

Eksperimentalna karakterizacija turbulencije u bežičnom optičkom kanalu

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

Apstrakt— U ovom radu prikazani su eksperimentalni rezultati dobijeni u laboratorijski kontrolisanim uslovima za karakterizaciju pojave turbulencije u slobodnom prostoru pri optičkom prenosu (FSO - free space optics). Prikupljeni podaci korišćeni su za statističku karakterizaciju funkcije gustine verovatnoće (pdf - probability density function) fluktuacija optičkog signala. U literaturi postoji niz empirijskih modela za različite režime turbulencije. Dobijeni pdf je upoređivan sa odabranim modelima iz literature u cilju definisanja statističkih osobina realnog turbulentnog kanala što je značajno za proračun performansi FSO sistema. Analiza je pokazala da se rezultati dobijeni pod datim eksperimentalnim uslovima dobro poklapaju sa eksponencijalno - Vejbulovim modelom turbulencije.

Ključne reči—funkcija gustine verovatnoće; FSO link; turbulencija; scintilacija.

I. UVOD

Optičke komunikacije kod kojih se optički signali prostiru kroz slobodni prostor (FSO - free space optical communication) nude pristup optičkom delu spektra, rešavajući tako probleme sa zagušenjem radio spektra [1], [2]. Pored toga, FSO sistemi su značajni kao odgovor na sve veću potrebu za brzom bežičnom komunikacijom. Danas, FSO sistemi se upotrebljavaju u lokalnim i metro mrežama, u komunikaciji između zemaljskih stanica i satelita [3]. Često su i rešenje u prevazilaženju problema takozvane “poslednje milje“, koriste se za dovođenje interneta u ruralna područja i međusobno povezivanje mobilnih baznih stanica.

Glavni nedostatak FSO sistema je slabljenje optičkog signala u slobodnom prostoru usled prisustva nepovoljnih atmosferskih uslova (kiša, sneg, uslovi slabe vidljivosti) [4]. Apsorpcija i rasejanje svetlosti u magli, oblacima, prašini i dimu značajno slabe laserski snop i ograničavaju performanse sistema i dostupnost optičke veze [1, 2, 4, 5]. Velike varijacije slabljenja mogu čak prouzrokovati relativno duge periode prekida optičke veze.

Performanse optičkog sistema koji radi u uslovima turbulencije mogu se definisati ukoliko je poznat matematički model funkcije gustine verovatnoće (pdf - probability density

function) zračenja optičkog signala (scintilacije) [2], [5]. Prema tome, prvi korak u proučavanju prenosa optičkog talasa kroz slobodni prostor je identifikacija pdf-a koji opisuje promenu intenziteta signala u svim uslovima turbulencije. Tokom godina, u literaturi se pojavljuje veći broj različitih teorijskih modela [4], [6]-[12], ali još uvek ne postoji jedinstvena raspodela koja opisuje varijacije intenziteta prenosnog signala u svim režimima turbulencije.

Raspodele koje su najčešće korišćene u literaturi su lognormalna (LN - lognormal) [4], inverzna Gausova kao manje složena raspodela u poređenju sa LN raspodelom [6], takozvana Beckmanova raspodela [7], Gama-Gama (GG - Gamma-Gamma) [8], eksponencijalno-Vejbulova (EW - exponentiated Weibull) [9], [10] i Malaga (M) raspodela [11], [12]. LN model dobro opisuje optički signal u uslovima slabe turbulencije, dok je GG model odličan u uslovima srednjih do visokih turbulencija, a takođe dobro aproksimira promene signala u uslovima slabe turbulencije. Bez obzira na to što je Beckmanova raspodela pokazala dobro poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima, zbog kompleksne matematičke forme nije bila povoljna za širu primenu u analitičkoj analizi FSO sistema. U novije vreme, kao alternativa LN i GG raspodelama, predloženi su EW i M modeli raspodele. M model je predložen kao generalni statistički model koji dobro opisuje i sferne i ravanske talase u različitim režimima turbulencije.

Neke od strategija koje se mogu koristiti za prevazilaženje scintilacionih efekata signala uključuju povećanje prenosne optičke snage, upotrebu različitih talasnih dužina, korišćenje više predajnika/prijemnika. U svakom slučaju, veoma je važno tačno opisati uslove turbulencije u FSO kanalu, kako bi se ublažili negativni efekti i poboljšale performanse posmatranog optičkog sistema. U radovima [9] i [10], EW je predložen kao pogodan model za opis realnog kanala turbulencije između krovova dve zgrade duž naseljenog terena srednje gustine u Barseloni. Prikazana je eksperimentalna i uporedna analiza sa ostalim modelima turbulencije, zajedno sa rezultatima simulacije. U radu [13], zabeležena je eksperimentalna validacija FSO kanala u priobalnom okruženju modelovanjem koeficijenta slabljenja u kanalu u zavisnosti od temperature i relativne vlažnosti vazduha, i temperature kondenzacije. Određivanje slabljenja FSO veze u uslovima tropske kiše dato je u radu [14], a eksperimentalna verifikacija modela magle u turbulentnom kanalu u laboratorijskim uslovima u radu [15].

U ovom radu prikazani su rezultati dobijeni u laboratorijski kontrolisanim uslovima u zatvorenom prostoru za

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

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

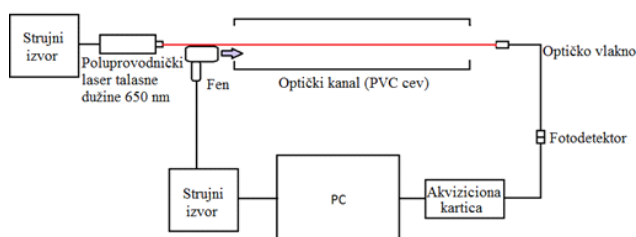
Nenad Milošević – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18115 Niš, Srbija, (e-mail: nenad.milosevic@elfak.ni.ac.rs).

modelovanje slabljenja signala u FSO kanalu. Detaljan opis eksperimenta i deo dobijenih rezultata prikazan je i u radu [16]. U eksperimentalne svrhe, korišćena je kratka turbulentna komora, dužine 3 m, napravljena od PVC cevi. Modulirani predajni signal je emitovan duž komore u kojoj su prisutni efekti turbulencije. Primljeni signal je demodulisan. Izmereni podaci su obrađeni i dobijeni histogram tj. pdf inteziteta primljenog optičkog signala upoređivan sa modelima koji su već predloženi u literaturi. Dobijeni rezultati pokazuju najbolje poklapanje sa EW raspodelom.

II. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Šematski prikaz izvedenog eksperimenta dat je na Sl. 1. Postavka se sastoji od tri glavna dela:

- izvor svetlosti
- komora za turbulenciju
- fotodetektor sa sistemom za akviziciju podataka



Sl. 1. Šematski prikaz eksperimenta

Na Sl. 2. prikazana je fotografija eksperimenta u Laboratoriji za telekomunikacione sisteme Univerziteta u Nišu, na Elektronskom fakultetu.

Kao izvor svetlosti korišćen je poluprovodnički laser. Talasna dužina emitovane svetlosti je 650 nm, što je u crvenom delu vidljivog spektra, pa je snop vidljiv i zbog toga se njegov položaj može lako prilagoditi. Korišćen je izvor konstantne struje za pobudu laserskih dioda. Injekciona struja je prilagođena u opsegu od nula do 50 mA, što odgovara emitovanoj optičkoj snazi između nula i 10 mW. Strujni prag laserskog zračenja je detektovan na 10,5 mA, na sobnoj temperaturi. Optička snaga izmerena je pomoću termopilot detektora koji je dostupan u laboratoriji, a merenja su potvrdila dobru stabilnost emitovane snage nakon izvesnog vremena potrebnog da se temperatura stabilizuje.

Turbulentna komora, unutrašnjeg prečnika 20 cm izgrađena je korišćenjem više međusobno povezanih PVC cevi, ukupne dužine 3 m. Duž komore raspoređena su četiri ventilatora (fena), pri čemu je svaki ventilator usmeren na osu komore, tj. na smer prostiranja laserskog snopa. Ventilatori se kontrolišu pojedinačno u smislu nivoa napona napajanja, što rezultira kontrolom brzine kojom se okreću, a time i kontrolom brzine protoka vazduha koji proizvode. Pored toga, temperaturni gradijent je dodat pomoću fena za kosu koji duva vrući vazduh na jednom kraju komore. Pored toplotnog gradijenta, fen dodaje snagu turbulencije svojim dodatnim protokom vazduha. Promenom ugla pod kojim je fen usmeren u odnosu na putanju širenja laserskog zraka mogu se postići različiti uslovi turbulencije, zahvaljujući različitim gradijentima temperature i uslovima protoka vazduha.



Sl. 2. Fotografija eksperimenta iz laboratorije

Laserski zrak pada na čeonu površinu konektora multimodnog optičkog vlakna, a zatim se vodi kratkim vlaknom do prijemnika sa PIN fotodiodom. Optički prijemnik je dizajniran i izrađen u laboratoriji i povezan sa sistemom za akviziciju. Sistem akvizicije zasnovan je na Arduino platformi i koristi svoj interni ADC (analogno-digitalni) pretvarač kako bi uzorkovao analogni signal iz prijemnika. Nakon svake konverzije, mikrokontroler prenosi podatke putem USB veze na host računar gde se podaci čuvaju za dalju obradu.

III. INTERPRETACIJA EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

Na početku eksperimenta utvrđeni su referentni nivoi signala testiranjem kombinacije predajnik/prijemnik bez ikakvih turbulencija u prenosnom kanalu. Prijemnik je tipa visoke impedanse. ADC rezolucija je 4,9 mV. Prijemnik je ograničen nivoom šuma predpojačavača koji iznosi $40\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, a za propusni opseg koji se razmatra može se prevesti u ulaznu struju šuma od 16 nA. Zbog toga je nivo šuma prijemnika ispod granice ADC rezolucije i prijemnik je u stanju da precizno detektuje konstantnu optičku snagu.

Pojam turbulencije često se karakteriše normalizovanom varijansom fluktuacija zračenja [5] ili indeksom scintilacije, kao

$$\sigma_I^2 = \frac{E[I^2]}{(E[I])^2} - 1, \quad (4)$$

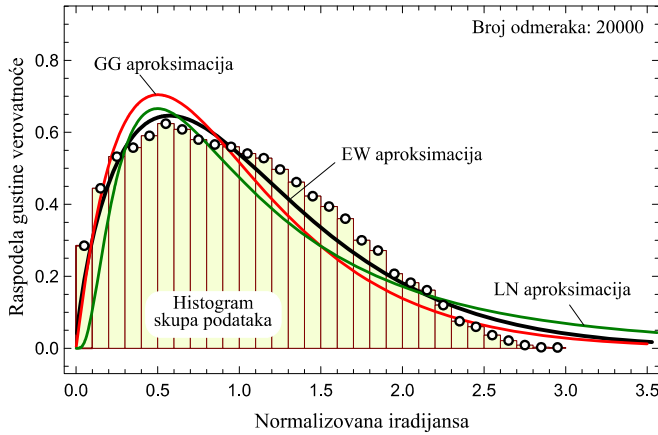
gde je I nivo zračenja na prijemnoj strani, a $E[\cdot]$ je operator matematičkog očekivanja [17]. Zračenje je direktno proporcionalno izmerenoj fotostruji, a samim tim i proporcionalno procesa na izlazu sistema akvizicije, X . Momenti stohastičkog procesa X se estimiraju na osnovu skupa odmeraka $\{x_i, 1 \leq i \leq N\}$ i mogu se definisati na sledeći način

$$E[X^k] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^k, \quad (5)$$

gde je indeks scintilacije $\sigma_I^2 = E[X^2]/(E[X])^2 - 1$, sve dok je proces ergodičan.

Kako se ventilatori uključuju u raznim kombinacijama,

uspostavljaju se različiti uslovi turbulencije, a nivoi primljenog signala pokazuju manje ili veće varijacije. Nakon prikupljanja velikog broja uzoraka, podaci su obrađeni u cilju definisanja statističkih parametara signala. Da bismo procenili pdf koji opisuje detektovane nivoe signala, iz svake serije uzoraka konstruisan je histogram, a zatim normalizovana skala tako da se ispuniti uslov normalizacije verovatnoće (Sl. 3). Ovako dobijeni pdf je dalje upoređivan sa postojećim modelima u literaturi. Na Sl. 3, prikazane su i krive funkcije gustine verovatnoće LN, GG i EW modela.



Sl. 3. Histogram prikupljenih podataka, normalizovan za procenu pdf-a
Indeks scintilacije je $\sigma_i^2 = 0.3614$

IV. PREGLED MODELA TURBULENCIJE U LITERATURI

Idealan teorijski model koji opisuje promene nivoa prenosnog signala bio bi onaj koji je validan u svim režimima turbulencije, za bilo koju veličinu prijemne aperture. Potreban je zatvoreni matematički oblik modela, a da njegovi parametri budu direktno povezani sa fizičkim parametrima atmosferskih uslova. Nažalost, takav savršeni model još uvek nije poznat, ako postoji. Neki od najčešće korišćenih modela u literaturi definisani su u ovom odeljku i upoređeni sa dobijenim eksperimentalnim rezultatima u sledećem.

LN model je najčešće korišćen model u uslovima slabe turbulencije [1], [4]. Dobijen je na osnovu prvog reda Ritove aproksimacije i pdf fluktuacija inteziteta signala ima sledeći oblik

$$p_I(x) = \frac{1}{x\sigma_i\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log x + \sigma_i^2/2)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad x > 0 \quad (6)$$

gde je σ_i^2 varijansa normalizovanog log-zračenja i $E[\log I] = -\sigma_i^2/2$. Indeks scintilacije koji odgovara LN modelu turbulencije se izračunava kao $\sigma_{LN}^2 = -1 + \exp(\sigma_i^2)$.

Nakagami- m model koji je poznat u karakterizaciji radio prenosa može se primeniti i u opisu prenosa optičkog talasa [7] kao Backman/modifikovani Rician model turbulencije. Funkcija gustine verovatnoće normalizovanog inteziteta signala, I , u tom slučaju, ima sledeći oblik

$$p_I(x) = \frac{1}{b} \exp\left(-\frac{1+x}{b}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{x}{b}}\right), \quad b, x > 0, \quad (7)$$

gde je $I_0(\cdot)$ modifikovana Beselova funkcija prve vrste [17]. Model je validan za indekse scintilacije ispod 2. Teorijski indeks scintilacije je $\sigma_{I_{MR}}^2 = -1 + \frac{2}{(1+1/b)^2} L_2(-1/b)$, gde je

$$L_2(x) \text{ Lagerov polinom drugog reda } L_2(x) = x^2/2 - 2x + 1.$$

GG model turbulencije [2], [8] predstavlja stohastički model baziran na teoriji scintilacije. Ovaj model podrazumeva fluktuacije inteziteta signala kao proces modulacije koji nastaje zbog small-scale i large-scale vrtloga turbulencije. I small-scale i large scale efekti se opisuju Gama raspodelom, odakle i potiče ime ovog modela turbulencije. Konačni pdf normalizovane iradijansu, I , ima sledeći oblik

$$p_I(x) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta x}), \quad \alpha, \beta, x > 0 \quad (8)$$

gde je $\Gamma(\cdot)$ Gama funkcija i $K_\nu(\cdot)$ Beselova funkcija drugog reda [17]. Parametri α i β su parametri broja efektivnih large-scale i small-scale sketerera, respektivno, koji su u direktnoj vezi sa atmosferskim parametrima C_n^2 i l_0 . Indeks scintilacije se može izračunati korišćenjem $\sigma_{I_{GG}}^2 = \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - 1$.

M statistički model [11], [12] je predložen kao generalizovani model koji se može svesti na skoro sve prethodno pomenute modele u literaturi. Formulacija ovog modela je u vidu sledećeg pdf-a iradijansu I

$$p_I(x) = A^{(G)} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^{(G)} x^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k}\left(2\sqrt{\frac{\alpha x}{\gamma}}\right), \quad \alpha, \theta, \gamma, x > 0 \quad (9)$$

gde je $A^{(G)} = \frac{2}{\gamma\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\gamma\theta}{\gamma\beta+1}\right)^\theta$ i

$$a_k^{(G)} = \frac{(\theta)_{k-1} (\alpha\gamma)^{\frac{k}{2}}}{[(k-1)!]^2 \gamma^{k-1} (\gamma\theta+1)^{k-1}}, \quad a(t)_i \text{ Pohamerov simbol i } \theta$$

parameter Nakagami- m raspodele.

EW model turbulencije [9], [10] je pokazao odlično poklapanje sa rezultatima simulacije i eksperimentalnim rezultatima u uslovima slabih do srednjih turbulencija u FSO kanalu u svim uslovima usrednjavanja aperture. Još jedna karakteristika ovog modela je jednostavan zatvoreni analitički oblik pdf-a, koji se može prikazati kao [9]

$$p_I(x) = \alpha\beta x^{\beta-1} \exp(-x^\beta) [1 - \exp(-x^\beta)]^{\alpha-1}, \quad \alpha, \beta, x > 0, \quad (10)$$

Indeks scintilacije ima oblik $\sigma_{I_{EW}}^2 = \frac{\Gamma(1+2/\beta)g_2(\alpha, \beta)}{\alpha(\Gamma(1+1/\beta)g_1(\alpha, \beta))^2} - 1$, gde je

$$g_n(\alpha, \beta) = \Gamma(\alpha) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!(j+1)^{1+n/\beta} \Gamma(\alpha-j)}.$$

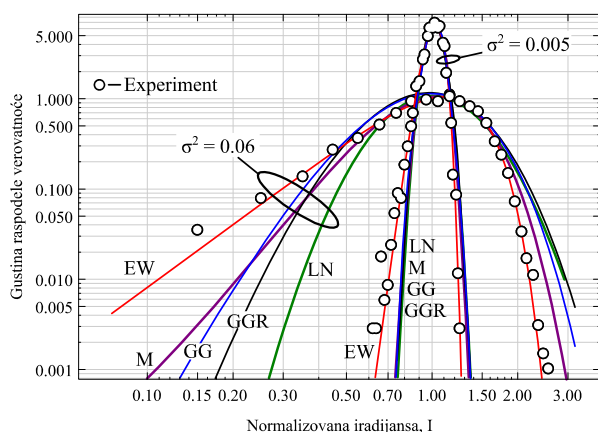
V. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

Promenom uglova i brzina ventilatora dobijeni su uslovi u kanalu koji rezultiraju vrednostima indeksa scintilacije u rasponu od 0.0053 do 0.3614, koji su stoga klasifikovani kao uslovi slabe turbulencije. Uslovi jake turbulencije zahtevaju duže prenosne deonice i/ili jače ventilatore. Koristeći

prikupljene podatke, vršili smo upoređivnje dobijenog modela sa modelima navedenih u prethodnom odeljku. Prikazane krive su fitovane na osnovu kriterijuma najmanje srednje kvadratne vrednosti, pozivanjem Levenberg-Markuardt algoritma [18].

Na Sl. 4 i 5 prikazane su funkcije gustine verovatnoće normalizovane iradijance I za različite indekse scintilacije.

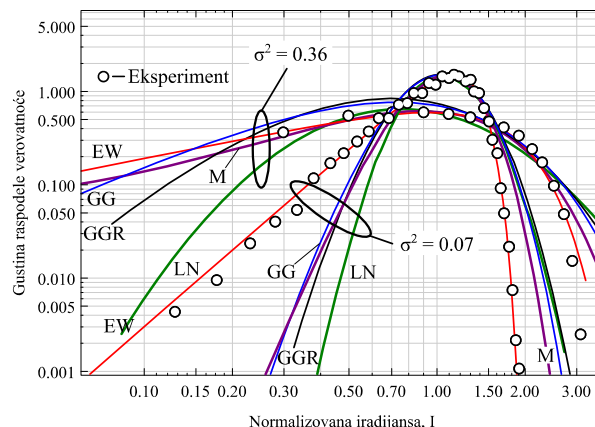
Suprotno očekivanjima, LN model je pokazao najslabije poklapanje sa dobijenim rezultatima osim u uslovima najslabije turbulencije. Ovo je posebno važno kada se razmatraju pdf repovi, jer verovatnoća repa ima veliki značaj u proceni performansi telekomunikacionih sistema. U tom delu grafika, vidno je odstupanje LN modela u odnosu na dobijeni eksperimentalni model.



Sl. 4. Eksperimentalni rezultati dobijeni u režimu slabe turbulencije, upoređeni sa modelima iz literature kada je indeks scintilacije $\sigma_i^2 = 0.06$ i $\sigma_i^2 = 0.005$

Nešto bolje poklapanje se postiže u poređenju sa GG modelom. Razmatrana su dva slučaja: jedan koji odgovara parametrima prema Ritovoj teoriji za ravne talase (GGR), a drugi koji odgovara slobodnom izboru vrednosti parametara (GG). Primećeno je da u najslabijim uslovima turbulencije postoji mala razlika između ova dva slučaja. Sa slika se uočava bolje poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima kada indeks scintilacije raste. Drugi razmatrani slučaj GG modela daje bolje rezultate, što dovodi do zaključka da Ritov-a aproksimacija ravnog talasa nije validna u potpunosti za uslove koji se ispituju. Kada su parametri u GG modelu nezavisni, rezultati pokazuju da su fitovane vrednosti parametra α mnogo veće od vrednosti parametra β . Ovo potvrđuje da je laserski snop koji se koristi samo delimično koherentan i da je dužina koherentnosti relativno mala [19].

Sa slika se može primetiti vidno odstupanje M modela od izmerenih podataka, što ukazuje na veliku kompleksnost ovog modela. Tačnije, postoje značajne numeričke poteškoće pri pokušaju da se podaci o slaboj turbulenciji prilagode ovom opštem M modelu. Slični problemi su primećeni i za opšti GG model u uslovima slabe turbulencije.



Sl. 5. Eksperimentalni rezultati dobijeni u režimu slabe turbulencije i upoređeni sa modelima iz literature kada je indeks scintilacije $\sigma_i^2 = 0.36$ i $\sigma_i^2 = 0.07$

Rezultati pokazuju da se EW raspodela najbolje poklapa sa izmerenim eksperimentalnim rezultatima. U analizi u parametri ove raspodele birani nezavisno s obzirom na to postoji ograničenja za definisanje parametara u različitim atmosferskim uslovima. Za niže vrednosti normalizovane iradijance, EW grafik se dobro slaže sa dobijenim grafikom, dok je to slaganje za veće vrednosti I skoro pa odlično.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je deo originalnih rezultata dobijenih u laboratorijskim uslovima u cilju karakterizacije pdf-a iradijance signala u FSO kanalu sa turbulencijama. Analiza je pokazala da je EW model turbulencije adekvatan matematički model za izmerene rezultate pod datim ograničenjima. Uslovi turbulencije u opisanom laboratorijskom okruženju zatvorenog prostora samo su približno reprezentativni za atmosferske uslove u realnim komunikacionim FSO sistemima. Zbog toga bi dalja istraživanja u ovoj oblasti trebalo usmeriti ka izvođenju eksperimenata u uslovima turbulencije na otvorenom i pri prenosu na dužim deonicama FSO kanala.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] V.I. Tatarskii: Wave Propagation in Turbulent Atmosphere [in Russian], Moscow, SSSR: Nauka, 1967.
- [2] L. Andrews, R. Philips: Laser Beam Propagation through Random Media, 2nd ed., Bellingham, Washington, USA: Spie Press, 2005.
- [3] M. Toyoshima, H. Takenaka, Y. Takayama: Atmospheric turbulence-induced fading channel model for space-to-ground laser communications links, Optics Express, Vol. 19, No. 17, 2011, pp. 15965 – 15975.
- [4] X. Zhu, J.M. Kahn: Free-Space Optical Communication through Atmospheric Turbulence Channels, IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No. 8, Aug. 2002, pp. 1293 – 1300.

- [5] L.C. Andrews, R.L. Phillips, C.Y. Hopen: *Laser Beam Scintillation with Applications*, Bellingham, Washington, USA: Spie Press, 2001.
- [6] N.D. Chatzidiamentis, H.G. Sandalidis, G.K. Karagiannidis, M. Matthaiou: Inverse Gaussian modeling of turbulence-induced fading in free-space optical systems, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 10, May 2011, pp. 1590 – 1596.
- [7] J.H. Churnside, S.F. Clifford: Log-normal Rician probability density function of optical scintillations in the turbulent atmosphere, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 4, No. 10, 1987, pp. 1923 – 1930.
- [8] M.A. Al-Habash, L.C. Andrews, R.L. Phillips: Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media, *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 8, Aug. 2001, pp. 1554 – 1562.
- [9] R. Barrios, F. Dios: Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves, *Optics Express*, Vol. 20, No. 12, 2012, pp. 13055 – 13064.
- [10] R. Barrios, F. Dios: Exponentiated weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence, *Optics & Laser Technology*, Vol.45, Feb. 2013, pp. 13 – 20.
- [11] A. J-Navas, J.M. G-Balsells, J.F. Paris, A. P-Notario: A Unifying Statistical Model for Atmospheric Optical Scintillation, *Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes*, InTech, DOI: 10.5772/25097, July 2011.
- [12] J.M. G-Balsells, A. J-Navas, J.F. Paris, M. C-Vázquez, A. P-Notario: Novel formulation of the M model through the Generalized-K distribution for atmospheric optical channels, *Optics Express*, Vol. 23, No. 5, 2015, pp. 6345 – 6358.
- [13] W.G Alheadary, K.-H. Park, N. Alfaraj, Y. Guo, E. Stegenburgs, T.K. Ng, B.S. Ooi, M.-S. Alouini: Free-space optical channel characterization and experimental validation in a coastal environment, *Optics Express*, Vol. 26, No. 6, 2018, pp. 6614 – 6628.
- [14] S.A. Al-Gailani, A.B. Mohammad, U.U. Sheikh, R.Q. Shaddad: Determination of rain attenuation parameters for free space optical link in tropical rain, *Optik*, Vol. 125, No. 4, Feb. 2014, pp. 1575 – 1578.
- [15] M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, H. Le-Minh, S. Zvanovec, J. Perez, J. Pesek, O. Fiser: Experimental validation of fog models for FSO under laboratory controlled conditions, 24th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 8-11 Sept. 2013, pp. 19 – 23.
- [16] D. N. Milić, D. M. Milović, J. A. Anastasov, "Experimental indoor validation of weak intensity fluctuations over free-space optical communication link", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 18, No. 1, February 2021, pp. 15-27.
- [17] I.S. Gradshteyn, I.M. Ryzhik: *Table of Integrals, Series, and Products*. 6th ed., New York: Academic, 2000.
- [18] J. More: *The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory Numerical Analysis*, Springer, Berlin Heidelberg, 1977.
- [19] O. Korotkova, L.C. Andrews, R.L. Phillips: Model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in Lasercom, *Optical Engineering*, Vol. 43, No. 2, Feb. 2004, pp. 330 – 341.

ABSTRACT

In this paper, experimental results obtained in laboratory - controlled conditions for the characterization of turbulence over indoor free space optical (FSO) link are presented. The collected data is used for statistical characterization of the probability density function (pdf) of fluctuations of transmitted optical signal. There are several empirical models in the literature for different turbulence regimes. The obtained pdf is compared with selected models from the literature in order to define the statistical properties of the real turbulent channel, which is important in determining the performance of the FSO system. The analysis has shown that the results obtained under the given conditions coincide well with the exponential - Weibull model of turbulence.

Experimental Turbulence Characterization over Free-space Optical Communication Link

Dejan Milić, Daniela Milović, Jelena Anastasov, Nenad Milošević