

Analiza kvaliteta primljenog signala u FSO sistemima modelovanim Gama-Gama raspodelom i različitim modulacionim formatima

BRANIMIR S. JAKŠIĆ, Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem
u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet
tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
ORCID: 0000-0001-66836-0021

JELENA M. TODORVIĆ, Univerzitet u Prištini
sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici,
Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
ORCID: 0000-0002-2018-8421

VLADIMIR D. MAKSIMOVIĆ, Univerzitet u Prištini
sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici,
Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
ORCID: 0000-0001-8479-0027

Originalni naučni rad

UDC: 004.7:621.389

DOI: 10.5937/tehnika2406709J

U radu je izvršena analiza primljenog signala u FSO komunikacionom sistemu koji je modelovan Gama-Gama raspodelom. Izračunate su vrednosti srednje verovatnoće greške po bitu (ABER) za slučaj kada je signal modulisan BPSK, DPSK, OOK, POLSK i MPPM modulacionom šemom. Na osnovu analitičkih izraza dati su numerički rezultati u formi grafika gde se na osnovu ponašanja grafika može utvrditi zavisnost ABER-a od različitih parametara komunikacionog FSO kanala.

Ključne reči: FSO, Gama-Gama raspodela, BPSK, DPSK, OOK, PoLSK, MPPM

1. UVOD

Free Space Optics (FSO) je bežična komunikaciona tehnologija koja koristi svetlost za prenos podataka kroz vazduh, obično u obliku infracrvene (IR) ili vidljive svetlosti. To je tehnologija linije vida i koristi se kao alternativa optičkim kablovima u nekim slučajevima, posebno za komunikaciju kratkog dometa. eDomet signala koji se prenosi FSO linkom je kratak i obično je do 2.5 km. [1, 2]. FSO može da ponudi prenos podataka velikog propusnog opsega sa brzinama u rasponu od nekoliko Mb/s do Gb/s, u zavisnosti od tehnologije i uslova okoline. Pošto se signali prenose vazduhom, prepreke kao što su zgrade, drveće ili čak nepovoljni vremenski uslovi (magla, kiša, sneg) mogu degradirati signal ili prekinuti komunikaciju. Međutim, na njega manje utiču elektromagnetne sme-

tnje u poređenju sa tradicionalnim bežičnim tehnologijama radio frekvencije (RF). Dobro definisani uski snop signala bez slabljenja snage je ono što karakteriše FSO, što je i razlog veće otpornosti na elektromagnetne smetnje i interferenciju sa susednim kanalima. Visok stepen bezbednosti je takođe ono čime se karakteriše. [3].

Kada su u pitanju vremenski uslovi, atmosferske prilike najviše utiču na degradaciju kvaliteta signala. Najveći uticaj imaju magla i atmosferska turbulencija, dok kiša i sneg imaju znatno manji uticaj. Fluktuacije intenziteta, širenje snopa i scintilacija su samo neke od pojava koje se mogu javiti pod uticajem atmosferskih efekata na FSO signal [4].

FSO uključuje određena slabljenja i gubitke u sistemu izazvanog atmosferskom turbulencijom. Jačina turbulencije, odnosno slabe ili jake fluktuacije obično se klasifikuju na osnovu vrednosti Rojtove varijanse, koja se računa kao:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (1)$$

Parametar C_n^2 označava indeks prelamanja koji se koristi kao mera za jačinu turbulencije. Za horizontalne

Adresa autora: Branimir Jakšić, Univerzitet u Prištini
sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet
tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Knjaza Miloša 7
e-mail: branimir.jaksic@pr.ac.rs
Rad primljen: 07.10.2024.
Rad prihvaćen: 12.12.2024.

putanje propagacije parametar C_n^2 se smatra konstantnim sa srednjim vrednostima od $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ do $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ za kanale od slabe do jake turbulencije, respektivno. Parametar k je talasni broj, koji se definiše kao $k=2\pi/\lambda$ sa talasnom dužinom λ , dok je L rastojanje između predajnika i prijemnika, odnosno dužina propagacije optičkog signala.

Parametar σ_R^2 se koristi za klasifikaciju režima turbulencije, poput slabe turbulencije ($\sigma_R^2 < 1$), umerene turbulencije ($\sigma_R^2 \approx 1$) i jake turbulencije ($\sigma_R^2 > 1$), dok kada $\sigma_R^2 \rightarrow \infty$ u pitanju je režim zasićenja. U slučaju slabe turbulencije, može se pretpostaviti da je Rojtova varijansa približno jednaka indeksu scintilacije.

Srednja verovatnoća greške po bitu (ABER), verovatnoća otkaza, kapacitet kanala i odnos signal-šum (SNR) su mere performansi koje se najčešće koriste kao parametri kvaliteta signala na prijemu FSO sistema. Poznavanje statistike FSO kanala je nepohodno kako bi se odredile ove performanse.

ABER predstavlja odnos broja pogrešno primljenih bitova i ukupnog broja prenetih bitova tokom posmatranog vremenskog intervala. Broj pogrešno primljenih bitova je broj primljenih bitova toka podataka preko komunikacionog kanala koji su izmenjeni zbog šuma, smetnji, izobličenja ili grešaka u sinhronizaciji bitova. Zbog toga, ABER predstavlja jednu od najbitnijih mera kvaliteta bežičnih komunikacionih sistema. Da bi se odredio ABER potrebno je poznavati združenu gustinu verovatnoće - PDF (Probability Density Function), tj. ABER zavisi od statistike kanala i od primenjene modulacione tehnike [4].

2. GAMA-GAMA RASPODELA

Gama-Gama raspodela se koristi za modelovanje atmosferskog kanala u slaboj, umerenoj i jakoj atmosferskoj turbulenciji i pruža dobre rezultate u poređenju sa eksperimentalnim.

Model Gama-Gama turbulencije zasnovan je na modulacionom procesu gde se pretpostavlja da se fluktuacija intenziteta koja prelazi kroz turbulentnu atmosferu sastoji od efekata malih i velikih razmera [5].

Funkcija gustine verovatnoće za Gama-Gama model u funkciji od intenziteta koji se zasniva na pretpostavci da su efekti i velikih i malih razmera regulisani raspodelom Gama, data je izrazom:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad (2)$$

gde $\Gamma(\cdot)$ predstavlja Gama funkciju, a $K_v(\cdot)$ je modifikovana Beselova funkcija druge vrste v -tog reda. Parametri α i β su parametri atmosferske turbulencije koji se mogu izraziti kao:

$$\alpha = \left[\frac{e^{\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}} - 1}{-1} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\beta = \left[\frac{e^{\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}} - 1}{-1} \right]^{-1} \quad (4)$$

gde σ_R^2 predstavlja Rojtuovu varijansu.

3. DIFERENCIJALNA FAZNA MODULACIJA (DPSK)

Tehnika DPSK (Differential Phase Shift Keying) modulacije je tehnika direktne detekcije koja se koristi za komunikaciju na kratkim udaljenostima. Prednost DPSK modulacije u odnosu na PSK je u činjenici da procena faze nosioca na prijemniku nije potrebna, jer DPSK prijemnik donosi odluku na osnovu fazne razlike između signala primljenih tokom dva uzastopna intervala simbola [6, 7]. ABER u zavisnosti od fluktuacije intenziteta optičkog signala kada se prenos u FSO sistemu vrši preko DPSK može se izraziti kao [8]:

$$P_e = \frac{1}{2} \int_0^\infty e^{-\frac{P_T R}{\sigma_N} I} f_I(I) dI \quad (5)$$

gde P_T predstavlja srednju predajnu snagu, R je osetljivost fotodiode, a σ_N je varijansa šuma. Kako bi se opisao kanal modelovan određenom raspodelom koristi se PDF primljenog signala i ovde je onačen sa $f_I(I)$. Zamenom PDF-a za Gama-Gama model (2) u jednačini (5) za dobijanje ABER-a u zavisnosti od fluktuacija intenziteta optičkog signala kada se prenos u FSO sistemu vrši preko DPSK dobija se:

$$P_e = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} e^{-\frac{P_T R}{\sigma_N} I_a} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I_a) dI_a \quad (6)$$

Rešenje u zatvorenom obliku za ABER za slučaj prenosa korišćenjem DPSK modulacione šeme je:

$$P_e = \frac{1}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta\sigma_N}{P_T R} \right)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} \times \times G_{1,2}^{2,1} \left[\frac{\alpha\beta\sigma_N}{P_T R} \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+\beta}{2} \\ \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (7)$$

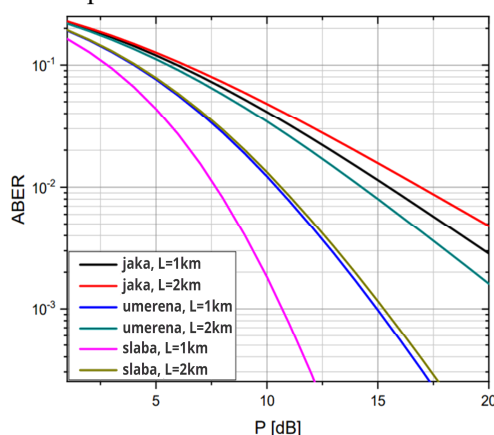
Parametri σ_R^2 , α i β dobijeni za različite vrednosti dužine linka i indeksa prelamanja prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri atmosfarske turbulencije u zavisnosti od jačine turbulencije.

C_n^2		$6 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$
$L=1000$ m	σ_R^2	0,23	0,77	4,65
	α	10,28	4,80	4,49
	β	8,77	3,08	1,25
$L=1500$ m	σ_R^2	0,48	1,63	9,79
	α	6,05	4,02	5,64
	β	4,47	1,89	1,10
$L=2000$ m	σ_R^2	0,82	2,76	16,58
	α	4,68	4,07	6,85
	β	2,93	1,47	1,05

FSO sistem radi na talasnoj dužini od $\lambda=875$ nm. Sistem je posmatran pod uticajem slabe, umerene i jake atmosfarske turbulencije sa indeksima prelamanja $C_n^2=6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $C_n^2=2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ i $C_n^2=1,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, respektivno, kao i za dužine linka $L=1000$ m i $L=2000$ m.

Na slici 1 prikazano je ponasanje ABER-a u zavisnosti od snage $P=P_T R/\sigma_N$, a za slučaj izvedenog analitičkog izraza u zatvorenom obliku za ABER. Može se primetiti da pri nižim stepenima turbulencije ABER brže opada, nego što je to slučaj pri jakoj atmosfarskoj turbulenciji. Kako odnos P raste, tako ABER uzima manje vrednosti. Ukoliko vrednosti atomosferske turbulencije, kao i dužine linka rastu, doći će i do porasta ABER-a.



Slika 1 - ABER za Gama-Gama model kanala pri DPSK modulaciji

Kod DPSK modulacione šeme vrednosti ABER-a su reda 10^{-1} i kreću se sve do $P>20$ dB pri jakoj turbulenciji, pri umerenoj turbulenciji istog reda su do 15 dB, a pri slaboj turbulenciji do 9 dB. Da bi se ABER

smanjio na red 10^{-3} potrebna je znatno viša snaga, za jaku i umerenu turbulenciju znatno više od 20 dB. Za slabu turbulenciju je potrebna snaga od 14 dB kako bi se ABER spustio na red 10^{-3} .

4. BINARNA FAZNA MODULACIJA (BPSK)

BPSK (Binary Phase Shift Keying) je jedna od modulacionih šema koja se često koristi kako bi se izbegle poteškoće u određivanju praga kod OOK modulacije, kao i kako bi se ublažile fluktuacije intenziteta izazvane turbulencijom. U svim uslovima turbulencije, performanse BER-a su uvek bolje kada se koristi BPSK modulaciona šema od performansi sistema sa OOK modulacijom. Tehnika BPSK modulacije je tehnika koherentne detekcije. Koherentni prijemnici su jedan do dva puta osetljiviji od OOK sistema, ali je i složenost koherentnog sistema takođe veća. Demodulacija se može izvršiti pomoću dve metode detekcije, i to homodinska i heterodinska detekcija. Fazni pomeraj se kod BPSK modulacije javlja od 0 stepeni i 180 stepeni [9].

ABER u funkciji od fluktuacije intenziteta optičkog signala modulisanim preko BPSK može se predstaviti kao [8]:

$$P_e = \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left(\frac{P_T R}{\sigma_N} I \right) f_I(I) dI \quad (8)$$

gde P_T predstavlja srednju predajnu snagu, R je osetljivost fotodiode, dok je σ_N varijansa šuma.

Zamenom PDF za Gama-Gama model (2) u jednačini (8) dobija se:

$$P_e = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_T R}{\sigma_N} I_a \right) \times K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} I_a \right) dI_a \quad (9)$$

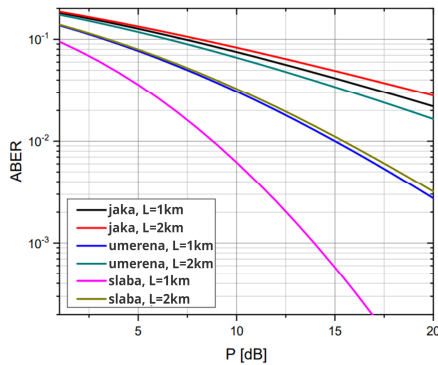
Konačno rešenje za ABER u zatvorenoj formi u slučaju BPSK modulacije je:

$$P_e = \frac{1}{2} - \frac{P_T R}{2\sqrt{\pi}\alpha\beta\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sigma_N} \times H_{3,2}^{1,3} \left[\left(\frac{P_T R}{\alpha\beta\sigma_N} \right)^2 \left| \begin{matrix} \left(\frac{1}{2}, 1 \right), (-\alpha, 2), (-\beta, 2) \\ (0, 1), \left(-\frac{1}{2}, 1 \right) \end{matrix} \right. \right], \quad (10)$$

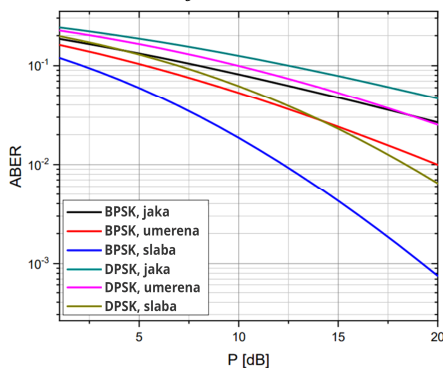
gde $H_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ predstavlja Foksovu H funkciju, koja je, u stvari, generalizacija Majerove G funkcije. Foksova H funkcija se u specijalnom slučaju svodi na Majerovu G funkciju [10, 07.34.26.0008.01].

Na osnovu dobijenog analitičkog izraza u zatvorenoj formi za ABER pri BPSK modulaciji (10),

predstavljani su grafici promene ABER-a u funkciji od odnosa $P=P_T R/\sigma_N$ na slici 2. Na osnovu datih rezultata za srednju verovatnoću greške po bitu može se zaključiti da se bolje performanse FSO prenosa dobijaju za BPSK modulaciju. Kod BPSK modulacije je potrebno mnogo manje snage (tj. odnosa srednje optičke snage na prijemu i varijanse šuma) nego kod DPSK modulacije da bi se dobio isti red ABER-a.



Slika 2 - ABER za Gama-Gama model kanala pri BPSK modulaciji



Slika 3 - Poređenje ABER-a za Gama-Gama model kanala pri DPSK i BPSK modulaciji

Na slici 3 je prikazan grafik promene ABER-a u funkciji od $P=P_T R/\sigma_N$ pod uticajem slabe, umerene i jake turbulencije za DPSK i BPSK modulacionu šemu. Rastojanje od predajnika do prijemnika iznosi $L=1500$ m. Sa slike 3 se može videti da se veće vrednosti ABER-a dobijaju upotrebom DPSK nego BPSK modulacije. Odnosno, BPSK daje bolje karakteristike FSO sistema. Takođe, može se videti da pri BPSK modulacionoj šemi, ABER znatno brže opada sa porastom snage nego kod DPSK modulacione šeme. Pri višim odnosima $P=P_T R/\sigma_N$ postoje značajnije razlike ABER-a za DPSK i BPSK. Ta razlika je veća za niže nivoe atmosferske turbulencije, dok je za jake atmosferske turbulencije razlika približno konstantna duž celog pernosnog opsega odnosa $P=P_T R/\sigma_N$.

5. ON-OFF KEYING (OOK) MODULACIJA

U svom najjednostavnijem obliku, FSO sistemi koriste OOK modulacionu šemu, gde su binarna „1“ i

binarna „0“ predstavljeni prisustvom („on“), odnosno odsustvom („off“) optičkog impulsa. Jednostavnost modulacione šeme OOK ogleda se u činjenici da optički impuls koji predstavlja binarni simbol „1“ uzima ceo signalni interval. IM/DD pomoću OOK je najjednostavnija šema i široko se primenjuje u komercijalno dostupnim FSO sistemima. OOK je veoma osetljiv na turbulenciju kanala [11].

ABER u funkciji od fluktuacije intenziteta optičkog signala kada se prenos ostvaruje korišćenjem OOK modulacione šeme može se predstaviti u obliku [12]:

$$P_e = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left(\frac{gI}{2\sqrt{N_0}} \right) f_I(I) dI \quad (11)$$

gde g predstavlja koeficijent konverzije optičke u električnu energiju, a N_0 srednju optičku snagu šuma. Funkcija $f_I(I)$ predstavlja PDF primljenog signala, odnosno primljene fluktuacije intenziteta, i koristi se za modelovanje kanala atmosferske turbulencije, dok je $\operatorname{erfc}(\cdot)$ komplementarna funkcija greške.

Zamenom PDF za Gama-Gama model (2) u (11) dobija se inicijalni izraz za ABER FSO sistema koji je modulisan OOK modulacionim formatom:

$$P_e = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \operatorname{erfc} \left(\frac{g}{2\sqrt{N_0}} I_a \right) \times K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} I_a \right) dI_a \quad (12)$$

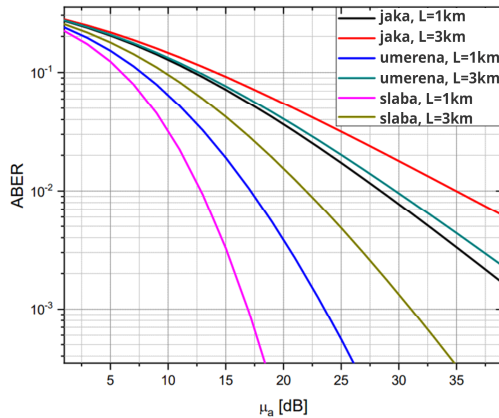
Konačno rešenje za ABER u zatvorenom obliku u slučaju OOK modulacione šeme za Gama-Gama raspodelu je:

$$P_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{4\sqrt{\pi\alpha\beta}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{N_0}} \times \times H_{3,2}^{1,3} \left[\left(\frac{g}{2\alpha\beta\sqrt{N_0}} \right)^2 \left| \begin{matrix} \left(\frac{1}{2}, 1 \right), (-\alpha, 2), (-\beta, 2) \\ (0, 1), \left(-\frac{1}{2}, 1 \right) \end{matrix} \right. \right] \quad (13)$$

Na osnovu dobijenog analitičkog izraza u zatvorenom obliku za ABER za kanal modelovan Gama-Gama raspodelom, (15), urađeni su grafici promene ABER-a u funkciji od električnog SNR koji je definisan sa $\mu_a = \frac{g^2 E[I_a]}{N_0}$, uz pretpostavku da je

$E[I_a]=1$. Razmatran je FSO sistem na talasnoj dužini $\lambda=1550$ nm, a za međusobna rastojanja prijemnika i predajnika $L=1000$ m i $L=3000$ m. Analizirana su tri stepena atmosferske turbulencije: slaba, umerena i jaka, sa indeksima prelamanja $C_n^2=6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $C_n^2=2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ i $C_n^2=1,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, respektivno.

Na slici 4 može se uočiti da kod Gama-Gama modelovanim atmosferskim kanalom pri OOK modulacionom šemom ABER znatno brže opada za kraće u odnosu na duže prenosne deonice. Sličan zaključak se može dobiti ukoliko se posmatra i jačina turbulencije, pri nižem stepenu turbulencije opadanje ABER-a je znatno izraženije nego za više stepene turbulencije.



Slika 4 - ABER za Gama-Gama model kanala pri OOK modulaciji.

6. POLARIZACIONA MODULACIJA (POLSK)

PolSK (Polarization Shift Keying) modulacija je nova digitalna efikasna alternativna tehnika modulacije u FSO sistemima sa koherentnom detekcijom. Koristi se za bežične optičke komunikacije na većim udaljenostima. Veze u FSO sistemima zasnovanim na PolSK modulaciji poboljšale su performanse u pogledu vršne optičke snage. Dakle, može se koristiti kao efikasna metoda za smanjenje uticaja efekata turbulencije [3].

PolSK je tehnika koja koristi polarizaciona stanja (SOP - States of Polarizations) optičkog signala kao parametar za prenos informacija. Informacije se kodiraju različitim SOP-ovima pomoću spoljnog modulatora. FSO sistem primenjuje PolSK modulacionu šemu u kojoj su podaci „1“ i „0“ predstavljeni sa dva linearna ortogonalna stanja polarizacije. Stoga su bitovi podataka u x i y polarizacijama uvek komplementarni.

ABER koji zavisi od fluktuacija intenziteta na prijemu za optički signal koji se prenosi FSO sistemom sa modulacionom šemom PolSK može se izraziti kao [14]:

$$P_e = \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{PR^2}{2\sigma_N^2}} I \right) f_I(I) dI \quad (14)$$

gde je R osetljivost fotodetektora, P je snaga lokalnog oscilatora, dok σ_N predstavlja varijansu šuma.

ABER koji zavisi od fluktuacija intenziteta na prijemu za optički signal koji se prenosi FSO sistemom sa PolSK modulacionom šemom, a za kanal

modelovan Gama-Gama raspodelom dobija se zamenom izraza za odgovarajući PDF (2) u (14):

$$P_e = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{R^2 P}{2\sigma_N^2}} I_a \right) \times K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} I_a \right) dI_a \quad (15)$$

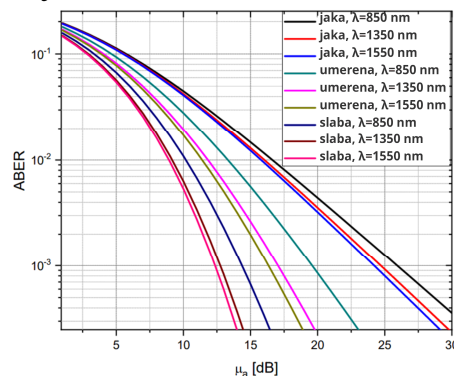
Rešavanjem izraza (15) dobija se ABER u zatvorenom obliku za slučaj PolSK modulacije:

$$P_e = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{2\alpha\beta\sigma_N^2}{R^2 P} \right)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} \times G_{2,3}^{2,2} \left[\frac{2\alpha\beta\sigma_N^2}{R^2 P} \left| \begin{matrix} 1-\frac{\alpha+\beta}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \\ \frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2}, -\frac{\alpha-\beta}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (16)$$

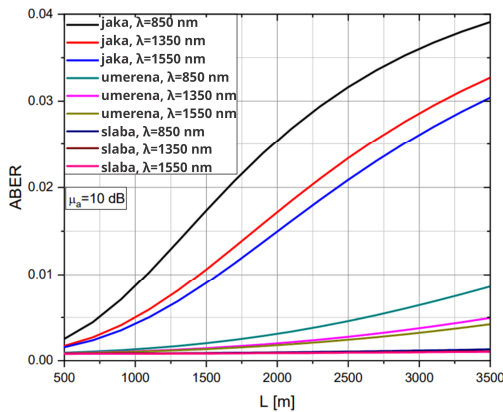
Na osnovu dobijenog analitičkog izraza u zatvorenom obliku za ABER za atmosferski kanal modelovan Gama-Gama raspodelom, (16) predstavljeni su grafici promene ABER-a u zavisnosti od električnog SNR i dužine FSO linka L . Električni SNR na prijemniku za PolSK FSO sistem definisan je kao: $\mu_a = \frac{R^2 P}{\sigma_N^2}$. Razmatran je FSO sistem koji radi na

tri različite talasne dužine: $\lambda=850$ nm, $\lambda=1350$ nm i $\lambda=1550$ nm, kao i tri stepena atmosfereke turbulencije: jaka, umerena i slaba, sa indeksima prelamanja $C_n^2 = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, $C_n^2 = 2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ i $C_n^2 = 6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, respektivno.

Na slici 5 i slici 6 data je promena ABER-a za FSO kanal modelovan Gama-Gama raspodelom u zavisnosti od SNR-a i dužine linka L , respektivno. Sa Slike 5 može se uočiti da se niže vrednosti ABER-a, bolji kvalitet prenosa ostvaruje, za više vrednosti talasne dužine λ . Takođe, kod jačih atmosferskih turbulencija, ABER sporije opada sa porastom SNR-a, nego što je to slučaj za umerene i slabe stepene atmosfereke turbulencije.



Slika 5 - ABER za Gama-Gama model kanala u zavisnosti od SNR-a pri PolSK modulaciji



Slika 6 - ABER za Gama-Gama model kanala u zavisnosti od dužine linka L pri PolSK modulaciji

Sa slike 6 se vidi da jaka atmosferska turbulencija dovodi do bržeg rasta ABER-a pri povećanju dužine FSO linka, L . Za umerenu i slabu atmosfersku turbulenciju rast ABER-a je znatno manje izraženiji. U prvih 1.000 m linka, ABER je gotovo identičan za sve talasne dužine pri umerenom i slabom stepenu atmosferske turbulencije.

7. VIŠEIMPULSNO-POZICIONA MODULACIJA (MPPM)

Pored OOK modulacije, kao tehnika modulacije intenziteta zasnovana na direktnoj detekciji koristi se i impulsno-poziciona modulacija - PPM (Pulse Position Modulation). One se uglavnom široko koriste u optičkim aplikacijama zbog jednostavnosti dizajna i ekonomičnosti. Međutim, imaju lošu efikasnost propusnog opsega, jer su i PPM i OOK tehnike izuzetno osetljive na atmosferske turbulencije.

Za optički MPPM (Multi-Pulse Pulse-Position) modulirani signal koji prenosi FSO sistem, ABER za primljeni intenzitet može se predstaviti kao [15]:

$$P_e = \int_0^\infty \frac{2^{\left\lfloor \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \right\rfloor - 1} \left(\frac{N}{\omega} \right) - 1}{2^{\left\lfloor \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \right\rfloor - 1}} \times \times \operatorname{erfc} \left(\frac{P_T R \left(\frac{\eta A}{\lambda L} \right)^2 I}{2\omega \sqrt{\frac{N}{\sigma_N^2} \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right)}} \right) f_I(I) dI \quad (17)$$

gde je R osetljivost fotodetektora, P_T je srednja predajna optička snaga, η je kvantna efikasnost detektora, A površina detektora u m^2 , λ je radna talasna dužina, L je rastojanje između predajnika i prijemnika i σ_N je varijansa šuma. Parametri N i ω predstavljaju vremenske slotove. U tehnikama MPPM modulacije, perioda frejma signala T podeljena je na N jednakih slotova trajanja $T_s = T/N$. U svakoj periodi frejma bilo

bi aktivno samo $1 \leq \omega \leq N$ slotova, tj. optička snaga se prenosi samo u ω vremenskim slotovima.

Kada se primenjuje MPPM modulaciona šema, ABER na prijemnoj strani za slučaj kada je kanal modelovan Gama-Gama raspodelom se može dobiti zamenom jednačine za PDF (2) u izraz (17):

$$P_e = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{2^{\left\lfloor \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \right\rfloor - 1} \left(\frac{N}{\omega} \right) - 1}{2^{\left\lfloor \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \right\rfloor - 1}} \times \times \int_0^\infty I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_T R \left(\frac{\eta A}{\lambda L} \right)^2}{2\omega \sqrt{\frac{N}{\sigma_N^2} \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right)}} I_a \right) \times \times K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} I_a \right) dI_a \quad (18)$$

Rešavanjem izraza (18) dobija se konačno rešenje za ABER za slučaj MPPM modulacionog formata:

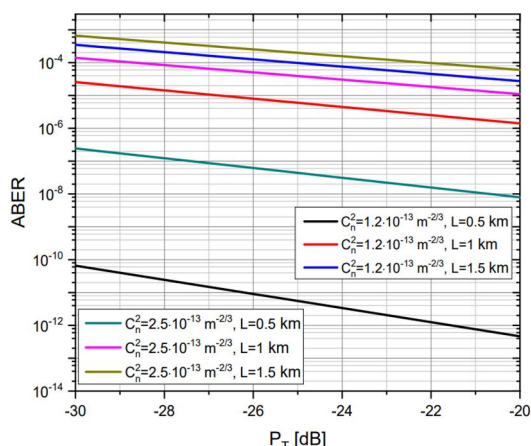
$$P_e = \frac{2^{\left\lfloor \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \right\rfloor - 1} \left(\frac{N}{\omega} \right) - 1}{2^{\left\lfloor \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \right\rfloor - 1}} \times \times \left[1 - \frac{1}{\alpha\beta\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{P_T R \left(\frac{\eta A}{\lambda L} \right)^2}{2\sqrt{\pi\omega}} \sqrt{\frac{N}{\sigma_N^2} \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right)} \times \times {}_3F_{3,2}^{1,3} \left(\left(\frac{P_T R}{2\alpha\beta\omega} \right)^2 \left(\frac{\eta A}{\lambda L} \right)^4 \frac{N}{\sigma_N^2} \log_2 \left(\frac{N}{\omega} \right) \left| \begin{matrix} \left(\frac{1}{2}, 1 \right), (-\alpha, 2), (-\beta, 2) \\ (0, 1), \left(-\frac{1}{2}, 1 \right) \end{matrix} \right. \right) \right] \quad (19)$$

Ovaj FSO sistem za koji je primenjena MPPM modulaciona tehnika razmatra se za različite vrednosti jake turbulencije sa indeksima prelamanja $C_n^2 = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ i $C_n^2 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$. Što se tiče udaljenosti između predajnika i prijemnika, razmatrana su tri slučaja: $L=500 \text{ m}$, $L=1000 \text{ m}$ i $L=1500 \text{ m}$. Pored toga, analiziran je uticaj aktivnih vremenskih slotova ω na performanse ABER-a FSO sistema u jakoj turbulenciji. Numerički rezultati za ABER prikazani su grafički u funkciji srednje predajne optičke snage i jačine atmosferske turbulencije.

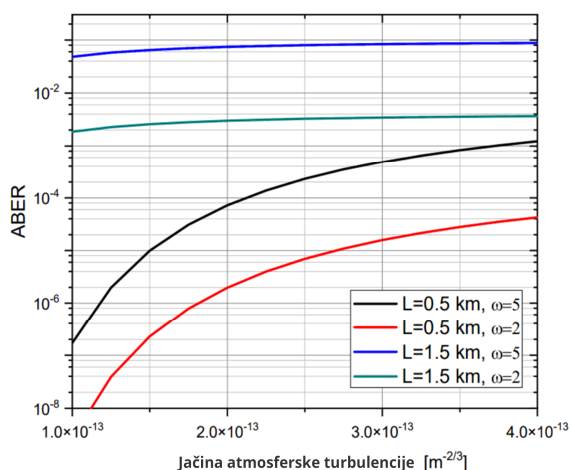
Ponašanje ABER-a za FSO kanal modelovan Gama-Gama raspodelom u funkciji srednje primljene optičke snage je prikazano na slici 7. Sa slike 7 se može videti da se ABER smanjuje gotovo linearno sa povećanjem snage. Za veće vrednosti jake atmosferske turbulencije, kao i za veće udaljenosti između predajnika i prijemnika, ABER ima veće vrednosti. Takođe, može se primetiti da je na istoj dužini FSO linka od $L=500 \text{ m}$ ABER veći za nekoliko redova veličine samo zbog veoma malog povećanja atmosferske turbulencije. Sličan zaključak se može izvesti ako se

posmatra promena dužine FSO linka na istoj vrednosti turbulencije.

Na slici 8 je prikazano ponašanje ABER-a za Gama-Gama raspodelu za različite vrednosti dužine FSO linka i aktivnih vremenskih slotova. Može se videti da za veće dužine FSO linka ABER ima veće vrednosti, ali je skoro konstantan sa povećanjem atmosfere turbulencije. Za kraće dužine FSO linka, ABER se povećava sa povećanjem atmosfere turbulencije. Takođe, može se primetiti da za predajnu optičku snagu $P_T=10^{-5}$ W, korišćenje manjeg broja aktivnih vremenskih slotova poboljšava performanse FSO sistema.



Slika 7 - ABER za Gama-Gama model kanala u zavisnosti od srednje predajne optičke snage pri MPPM modulaciji



Slika 8 - ABER za Gama-Gama model kanala u zavisnosti od jačine atmosfere turbulencije pri MPPM modulaciji

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može se predvideti ponašanje FSO sistema za različite vrednosti parametara sistema, različite modele modulacionih šema i različite nivoe atmosfere turbulencije. Ovo

omogućava dizajnerima mobilnih prenosnih sistema da kreiraju racionalna sistemska rešenja za željene performanse sistema.

9. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, na finansiranju naučnoistraživačkog rada, Ugovor br. 451-03-65/2024-03/200155, realizator Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Univerzitet u Prištini.

LITERATURA

- [1] Khalighi MA, and M. Uysal M. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 16, No. 4, pp. 2231–2258, 2014.
- [2] Arnon S, Barry J, Karagiannidis GK, Schober R, and Uysal M. *Advanced Optical Wireless Communication Systems*, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [3] Al-Habash MA, Andrews LC, and Phillips RL, Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media, *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 8, pp. 1554–1562, 2001.
- [4] Balaji KA, and Prabu K, BER analysis of relay assisted PSK with OFDM ROFSO system over Malaga distribution including pointing errors under various weather conditions, *Optics Communications*, Vol. 426, pp. 187–193, 2018.
- [5] Badar N, and Jha RK, Performance comparison of various modulation schemes over free space optical (FSO) link employing Gamma–Gamma fading model, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 49, No. 5, pp. 192, 2017.
- [6] Milošević N, Petković M, and Djordjević G, Average BER of SIM-DPSK FSO system with multiple receivers over M-distributed atmospheric channel with pointing errors, *IEEE Photonics Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 1–10, 2017.
- [7] Zhang H, Li C, and Hao C, Performance analysis for BPSK, DPSK and OOK-based FSO system in atmospheric turbulence conditions, *International Journal of Simulation - Systems, Science & Technology*, Vol. 17, No. 36, pp. 371–376, 2016.
- [8] Bandjur Dj, Jaksic B, Panic S, Bandjur M, Matovic A, and Mekic E, Transmission Over Kappa-Mu Fading Channels with Gamma Distributed Random Line-Of-Sight Components, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, Vol. 62, No. 2, pp. 179–184, 2017.
- [9] Ata Y, Baykal Y, and Gökçe MC, Error performance of optical wireless communication systems exercising BPSK subcarrier intensity modulation in

- non-Kolmogorov turbulent atmosphere, *Optics Communications*, Vol. 436, pp. 108–112, 2019.
- [10] The Wolfram Functions Site: MeijerG functions: <http://functions.wolfram.com/PDF/MeijerG.pdf>.
- [11] Trinh PV, Dang NT, and Pham AT, *All-optical AF relaying FSO systems using EDFA combined with OHL over Gamma-Gamma channels*, 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London, 2015.
- [12] Todorović J, Jakšić B, Spalević P, Bandur Đ, and Panić S, Average Bit Error Rate at Signal Transmission with OOK Modulation Scheme in Different FSO Channels, *Technical gazette*, Vol. 28, No. 3, pp. 725-732, 2021.
- [13] Jeyaseelan J, Kumar DS, Caroline BE, PolSK and ASK Modulation Techniques Based BER Analysis of WDM-FSO System for Under Turbulence Conditions, *Wireless Personal Communications*, Vol. 103, No. 4, pp. 3221-3237, 2018.
- [14] Todorović J, Jakšić B, Spalević P, Bandur Đ, and Bandur M, Analysis of Signal Quality in FSO Systems with PolSK Modulation, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 171-186, 2020.
- [15] Khallaf HS, Shalaby HMH, Garrido-Balsells JM, and Sampei S, Performance analysis of a hybrid QAM-MPPM technique over turbulence-free and Gamma-Gamma free-space optical channels, *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 9, No. 2, pp. 161-171, 2017.

SUMMARY

ANALYSIS OF RECEIVED SIGNAL QUALITY IN FSO SYSTEMS MODELED BY GAMMA-GAMMA DISTRIBUTION AND DIFFERENT MODULATION FORMATS

The paper analyzed the received signal in the FSO communication system, which was modeled by the Gamma-Gamma distribution. Average bit error rate (ABER) values were calculated for the case when the signal was modulated by BPSK, DPSK, OOK, POLSK and MPPM modulation schemes. Based on analytical expressions, numerical results are given in the form of graphs, where the dependence of ABER on various parameters of the communication FSO channel can be determined based on the behavior of the graph.

Key Words: FSO, Gamma-Gamma distribution, BPSK, DPSK, OOK, POLSK, MPPM