLAB programming environment, enable calculations of important characteristics for estimation of ADSL service quality, such as number of bits per single channel and transmission data rate. Software capabilities are illustrated on an example of available twisted pair by comparing modelled and measured results.

Keywords – ADSL, software, twisted pair, transmission data rate.

SOFTWARE FOR ESTIMATION OF ADSL SERVICE QUALITY

Bratislav Milovanović, Mladen Randelović, Aleksandar Atanasković, Nebojša Dončov