

Verovatnoća prekida komunikacije u hibridnom RF - PLC/VLC sistemu

Jelena Anastasov, *Student Member, IEEE*, Dejan Milić, *Member, IEEE*, Daniela Milović i Nenad Milošević

Apstrakt— U ovom radu razmatra se hibridni sistem za prenos informacija do krajnjeg korisnika u zatvorenom prostoru. Prenos se obavlja preko kooperativnog linka sa DF (decode-and-forward) relejem koji povezuje PLC (power line communication) i VLC (visible light communication) deonice. Kao back-up link koristi se bežični RF kanal. Korisnik, primenom SC kombinovanja (selection combining) bira link koji mu omogućava bolji kvalitet signala. U radu je analizirana verovatnoća prekida i uticaj parametra PLC, VLC i RF deonica na performanse ovakvog sistema. Detaljnije, razmatran je uticaj pozicije LED lampe (visina, ugao zračenja), uticaj odnosa srednjih snaga signala i šuma sa svim deonicama, dubine fedinga radio kanala i vrednosti praga prekida na verovatnoću prekida komunikacije u posmatranom sistemu.

Ključne reči—verovatnoća prekida; PLC link; VLC link; DF relej; RF link; selepciono kombinovanje.

I. UVOD

Prenos informacija u eri razvoja IoT (Internet of Things) je od izuzetne važnosti. Veliki broj uređaja u pametnim kućama, zgradama, saobraćajnoj infrastrukturi, kao i veliki broj senzora i upravljačkih sistema zahteva sigurnu komunikaciju kroz različite medijume u cilju sveobuhvatne pokrivenosti [1]. Pored najrasprostranjenijeg bežičnog RF (radio frequency) prenosa, koriste se i PLC (power line communication) tehnologija kao i bežične optičke komunikacije kod kojih se optički signali prostiru kroz slobodni prostor i koje se mogu podeliti na FSO (free space optical) i VLC (visible light communication).

PLC tehnologija se aktivno izučava poslednjih decenija jer je efikasna i ekonomično isplativa. Razlog je postojanje rasprostranjene elektroenergetske infrastrukture preko koje se vrši prenos informacija [2]. PLC se koristi u zatvorenim prostorijama, ali i za povezivanje udaljenih komunikacionih čvorova. Komunikacija se obavlja preko dalekovoda, tako da PLC predstavlja žičanu komunikaciju što ukazuje na povećanu sigurnost prenosa u poređenju sa bežičnim sistemima. S druge strane VLC tehnologija koristi svetlosne diode koje služe ne samo za osvetljavanje prostorije već i za

Jelena Anastasov – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18115 Niš, Srbija, (e-mail: jelena.anastasov@elfak.ni.ac.rs).

Dejan Milić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18115 Niš, Srbija, (e-mail: dejan.milic@elfak.ni.ac.rs).

Daniela Milović – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18115 Niš, Srbija, (e-mail: daniela.milovic@elfak.ni.ac.rs).

Nenad Milošević – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18115 Niš, Srbija, (e-mail: nenad.milosevic@elfak.ni.ac.rs).

komunikaciju [3]. VLC emituje informacije u vidljivom delu spektra, tako da predstavlja odličnu alternativu RF prenosu kod koga je spektar maksimalno eksploatisan. VLC prenos nudi prednosti visoke sigurnosti i kapaciteta uz ekološki prihvatljive standarde [4].

VLC sistem treba biti povezan sa spoljnom mrežom što je moguće izvršiti primenom RF [5] ili FSO [6] tehnologije. Međutim, najperspektivnije rešenje povezivanja VLC pristupne tačke sa spoljnom baznom stanicom je preko elektroenergetskih kablova kojima se istovremeno vrši napajanje LED osvetljenja i prenos informacija velikom brzinom [7]. Implementacija releja između PLC i VLC deonice doprinosi poboljšanju performansi sistema.

U radu [8], autori su razmatrali kooperativni PLC/VLC sistem sa AF (amplify-and-forward) relejem i odredili kapacitet posmatranog sistema. Analitički izrazi za kapacitet i verovatnoću prekida sistema sa kaskadnom vezom PLC i VLC linka koji su povezani preko DF (decode-and-forward) releja izvedeni su u [9]. U radu [10], prikazana je analiza performansi kooperativnog PLC/VLC sistema sa više LED lampi i više korisnika, pri čemu se korišćenjem selektivne metode kombinovanja (selection combining-SC) bira korisnik koji učestvuje u komunikaciji.

U ovom radu razmatra se sistem u kome se jedan korisnik nalazi u zatvorenom prostoru i informacije prima preko VLC linka koji je preko DF releja povezan sa PLC linkom, pri čemu korisnik informacije može primati tu istu informaciju i preko standardnog RF linka. Procenjujući kvalitet signala prenešenog preko PLC/VLC linka i RF linka, primenom SC kombinovanja, korisnik odlučuje koji deo sistema za prenos informacija će koristiti. U radu je izведен je izraz za verovatnoću prekida razmatranog sistema i analiziran je uticaj parametara svih prenosnih kanala u sistemu na vrednosti verovatnoće prekida komunikacije.

Ukratko, rad je strukturiran po poglavljima na sledeći način. U drugom poglavljju dat je opis modela sistema koji je korišćen u analizi. U trećem poglavljju su detaljno opisani komunikacioni kanali ovog sistema. U četvrtom poglavljju, izведен je izraz za izračunavanje verovatnoće prekida. Numerički rezultati i diskusija dobijenih rezultata prikazana je u petom poglavlu rada. U poslednjem poglavljju dati su osnovni zaključci prikazane analize.

II. MODEL SISTEMA

Razmatran je hibridni asimetrični RF - dual-hop kooperativni PLC/VLC sistem. Kao što je prikazano na slici

1, komunikacioni izvor prenosi signal do VLC LED lampe putem PLC deonice. Lampa je povezana sa PLC-om uz pomoć DF releja koji dekodira signale sa PLC veze i ponovo šalje dekodiranu verziju originalnog signala putem VLC deonice do prijemnika. Signali koji se prenose od izvora do releja, prolaze kroz nekoliko tačaka diskontinuiteta, brojne spojeve kablova za napajanje itd. [2]. Zbog toga, pored originalnog do releja stiže i skup zakasnelyih kopija signala što ukazuje na postojanje fedinga. PLC kanal je takođe izložen uticaju različitih aditivnih šumova. Relej prima signal r_{PLC} oblika [9], [10]

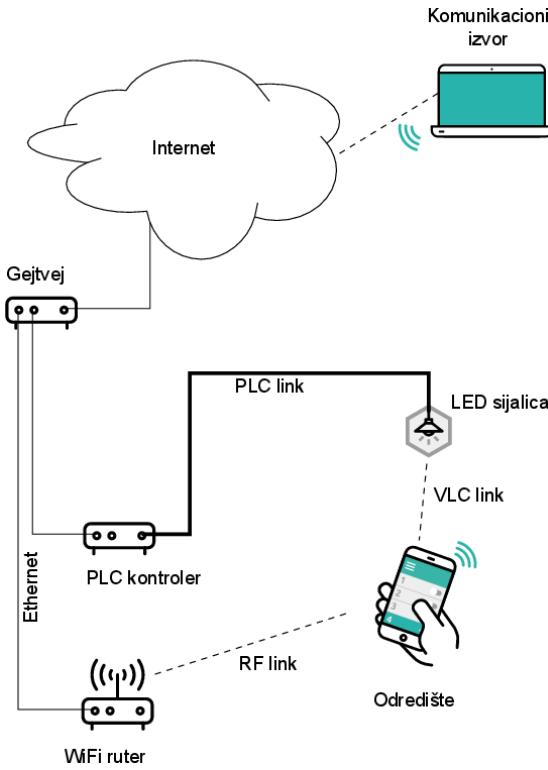
$$r_{PLC} = h_{PLC}i + n_{PLC}, \quad (1)$$

gde je i izvorni informacioni signal, h_{PLC} trenutna vrednost fedinga, a n_{PLC} ukupni trenutni šum u PLC kanalu.

Relej dekodira primljene podatke i prosleđuje ih na VLC link kao [9], [10]

$$r_{VLC} = h_{VLC}\hat{i} + n_{VLC}, \quad (2)$$

gde je \hat{i} dekodirana verzija izvornog signala, h_{VLC} trenutna vrednost amplitude i n_{VLC} trenutna vrednost šuma u VLC kanalu. Preko VLC linka signal stiže do odredišne tačke tj. do korisnika.



Slika1. Model komunikacionog sistema

Sa druge strane, ista informacija se šalje i putem antene RF predajnika, radio kanalom u kojem takođe postoji feding. Signal koji stiže do odredišta je sledećeg oblika

$$r_{RF} = h_{RF}i + n_{RF}, \quad (3)$$

gde je h_{RF} trenutna vrednost fedinga u RF kanalu, a n_{RF} trenutna vrednost aditivnog šuma.

Korisnik tj. prijemnik sadrži dve prijemne antene (fotodetektor i RF antenu) i koristi metodu SC kombinovanja ekstrahući poslatu informaciju, biranjem veće vrednosti

trenutnog odnosa snage signala i snage šuma (SNR-signal to noise ratio).

III. MODELI KOMUNIKACIONIH KANALA

A. PLC komunikacioni kanal

U PLC kanalu postoji efekat fedinga tako da se, trenutna vrednost amplitude kanala, h_{PLC} , modeluje se lognormalnom raspodelom [11], tj. funkcija gustine verovatnoće (PDF-probability density function) promenljive h_{PLC} , može se predstaviti kao

$$f_{h_{PLC}}(h) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\ln h - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

gde μ predstavlja srednju vrednost a σ^2 varijansu veličine h_{PLC} . Ukupni šum u PLC kanalu je zbir pozadinskog i impulsnog šuma $n_{PLC} = n_I + n_{bn}$. PDF trenutne vrednosti ukupnog šuma ima sledeći oblik [9]-[11]

$$f_{n_{PLC}}(n) = P_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_G^2}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma_G^2}} + P_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_G^2(1+\chi)}} e^{-\frac{n^2}{2\sigma_G^2(1+\chi)}}, \quad (5)$$

gde je $P_1 = (1 - \lambda T)$ i $P_2 = \lambda T$. Parametrom λ se definiše učestanost pojavljivanja impulsnog šuma u toku vremena T , a λT predstavlja verovatnoću pojavljivanja impulsnog šuma u kanalu. Parametar σ_G^2 predstavlja snagu pozadinskog šuma, a χ odnos snaga impulsnog i pozadinskog šuma.

Trenutna vrednost SNR-a u PLC kanalu se definiše kao

$$\gamma_{PLC} = \frac{E_b |h_{PLC}|^2}{\sigma_G^2 (1 + \chi)}, \text{ a PDF trenutnog SNR-a na sledeći način}$$

[10]

$$f_{\gamma_{PLC}}(\gamma) = (1 - \lambda T) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2 \gamma}} e^{-\frac{(\ln \gamma - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}} + \lambda T \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2 \gamma}} e^{-\frac{(\ln \gamma - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad (6)$$

gde je $\mu_0 = 2\mu + \ln \bar{\gamma}_{pB}$, $\mu_1 = 2\mu + \ln \bar{\gamma}_{pl}$ i $\sigma_0 = \sigma_1 = 2\mu$.

Kako bi pojednostavili analizu i izveli izraze u zatvorenom obliku, koristićemo aproksimaciju lognormalne raspodele u Gama raspodelu, detaljno opisanu u [12], tako da se PDF trenutnog SNR-a može napisati u sledećem obliku

$$f_{\gamma_{PLC}}(\gamma) = (1 - \lambda T) \left(\frac{m_b}{\Omega_b} \right)^{m_b} \frac{\gamma^{m_b-1}}{\Gamma(m_b)} e^{-\frac{\gamma m_b}{\Omega_b}} + \lambda T \left(\frac{m_i}{\Omega_i} \right)^{m_i} \frac{\gamma^{m_i-1}}{\Gamma(m_i)} e^{-\frac{\gamma m_i}{\Omega_i}}, \quad (7)$$

gde je $\Gamma(\cdot)$ Gamma funkcija definisana kao $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} \exp(-t) dt$ [13, (8.3107.1)], a m_b i m_i parametri

oštine efekta senke Gama raspodele fedinga, i Ω_b i Ω_i vrednosti srednjeg SNR-a. Veze između parametara lognormalne i Gama raspodele se mogu naći u radu [12].

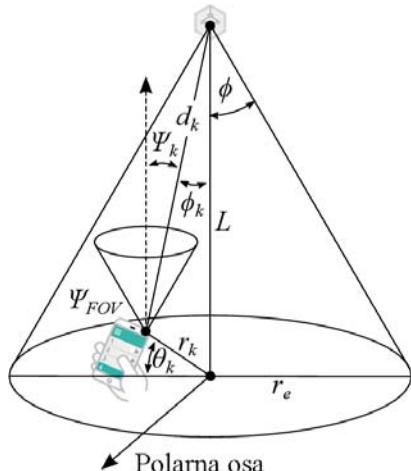
Integraljenjem prethodne jednačine i korišćenjem relacije [14, (8.4.16)], izведен je i izraz za izračunavanje kumulativne funkcije raspodele (cumulative distribution function-CDF) trenutnog SNR-a u PLC kanalu, na sledeći način

$$F_{\gamma_{PLC}}(\gamma) = (1 - \lambda T) \frac{1}{\Gamma(m_b)} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_b \gamma}{\Omega_b} \middle| m_b, 0 \right), \\ + \lambda T \frac{1}{\Gamma(m_i)} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_i \gamma}{\Omega_i} \middle| m_i, 0 \right), \quad (8)$$

gde je $G_{p,q}^{m,n} \left(z \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right)$, Meijer-ova G funkcija [13, (9.301⁷)].

B. VLC komunikacioni kanal

Parametri modela VLC kanala predstavljeni su na slici 2. LED sijalica se nalazi na visini L i pokriva površinu kruga maksimalnog poluprečnika r_e .



Sl. 2. Model VLC komunikacionog kanala

Položaj korisnika je slučajna veličina, koji se u polarnom koordinatnom sistemu određuje uglom θ_k i poluprečnikom r_k . Euklidsko rastojanje između LED osvetljenja i korisnika je $d_k = (r_k^2 + L^2)^{1/2}$. Važi Lambertov zakon $z = -1/\log_2(\cos(\phi))$, gde je ϕ ugao zračenja LED sijalice. Parametrom Ψ_{FOV} je označeno vidno polje prijemnika. Upadni ugao i ugao zračenja korisnika označeni su kao ψ_k i ϕ_k , respektivno, pri čemu je $\cos(\psi_k) = \cos(\phi_k) = L/d$. Pojačanje kanala LOS (line-of-sight) linka između LED-a i korisnika je

$$h_{VLC} = \frac{\Xi(z+1)L^{z+1}}{(r_k^2 + L^2)^{\frac{z+3}{2}}}, \quad (9)$$

pri čemu je $\Xi = AR_p U(\psi_k)g(\psi_k)/2\pi$ konstanta za konkretni sistem, A površina detektora, R_p responsivnost fotodetektora, $U(\psi_k)$ pojačanje optičkog filtra i $g(\psi_k)$ optički koncentrator [15].

Kako je položaj korisnika slučajna veličina sa uniformnom raspodelom po krugu poluprečnika r_e , funkcija gustine verovatnoće pojačanja kanala je [15]

$$f_{h_{VLC}}(h) = \frac{2}{r_e^2(z+3)} (\Xi(z+1)L^{z+1})^{\frac{2}{z+3}} h^{-\frac{2}{z+3}-1} \quad (10)$$

PDF trenutnog SNR-a, $\gamma_{VLC} = \bar{\gamma}_{VLC} h^2$, je [10]

$$f_{\gamma_{VLC}}(\gamma) = \frac{\bar{\gamma}_{VLC}^{\frac{1}{z+3}}}{r_e^2(z+3)} (\Xi(z+1)L^{z+1})^{\frac{2}{z+3}} \gamma^{-\frac{z+4}{z+3}}, \quad (11)$$

za $\gamma \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, gde je $\lambda_{\min} = \frac{\bar{\gamma}_{VLC}(\Xi(z+1)L^{z+1})^2}{L^{2(z+3)}}$ i $\lambda_{\max} = \frac{\bar{\gamma}_{VLC}(\Xi(z+1)L^{z+1})^2}{(r_e^2 + L^2)^{(z+3)}}$ i $\bar{\gamma}_{VLC} = \frac{\rho^2 P_{opt}^2}{N_0 B}$. Optička snaga je označena sa P_{opt} , N_0 je spektralna gustina šuma, B je propusni opseg i ρ je koeficijent električno-optičke konverzije.

Kumulativna funkcija raspodele se može dobiti, integraljenjem (10) u granicama $\gamma \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, u obliku

$$F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) = \frac{-1}{r_e^2} (\Xi(z+1)L^{z+1})^{\frac{2}{z+3}} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{VLC}} \right)^{-\frac{1}{z+3}} + \left(1 + \frac{L^2}{r_e^2} \right). \quad (12)$$

C. RF komunikacioni kanal

Prepostavili smo da se feding u RF kanalu može modelovati Nakagami- m raspodelom, tako da je PDF trenutnog SNR-a RF linka, γ_{RF} , sledećeg oblika [12]

$$f_{\gamma_{RF}}(\gamma) = \frac{m^m}{\bar{\gamma}_{RF}^m \Gamma(m)} \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_{RF}^m}\right), \quad (13)$$

pri čemu je $\bar{\gamma} = E[r^2]$ srednja vrednost SNR-a, a m Nakagami parametar koji opisuje dubinu fedinga ($m \geq 0.5$).

Odgovarajući CDF trenutnog SNR-a je

$$F_{\gamma_{RF}}(\gamma) = 1 - \frac{\Gamma\left(m, \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_{RF}^m}\right)}{\Gamma(m)}, \quad (14)$$

gde $\Gamma(.,.)$ predstavlja nekompletну Gamma funkciju definisanu kao $\Gamma(\alpha, x) = \int_x^\infty t^{\alpha-1} \exp(-t) dt$ [13, (8.350.2⁷)].

IV. VEROVATNOĆA PREKIDA KOMUNIKACIJE U SISTEMU

U sistemu sa DF relejem, vrednost ekvivalentnog SNR-a se definiše kao $\gamma_{eq} = \min(\gamma_{PLC}, \gamma_{VLC})$, a funkcija gustine verovatnoće izračunava pomoću formule

$$f_{\gamma_{eq}}(\gamma) = f_{\gamma_{PLC}}(\gamma)(1 - F_{\gamma_{VLC}}(\gamma)) + f_{\gamma_{VLC}}(\gamma)(1 - F_{\gamma_{PLC}}(\gamma)). \quad (15)$$

Nadalje, CDF trenutne vrednosti SNR-a PLC/VLC linka se računa kao

$$F_{\gamma_{eq}}(\gamma) = F_{\gamma_{PLC}}(\gamma) + F_{\gamma_{VLC}}(\gamma) - F_{\gamma_{PLC}}(\gamma)F_{\gamma_{VLC}}(\gamma). \quad (16)$$

S obzirom na to da prijemna tačka koristi metodu SC kombinovanja, krajnja vrednost trenutnog SNR-a se izračunava kao $\gamma_{end} = \max(\gamma_{eq}, \gamma_{RF})$, tako da je lako izračunati verovatnoću prekida komunikacije posmatranog sistema na sledeći način

$$P_{out}(\gamma_{th}) = F_{\gamma_{eq}}(\gamma_{th})F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th}), \quad (17)$$

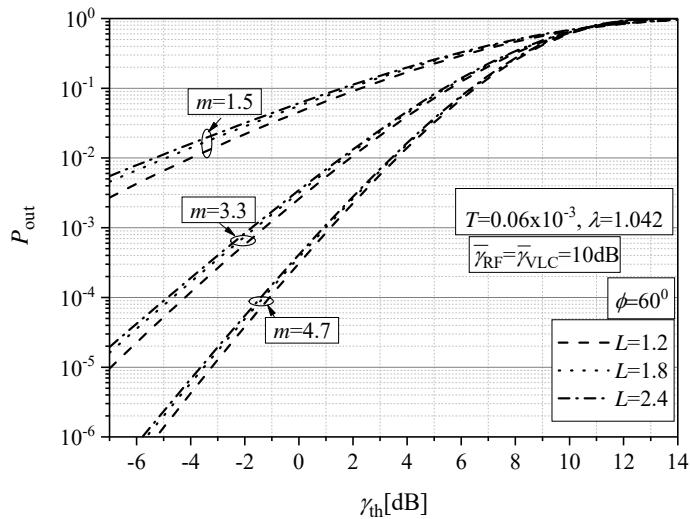
gde je γ_{th} prag prekida koji se odabira sa stanovišta kvaliteta prijema. Zamenom (8) i (12) u (15), a zatim zamenom (15) i (14) u (17) može se izračunati verovatnoća prekida za definisane parametre sistema.

V. NUMERIČKI REZULTATI

U ovo delu rada, prikazani su numerički rezultati dobijeni na osnovu analitičkog izraza za izračunavanje verovatnoće prekida, tj. na osnovu jednačine (17). Rezultati su dobijeni u softverskom paketu *Mathematica®*, u kome je i ugrađena, specijalna, Meijer-ova G funkcija.

Neki od parametara PLC-VLC linka su fiksirani u analizi na svim slikama i to: $m_b=0.6$, $m_t=2$, $A=0.1m$, $R_p=0.4A/W$, $U(\psi_k)=g(\psi_k)=7dB$.

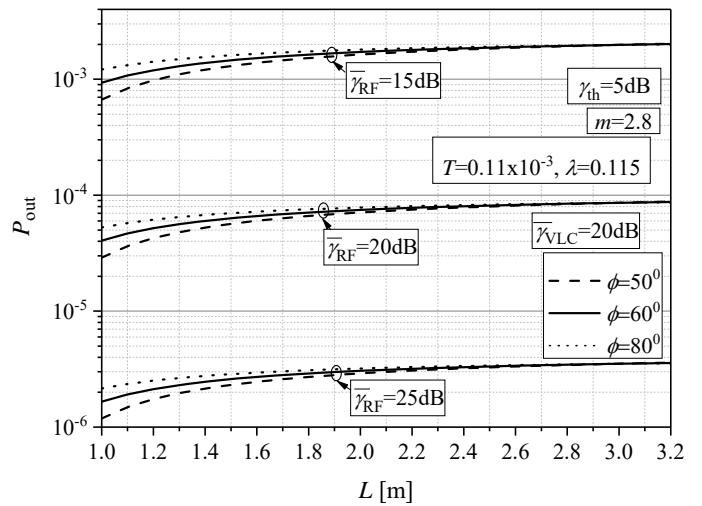
Na slici 3., prikazana je verovatnoća prekida komunikacije u posmatranom sistemu u funkciji od praga prekida za različite vrednosti dubine feedinga u radio kanalu. Takođe razmatran je i uticaj položaja tj. visine instalirane LED sijalice za konstantnu vrednost parametra m . Sa slike se može uočiti da su za niže vrednosti praga prekida i verovatnoće prekida niže. U sistemu sa radio kanalom u dubljem feedingu, performanse su generalno lošije, tako da su verovatnoće prekida najveće za slučaj kada je $m=1.5$. Uticaj promene visine na kojoj se nalazi LED sijalica je nešto očigledniji kada je RF kanal u dubokom feedingu. S obzirom na to da je LED sijalica instalirana na manjim visinama, bliža korisniku a samim tim i LOS komponenta jača, verovatnoće prekida komunikacije u sistemu su u tom slučaju niže.



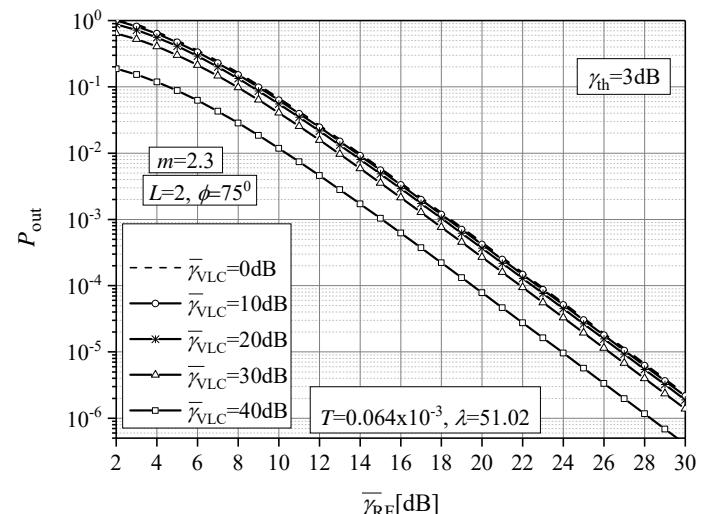
Sl. 3. Verovatnoća prekida u zavisnosti od praga prekida za različite dubine Nakagami- m feedinga

Na slici 4 data je verovatnoća prekida u funkciji visine LED sijalice za različite uglove zračenja i različite vrednosti srednje snage SNR-a na RF deonici. Povećanjem srednjeg SNR-a Nakagami- m feeding kanala dolazi do poboljšanja performansi sistema, tj. do smanjenja verovatnoće prekida. Nakon neke izvesne visine instaliranja LED lampe na plafonu, dalje povećanje u visini nema uticaja na vrednost verovatnoće prekida tj. ta vrednost ostaje konstantna za bilo koju vrednost $\bar{\gamma}_{RF}$. Što je ugao zračenja LED lampe manji, to je jačina LOS komponente signala veća, a samim tim i verovatnoća prekida na tom linku i u celokupnom sistemu niža.

Na slici 5., analiziran je uticaj srednjeg SNR-a RF i VLC linka na verovatnoću prekida komunikacije u posmatranom sistemu. Može se uočiti da se povećanjem srednjeg SNR-a na VLC deonici i/ili povećanjem srednjeg SNR-a u Nakagami- m kanalu, vrednosti verovatnoće prekida znatno smanjuju.



Sl. 4. Verovatnoća prekida u zavisnosti od visine LED sijalice za različite uglove zračenja



Sl. 5. Verovatnoća prekida u zavisnosti od srednjeg SNR-a RF deonice za različite vrednosti srednjeg SNR-a VLC deonice

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je analiza verovatnoće prekida u hibridnom komunikacionom sistemu u kojem se ista informacija nezavisno šalje RF linkom u prisustvu Nakagami- m fedinga i kooperativnim VLC/PLC linkom do prijemne antene sa SC kombajnerom.

Na osnovu dobijenih numeričkih rezultata može se zaključiti da najveći uticaj na smanjenje verovatnoće prekida ima povećanje srednjeg SNR-a na bilo kojoj od prenosnih deonica u sistemu. Značajan uticaj ima i dubina fedinga u radio kanalu (povećanje parametra m Nakagami- m fedinga). Smanjenje ugla zračenja ili visine LED lampe u odnosu na poziciju korisnika, smanjuje verovatnoću prekida, a povećanje visine posle neke izvesne vrednosti nema uticaj na dalju promenu verovatnoće prekida.

Dalji pravac istraživanja u ovoj oblasti bi bio na temu poboljšanja bezbednosti komunikacije na fizičkom nivou analiziranog telekomunikacionog sistema u slučaju jednog ili više prisluskivača.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] J. A. Stankovic, "Research directions for the Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 1, pp. 3-9, Feb. 2014.
- [2] S. Mudrievskyi "Power line communications: state of the art in research, development and application," *AEU – Int J Electron Commun.* Vol. 68, no. 7, pp. 575-577, 2014.
- [3] S. Sheoran, P. Garg, and P. K. Sharma, "Interference mitigation technique with coverage improvement in indoor VLC system," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 30, no. 2, p. e3511, Feb. 2019.
- [4] Z. Ghassemlooy, L. N. Alves, S. Zvanovec, and M. Khalighi, *Visible Light Communications: Theory and Applications*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [5] D. A. Basnayaka and H. Haas, "Design and analysis of a hybrid radio frequency and visible light communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 10, pp. 4334–4347, Oct. 2017.
- [6] A. Gupta, N. Sharma, P. Garg, and M. S. Alouini, "Cascaded FSO-VLC communication system," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, pp. 810–813, Dec. 2017.
- [7] X. Ma, J. Gao, F. Yang, W. Ding, H. Yang, and J. Song, "Integrated power line and visible light communication system compatible with multi-service transmission," *IET Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 104–111, Jan. 2017.
- [8] W. Gheth, K. M. Rabie, B. Adebisi, M. Ijaz, G. Harris, "Performance Analysis of Integrated Power-Line/Visible-Light Communication Systems with AF Relaying," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, United Arab Emirates, 9-13 Dec. 2018.
- [9] W. Gheth, K. M. Rabie, B. Adebisi, M. Ijaz, G. Harris, "On the Performance of DF-based Power-Line/Visible-Light Communication Systems," 2018 International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS), DUBAI, United Arab Emirates, United Arab Emirates, 7-8 Nov. 2018.
- [10] M. Jani, P. Garg, A. Gupta, "Performance Analysis of a Co-Operative PLC/VLC System with Multiple Access Points for Indoor Broadcasting," *AEU International Journal of Electronics and Communications*, vol. 103, pp. 64-73, May 2019.
- [11] Y. H. Ma, P. L. So, E. Gunawan, "Performance analysis of OFDM systems for broadband power line communications under impulsive noise and multipath effects," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 674–682, Apr. 2005.
- [12] I. M. Kostic, "Analytical approach to performance analysis for channel subject to shadowing and fading," *IEE P-Commun.*, vol. 152, no. 6, pp. 821-827, 9 Dec. 2005.
- [13] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*. 6th ed., New York: Academic, 2000.
- [14] A. P. Prudnikov, Y. A. Bryčkov, O. I. Marichev, and G. G. Gould, *Integrals and Series. Volume 3, More Special Functions*, 1st ed. Amsterdam, The Netherlands: Gordon Breach Sci., 1986.
- [15] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. on Consum. Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.

ABSTRACT

In this paper, a hybrid communication system with an end-user node for indoor broadcasting is considered. A cooperative power line communication (PLC) and visible light communication (VLC) links, connected by the decode-and-forward (DF) relay, are used for a signal transmission. As a back-up, an independent RF wireless channel is also used for transmission of the same signal. A user node's receiver utilizes selection combining (SC) method to choose a branch with higher signal quality. In this work, the outage probability is analysed and the impact of various PLC, VLC and RF link parameters on the system performance are assumed. In more details, the impact of LED lamp's position (the distance and the semi-angle), the average signal-to-noise-ratio (SNR) of the PLC, VLC or RF link, fading severity and the outage threshold impacts on the outage probability of the system under consideration is investigated.

Outage probability analysis of a hybrid RF – VLC/PLC communication system

Jelena Anastasov, Dejan Milić, Daniela Milović, Nenad Milošević