



UNIVERZITET U NIŠU  
ELEKTRONSKI FAKULTET



**Milica I. Petković**

**ANALIZA I NAČINI POBOLJŠANJA PERFORMANSI  
BEŽIČNIH OPTIČKIH TELEKOMUNIKACIONIH  
SISTEMA U USLOVIMA ATMOSFERSKE  
TURBULENCIJE**

doktorska disertacija

Niš, 2015.



UNIVERSITY OF NIS  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



**Milica I. Petković**

**ANALYSIS AND PERFORMANCE IMPROVEMENT OF  
WIRELESS OPTICAL TELECOMMUNICATION  
SYSTEMS IMPAIRED BY ATMOSPHERIC  
TURBULENCE**

PhD thesis

Niš, 2015.



UNIVERZITET U NIŠU  
ELEKTRONSKI FAKULTET



**Milica I. Petković**

**ANALIZA I NAČINI POBOLJŠANJA PERFORMANSI  
BEŽIČNIH OPTIČKIH TELEKOMUNIKACIONIH  
SISTEMA U USLOVIMA ATMOSFERSKE  
TURBULENCIJE**

doktorska disertacija

**Mentor:**

dr Goran T. Đorđević, vanredni profesor

Niš, 2015.

# **Podaci o mentoru i članovima komisije**

## **Mentor:**

Dr Goran T. Đorđević, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

## **Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije:**

1. Prof. dr Goran T. Đorđević, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
2. Akademik prof. dr Gradimir V. Milovanović, Srpska akademija nauka i umetnosti
3. Prof. dr Dejan N. Milić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
4. Prof. dr Predrag N. Ivaniš, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
5. Doc. dr Nenad D. Milošević, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Datum odbrane: \_\_\_\_\_



---

## I Autor

---

Ime i prezime	Milica I. Petković
Datum i mesto rođenja	01.08.1986. godine, Knjaževac
Sadašnje zaposlenje	Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet Katedra za telekomunikacije

---

## II Doktorska disertacija

---

Naslov	Analiza i načini poboljšanja performansi bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema u uslovima atmosferske turbulencije
Ustanova i mesto gde je disertacija rađena	Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet Katedra za telekomunikacije
Mentor	Prof. dr Goran T. Đorđević

---

## III Tok prijave doktorske disertacije

---

Broj odluke i datum prihvatanja teme doktorske disertacije	NNV br. 07/03-007/15-001 od 05.03.2015. godine, Elektronski fakultet NSV br. 8/20-01-004/15-008 od 08.04.2015. godine, Univerzitet u Nišu
Komisija za ocenu podobnosti teme doktorske disertacije	1. Prof. dr Goran T. Đorđević 2. Prof. dr Daniela M. Milović 3. Prof. dr Dejan N. Milić 4. Prof. dr Ivan B. Đorđević 5. Prof. dr Predrag N. Ivaniš
Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije	1. Prof. dr Goran T. Đorđević 2. Akademik prof. dr Gradimir V. Milovanović 3. Prof. dr Dejan N. Milić 4. Prof. dr Predrag N. Ivaniš 5. Doc. dr Nenad D. Milošević
Datum odbrane	

---

### Naučni doprinos disertacije:

Brzi razvoj optičkih bežičnih komunikacija u slobodnom prostoru (FSO – *Free Space Optics*) posledica je konstantnog rasta broja korisnika i novih servisa. Optičke bežične sisteme karakteriše velika brzina i pouzdan prenosa, kao i jednostavna i ekonomična implementacija, pri čemu se prenos obavlja u nelicenciranom delu spektra. U disertaciji su predstavljeni novi analitički rezultati za verovatnoću prekida i verovatnoću greške optičkih bežičnih sistema sa PIN i lavinskom fotodiodom na prijemu, za različite vrste modulacionih tehnika. Analizirani su efekti atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja na performanse sistema. Izvršena je optimizacija pojačanja lavinske fotodiode u cilju poboljšanja performansi sistema. Prikazani su izvedeni tačni izrazi za ergodični kapacitet i kapacitet prekida kada je u obzir uzeta i kratkotrajna slučajna blokada optičkog signala usled

---

---

prepreka. Na osnovu izvedenih izraza izvršena je optimizacija poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa radi dobijanja optimalnih performansi sistema.

U cilju poboljšanja performansi sistema razmatrana je primena relejne tehnologije, pri čemu prva deonica predstavlja radio-frekvencijski (RF) link, dok se na drugoj deonici koristi FSO prenos signala. Analizirani su asimetrični RF/FSO sistemi sa AF (*Amplify and Forward*) relejem konstantnog i promenljivog pojačanja. Na osnovu analitičkih izraza za verovatnoću prekida i verovatnoću greške, ispitan je uticaj karakteristika obe deonice na performanse sistema. Takođe, izvedeni su izrazi za performanse RF/FSO sistema kada je u obzir uzet i efekat neidealne procene stanja RF kanala. Iz uslova da se postigne minimalna verovatnoća prekida veze ili verovatnoća greške, određena je optimalna vrednost poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz teleskopa na releju. Pored tačnih analitičkih izraza za verovatnoću prekida i verovatnoću greške, izvedeni su i odgovarajući aproksimativni izrazi, koji imaju prostiji oblik pogodniji za primenu. U poslednjem delu disertacije analizirani su RF/FSO sistemi sa više paralelno povezanih releja, pri čemu se koristi parcijalna selekcija releja. Određen je diverziteti dobitak za različiti broj implementiranih AF releja. Tačnost analitičkih rezultata potvrđena je nezavisnim simulacionim postupkom. Izvedeni analitički izrazi i prikazana analiza omogućavaju određivanje parametara kojima se postižu optimalne performanse sistema pri projektovanju optičkih bežičnih sistema.

---

## REZIME

### **Analiza i načini poboljšanja performansi bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema u uslovima atmosferske turbulencije**

Budući da savremene radio-frekvencijske (RF) komunikacione sisteme karakteriše prenatrpan i licencirani spektar, ograničen propusni opseg i relativno male brzine prenosa, upotreba ovih tehnologija ne ispunjava niz novih zahteva koje nameću buduće generacije telekomunikacionih sistema. I pored toga što upotreba optičkih vlakana omogućava širok propusni opseg i velike brzine prenosa, implementacija ovih sistema je komplikovana i skupa. Kao jedno od mogućih rešenja za problem “poslednje milje”, optičke komunikacije u slobodnom prostoru (FSO – *Free Space Optics*), koje predstavljaju jednu od vrsta optičkih bežičnih komunikacija, dobijaju na važnosti obezbeđujući istovremeno približne brzine kao sistemi sa optičkim vlaknima, i fleksibilnost bežičnih komunikacija.

Kod FSO sistema prenos se vrši kroz atmosferski kanal, a zatim se optički signal na prijemu konvertuje u električni pomoću fotodiode. U disertaciji su razmatrani komercijalni FSO sistemi koji uglavnom koriste intenzitetsku modulaciju (IM) sa OOK (*On-Off Keying*) formatom na predaji, dok se na prijemu vrši direktna detekcija (DD). Prikazani su rezultati za verovatnoću prekida i verovatnoću greške sistema, na osnovu kojih je ispitan uticaj atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. U nastavku su analizirani FSO sistemi kod kojih se pomoću prethodno modulisanog podnosioca vrši intenzitetska modulacija svetlosti lasera, što predstavlja intenzitetsku modulaciju podnosiocem (SIM – *Subcarrier Intensity Modulation*). Analizirani su FSO sistemi sa SIM tehnikom u kombinaciji sa sledećim modulacijama primenjenim u električnom domenu: fazna modulacija (PSK – *Phase Shift Keying*), diferencijalna fazna modulacija (DPSK – *differential PSK*) i kvadraturna amplitudna modulacija (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*). Izvedeni su izrazi za verovatnoću greške. Analiza FSO sistema sa SIM-PSK i SIM-DPSK modulacijama obuhvata i opštiji slučaj kada uticaj hardverskih nesavršenosti električnog dela prijemnika nije zanemaren. Na kraju ovog dela doktorske disertacije, predstavljena je i analiza ergodičnog kapaciteta i kapaciteta prekida FSO sistema, pri čemu je u obzir uzeta i kratkotrajna blokada optičkog signala usled slučajnih prepreka. Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je optimizacija parametara FSO linka radi dobijanja optimalnih performansi sistema.

U jednom delu disertacije prikazana je analiza FSO sistema sa lavinskom fotodiodom (APD – *Avalanche Photodiode*) na prijemu. Izvedeni su izrazi za verovatnoću greške po bitu FSO sistema gde se primenjuje IM/DD sa OOK, SIM-BPSK i SIM-BDPSK. Na osnovu prikazanih rezultata izvršena je optimizacija pojačanja lavinske fotodiode u cilju dobijanja minimalnih vrednosti verovatnoće greške.

Kao jedan od načina poboljšanja performansi sistema, razmatrana je primena relejnih tehnologija. Analizirani su asimetrični RF/FSO sistemi sa AF (*Amplify and Forward*) relejem konstantnog i promenljivog pojačanja. Pored sistema kada je relej pod uticajem šuma, razmatran je i opšti slučaj kada je relej pod uticajem šuma i većeg broja interferencija. Prikazani su rezultati za verovatnoću prekida i verovatnoću greške, na osnovu kojih su

ispitani uticaji uslova obe deonice na performanse sistema. Trenutna informaciju o stanju RF kanala koja se koristi za određivanje promenljivog pojačanja u praksi može biti zakasnela. Stoga, u nastavku disertacije izvedeni su i analitički izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja, kada je u obzir uzeta i vremenska korelacija između trenutne i zakasnele informacije o stanju RF kanala, što dodatno narušava performanse posmatranog sistema.

Poboljšanje performansi asimetričnih RF/FSO sistema postignuto je primenom diverziti tehnika kombinovanja signala u RF domenu sa više paralelno povezanih releja. Izvedeni su analitički izrazi za performanse sistema kada se koristi parcijalna selekcija releja na osnovu zakasnele trenutne informacije o stanju kanala. Analizirani su RF/FSO sistemi sa AF relejima konstantnog, kao i sa AF relejima promenljivog pojačanja koje se određuje na osnovu iste trenutne informacije koja se koristi za selekciju aktivnog releja. Ispitan je uticaj fedinga na prvoj deonici, kao i uticaj atmosferskih uslova, greške pozicioniranja i projektovanja FSO predajnika/prijemnika na performanse sistema.

Razvijen je simulacioni model kojim su potvrđeni numerički rezultati dobijeni na osnovu izvedenih analitičkih izraza koji su predstavljeni u disertaciji.

**Ključne reči:** atmosferska turbulencija, verovatnoća prekida, verovatnoća greške, greška pozicioniranja, kapacitet, optičke bežične telekomunikacije, relejna tehnologija.

**Naučna oblast:** Elektrotehnika i računarstvo

**Uža naučna oblast:** Telekomunikacije

**UDK broj:** T180      ( (621.391+551.551.5):519.724 )

## SUMMARY

### **Analysis and performance improvement of wireless optical telecommunication systems impaired by atmospheric turbulence**

Since contemporary radio-frequency (RF) communication systems are characterized by overcrowded and licensed spectrum, limited bandwidth and relatively low transmission data rates, the use of these technologies does not provide a series of new demands that future generations of telecommunications systems have to realize. Although optical fiber systems allow more bandwidth and higher transmission rates, they are characterized by complicated and expensive implementation. As one possible solution for the "last mile" problem, Free Space Optics (FSO) technology has gained importance since it provides simultaneously the optical fibre systems data rates and the flexibility of wireless communications.

The optical signal at the reception is converted into an electrical one by photodiode after transmission via the atmospheric channel. Commercial FSO systems generally use intensity modulation (IM) with OOK scheme at the transmitting part of the system, while direct detection (DD) is performed at the reception. The FSO system employing IM/DD with OOK scheme and PIN photodiode at the receiver is analyzed in the thesis. The outage probability and error rate expressions are presented, which are used to examine the effect of atmospheric turbulence and pointing errors. The FSO systems with subcarrier intensity modulation (SIM) employing various modulations in electrical domain (phase shift keying (PSK), differential phase shift keying (DPSK) and quadrature amplitude modulation (QAM)) are analyzed in the continuation of the thesis. The error rate expressions are derived. The SIM-PSK and SIM-DPSK FSO system analysis is performed considering more general case when the hardware imperfections of the receiver electrical part are taken into account. The ergodic and outage capacity analysis is also presented, taking into consideration the probability of the optical signal blockage due to random obstacles. Based on the derived results, the FSO link optimization is done in order to achieve better system performance.

Furthermore, the analysis of FSO systems with avalanche (APD) photodiode at the reception is presented. The bit error rate expressions for the FSO systems employing IM/DD with OOK scheme, SIM-PSK and SIM-BDPSK are derived. Based on the presented results, the APD gain optimization is performed in order to achieve minimal values of the error rate.

The use of relaying technology is investigated as a method to improve system performance. The mixed RF/FSO systems with fixed and variable AF (*Amplify and Forward*) relays are analyzed. Beside the noise-limited scenario, the more general case, when the relay is affected by noise and interference, is also considered. The outage probability and error rate expressions are presented, which are utilized to determine the effects of the RF and FSO link conditions on system performance. The determination of a variable gain is performed based on instantaneous channel state information (CSI), which is happened to be outdated in practical scenario. Therefore, the analytical expressions for the outage probability and error rate are derived, considering the RF/FSO system with variable AF relay based on outdated CSI.

Further improvement of the system performance is achieved by using diversity combining techniques in the RF domain by multiple parallel relaying. The analytical expressions for the system performance are derived for the RF/FSO system with partial relay selection based on outdated CSI. The RF/FSO system with fixed AF relays is considered, as well as the RF/FSO system with variable AF relays when the amplification gain is determined by the same outdated CSI used for relay selection. The effect of RF channel state is examined, as well as the influence of atmospheric conditions, pointing errors and FSO aperture design on the system performance.

A developed simulation model is utilized to confirm the numerical results obtained by the analytical expressions presented in the dissertation thesis.

**Keywords:** atmospheric turbulence, capacity, error rate, free space optics, optical wireless communications, outage probability, pointing errors, relay technology.

**Academic expertise:** Electrical Engineering and Computer Science

**Field:** Telecommunications

**UDK number:** T180 ((621.391+551.551.5):519.724)

## Spisak slika

<b>Slika 2.2.1.</b>	Model FSO sistema.....	16
<b>Slika 2.2.2.</b>	Optički prijemnik sa direktnom detekcijom .....	18
<b>Slika 2.2.3.</b>	Optički prijemnik sa koherentnom detekcijom.....	20
<b>Slika 2.2.4.</b>	Blok šema SIM FSO sistema .....	24
<b>Slika 2.2.5.</b>	Blok šema SIM FSO sistema sa više podnosioca .....	25
<b>Slika 2.3.1.</b>	Atmosferski kanal pod uticajem atmosferske turbulencije .....	29
<b>Slika 2.3.2.</b>	Projekcija optičkog snopa na ravan detektora .....	32
<b>Slika 3.1.1.</b>	Verovatnoća prekida FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije džižtera u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	40
<b>Slika 3.1.2.</b>	Verovatnoća prekida FSO sistema za različite vrednosti praga prekida i dužine linka.....	41
<b>Slika 3.2.1.</b>	Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džižtera .....	45
<b>Slika 3.2.2.</b>	Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom za različite vrednosti normalizovane širine optičkog snopa na prijemu.....	45
<b>Slika 3.2.3.</b>	Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom u zavisnosti od Rojtove standardne devijacije .....	46
<b>Slika 3.2.4.</b>	Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa SIM u kombinaciji sa binarnim modulacijama pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije za različite vrste binarnih modulacija.....	48

<b>Slika 3.2.5.</b>	Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema u zavisnosti od standardne devijacije džitera .....	54
<b>Slika 3.2.6.</b>	Verovatnoća greške SIM-8QAM FSO sistema za različite dužine FSO linka u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	55
<b>Slika 3.2.7.</b>	Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema u zavisnosti od Rojtove standardne devijacije.....	55
<b>Slika 3.2.8.</b>	Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema za različite nivoe modulacije ..	56
<b>Slika 3.2.9.</b>	Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema na osnovu tačnog i aproksimativnih izraza .....	56
<b>Slika 3.2.10.</b>	Verovatnoća greške SIM-8QAM FSO sistema na osnovu tačnog i aproksimativnog izraza .....	57
<b>Slika 3.2.11.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-QPSK FSO sistema pod uticajem faznog šuma .....	63
<b>Slika 3.2.12.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-8PSK FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	63
<b>Slika 3.2.13.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema za različite nivoe modulacije u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	64
<b>Slika 3.2.14.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-QPSK FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma i standardne devijacije džitera .....	65
<b>Slika 3.2.15.</b>	Zavisnost verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti električnog SNR-a.	65
<b>Slika 3.2.16.</b>	Zavisnost verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera.....	66
<b>Slika 3.2.17.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema sa amplitudskim disbalansom kvadraturenih grana .....	67
<b>Slika 3.2.18.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-MDPSK FSO bez uticaja hardverskih nesavršenosti .....	70
<b>Slika 3.2.19.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-QDPSK FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	71



<b>Slika 3.2.20.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-QDPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera....	71
<b>Slika 3.2.21.</b>	Verovatnoća greške po simbolu SIM-MDPSK FSO sistema sa amplitudskim disbalansom SNR-ova.....	72
<b>Slika 3.3.1.</b>	Normalizovani ergodični kapacitet FSO sistema u zavisnosti od verovatnoće blokade signala.....	78
<b>Slika 3.3.2.</b>	Verovatnoća prekida FSO sistema u zavisnosti od električnog SNR-a za različite vrednosti verovatnoće blokade signala .....	79
<b>Slika 3.3.3.</b>	Verovatnoća prekida FSO sistema u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti optičke snage.....	79
<b>Slika 3.3.4.</b>	Normalizovani ergodični kapacitet FSO sistema u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa.....	80
<b>Slika 3.3.5.</b>	Verovatnoća prekida FSO sistema u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa .....	81
<b>Slika 3.3.6.</b>	Normalizovani ergodični kapacitet i kapacitet prekida u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera.....	82
<b>Slika 3.3.7.</b>	Normalizovani ergodični kapacitet i kapacitet prekida u zavisnosti od električnog SNR-a za različite vrednosti parametra greške pozicioniranj.....	83
<b>Slika 4.1.1.</b>	Model FSO sistema sa IM/OOK i APD prijemnikom.....	85
<b>Slika 4.1.2.</b>	Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite dužine linka.....	88
<b>Slika 4.1.3.</b>	Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti temperature prijemnika .....	88
<b>Slika 4.1.4.</b>	Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	89
<b>Slika 4.1.5.</b>	Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od optičke snage u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	90
<b>Slika 4.1.6.</b>	Verovatnoća greške FSO sistema, sa i bez EGC prijemnika, u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti temperature prijemnika .....	92
<b>Slika 4.1.7.</b>	Verovatnoća greške FSO sistema, sa i bez EGC prijemnika, u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti dužine FSO deonice.....	92
<b>Slika 4.2.1.</b>	3D grafik zavisnosti verovatnoće greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom.....	98

<b>Slika 4.2.2.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa.....	98
<b>Slika 4.2.3.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od širine snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti optičke snage .....	99
<b>Slika 4.2.4.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od dužine FSO linka.....	100
<b>Slika 4.2.5.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od pojačanja fotodiode za različite vrednosti temperature prijemnika, optičke snage i za različite bitske brzine .....	101
<b>Slika 4.2.6.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od pojačanja fotodiode za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije.....	102
<b>Slika 4.2.7.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od pojačanja fotodiode za različite vrednosti dužine FSO linka.....	103
<b>Slika 4.2.8.</b>	Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti pojačanja fotodiode.....	104
<b>Slika 4.3.1.</b>	Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti dužine linka i normalizovane standardne devijacije džitera .....	106
<b>Slika 4.3.2.</b>	Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite temperature prijemnika u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	107
<b>Slika 4.3.3.</b>	Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti bitske brzine i optičke snage .....	107
<b>Slika 4.3.4.</b>	Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije.....	108
<b>Slika 5.1.</b>	Asimetrični RF/FSO sistem .....	110
<b>Slika 5.1.1.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera .....	117
<b>Slika 5.1.2.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma za različite dubine fedinga i za različite vrednosti praga	118

<b>Slika 5.1.3.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	120
<b>Slika 5.1.4.</b>	Asimetrični RF/FSO sistem u prisustvu interferencije na releju .....	121
<b>Slika 5.1.5.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različite vrednosti srednjeg INR-a i broja interferencije .....	124
<b>Slika 5.1.6.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	125
<b>Slika 5.1.7.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različite vrednosti poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnika .....	126
<b>Slika 5.1.8.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različite vrednosti parametra fedinga $m_1$ i normalizovane standardne devijacije džitera .....	128
<b>Slika 5.1.9.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različiti broj interferencija.....	128
<b>Slika 5.2.1.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema za različite vrste AF releja i normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	131
<b>Slika 5.2.2.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema za različite vrste AF releja i različite vrednosti parametra fedinga na RF deonici .....	132
<b>Slika 5.2.3.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema za različite vrste AF releja i normalizovane standardne devijacije džitera .....	134
<b>Slika 5.2.4.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema za različite vrste releja kada je relej pod uticajem šuma i interferencije.....	137
<b>Slika 5.2.5.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije.....	138
<b>Slika 5.2.6.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa .....	146
<b>Slika 5.2.7.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od optičke snage .....	147

<b>Slika 5.2.8.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od električnog SNR-a na drugoj deonici .....	148
<b>Slika 5.2.9.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od srednjeg SNR-a na prvoj deonici.....	149
<b>Slika 5.2.10.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od $\mu_1 = \mu_2$ .....	150
<b>Slika 5.2.11.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice za različite vrednosti dubine fedinga na RF deonici .....	151
<b>Slika 5.2.12.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od električnog SNR-a na FSO deonici .....	156
<b>Slika 5.2.13.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice i dva granična slučaja .....	156
<b>Slika 5.2.14.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od srednjeg SNR-a na RF deonici .....	157
<b>Slika 5.2.15.</b>	Neotklonjive granice verovatnoće prekida i verovatnoće greške .....	158
<b>Slika 6.1.</b>	Asimetrični RF/FSO sistem sa više releja i parcijalnom selekcijom releja...	160
<b>Slika 6.1.1.</b>	Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja od Rojtove standardne devijacije .....	168
<b>Slika 6.1.2.</b>	Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja od broja releja za različite vrednosti Rojtove standardne devijacije .....	169
<b>Slika 6.1.3.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti koeficijenta korelacije i električnog SNR-a na FSO deonici .....	170
<b>Slika 6.1.4.</b>	Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i i AF relejima konstantnog pojačanja od koeficijenta korelacije u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	171
<b>Slika 6.1.5.</b>	Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i i AF relejima konstantnog pojačanja od broja releja za različite vrednosti standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije.....	172
<b>Slika 6.1.6.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti standardne devijacije džitera .....	172

<b>Slika 6.1.7.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti koeficijenta korelacije i dužine FSO deonice .....	173
<b>Slika 6.1.8.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja u zavisnosti od standardne devijacije džitera za različite vrednosti koeficijenta korelacije .....	177
<b>Slika 6.1.9.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti električnog SNR-a na FSO deonici u različitim uslovima turbulencije .....	178
<b>Slika 6.1.10.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	179
<b>Slika 6.1.11.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja u zavisnosti od koeficijenta korelacije .....	179
<b>Slika 6.2.1.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima promenljivog pojačanja u različitim uslovima atmosferske turbulencije .....	186
<b>Slika 6.2.2.</b>	Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima različitih pojačanja .....	186
<b>Slika 6.2.3.</b>	Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima promenljivog pojačanja za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera .....	189

## Spisak tabela

<b>Tabela 2.1.</b>	Pregled vrednosti osetljivosti i pojačanja različitih vrsta fotodioda .....	18
<b>Tabela 2.2.</b>	Pregled vrednosti korišćenih parametra .....	37
<b>Tabela 3.1.</b>	Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa [cm] .....	81
<b>Tabela 4.1.</b>	Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa $w_{opt}$ [cm] .....	99
<b>Tabela 4.2.</b>	Optimalne vrednosti dužine FSO linka $L_{opt}$ [m] .....	101
<b>Tabela 5.1.</b>	Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa i na prijemu .....	146
<b>Tabela 5.2.</b>	Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa $w_{opt}$ [cm] .....	147
<b>Tabela 6.1.</b>	Verovatnoća prekida asimetričnog RF/FSO za različit broj releja $N$ .....	170

# Sadržaj

<b>1. Uvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Optičke bežične komunikacije .....</b>	<b>11</b>
2.1. Istorijski razvoj i primena FSO sistema.....	13
2.2. Konfiguracija FSO linka .....	15
2.2.1. Optoelektronske komponente .....	16
2.2.2. Detekcija optičkog signala .....	18
2.2.3. Šumovi kod fotodetekcije .....	19
2.2.4. Modulacione tehnike.....	22
2.3. Model FSO kanala .....	26
2.3.1. Atmosfersko slabljenje.....	26
2.3.2. Atmosferska turbulencija .....	27
2.3.3. Greška pozicioniranja .....	31
2.3.4. Kombinovani model.....	34
2.3.5. Kratkotrajna blokada signala usled fizičkih prepreka.....	36
<b>3. Performanse FSO sistema sa PIN fotodiodom .....</b>	<b>38</b>
3.1. Verovatnoća prekida FSO sistema sa PIN fotodiodom .....	38
3.2. Verovatnoća greške FSO sistema sa PIN fotodiodom.....	42
3.2.1. Verovatnoća greške FSO sistema sa IM/DD i OOK .....	42
3.2.2. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM u kombinaciji sa binarnim modulacijama.....	47
3.2.3. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-QAM .....	49
3.2.4. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-MPSK.....	58
3.2.5. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-MDPSK.....	67
3.3. Kapacitet FSO sistema sa PIN fotodiodom .....	73
3.3.1. Ergodični kapacitet FSO sistema .....	73

3.3.2. Kapacitet prekida FSO sistema.....	75
<b>4. Performanse FSO sistema sa APD fotodiodom.....</b>	<b>84</b>
4.1. Verovatnoća greške FSO sistema sa IM/DD i OOK i APD fotodiodom.....	84
4.2. Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom.....	93
4.3. Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema sa APD fotodiodom.....	104
<b>5. Asimetrični RF/FSO sistemi.....</b>	<b>109</b>
5.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja	113
5.1.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja u prisustvu šuma.....	113
5.1.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije na releju .....	121
5.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja .....	129
5.2.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma.....	129
5.2.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistem sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije na releju .....	135
5.2.3. Analiza efekta neidealne procene stanja RF kanala na performanse RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma.....	138
<b>6. Asimetrični RF/FSO sistemi sa više releja.....</b>	<b>159</b>
6.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF reledjima konstantnog pojačanja i parcijalnom selekcijom releja .....	163
6.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF reledjima promenljivog pojačanja i parcijalnom selekcijom releja .....	180
<b>7. Zaključak.....</b>	<b>190</b>
<b>Dodatak A.....</b>	<b>197</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>203</b>



# 1. Uvod

Razvoj novih telekomunikacionih tehnologija usledio je kao posledica kako vojnih, tako i novih komercijalnih zahteva. Usled konstantnog rasta broja korisnika i razvoja savremenih visokokvalitetnih multimedijalnih aplikacija, nove generacije bežičnih sistema moraće da ispune niz novih zahteva. Nasuprot bežičnim radio-frekvencijskim (RF) tehnologijama, optički sistemi obezbeđuju veći propusni opseg, veće brzine i bolji kvalitet prenosa. Pošto se implementacija sistema sa optičkim vlaknima pokazala kao dosta komplikovana i skupa, ovi sistemi predstavljaju dobar izbor za komunikacioni link na velikim udaljenostima. Međutim, kao jedno od rešenja za problem „poslednje milje“, koriste se optičke bežične komunikacije (OWC – *Optical Wireless Communications*), koje kombinuju brzinu optičkih sistema i fleksibilnost bežičnih komunikacija.

Optičke bežične komunikacije predstavljaju savremenu bežičnu tehnologiju koja podrazumeva prenos optičkog signala kroz slobodan prostor (vazduh, svemir, vakuum i sl.). Karakterišu ih velike brzine prenosa, laka i jeftina implementacija, nelicencirani širok propusni opseg, kao i poboljšana bezbednost prenosa podataka. Pored prenosa optičkog signala iz vidljivog dela spektra, što se odnosi na VLC (*Visible Light Communications*) sisteme, optičke bežične komunikacije obuhvataju i FSO sisteme (*Free Space Optics*) ili optičke komunikacije u slobodnom prostoru, koji predstavljaju prenos optičkog snopa iz infracrvenog dela spektra. U disertaciji će se analizirati baš FSO sistemi, koji se drugačije nazivaju zemaljske (*terrestrial*) ili spoljne (*outdoor*) optičke bežične komunikacije.

Kao što je već rečeno, optičke bežične komunikacije koriste se kao jedno od najadekvatnijih rešenja za problem „poslednje milje“ u razvoju pristupnih mreža, pri čemu se koriste za premošćavanje jaza propusnog opsega između glavne komunikacione mreže sa optičkim vlaknima i krajnjih korisnika. Na tržištu su već dostupni FSO linkovi od 50 m do

nekoliko kilometara, čime se obezbeđuju brzine prenosa od 1 Mbps do 10 Gbps. Takođe, u slučaju kolapsa glavnog linka, FSO sistemi koriste se kao privremena podrška i zamena već postojećih sistema sa optičkim vlaknima. Dalje, optički bežični sistemi veoma su pogodni za premošćavanje nedostupnih terena, npr. preko reka, vrlo prometnih ulica, železničkih pruga, i u ostalim sredinama gde je implementacija sistema sa optičkim vlaknima dosta otežana ili nemoguća.

Optičke bežične komunikacije predstavljaju prenos optičkog signala kroz slobodan prostor, stoga atmosferski uslovi imaju znatan uticaj na kvalitet prenosa. Usled varijacija u atmosferskom pritisku, temperaturi i nadmorskoj visini, dolazi do slučajnih promena indeksa prelamanja, što predstavlja pojavu koja se naziva atmosferska turbulencija. Kao posledica atmosferske turbulencije, dolazi do slučajnih fluktuacija intenziteta optičkog signala na prijemu. U literaturi su predloženi mnogi statistički modeli, pre svega log-normalna [8], [53] i K raspodela [8], [78], za opisivanje fluktuacija intenziteta optičkog signala usled slabe i jake atmosferske turbulencije, respektivno. Zbog odličnih slaganja teorijskih rezultata i eksperimentalnih merenja u širokom opsegu uslova atmosferske turbulencije, kao najpogodnija opšte je prihvaćena gama-gama raspodela [6], [8], [53], [78]. Još jedan uzrok slabljenja signala na prijemu je loše pozicioniranje predajnika i prijemnika. Pošto su FSO sklopovi na predaji i prijemu obično instalirane na visokim zgradama, slabi zemljotresi, jak vetar i toplotno širenje utiču na vibracije laserskog snopa prilikom prenosa, a time i na slabljenje signala na prijemu. Ova pojava naziva se greška pozicioniranja, i nastaje usled vibracija optičkog snopa i njegovog pomeraja u vertikalnom i horizontalnom pravcu. U literaturi je predloženo više statističkih modela za opisivanje greške pozicioniranja [25], [48], [51], [176]. U disertaciji je usvojen model predložen od strane Farida i Hranilovića [48], koji ne zanemaruje veličinu detektora u odnosu na širinu optičkog snopa na prijemu, i izveden je pod pretpostavkom da je rezultujući radijalni pomeraj modelovan Rejljevom (*Rayleigh*) raspedelom. Analiza performansi sistema prikazana u disertaciji podrazumeva da je FSO kanal pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Izvedeni izrazi za većinu performansi sistema biće uprošćeni na slučaj kada je prenos optičkog signala samo pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije.

Optički bežični sistemi, ili preciznije optičke komunikacije u slobodnom prostoru, koji se trenutno koriste u komercijalne svrhe obično na predaji primenjuju intenzitetsku modulaciju (IM – *Intensity Modulation*) zasnovanu na OOK (*On-Off Keying*) šemi, dok se na prijemu vrši direktna detekcija (DD – *Direct Detection*). Ova vrsta sistema podrazumeva da se najpre vrši intenzitetska modulacija, i korisni signal se zatim laserom usmerava i šalje kroz

atmosferski kanal do prijemnika. Prijemnik „skuplja“ optički signal i fokusira ga na fotodetektor, koji vrši konverziju trenutne optičke snaga u električnu struju koja se dalje detektuje. Prilikom projektovanja optičkih prijemnika, najčešće su u upotrebi fotodetektor sa PIN i lavinskom (APD – *Avalanche Photodiode*) fotodiodom. Stoga, u disertaciji biće analizirane performanse FSO sistema sa oba tipa detektora. Uprkos jednostavnoj implementaciji IM/DD sa OOK, što je glavni razlog korišćenja ove tehnike kod komercijalnih FSO sistema, potreba za podešavanjem praga kod detekcije dovela je do interesovanja za primenu intenzitetske modulacije podnosiocem (SIM – *Subcarrier Intensity Modulation*) kod FSO sistema. U ovom slučaju, električni signal prvo se moduliše nekim od već poznatih vrsta RF modulatora, čiji izlaz moduliše intenzitet optičkog izvora, tj. laser, koji dalje šalje optički signal kroz atmosferski kanal. Nakon direktne detekcije na prijemu, i konverzije optičkog signala u električni, vrši se detekcija signala odgovarajućim RF demodulatorom.

Kao kriterijumi na osnovu kojih se ocenjuju performanse sistema, u disertaciji biće analizirane sledeće mere kvaliteta prenosa signala kroz atmosferski kanal: verovatnoća prekida, verovatnoća greške i kapacitet sistema. Verovatnoća prekida predstavlja verovatnoću da je odnos trenutnih snaga signala i šuma (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) manji od unapred definisanog praga, izabranog tako da obezbeđuje određeni kvalitet usluga. Verovatnoća greške po bitu definiše se kao odnos broja pogrešno primljenih i ukupnog broja prenetih bita. Kapacitet kanala je važna karakteristika sistema, koja predstavlja maksimalnu brzinu prenosa informacija kroz kanal pri čemu se verovatnoća greške može učiniti proizvoljno malom.

### ***Pregled literature i osnovni ciljevi disertacije***

Upotreba optičkih komunikacija u raznim oblicima javila se još pre više hiljada godina, dok prva praktična demonstracija FSO tehnologije predstavlja “*photophone*”, patent Alexander Graham Bell-a iz 1880. godine, poznat kao prvi bežični telefon, čime je sunčeva svetlost intenzitetski modulirana glasom da bi se prenela na određeno rastojanje [8], [53], [78]. Nakon zastoja zbog intenzivnog izučavanja RF bežičnih komunikacija, otkriće lasera 1960. godine dovodi do ponovnog interesovanja za bežične optičke komunikacije i razvoj FSO tehnologije. U literaturi se može naći veliki broj publikovanih radova na temu optičkih bežičnih sistema i analize njihovih performansi. Kao jedna od najopštijih mera kvaliteta prenosa signala, verovatnoća prekida FSO sistema razmatrana je u [23], [128], [146]. Za razliku od [146], gde je predstavljena analiza FSO sistema pod uticajem jake atmosferske

turbulencije modelovane K raspodelom, u [23] je pored gama-gama atmosferske turbulencije u obzir uzeta i greška pozicioniranja. U disertaciji biće izveden alternativni jednostavniji izraz za verovatnoću prekida u poređenju sa izrazom datim u [23]. Dobijen izraz za verovatnoću prekida biće uprošćen za slučaj kada je FSO sistem pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije, što je publikovano u [128].

Verovatnoća greške po bitu (BER – *Bit Error Rate*) FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom analizirana je u radovima [123], [149], [168], [169], [173]. Prenos optičkog signala kroz kanal koji je pod uticajem jake atmosferske turbulencije opisane K raspodelom razmatran je u [168], [169], dok je analiza ekvivalentnog sistema u [149], [173] proširena uzimajući u obzir i uticaj greške pozicioniranja. U disertaciji biće izveden izraz za verovatnoću greške FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom, dok je prenos signala pod uticajem kombinovanog efekta gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Prikazani rezultati objavljeni su u [123].

Analiza verovatnoće greške FSO sistema sa SIM u kombinaciji sa različitim vrstama RF modulacija intenzivno je izučavana u literaturi [31], [32], [60]–[62], [90], [91], [108], [110], [130]–[137], [139], [140], [144], [153]–[155], [166], [167], [171], [174]. Uzimajući u obzir i gama-gama atmosfersku turbulenciju i grešku pozicioniranja, u disertaciji biće izveden izraz za verovatnoću greške FSO sistema sa SIM tehnikom, dok se u električnom domenu koristi neka od poznatih binarnih modulacija. Dobijeni izraz predstavlja jednostavniji oblik izraza verovatnoće greške, koji se može naći u [23]. Na osnovu dobijenog izraza, u disertaciji je takođe izveden izraz za verovatnoću greške FSO sistema kada je greška pozicioniranja zanemarljivo mala, koji je publikovan u [128].

U bežičnim komunikacionim sistemima kvadraturna amplitudska modulacija (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) pokazala se kao korisna modulaciona tehnika kojom se postižu velike brzine prenosa. Stoga, analiza verovatnoće greške FSO sistema sa SIM i QAM tehnikom primenjenom na podnosiocima u RF domenu intenzivno je izučavana u literaturi [60]–[62], [110], [166], [167], [171]. Analiza data u [60]–[62], [110], [171] smatra da je FSO kanal pod uticajem atmosferske turbulencije modelovane različitim statističkim modelima, dok je u [166], [167] u obzir uzeta i greška pozicioniranja, pri čemu su izvedeni izrazi dobijeni na osnovu aproksimacije Gausove Q-funkcije (*Gaussian Q-function*). Za razliku od [166], [167], gde su izrazi za verovatnoću greške po simbolu (SEP – *Symbol Error Probability*) dati u integralnom obliku, u disertaciji biće izvedeni tačni izrazi za verovatnoću greške po bitu u zatvorenom obliku predstavljeni preko Mejerovih (*Meijer*) G-funkcija. Dobijeni rezultati objavljeni su u [44].

Prilikom uvođenja SIM tehnike kod FSO sistema u cilju izbegavanja podešavanja praga tokom detekcije kod OOK šeme, akcenat je bačen pre svega na primenu fazne modulacije (PSK – *Phase Shift Keying*) u električnom delu FSO sistema. U literaturi može se naći veliki broj radova koji se bave analizom FSO sistema sa SIM tehnikom i binarnom PSK (BPSK), [91], [108], [130], [132], [136], [140], [144], [154], [174]. Proširenje analize verovatnoće greške FSO sistema sa SIM i  $M$ -arnom faznom modulacijom (MPSK) data je u radovima [31], [32], [60], [90], [153], [155]. Publikovani rezultati za verovatnoću greške FSO sistema sa SIM-MPSK predstavljaju aproksimativne rezultate, i nisu dati u zatvorenom obliku. Za razliku od već pomenutih radova, u disertaciji biće izvedeni rezultati za verovatnoću greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema, koji je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja, dok su u obzir uzeti i fazni šum referentnog nosioca, i amplitudski disbalans kvadraturnih grana u električnom delu FSO prijemnika.

U praktičnim bežičnim komunikacionim sistemima često se primenjuje diferencijalna fazna modulacija (DPSK – *Differential Phase Shift Keying*). U radovima [133]–[135], [137], [139] data je analiza performansi FSO sistema koji koristi SIM-BDPSK, dok su izrazi za verovatnoću greške po bitu FSO sistema sa SIM-MDPSK u radu [155] prikazani preko integrala. U disertaciji biće predstavljena analiza verovatnoće greške po simbolu SIM-MDPSK FSO sistema, koji je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Pored sistema bez hardverskih nesavršenosti prijemnika, razmatran je i FSO sistem kad je u obzir uzet i uticaj faznog šuma.

Kapacitet sistema, kao važna performansa telekomunikacionih sistema sa FSO tehnologijom, analiziran je u radovima [16], [17], [23], [48], [50], [89], [100]–[106], [111], [146]. Uz pretpostavku brzih fluktuacija intenziteta optičkog signala na prijemu, stanja kanala u dva susedna simbolska intervala međusobno su nezavisna, tako da je ergodični kapacitet relevantna mera kvaliteta prenosa FSO signala. Uzimajući u obzir različite statističke modele za modelovanje fluktuacija intenziteta primljenog optičkog signala, ergodični kapacitet FSO sistema je analiziran u radovima [16], [17], [23], [50], [89], [100]–[105], [111], [146]. U disertaciji biće analiziran ergodični kapacitet FSO sistema koji je pod uticajem atmosferske turbulencije modelovane gama-gama raspodelom i greške pozicioniranja. Izvedeni izrazi biće predstavljeni preko Mejerovih  $G$ -funkcija, i biće prikazani u jednostavnijem obliku nego alternativni izrazi dati u [23], [50], [111]. Takođe, za razliku od svih pomenutih radova, disertacija sadrži proširenu analizu FSO sistema kada je u obzir uzeta i verovatnoća kratkotrajne blokade signala prilikom prenosa kroz atmosferski kanal usled slučajnih prepreka. Međutim, pošto atmosfersku turbulenciju odlikuju relativno spore fluktuacije

intenziteta optičkog signala u odnosu na brzinu prenosa, jer je vreme koherencije kanala oko 1-100 ms, odmerci fadinga nastali zbog atmosferske turbulencije ostaju konstantni tokom velikog broja prenesenih simbola [32], [48], [53], [87]. Stoga, odgovarajuća mera za opisivanje performansi FSO sistema nije ergodični, već kapacitet prekida, koji je kao performansa FSO sistema analiziran u [48], [89], [100], [102]–[104], [106]. Uzimajući u obzir uticaj greške pozicioniranja pored gama-gama atmosferske turbulencije, kapacitet prekida razmatran je u [48], [89], pri čemu su izvedeni izrazi prikazani u integralnoj formi. Jedan od doprinosa disertacije je i predstavljanje novih izraza u zatvorenom obliku za kapacitet prekida FSO sistema. Pored greške pozicioniranja i gama-gama atmosferske turbulencije, prilikom analize u obzir je uzeta i verovatnoća kratkotrajne blokade signala usled slučajnih prepreka. Na osnovu izvedenih rezultata, izvršena je optimizacija FSO linka u odnosu na poluprečnik optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa.

Za razliku od do sada pomenutih radova koji razmatraju FSO sisteme u kojima se konverzija optičkog signala u električni vrši pomoću PIN fotodetekatora, radovi [41], [42], [79], [92], [171] analiziraju FSO sistem sa APD prijemnikom. U disertaciji će biti izvedeni izrazi za verovatnoću greške najčešće korišćenog FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom, pri čemu se smatra da je statistika atmosferskog kanala modelovana gama-gama raspodelom. Dobijeni rezultati su publikovani u radu [120]. U disertaciji su prikazani i rezultati za verovatnoću greške FSO sistema koji koristi SIM-BPSK, dok je, za razliku od [92], u obzir uzeta i greška pozicioniranja. Izvedena analiza ovakvog sistema objavljena je u radu [125]. Takođe, analiza FSO sistema sa SIM-BDPSK će biti prikazana u disertaciji, što je i publikovano u radu [121].

U cilju poboljšanja performansi sistema, došlo se na ideju primene relejne tehnologije kod optičkih bežičnih komunikacija [1], [2], [5], [28], [33], [34], [72], [73], [98], [138], [142], [143], [172], [177]. Upotrebom releja smanjuje se optička snaga na predaji, povećava kapacitet sistema, i pre svega postiže bolja pokrivenost. U radu [88] predloženi su asimetrični RF/FSO sistemi sa neregnerativnim (AF – *Amplify and Forward*) relejem. Ovi sistemi pogodni su za prenos signala kada na deonici od predajnika do releja ne postoji direktna linija optičke vidljivosti, tako da se na njoj vrši RF prenos signala, dok je FSO prenos ostvaren na drugom linku između releja i prijemnika do krajnjih korisnika. U radovima [10], [11], [18]–[20], [24], [71], [88], [116], [145], [179], [180] razmatrani su asimetrični RF/FSO sistemi sa AF relejem konstantnog pojačanja, dok je analiza RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja data u radovima [21], [22], [39], [179]. Za razliku od [18]–[22], [24], [88], [145], gde je fading na RF deonici modelovan Rejljevom raspodelom, u disertaciji biće

izvedeni rezultati za verovatnoću prekida i verovatnoću greške kada je RF deonica pod uticajem Nakagami- $m$  fedinga. FSO link je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Doprinos disertacije u ovom delu ogleda se u prikazanoj analizi asimetričnih RF/FSO sistema sa konstantnim pojačanjem kako u prisustvu šuma, tako i u prisustvu više interferencija (CCIs – *Co-Channel Interference*) na releju. Dobijeni rezultati predstavljeni su u [118]. Što se tiče asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma, pored tačnih izraza za verovatnoću prekida i verovatnoću greške koji su predstavljeni preko integrala, dati su i aproksimativni izrazi izvedeni na osnovu gornje granice ukupnog SNR-a. Takođe, doprinos disertacije u ovom delu je i analiza asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma i interferencija na releju, koja pored tačnih izraza za verovatnoću prekida, sadrži i odgovarajuće aproksimativne izraze. Glavni doprinos ovog dela disertacije je analiza efekata neidealne procene stanja RF kanala na performanse RF/FSO sistema sa relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma. Pošto AF relej promenljivog pojačanja koristi trenutnu informaciju o stanju kanala (CSI – *Channel State Information*) prve deonice za kontrolu pojačanja releja, moguće je da procenjena trenutna informacija bude zakasnela (*outdated* CSI), što utiče na performanse posmatranog sistema. U disertaciji će biti izvedeni analitički izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja, uzimajući u obzir i vremensku korelaciju između trenutne i zakasnele informaciju o stanju RF kanala. Izvedeni rezultati su pojednostavljeni na slučaj kada je RF deonica pod uticajem Rejljevog fedinga, na osnovu kojih su dobijeni jednostavniji izrazi za performanse sistema u opsegu velikih vrednosti srednjeg i električnog SNR-a. Deo dobijenih rezultata u ovom delu disertacije publikovan je u [45].

Korišćenje relejne tehnologije i primena diverziteti tehnika kombinovanja signala u RF domenu sa više paralelno ili serijski povezanih releja, može se naći u radovima [43], [86], [95]–[97], [157], [160], [162]. Primena više releja kod asimetričnih RF/FSO sistema nije analizirana u dosadašnjoj literaturi, stoga ovaj deo predstavlja jedan od najvećih doprinosa disertacije. U disertaciji biće predstavljena analiza asimetričnih RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom releja. Usled brze promene fedinga na RF deonici i potrebnog vremena pri prenosu povratne informacije od releja do prijemnika, parcijalna selekcija releja vrši se na osnovu zakasnele trenutne informacije o stanju kanala. Ova zakasnela trenutna informacija o stanju RF kanala je u vremenskoj korelaciji se pravom trenutnom informacijom o stanju RF kanala u trenutku slanja signala. Najpre će se razmatrati sistemi sa AF relejima konstantnog pojačanja. Nakon toga, analiza će biti proširena na sisteme sa AF relejima

promenljivog pojačanja, koje se određuje na osnovu iste trenutne informacije koja se koristi za odabir releja. Feding na RF deonicama modelovan je Rejljevom raspodelom, dok je FSO deonica pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije i greške pozicioniranja. Deo rezultata u ovom delu disertacije publikovan je u radu [117], kao i u poglavlju knjige [115].

Tokom izrade doktorske disertacije razvijen je simulacioni model kojim su potvrđeni numerički rezultati dobijeni na osnovu izvedenih analitičkih izraza.

### ***Organizacija doktorske disertacije***

U drugom poglavlju dat je pregled optičkih bežičnih sistema, njihove osobine, kao i prednosti u odnosu na tradicionalne RF sisteme. Nakon istorijskog razvoja i primene, dat je opis konfiguracije FSO linka i osnovnih elemenata sistema. Pobrajane su najčešće korišćene optoelektronske komponente, vrste detekcije signala na prijemu, kao i vrste šumova pri fotodetekciji. Dat je pregled modulacionih tehnika, koje se koriste pri analizi sistema. Opisan je model FSO kanala i izložene su njegove osnovne karakteristike. Detaljno su opisane pojave koje utiču na slabljenje optičkog signala. Pored atmosfenskog slabljenja, objašnjena je atmosferska turbulencija i greška pozicioniranja. Definisana je i gama-gama raspodela, kao matematički statistički model koji se koristi za opisivanje fluktuacija intenziteta optičkog signala usled atmosfere turbulencije. Dat je i prikaz modela koji je usvojen za opisivanje greške pozicioniranja, kao i modela za opisivanje kratkotrajne blokade signala usled fizičkih prepreka.

U trećem poglavlju data je analiza FSO sistema sa PIN fotodiodom na prijemu, pri čemu se smatra da su fluktuacije intenziteta optičkog signala posledica gama-gama atmosfere turbulencije i greške pozicioniranja. Izvedeni su izrazi za verovatnoću prekida, koji su svedeni za slučaj kada je FSO kanal samo pod uticajem atmosfere turbulencije, koji je publikovan [128]. U nastavku izvedeni su izrazi za verovatnoću greške FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom, koji su štampani u [123]. Dalja analiza verovatnoće greške odnosi se na FSO sisteme sa SIM tehnikom. Najpre je razmatran sistem kada se u električnom domenu koriste različite vrste binarnih modulacija. Dobijeni izrazi uprošćeni su za slučaj kada je greška pozicioniranja zanemarljivo mala, što je publikovano u [128]. Prikazana je analiza FSO sistema sa SIM-QAM modulacijom sa kvadraturnom i pravougaonom konstelacijom tačaka. Dobijeni rezultati objavljeni su u [44]. Nastavak disertacije predstavlja analizu FSO sistema koji koristi SIM-MPSK, kao i SIM-MDPSK. Pored novih rezultata za verovatnoću greške po simbolu FSO sistema bez hardverskih



nesavršenosti prijemnika, izvedeni su i izrazi sistema sa amplitudskim disbalansom grana, kao i sa faznom greškom nosioca. Ispitan je uticaj neidealne procene faze na verovatnoću greške po simbolu. Na kraju ovog poglavlja, biće prikazana analiza ergodičnog kapaciteta i kapacitet prekida u prisustvu blokade linka izazvanog letom ptice, insekta ili nekom drugom preprekom, i ispitaće se uticaj ovog efekta na kapacitet sistema. Izvedeni rezultati biće upotrebljeni za izvršenje optimizacije FSO linka, tj. za nalaženje optimalne vrednosti poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa kojom se postiže maksimalna vrednost ergodičnog kapaciteta, tj. minimalna vrednost kapaciteta prekida.

Analiza FSO sistema sa APD fotodiodom biće data u četvrtom poglavlju. Izvedeni su izrazi za verovatnoću greške FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom, koji su publikovani u [120]. Drugi deo ovog poglavlja sadržaće analizu FSO sistema koji je baziran na SIM-BPSK. Izvedeni rezultati predstavljeni su u [125]. Pored opštih rezultata, izvedeni su i rezultati za sistem u prisustvu termičkog šuma, kao i za sistem u prisustvu šot šuma. Izvršena je minimizacija verovatnoće greške za optimalne vrednosti poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa, kao i za optimalne vrednosti dužine FSO linka. U poslednjem delu ovog poglavlja, biće predstavljena analiza FSO sistema sa SIM-BDPSK. Izvedeni rezultati objavljeni su u [121]. Na osnovu dobijenih izraza za FSO sistem sa APD prijemnikom izvršena je minimizacija verovatnoće greške u odnosu na optimalne vrednosti pojačanja fotodiode.

Peto poglavlje sadrži analizu asimetričnih RF/FSO sistema, gde je fading na RF deonici modelovan Nakagami- $m$  raspodelom, a FSO link je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Najpre će biti ispitane performanse sistema sa AF relejem konstantnog pojačanjem. Biće izvedeni tačni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške sistema u prisustvu šuma. Dobijeni rezultati biće uprošćeni za slučaj bez greške pozicioniranja. Dalje, analiza će biti proširena na sistem u prisustvu šuma i više interferencija na releju. Izvedeni rezultati za verovatnoću prekida i verovatnoću greške dati su u [118], koji su takođe uprošćeni za slučaj bez greške pozicioniranja. U nastavku biće prikazana analiza asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja. Najpre su izvedeni tačni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške sistema u prisustvu šuma, koji su predstavljeni preko integrala, kao i odgovarajući aproksimativni izrazi izvedeni na osnovu gornje granice ukupnog SNR-a. Biće izvršena analiza verovatnoće prekida asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije na releju, i biće izvedeni tačni izrazi u integralnom obliku, kao i odgovarajuće aproksimacije. Na kraju ovog poglavlja biće izvedeni izrazi za verovatnoću

prekida i verovatnoću greške RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma, pri čemu će u obzir biti uzet i efekat neidealne procene stanja RF kanala na osnovu kojeg se određuje pojačanje. Izvedeni izrazi biće uprošćeni na slučaj kada je RF deonica pod uticajem Rejlijevog fedinga, koji su publikovani u [45]. Takođe, predstavljeni su i jednostavniji izrazi za performanse sistema na velikim vrednostima SNR-a.

Dalje poboljšanje performansi asimetričnih RF/FSO sistema implementiranjem više releja koji su paralelno povezani, i korišćenjem parcijalne selekcije releja, prikazano je u šestom poglavlju. Analiza asimetričnih RF/FSO sistema biće izvedena uz pretpostavku da su promene fedinga na RF deonici brze, i da dolazi do kašnjenja povratne trenutne informacije od releja do prijemnika, tj. smatra se da se parcijalna selekcija releja vrši na osnovu zakasnele trenutne informacije o stanju RF kanala. Analiza sistema u ovom poglavlju biće izvedena uz pretpostavku da izabrani relej sa najboljom procenom kanala možda neće biti u mogućnosti da izvrši prenos, pa se bira najbolji među ostalim relejima. Feding na RF deonicama modelovan je Rejlijevom raspodelom, dok je druga FSO deonica pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije i greške pozicioniranja. U prvom delu ovog poglavlja razmatraće se sistemi sa AF relejima konstantnog pojačanja, pri čemu će biti izvedeni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške. Izvedeni izrazi za verovatnoću prekida biće objavljeni u poglavlju knjige [115]. Dobijeni rezultati biće uprošćeni za slučaj kada je greška pozicioniranja na FSO deonici zanemarljivo mala, što predstavlja rezultate objavljene u [117]. Drugi deo ovog poglavlja predstavlja analizu asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejima promenljivog pojačanja. Zakasnela trenutna informacija koja se koristi za odabir aktivnog releja koristi se i za određivanje pojačanja. Biće izvedeni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške.

U sedmom poglavlju biće predstavljeni svi glavni zaključci do kojih se došlo u toku izrade disertacije.

Obzirom da je prilikom analize u doktorskoj disertaciji korišćen vrlo složen matematički aparat, na kraju disertacije biće prikazan dodatak sa jednačinama koje su primenjene prilikom izvođenja, kao i spisak korišćene literature.

## 2. Optičke bežične komunikacije

Sa konstantnim povećanjem broja korisnika, budući telekomunikacioni sistemi suočavaju se sa nizom novih potreba u cilju prenosa savremenih visokokvalitetnih multimedijalnih servisa. Naredne generacije bežičnih sistema bi trebalo da pruže veći propusni opseg, bolju pokrivenost, veće brzine i bolji kvalitet prenosa. Pretpostavlja se da upotreba bakarnih i koaksijalnih kablova i bežičnih RF tehnologija neće obezbediti navedene potrebe zbog niza ograničenja, kao što su pretrpan i licenciran spektar, ograničen propusni opseg, relativno niske brzine prenosa, pitanje bezbednosti, dostupnost i visoke cene [8], [53], [78].

Kao pogodno rešenje za novonastale potrebe optička vlakna dobila su na važnosti, pre svega jer obezbeđuju ogroman propusni opseg, što za posledicu daje velike brzine prenosa. Međutim, implementacija optičkih vlakana u gusto naseljenim urbanim sredinama je dosta komplikovana, dugotrajna i skupa [76]. Da bi se u potpunosti iskoristile njihove prednosti prenosa i kompenzovali veliki troškovi infrastrukture, sistemi sa optičkim vlaknima su najefikasniji izbor za komunikacioni link na velikim rastojanjima. Širok propusni opseg koji je postignut mrežom sistema sa optičkim vlaknima još uvek nije dostupan kod uobičajnih pristupnih mreža, pre svega zbog ograničenog propusnog opsega tehnologija koje se najčešće koriste za povezivanje krajnjih korisnika na glavnu mrežu sa optičkim vlaknima. Stoga, brzine prenosa podataka koje su dostupne krajnjim korisnicima su ograničene. Postojanje razlike u propusnom opsegu između glavne i uobičajnih pristupnih mreža predstavlja problem „poslednje milje“. Ova premosnica sa velikim propusnim opsegom za sada je rešena tehnologijama kojima se ne iskorišćava raspoloživi kapacitet sistema. Kao pogodno rešenje ovog problema mogu se primeniti optičke bežične komunikacije, koje kombinuju brzinu

optičkih sistema i fleksibilnost bežičnih komunikacija [8], [14], [26], [27], [53], [63]–[65], [76], [78], [107], [131], [152].

Optičke bežične komunikacije predstavljaju bežičnu tehnologiju koja podrazumeva prenos optičkog signala (vidljive, infracrvene ili ultraljubičaste svetlosti) kroz slobodan prostor (vazduh, svemir, vakuum i sl.). Pored toga što obezbeđuje približne brzine prenosa kao i optička vlakna bez dodatnih troškova instaliranja ovih sistema, primena optičkih bežičnih komunikacija nudi i niz drugih pogodnosti. Jeftina i brza ugradnja, poboljšana bezbednost prenosa podataka, nelicencirani i širok propusni opseg, podrška velikog broja korisnika, samo su neke od osobina zbog čega optička bežična tehnologija nalazi široku primenu u savremenim komunikacijama [14], [53], [65], [107].

Pored bežične tehnologije za prenos optičkog signala iz vidljivog dela spektra (tzv. VLC tehnologija), optičke bežične komunikacije obuhvataju i optičke komunikacije u slobodnom prostoru, tj. FSO sisteme. FSO tehnologija podrazumeva prenos optičkog snopa iz infracrvenog dela spektra, pri čemu postoji linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika. Za razliku od VLC sistema koje koriste LED diode za emitovanje svetlosti, FSO linkovi najčešće koriste lasere, mada je za manje brzine prenosa na kraćim rastojanjima moguće koristiti i LED diode [53].

Optičke komunikacije u slobodnom prostoru predstavljaju jedno od najpogodnijih rešenja za problem „poslednje milje“ u razvoju pristupnih mreža. U sredinama gde je moguće ostvariti optičku vidljivost između predajnika i prijemnika, FSO sistemi se mogu koristiti za povezivanje krajnjih korisnika na već postojeće komunikacione mreže. Pored toga, FSO sistemi nalaze širok opseg primena zbog osobina koje ih odlikuju [30], [53], [78], [131]:

- Optički snop je veoma uzan i karakteriše ga velika usmerenost, pri čemu se obezbeđuje energetska efikasnost, sigurnost i prostorna izolacija od potencijalnih interferencija. Ova osobina nije svojstvena RF komunikacijama;
- Veliki propusni opseg – Pošto je količina prenesenih podataka u direktnoj vezi sa frekvencijom modulisanog nosioca, optički nosilac (čiji je opseg frekvencije  $10^{12}$ - $10^{16}$  Hz) dozvoljava 2000 THz propusnog opsega. Optičke komunikacije omogućavaju povećan kapacitet u odnosu na RF sisteme;
- Velike brzine prenosa;
- FSO prenos je nelicenciran – FSO sistemi koriste frekvencije iznad 300 GHz, što predstavlja nelicencirani opseg širom sveta. Za razliku od RF sistema, FSO sistemi ne zahtevaju dodatne dozvole;

- FSO obezbeđuje podršku većeg broja korisnika u odnosu na standardne RF sisteme;
- Uređaji primenjeni kod tehnologije sa optičkim vlaknima se koriste i kod FSO sistema. Stoga, komponente za FSO su dostupne;
- FSO linkovi su jeftini i relativno jednostavni za ugradnju i repozicioniranje kada je to potrebno;
- Buduće mreže bi trebalo da omoguće interoperabilnost RF tehnologije, sistema sa optičkim vlaknima i FSO sistema. Međutim, nekompatibilnost RF/mikrotalasne tehnologije i tehnologije sa optičkim vlaknima jedan je od ograničavajućih faktora u nastajanjima da se dodatno iskoriste mogućnosti prenosa hibridnih pristupnih mreža. Zbog svoje fleksibilnosti, FSO predstavlja tehnologiju koja potencijalno može da reši problem nekompatibilnosti između RF i optičke tehnologije.

Ipak, upotreba FSO sistema ograničena je samo na sredine gde postoji linija optičke vidljivosti. Prilikom prostiranja optičkog signala kroz FSO kanal, dolazi do fluktuacija amplitude i faze talasa zbog atmosferskih turbulencija, što predstavlja osnovni problem FSO sistema.

## 2.1. Istorijski razvoj i primena FSO sistema

Optičke komunikacije u raznim oblicima su u upotrebi već hiljadama godina. Prva upotreba optičkih signala javila se kod drevnih naroda Grka i Rimljana još 800. p.n.e. kada se svetlost koristila kao signalizaciono sredstvo, a zatim i kod američkih Indijanaca 150. p.n.e. Ipak, prva praktična demonstracija FSO tehnologije predstavlja “*photophone*”, patent Alexander Graham Bell-a 1880. godine. U ovom patentu je sunčeva svetlost intenzitetski modulirana glasom da bi se prenela na rastojanje od 213 m [8], [27], [53], [63], [65], [78], [107], [131], [152].

Ponovno interesovanje za bežične optičke komunikacije i razvoj FSO tehnologije počinje 1960. otkrićem novih optičkih izvora. Pronalazak lasera je bio revolucionarni korak za optičke komunikacije, sa čim počinju i niz demonstracija FSO sistema (npr. prenos televizijskog signala koristeći GaAs LED na razdaljinu od 48 km; zatim 190 km prenosa glasovno modulisanog He-Ne lasera, itd). Dr. Erhard Kube objavio je rad “Information transmission by light beams through the atmosphere” u Nemačkoj, *Nachrichtentechnik*, Juna

1968. Prvi laserski link u komercijalne svrhe izgrađen je u Japanu od strane *Nippon Electric Company (NEC) Corporation* 1970-te godine. Od tada, nastavlja se intenzivno istraživanje bežičnih optičkih komunikacija, pre svega od strane vojnih organizacija. Velika zainteresovanost za FSO tehnologiju postoji u vojnim krugovima pre svega zbog značajno većeg propusnog opsega koje nudi u odnosu na RF tehnologiju, kao i zbog veće bezbednosti prenosa podataka. Takođe, OWC tehnologija je postala popularna i za istraživanje svemira (*deep space*) pod okriljem agencije NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) i ESA (*European Space Agency*), u okviru programa *Mars Laser Communication Demonstration* (MLCD) i *Semiconductor-laser Inter-satellite Link Experiment* (SILEX), respektivno.

Iako se dosta dugo znalo o tehnikama potrebnim za izgradnju operativnih komercijalnih FSO sistema, njihova praktičnost je do nedavno bila dovedena u pitanje iz dosta razloga. Kao prvo, postojeći komunikacioni sistemi bili su adekvatni za upotrebu, jer su ispunjavali sve potrebne zahteve i uslove. Drugo, potrebno ulaganje u istraživanja i razvoj ovih sistema u cilju poboljšanja i obezbeđivanja pouzdanosti sistema znatno je usporilo njihovu primenu. Dalje, neodrživost i otkaz FSO sistema usled nepovoljnih atmosferskih uslova (npr. u prisustvu magle) dodatno su osporila njihovu upotrebu. Takođe, primena FSO sistema u svemiru, gde bi se mogao zanemariti uticaj atmosferskih efekata, zahteva precizno pozicioniranje predajnika i prijemnika sistema, što ranije nije bilo moguće. Obzirom na pomenute probleme, razvoj FSO sistema i njihova primena u komercijalnim komunikacionim mrežama je do skora bila minimalna.

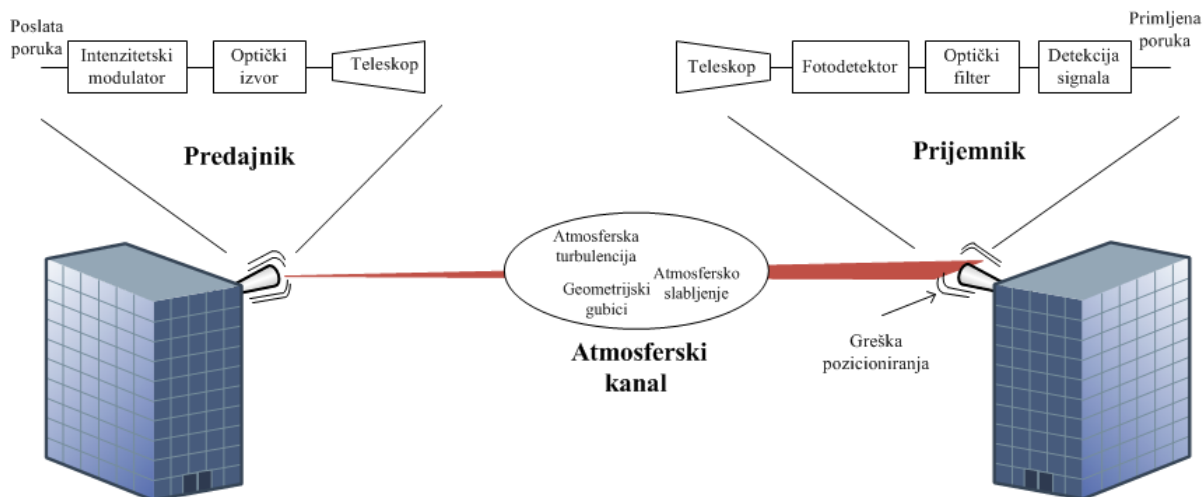
Tokom protekle decenije, brz razvoj i dostupnost optoelektronskih uređaja dovodi do ponovnog interesovanja za komercijalnu primenu FSO sistema. Takođe, povećana potreba za većim propusnim opsegom uslovala je da se buduće komunikacione mreže ne mogu oslanjati samo na jednu tehnologiju za povezivanje krajnjih korisnika, kao što je bio slučaj u prošlosti. Obzirom na uspehe u vojnoj primeni, upotreba FSO sistema opravdana je i u novim komercijalnim komunikacionim infrastrukturama. Zemaljski FSO sistemi koji su operativni u oba smera (*full duplex*) i koji rade brzinom 1.25 Gbps između dva statička čvora uobičajeni su na današnjem tržištu, kao sistemi koji pouzdano rade na rastojanjima od 3 do 5 km [164]. Prvi 10 Gbps FSO sistem predstavljen je na tržištu 2008. godine, što predstavlja najbržu komercijalnu bežičnu tehnologiju [40], [67]. Takođe, u cilju daljeg povećanja kapaciteta intenzivno su izučavani integrisani sistemi, koji se sastoje od FSO sistema i sistema sa optičkim vlaknima, i WDM (*Wavelength Division Multiplex*) FSO sistema [36], [75].

Zbog pomenutih osobina, FSO sistemi nalaze svoju primenu u sledećim oblastima:

- Problem „poslednje milje“ – FSO se koristi da premosti jaz propusnog opsega između glavne komunikacione mreže sa optičkim vlaknima i krajnjih korisnika. Na tržištu su već dostupni FSO linkovi od 50 m do nekoliko kilometara, sa brzinom prenosa od 1 Mbps do 10 Gbps.
- Podrška sistemima sa optičkim vlaknima – U slučaju oštećenja ili nedostupnosti glavnog linka sa optičkim vlaknima, FSO sistemi mogu se koristiti kao podrška i zamena u slučaju kolapsa sistema. Dužina ovog linka bi trebalo biti do 10 km sa brzinom prenosa do 10 Gbps.
- Komunikacija između ćelija – Može se koristiti za povratni saobraćaj između baznih stanica i komutacionih centara za 3G i 4G mreže, kao i za prenos IS-95 CDMA signala iz makro- i mikro-ćelija do baznih stanica.
- Oporavak od otkazivanja ili kao privremeni link – FSO tehnologija nalazi primenu kao privremeni link, bilo da je to za konferencije ili ad hoc povezivanje u slučaju kolapsa postojeće komunikacione mreže.
- Nedostupni predeli – FSO je veoma pogodan za premošćavanje nedostupnih terena, npr. preko reka, vrlo prometnih ulica, železničkih pruga itd.
- Televizija visoke rezolucije – Pošto kamere visoke rezolucije zahtevaju širok propusni opseg, optičke komunikacije u slobodnom prostoru sve više dobijaju na važnosti kod primene u filmskoj industriji i kod medija, da bi se preneli signali od kamere visoke rezolucije do odgovarajućih centara.

## 2.2. Konfiguracija FSO linka

U FSO komunikacionim sistema vrši se prenos optičkog signala od predajnika do prijemnika kroz atmosferski kanal, pri čemu je obavezno postojanje linije optičke vidljivosti. Na slici 2.2.1. prikazan je model FSO sistema. Električni informacioni signal najpre se šalje na optički izvor gde se intenzitetski moduliše i konvertuje u optički signal. Optički izvor se nalazi u sklopu predajnog teleskopa, koji određuje intenzitet optičkog snopa, kao i njegov pravac i veličinu. Usmeren optički snop se dalje šalje kroz atmosferski kanal. Tokom prenosa signal je oslabljen usled postojanja atmosferske turbulencije. Takođe, optički signal oslabljen je i zbog postojanja greške pozicioniranja između predajnika i prijemnika, o čemu će biti reči kasnije.



*Slika 2.2.1. Model FSO sistema*

Na prijemnom delu sistema, teleskop „skuplja“ optički signal, koji se filtrira pomoću optičkog filtra. Signal se dalje fokusira na fotodetektor, koji trenutnu optičku snagu konvertuje u električnu struju, a zatim se vrši detekcija signala.

## 2.2.1. Optoelektronske komponente

Pošto FSO uređaji uglavnom koriste iste komponente kao i sistemi sa optičkim vlaknima, njihova dostupnost olakšala je i omogućila brz razvoj i upotrebu FSO sistema. U zavisnosti od vrste komponenti koje se koriste prilikom projektovanja FSO predajnika i prijemnika, performanse FSO sistema će se znatno razlikovati. U ovom delu disertacije biće opisani najčešće korišćeni optički izvori na predajnom, i detektori na prijemnom delu FSO sistema.

### 2.2.1.1. Optički izvori

Nakon intenzitetske modulacije, optički signal se šalje na optički izvor, čime se određuje intenzitet, pravac i veličina optičkog snopa. Optički izvor je jedan od ključnih elementa prilikom projektovanja FSO linka, jer određuje talasnu dužinu, vek trajanja sistema i dimenzije predajnog sklopa. Takođe, optička snaga na predaji ne treba da bude veća od nekoliko mW. Najbitnije od svega, optički izvori bi trebalo biti u stanju da se modulišu na veoma velikim brzinama prenosa. I pored velikog izbora optičkih izvora koji se mogu koristiti, u praksi se najčešće koriste LED diode i laseri [53], [65], [93].



### *LED diode*

Svetleće ili LED (*Light Emitting Diode*) diode se baziraju na spontanom zračenju usled rekombinacije elektrona i šupljina u aktivnoj zoni p-n spoja. One predstavljaju nekoherentan izvor svetlosti. Odlikuje ih niska cena i dug vek trajanja. Nalaze primenu u bežičnim optičkim komunikacionim sistemima manjih kapaciteta i na kraćim rastojanjima između predajnika i prijemnika. Uglavnom se koriste kod VLC sistema, mada su našle primenu i kod FSO linkova kraćih rastojanja za postizanje manjih brzina prenosa.

### *Laser*

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) je uređaj kojim se vrši pojačanje svetlosti stimulisanom emisijom zračenja. Kod FSO sistema se koriste poluprovodnički laseri, koji predstavljaju koherentan izvor svetlosti. Laser ima veću predajnu optičku snagu u odnosu na LED diodu. Na primer, da bi LED dioda obezbedila optičku snagu od 1 mW, potrebna je ulazna struja od 150 mA, dok je za istu optičku snagu laseru potrebno 10 mA ili manje [53]. FSO sistemi uglavnom koriste lasere, jer su pogodniji za duže deonice u odnosu na LED diode.

#### **2.2.1.2. Fotodetektori**

Na prijemnom delu FSO sistema postoji teleskop, tj. sabirno sočivo, koji predstavlja prijemnu antenu koja „skuplja“ optički signal i šalje ga na fotodetektor. Fotodetektor je optoelektronski uređaj koji energiju optičkog signala konvertuje u električni signal. U optičkim komunikacijama uglavnom se koriste fotodiode, pre svega zbog malih dimenzija, velike osetljivosti, širokog propusnog opsega, velike pouzdanosti, brzog odziva i niskih cena. Najčešće se koriste dva tipa fotodioda: PIN i APD fotodioda [4], [53], [65], [77], [93].

#### *PIN fotodetektori*

PIN fotodioda se od standardne PN fotodiode razlikuje po tome što se formira od jako dopiranih poluprovodničkih slojeva  $p^+$  i  $n^+$  tipa, između kojih se nalazi slabo dopirani ili nedopirani poluprovodnički sloj.

#### *APD fotodetektori*

Osim sopstvenog sloja, lavinska fotodioda sadrži i slabo dopirani  $n^-$  sloj koji se nalazi uz  $p^+$  sloj, i čija je svrha da pojača ugrađeno električno polje da bi u toj oblasti bio moguć proboj

putem udarne jonizacije. Lavinske ili APD fotodiode karakteriše bolja osetljivost, ali i veći kvantni šum u odnosu na PIN fotodiode. Takođe, APD fotodiode imaju pojačanje veće od jedinice, dok je kod PIN fotodioda vrednost pojačanja jednaka jedinici.

Tabela 2.1. sadrži vrednosti osetljivosti i pojačanja PIN i APD fotodioda od različitih materijala [64].

**Tabela 2.1.** Pregled vrednosti osetljivosti i pojačanja različitih vrsta fotodiode

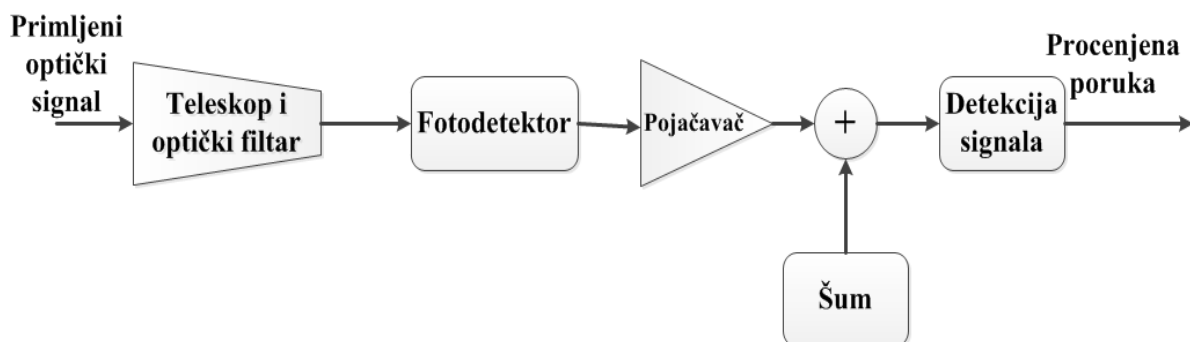
<b>Materijal i tip fotodiode</b>	<b>Osetljivost (A/W)</b>	<b>Pojačanje</b>
Si PIN	0.5	1
Ge PIN	0.7	1
InGaAs PIN	0.9	1
Si APD	77	150
Ge APD	7	10
InGaAs APD	9	10

### 2.2.2. Detekcija optičkog signala

Postoje dve vrste detekcije koje se koriste kod FSO sistema: direktna i koherentna detekcija. Iako je u nastavku dat kratak pregled obe vrste detekcije, u disertaciji biće razmatrani samo FSO sistemi sa direktnom detekcijom [8], [53].

#### *Direktna detekcija – DD*

Direktna detekcija predstavlja jednostavniji oblik detekcije koja se koristi kod optičkog prijemnika. Takođe se naziva nekoherentna ili detekcija anvelope. U ovom slučaju, prijemnik reaguje samo na trenutnu snagu prikupljenog optičkog snopa. Stoga, da bi se pravilno detektovao signal, prenesena informacija mora biti u vezi sa varijacijama intenziteta optičkog signala. Ako je  $P(t)$  trenutna snaga primljenog signala, trenutna struja detektora je [53]



**Slika 2.2.2.** Optički prijemnik sa direktnom detekcijom

$$i(t) = \frac{\eta q \lambda}{hc} g P(t) = R g P(t), \quad (2.2.1)$$

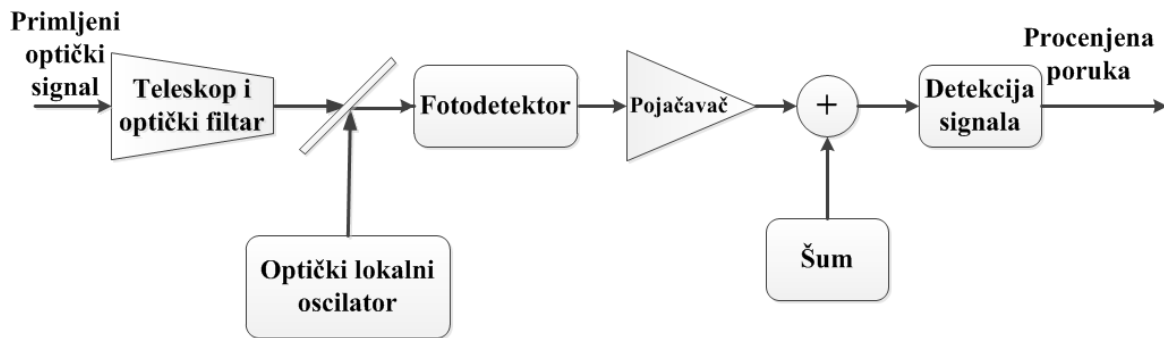
gde je  $\eta$  kvantna efikasnost (koeficijent konverzije) fotodetektora,  $q$  opterećenje elektrona,  $\lambda$  predstavlja talasnu dužinu svetlosti,  $h$  je Plankova (*Planck*) konstantna i  $c$  brzina svetlosti. Parametar  $R = \eta q \lambda / (hc)$  predstavlja osetljivost fotodiode, čije su vrednosti date u Tabeli 2.1. Pojačanje fotodiode označeno sa  $g$ , jednako je jedinici kod PIN fotodetektora, dok je u slučaju APD fotodiode veće (Tabela 2.1.). Blok dijagram prijemnika sa direktnom detekcijom je dat na slici 2.2.2. [53].

### *Koherentna detekcija*

Glavna razlika prijemnika sa koherentnom detekcijom u odnosu na prijemnik sa direktnom detekcijom je postojanje optičkog lokalnog oscilatora. Optički signal na prijemu kombinuje se sa optičkim signalom koji je generisan od strane lokalnog oscilatora, koji se dalje šalje na fotodetektor. Frekvencija oscilatora ne mora biti ista kao frekvencija primljenog signala. Stoga, razlikuju se dve vrste koherentne detekcije: heterodinska i homodinska detekcija. Blok šema prijemnika sa koherentnom detekcijom prikazana je na slici 2.2.3. Bitno je naglasiti da koherentna detekcija kod optičkih nije isto što i kod RF sistema. Za razliku od RF koherentne detekcije, signal na izlazu iz optičkog lokalnog oscilatora ne mora da ima istu fazu kao i primljeni signal [53], [107].

### **2.2.3. Šumovi kod fotodetekcije**

Idealni optički prijemnik omogućava konverziju optičkog signala u električni bez dodatnih gubitaka. Međutim, u praksi je situacija malo drugačija. Sposobnost optičkog prijemnika da detektuje i konvertuje signal na prijemu je ograničena šumom. Ako je snaga signala manja od snage šuma, signali neće biti ispravno detektovani. Slično kao i kod sistema sa optičkim vlaknima, dva glavna izvora šuma na ulazu prijemnika su šot šum (*shot noise*) i termički šum (*thermal noise*). Za razliku od termičkog šuma, koji je posledica nesavršenosti elektronike prijemnika, šot šum zavisi od primljene fotostruje. Kod FSO sistema, šum pozadinskog zračenja (*background radiation noise, ambient light*) je takođe od značaja, dok kod sistema sa optičkim vlaknima može biti zanemaren [131]. Struja mraka (*dark current*) se takođe javlja kod optičkih sistema, ali obično je zanemarljiva prilikom FSO prenosa [4], [53], [93], [152].



Slika 2.2.3. Optički prijemnik sa koherentnom detekcijom

### Termički šum

Termički šum nastaje usled termičkog kretanja elektrona u kolu prijemnika, i obično se modeluje kao stacionarni Gausov (*Gaussian*) slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{th}^2$ , definisane kao [4]

$$\sigma_{th}^2 = 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f, \quad (2.2.2)$$

gde je  $k_B$  Bolcmanova (*Boltzmann*) konstanta,  $T$  je apsolutna temperatura prijemnika u Kelvinima, dok  $R_L$  predstavlja radnu otpornost. Parametar  $F_n$  označava stepen pojačanja šuma, dok  $\Delta f$  predstavlja efektivni propusni opseg i može se odrediti kao  $\Delta f = R_b/2$ , gde je  $R_b$  bitska brzina [93].

### Šot šum

Šot šum nastaje usled generisanja fotostruje i predstavlja glavni izvor šuma u optičkim sistemima. Javlja se zbog diskretne prirode svetlosti i zavisi od tipa primenjene fotodiode. Ova vrsta šuma je stacionarni slučajni proces opisan Poasonovom (*Poisson*) raspodelom, koja se u praksi često aproksimira Gausovom statistikom [53]. Stoga, šot šum se modeluje kao Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{sh}^2$ , određene kao [4], [53], [93], [152]

$$\sigma_{sh}^2 = \begin{cases} 2qg^2 F_A R I \Delta f & \text{APD fotodiode,} \\ 2q R I \Delta f & \text{PIN fotodiode,} \end{cases} \quad (2.2.3)$$

gde  $I$  predstavlja fluktuacije intenziteta primljene svetlosti,  $R$  je osetljivost fotodiode. Faktor dodatnog šuma usled lavinskog efekta je označen sa  $F_A$ , koji je u slučaju PIN fotodiode jednak jedinici, dok se kod APD fotodiode može naći kao [93]

$$F_A = k_A g + (1 - k_A) \left( 2 - \frac{1}{g} \right), \quad (2.2.4)$$

gde je  $k_A$  faktor jonizacije. Kao što je već rečeno, pojačanje fotodiode  $g$  je jednako jedinici kod PIN fotodetektora, dok je u slučaju APD fotodiode veće.

### Šum pozadinskog zračenja

Ova vrsta šuma nastaje usled detekcije fotona koji su generisani iz okruženja prijemnika, i nisu deo korisnih signala. Ako prijemnik nije izolovan od pozadinskih zračenja, ova vrsta šuma ne može biti zanemarena. Mogu se izdvojiti dve vrste izvora koja najviše doprinose pozadinskom zračenju: lokalizovani izvori (npr. Sunce) i prošireni izvori (npr. nebo). Izrazi za intenzitete obe vrste pozadinskog zračenja su dati kao [53]

$$\begin{aligned} I_{sky} &= N(\lambda) \Delta\lambda \pi \Omega^2 / 4, \\ I_{sun} &= W(\lambda) \Delta\lambda, \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

gde su  $N(\lambda)$  i  $W(\lambda)$  spektralno zračenje iz neba i spektralno zračenje Sunca, respektivno,  $\Delta\lambda$  predstavlja propusni opseg filtra koji prethodi fotodetektoru, i  $\Omega$  je ugao vidnog polja fotodetektora u radijanima. Uticaj ove vrste šuma može biti znatno redukovano pomoću uskog vidnog polja i propusnog opsega  $\Delta\lambda$ . Šum pozadinskog zračenja je u suštini kvantni šum modelovan kao Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse

$$\sigma_{bg}^2 = \begin{cases} 2qg^2 F_A R \Delta f (I_{sky} + I_{sun}) & \text{APD fotodiode,} \\ 2qR \Delta f (I_{sky} + I_{sun}) & \text{PIN fotodiode.} \end{cases} \quad (2.2.6)$$

Pod pretpostavkom da su sve navedene komponente šuma od važnosti i ne mogu biti zanemarene, ukupni šum može se modelovati kao stacionarni Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_n^2$ , koja predstavlja zbir varijansi termičkog šuma, šot šuma i šuma pozadinskog zračenja

$$\sigma_n^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh}^2 + \sigma_{bg}^2. \quad (2.2.7)$$

U zavisnosti od tipa fotodetektora, ukupna varijansa šuma biće drugačija. U analizi koja će biti prikazana u nastavku disertacije, prilikom razmatranja FSO sistema sa PIN fotodetektorom, termički šum će biti dominantna komponenta, dok će u slučaju analize FSO sistema sa APD prijemnikom, šot šum takođe biti uzet u obzir.

## 2.2.4. Modulacione tehnike

Brojne modulacione tehnike mogu biti primenjene kod bežičnih optičkih sistema, stoga određeni faktori imaju važnu ulogu prilikom odabira modulacije. Optička snaga na predaji je ograničena, pa je najbitnije da primenjena modulaciona tehnika obezbedi energetska efikasnost. Takođe, od velike važnosti je iskorišćenost propusnog opsega, koji je u praktičnim sistemima ograničen usled određenih karakteristika sistema (površina fotodetektora, kapacitet kanala,...). Pouzdanost prenosa jedan je od bitnih faktora na koji treba obratiti pažnju prilikom projektovanja sistema, jer bi trebalo da se obezbedi minimalna prihvatljiva verovatnoće greške tokom prenosa optičkog signala u nepovoljnim uslovima. Kompleksnost predajnika i prijemnika, kao i laka implementacija FSO opreme, veoma je bitna i predstavlja važan parametar prilikom odabira modulacione tehnike [53], [131].

Postizanje odlične energetske efikasnosti i odgovarajućeg propusnog opsega nije od velike koristi, ako je implementacija sistema komplikovana i skupa. Stoga, komercijalni FSO sistemi najčešće koriste intenzitetsku modulaciju zasnovanu na OOK šemi, dok se na prijemu vrši direktna detekcija. Glavni nedostatak OOK IM/DD modulacije je potreba za podešavanjem praga pri detekciji. U cilju daljeg poboljšanja performansi FSO sistema, predložena je intenzitetska modulacija podnosiocem.

### *Intenzitetska modulacija sa OOK šemom*

Kao što je već rečeno, komercijalni FSO sistemi najčešće koriste IM/DD, čime se najjednostavnije moduliše intenzitet optičkog izvora i vrši dalji prenos signala kroz slobodan prostor. Pošto OOK važi za najprostiji oblik binarnog modulacionog formata, u praksi se najčešće javljaju baš sistemi sa IM/DD i OOK. Blok šema FSO sistema sa OOK IM/DD je predstavljena na slici 2.2.1. Jednostavnost OOK modulacije ogleda se u tome što bit koji nosi informaciju zauzima ceo signalizacioni interval  $T_b$  kada se prenosi bit 1, dok bit 0 predstavlja izostanak optičkog impulsa. Ako je srednja predajna optička snaga označena sa  $P_t$ , anvelopa signala na predaji je [53]

$$x(t) = \begin{cases} 2P_t, & t \in [0, T_b) \\ 0, & \text{ostalo} \end{cases} \quad (2.2.8)$$

Na prijemu se vrši direktna detekcija i konverzija optičkog signala u električni pomoću PIN ili APD fotodiode. Posle konverzije, električni signal je dat u obliku

$$y(t) = x(t)RI + n(t), \quad (2.2.9)$$

gde  $I$  predstavlja fluktuacije intenziteta signala, a  $n(t)$  predstavlja beli Gausov šum (AWGN – *Additive White Gaussian Noise*) nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_n^2$ . Detekcija signala na prijemu vrši se na osnovu amplitude primljenog signala, pa će postojanje fluktuacija intenziteta optičkog signala dovesti do potrebe za podešavanjem praga prilikom detekcije, što predstavlja glavni nedostatak IM/DD sa OOK. Na osnovu izraza (2.2.9), može se definisati trenutni SNR kao

$$\gamma = \frac{(2P_tRI)^2}{2\sigma_n^2}, \quad (2.2.10)$$

dok se srednja vrednost SNR-a može naći kao [108]

$$\bar{\gamma} = E[\gamma] = E\left[\frac{(2P_tRI)^2}{2\sigma_n^2}\right] = \frac{(2P_tR)^2}{2\sigma_n^2} E[I^2]. \quad (2.2.11)$$

gde je sa  $E[\cdot]$  označeno matematičko očekivanje. U literaturi najčešće se definiše električni SNR kao [108]

$$\mu = \frac{(2P_tR)^2}{2\sigma_n^2} E^2[I], \quad (2.2.12)$$

pri čemu važi

$$\gamma = \frac{\mu}{E^2[I]} I^2. \quad (2.2.13)$$

#### *Intenzitetska modulacija podnosiocem (SIM – Subcarrier Intensity Modulation)*

Intenzitetska modulacija podnosiocem je tehnika preuzeta iz RF komunikacija, koja se već koristi kod aplikacija kao što su digitalna televizija, LAN (*Local Area Networks*) mreža, ADSL-a (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), 4G komunikacionih sistema i sistema sa optičkim vlaknima. Blok šema FSO sistema sa SIM tehnikom prikazana je na slici 2.2.4. Intenzitetska modulacija podnosiocem bazirana je na tome da se električni signal koji nosi informaciju,  $x(t)$ , najpre moduliše jednom od već poznatih RF modulacionih tehnika. Pošto električni signal ima i pozitivne i negativne vrednosti, jednosmerna (DC *bias*) komponenta mora se dodati u cilju obezbeđivanja nenegativnosti. Signal zatim moduliše intenzitet

optičkog izvora (laser) sa predajnom optičkom snagom  $P_t$ . Optički izvor dalje šalje signal kroz atmosferski kanal. Intenzitet optičkog signala na predaji dat je u obliku

$$I_t(t) = P_t(1 + ms(t)), \quad (2.2.14)$$

gde  $m$  predstavlja indeks modulacije, i  $s(t)$  je signal na izlazu iz električnog modulatora. Nakon prenosa kroz atmosferski kanal, vrši se direktna detekcija na prijemu i uklanjanje jednosmerne komponente. Posle konvertovanja optičkog signala u električni pomoću fotodiode, signal se detektuje odgovarajućim električnim demodulatorom. Konačno, električni signal je dat kao

$$y(t) = x(t)RP_t mI + n(t). \quad (2.2.15)$$

Trenutni SNR u ovom slučaju definiše se kao

$$\gamma = \frac{(RP_t mI)^2}{2\sigma_n^2}, \quad (2.2.16)$$

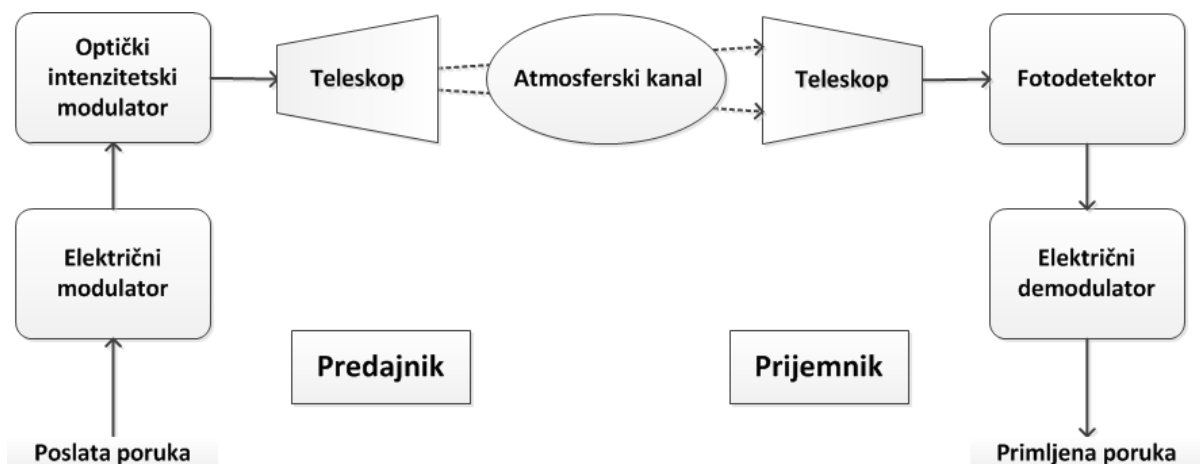
dok je srednja vrednost SNR-a

$$\bar{\gamma} = E[\gamma] = E\left[\frac{(RP_t mI)^2}{2\sigma_n^2}\right] = \frac{(RP_t m)^2}{2\sigma_n^2} E[I^2]. \quad (2.2.17)$$

Srednji električni SNR je definisan kao

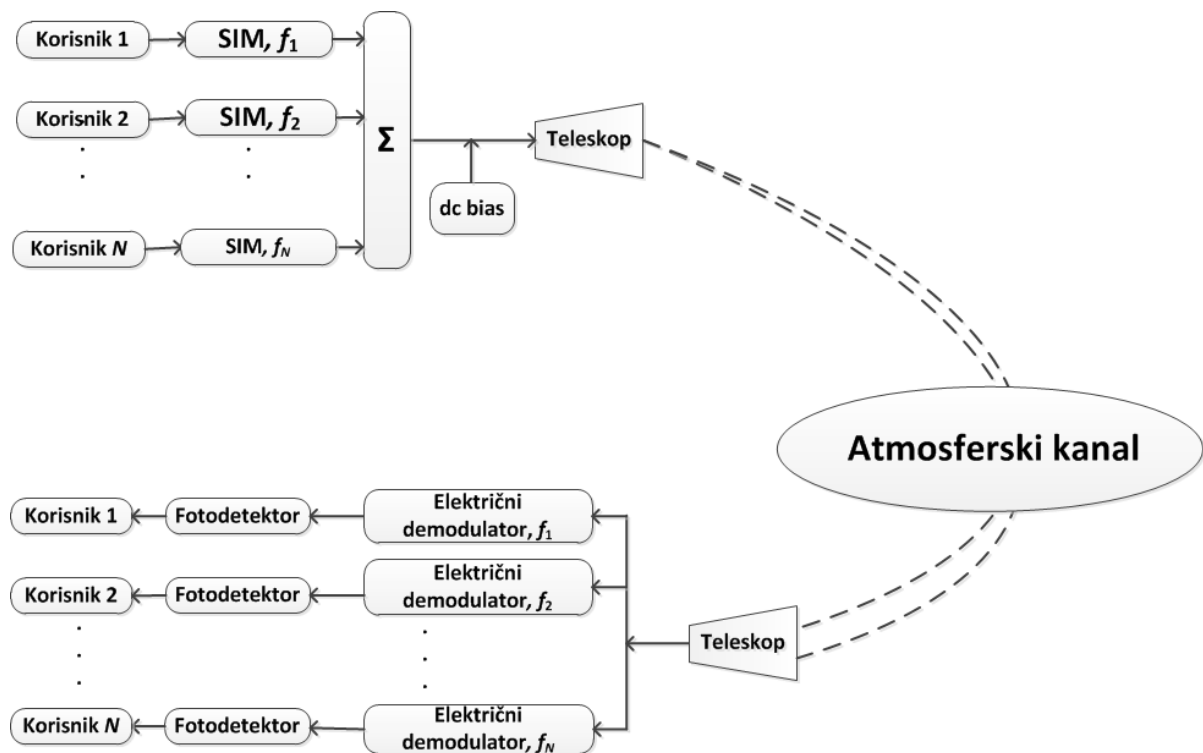
$$\mu = \frac{(RP_t m)^2}{2\sigma_n^2} E^2[I]. \quad (2.2.18)$$

Može se primetiti da i u slučaju SIM FSO sistema važi relacija (2.2.13).



Slika 2.2.4. Blok šema SIM FSO sistema





Slika 2.2.5. Blok šema SIM FSO sistema sa više podnosioca

Primena SIM tehnike u FSO sistemima dobila je na važnosti iz više razloga. Pre svega, razne vrste modulacija podnosioca su već poznate. Koriste se dostupne komponente iz RF komunikacija, poput stabilnih oscilatora i uskopojasnih filtera. Za razliku od OOK, podešavanje praga kod detekcije nije potrebno. Intenzitetska modulacija podnosiocem može se koristiti za povećanje kapaciteta sistema tako što se podaci različitih korisnika šalju preko različitih podnosioca [52], [53], [66], [131].

Intenzitetska modulacija sa više podnosioca, koja omogućava da veći broj korisnika istovremeno komunicira koristeći frekvencijski multipleks (FDM – *Frequency Division Multiplexing*) [29], [53], dodatno je podstakla interesovanje za praktičnu primenu FSO sistema. U tom slučaju, podaci svakog korisnika su modulirani različitom frekvencijom, nakon čega su multipleksirani, i zatim iskorišćeni da intenzitetski modulišu optički izvor. Na prijemu, višestruki demodulatori se koriste u cilju obnove pojedinačnih podataka. Blok šema FSO sistema koji koristi SIM tehniku sa više podnosioca prikazana je na slici 2.2.5.

Glavni nedostatak FSO sistema koji koriste SIM tehniku je neefikasnost snage. Relativno velika predajna optička snaga na predaji potrebna je iz dva razloga. Prvo, optički izvor je u „on“ stanju prilikom prenosa i bita 1 i bita 0, za razliku od OOK šeme kada je izvor aktivan samo prilikom prenosa bita 1. Drugo, kao što je već pomenuto, da bi se osiguralo da električni signal koji će modulirati intenzitet optičkog izvora nikad nije negativan, javlja se

potreba za dodavanjem jednosmerne komponente. Povećanje broja podnosioca dovodi do veće predajne optičke snage, jer je minimalna vrednost kompozitnog električnog signala smanjena (postaje negativnija). Stoga, potrebna jednosmerna komponenta se povećava. Ovo rezultira u lošoj efikasnosti snage, pa će broj podnosioca biti ograničen [53], [131], [178]. Još jedan od izazova sa kojim se sreće implementacija SIM tehnike kod FSO sistema je sinhronizacija demodulatora na prijemnom delu sistema.

## 2.3. Model FSO kanala

Pošto FSO tehnologija podrazumeva prenos optičkog signala kroz slobodan prostor, performanse sistema su osetljive na atmosferske uslove. Sledeće pojave utiču na slabljenje optičkog signala na prijemu i na gubitak primljene snage:

- atmosfersko slabljenje usled prostiranja (*pathloss*);
- atmosferska turbulencija;
- greška pozicioniranja (*pointing errors, misalignment fading*);
- kratkotrajna blokada signala usled fizičkih prepreka.

### 2.3.1. Atmosfersko slabljenje

Usled prostiranja kroz atmosferski kanal, optički signal osetljiv je na atmosferske uslove, kao što su sneg, kiša, magla i sl. Atmosfersko slabljenje usled prostiranja se pre svega javlja kao posledica apsorpcije i rasejanja gasova i čestica koji su sastavni deo atmosfere. [53]. Do apsorpcije dolazi kada se neki od fotona apsorbuju od strane molekularnih sastojaka atmosfere (magla, vodena para, ozon i sl.), pri čemu se njihova energija pretvara u toplotu. Rasejanje čestica ne dovodi do gubitka energije, ali se početni pravci prostiranja menjaju. Efekat rasejanja u velikoj meri zavisi od vremenskih uslova. Pošto su kapljice kiše i snega mnogo veće nego talasne dužine lasera koje su u upotrebi, rasejanje u ovim uslovima nema veliki uticaj na prenos optičkog signala kroz atmosferu. Međutim, čestice koje su prisutne u magli i izmaglici imaju prečnike koji su uporedivi sa optičkim talasnim dužinama. Stoga, rasejanje dovodi do velikog slabljenja u slučaju magle i izmaglice [53], [131].

Atmosfersko slabljenje usled prostiranja se opisuje preko Bir-Lambertovog (*Beer-Lambert*) zakona

$$I_l = \exp(-\sigma L), \quad (2.3.1)$$

gde  $\sigma$  predstavlja koeficijent slabljenja zavisan od atmosferskih uslova i  $L$  je dužina FSO deonice. Pošto je nivo apsorpcije određen talasnom dužinom svetlosti, u atmosferi se nalazi zona sa minimalnim stepenom apsorpcije. Talasne dužine koje koriste FSO sistemi pripadaju ovoj transparentnoj zoni, tako da je koeficijent slabljenja  $\sigma$  uglavnom određen stepenom rasejanja [131].

### 2.3.2. Atmosferska turbulencija

Atmosferska turbulencija je pojava koja u najvećoj meri utiče na slabljenja optičkog signala na prijemu. Turbulentno kretanje atmosfere usled promena u vazдушnom pritisku, nadmorskoj visini i brzini vetra, dovodi do razlike u temperaturi duž atmosferskog polja kojim se prenosi optički signal. Ove varijacije u atmosferi dovode do fluktuacija indeksa prelamanja, što rezultira postojanjem atmosferske turbulencije. Nehomogenost atmosfere usled turbulencije može se shvatiti kao postojanje nestabilnih vazдушnih masa, tj. ćelija ili optičkih vrtloga različitih veličina. Preciznije, veliki vrtlozi su određeni dimenzijom  $L_0$  (*outer scale*), dok su manji definisani dimenzijom  $l_0$  (*inner scale*). Optički kanal pod uticajem atmosferske turbulencije, koja je predstavljena preko vrtloga, prikazan je na slici 2.3.1. [53]. Po teoriji Kolmogorova (*Kolmogorov*), kinetička energija velikih vrtloga prenosi se na manje vrtloge bez gubitaka, pa na još manje itd. Kod vrtloga najmanjih dimenzija, energija se gubi zbog viskoznosti [8], [9], [12], [53], [70], [74], [81].

Slučajne promene indeksa prelamanja kroz različite vazdušne vrtloge, koji su posledica atmosferske turbulencije, dovode do varijacija faze i amplitude optičkog talasnog fronta. Drugim rečima, prilikom prenosa optičkog signala kroz atmosferski kanal dolazi do interakcije laserskog snopa i vrtloga, što rezultira u fluktuacijama faze i amplitude optičkog signala na prijemu. Slučajne promene amplitude optičkog signala nazivaju se scintilacija, koja ozbiljno može narušiti performanse FSO sistema.

Glavni problem prilikom projektovanja FSO sistema je atmosferska turbulencija, koja dovodi do degradacije performansi FSO sistema. Stoga, projektanti ovih sistema moraju u potpunosti da znaju prirodu okruženja kroz koje se prostiru optički signali. Za opisivanje

statistike intenziteta FSO signala u literaturi predloženo je više statističkih modela. Kada se signal prenosi kroz povoljnu sredinu (vedro nebo), što odgovara uslovima slabe atmosferske turbulencije, log-normalna raspodela je usvojena kao najpogodnija [27], [53], [63], [107], [131], [152]. U slučaju jake atmosferske turbulencije (gusta magla), K raspodela se pokazala kao odlična za opisivanje statistike intenziteta optičkog signala u FSO kanalima [63], [107], [152]. U literaturi najčešće je prihvaćena gama-gama raspodela, jer je pokazala odlična poklapanja teorijskih i eksperimentalnih podataka u širokom opsegu atmosferskih uslova [6], [8], [53]. Stepenn scintilacije određen je veličinom koja se zove indeks scintilacije (S.I. – *Scintillation Index*), koji je definisan kao [6], [108]

$$\text{S.I.} = \frac{\text{E}[I^2]}{\text{E}^2[I]} - 1. \quad (2.3.2)$$

gde  $I$  predstavlja fluktuacije intenziteta optičkog signala.

Gama-gama model zasnovan je na pretpostavci da su fluktuacije optičkog signala, koje su nastale prilikom prolaska kroz turbulentni FSO kanal, posledica modulacionih procesa  $I_x$  i  $I_y$ . Ova dva procesa potiču iz vrtloga velikih i malih dimenzija, respektivno, tj. normalizovan intenzitet optičkog signala usled gama-gama atmosferske turbulencije definiše se kao proizvod ova dva statistički nezavisna slučajna procesa

$$I_a = I_x I_y. \quad (2.3.3)$$

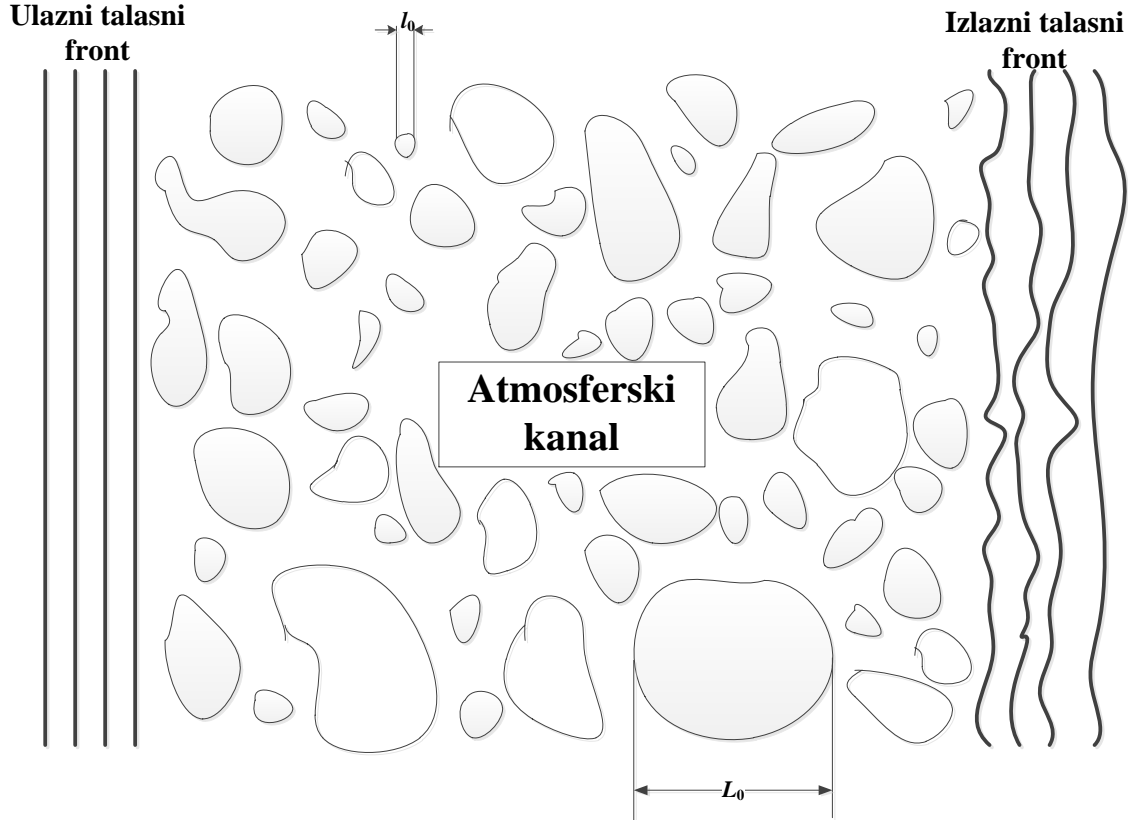
Procesi  $I_x$  i  $I_y$  opisani su gama raspodelom, pa su njihove funkcije gustine verovatnoće (PDF – *Probability Density Function*) date kao [6]

$$f_{I_x}(I_x) = \frac{\alpha(\alpha I_x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha I_x), \quad I_x > 0, \quad \alpha > 0, \quad (2.3.4)$$

$$f_{I_y}(I_y) = \frac{\beta(\beta I_y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I_y), \quad I_y > 0, \quad \beta > 0, \quad (2.3.5)$$

gde  $\Gamma(\cdot)$  predstavlja Gama funkciju definisanu kao [55, (8.310.1)], dok su  $\alpha$  i  $\beta$  parametri atmosferske turbulencije koji predstavljaju efektivan broj vrtloga velikih i malih dimenzija, respektivno. Posle matematičkog izvođenja datog u [6], [8], dobijena je gama-gama funkcija gustine verovatnoće kojom se opisuje normalizovan intenzitet  $I_a$

$$f_{I_a}(I_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_a}), \quad I_a > 0, \quad (2.3.6)$$



**Slika 2.3.1.** Atmosferski kanal pod uticajem atmosfere turbulencije

gde je  $K_\nu(\cdot)$  modifikovana Beselova (*Bessel*) funkcija druge vrste  $\nu$ -og reda [55, (8.407)]. Pošto je intenzitet  $I_a$  normalizovan, važi da je  $E[I_a] = 1$ . Na osnovu (2.3.6), lako se može potvrditi da je  $E[I_a^2] = (1 + \alpha)(1 + \beta) / (\alpha\beta)$ , pa će indeks scintilacije u slučaju gama-gama atmosfere turbulencije na osnovu (2.3.2) biti [108]

$$\text{S.I.} = \frac{E[I_a^2]}{E^2[I_a]} - 1 = \frac{\alpha + \beta + 1}{\alpha\beta} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta}. \quad (2.3.7)$$

Posmatrajući FSO sistem gde se pretpostavlja da su fluktuacije intenziteta posledica samo gama-gama atmosfere turbulencije, i važi  $E[I_a] = 1$ , odnos trenutnog i električnog SNR-a, koji je ranije definisan jednačinom (2.2.13), može se odrediti kao

$$\gamma_a = \mu_a I_a^2. \quad (2.3.8)$$

Koristeći (2.3.6) i (2.3.8), i transformacije slučajnih promenljivih  $f_{\gamma_a}(\gamma_a) = \left. \frac{f_{I_a}(I_a)}{\left| \frac{\partial \gamma_a}{\partial I_a} \right|} \right|_{I_a = \sqrt{\frac{\gamma_a}{\mu_a}}}$ ,

dobija se funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a [117]

$$f_{\gamma_a}(\gamma_a) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\mu_a^4} \gamma_a^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1} K_{\alpha-\beta} \left( 2\sqrt{\alpha\beta\sqrt{\frac{\gamma_a}{\mu_a}}} \right), \quad (2.3.9)$$

gde je električni SNR definisan na osnovu jednačine (2.2.12) za FSO sistem sa IM/DD OOK kao  $\mu_a = (2P_t R)^2 / (2\sigma_n^2)$ , i na osnovu jednačine (2.2.18) za SIM FSO sistem kao  $\mu_a = (RP_t m)^2 / (2\sigma_n^2)$ .

U slučaju ravanskih talasa, i graničnog slučaja kada je  $l_0 = 0$  (*zero inner scale*), parametri  $\alpha$  i  $\beta$  određeni su kao [8]

$$\alpha = \left( \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (2.3.10)$$

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

Preko Rojtove (*Rytov*) varijanse  $\sigma_R^2$ , parametri  $\alpha$  i  $\beta$  povezani su sa atmosferskim uslovima tokom kojih se vrši prenos optičkog signala na sledeći način

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{1/6}, \quad (2.3.11)$$

gde je  $k$  talasni broj definisan preko talasne dužine  $\lambda$  kao  $k = 2\pi/\lambda$ . Indeks prelamanja  $C_n^2$  se najčešće koristi za određivanja jačine turbulencije, i vrednosti ovog parametra variraju od  $10^{-17}$  do  $10^{-13} \text{m}^{-2/3}$  [53].

Kada se posmatraju ravanski talasi uz pretpostavku  $l_0 \neq 0$  (*nonzero inner scale*), parametri  $\alpha$  i  $\beta$  definisani su kao [8]

$$\alpha = \left( \exp[\sigma_{\ln x}^2] - 1 \right)^{-1},$$

$$\beta = \left( \exp \left[ \frac{0.51\sigma_p^2}{(1+0.69\sigma_p^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (2.3.12)$$

sa parametrima  $\sigma_{\ln x}^2$  i  $\sigma_p^2$  određenim na sledeći način

$$\sigma_{\ln x}^2 = 0.16\sigma_R^2 \left( \frac{\eta_x Q}{\eta_x + Q} \right)^{7/6} \left[ 1 + 1.75 \left( \frac{\eta_x}{\eta_x + Q} \right)^{1/2} - 0.25 \left( \frac{\eta_x}{\eta_x + Q} \right)^{7/12} \right], \quad (2.3.13)$$

$$\sigma_p^2 = 3.86\sigma_R^2 \left\{ (1+1/Q^2)^{11/12} \left[ \sin\left(\frac{11}{6} \tan^{-1} Q\right) + \frac{1.51}{(1+Q^2)^{1/4}} \sin\left(\frac{4}{3} \tan^{-1} Q\right) - \frac{0.27}{(1+Q^2)^{7/24}} \sin\left(\frac{5}{4} \tan^{-1} Q\right) \right] - 3.5Q^{5/6} \right\}, \quad (2.3.14)$$

i parametrima  $\eta_x$  i  $Q$  datim kao

$$\eta_x = \frac{2.61}{1+0.45\sigma_R^2 Q^{1/6}}, \quad Q = \frac{10.89L}{kl_0^2}. \quad (2.3.15)$$

U slučaju sfernih talasa, parametri  $\alpha$  i  $\beta$  definisani su kao [8]

$$\alpha = \left( \exp \left[ \frac{0.49\sigma_{Rs}^2}{(1+0.18d^2 + 0.56\sigma_{Rs}^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (2.3.16)$$

$$\beta = \left( \exp \left[ \frac{0.51\sigma_{Rs}^2 (1+0.69\sigma_{Rs}^{12/5})^{-5/6}}{(1+0.9d^2 + 0.62d^2\sigma_{Rs}^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right)^{-1},$$

gde je  $d = \sqrt{kD^2/(4L)}$ , pri čemu je  $D$  prečnik detektora ( $D = 2a$ ), i Rojtova varijansa  $\sigma_{Rs}^2$  u ovom slučaju je određena kao

$$\sigma_{Rs}^2 = 0.5C_n^2 k^{7/6} L^{1/6}. \quad (2.3.17)$$

### 2.3.3. Greška pozicioniranja

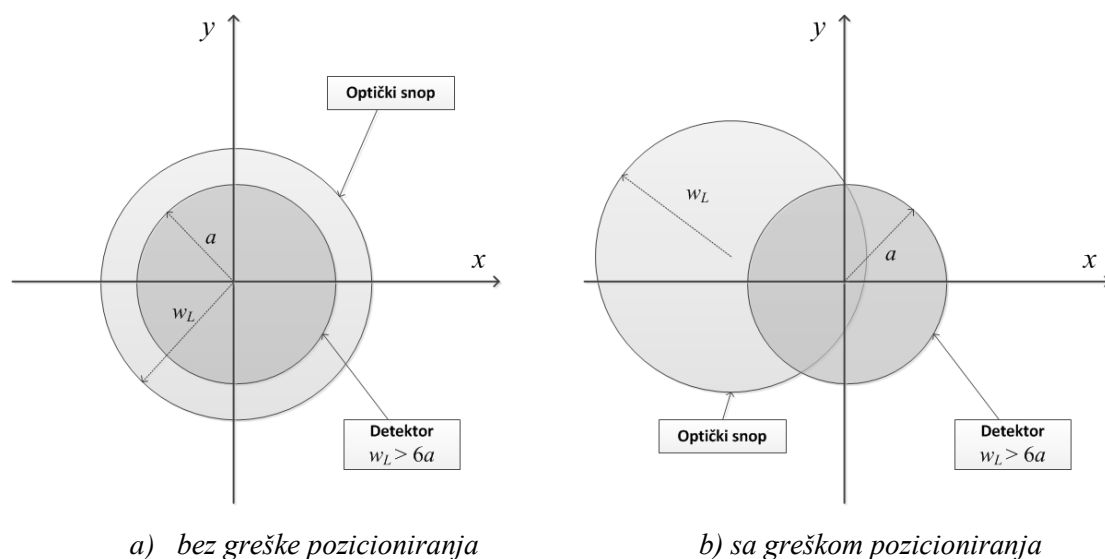
Pored atmosfarske turbulencije, još jedan bitan razlog slabljenja optičkog signala je loše pozicioniranje predajnika i prijemnika, koje dovodi do greške pozicioniranja. Uglavnom se teži da FSO predajnik obezbedi uzak laserski snop u cilju smanjenja optičke snage lasera. Što se tiče prijemnog dela, poželjno je da vidno polje teleskopa bude uže da bi se smanjio uticaj šuma pozadinskog zračenja. Predajnik i prijemnik FSO sistema obično su instalirani na visokim zgradama, tako da slabi zemljotresi, jak vetar i toplotno širenje utiču na vibracije optičkog snopa. Stoga, pozicioniranje FSO uređaja je zahtevan i komplikovan zadatak, jer linija optičke vidljivosti mora biti usklađena tokom trajanja komunikacije između predajnika i prijemnika [25], [47], [48], [51], [147]–[149], [176]. Greška pozicioniranja nastaje usled vibracija optičkog snopa i njegovog rasejavanja (pomeraja) u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Sastoji se od dve osnovne komponente: preciznost lasera (*boresight*) i džiter. Greška

usled loše preciznosti nastaje usled termičkog širenja laserskog snopa i predstavlja fiksni pomeraj između centra optičkog snopa i detektora na prijemu. Džiter predstavlja slučajni pomeraj, koji se javlja kao posledica njihanja zgrada usled slabih zemljotresa i veoma jakog vetra.

U literaturi je predloženo više statističkih modela za opisivanje greške pozicioniranja [25], [48], [51], [176] u zavisnosti od vrednosti i modelovanja komponente preciznosti lasera i džitera. U disertaciji je za opisivanje greške pozicioniranja korišćen model predložen od strane Farida i Hranilovića [48], koji, za razliku od modela datog u [25], ne zanemaruje veličinu detektora u odnosu na širinu optičkog snopa na prijemu. Takođe, pretpostavlja se da je postignuta zadovoljavajuća preciznost lasera. Ovaj model izveden je pod pretpostavkom da su horizontalni i vertikalni pomeraji nezavisni Gausovi slučajni procesi, nulte srednje vrednosti i standardne devijacije  $\sigma_s$ , pa je rezultujući radijalni pomeraj  $r$  modelovan Rejljevom raspodelom [48]

$$f(r) = \frac{r}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (2.3.18)$$

gde je  $\sigma_s^2$  varijansa džitera na prijemu. Model je izveden pod pretpostavkom Gausovog snopa i kružnog detektora poluprečnika  $a$ , pri čemu važi  $w_L/a > 6$ , gde  $w_L$  predstavlja širinu optičkog snopa na udaljenosti  $L$  od predajnika. Slika 2.3.2. predstavlja projekciju optičkog snopa na ravan detektora na prijemu za slučaj bez i sa greškom pozicioniranja. Slabljenje usled greške pozicioniranja optičkog snopa,  $I_p$ , na rastojanju  $L$  od prijemnika i sa radijalnim pomerajem  $r$ , može se aproksimirati kao [48]



Slika 2.3.2. Projekcija optičkog snopa na ravan detektora



$$I_p(r) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w_{Leq}^2}\right). \quad (2.3.19)$$

gde parametar  $A_0$  predstavlja maksimalnu primljenu snaga tj. primljenu snagu kada je  $r = 0$ , i parametar  $w_{Leq}$  je ekvivalentni poluprečnik snopa na prijemu, koji su definisani kao

$$A_0 = [\text{erf}(v)]^2, \quad v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}w_L}, \quad (2.3.20)$$

$$w_{Leq}^2 = \frac{w_L^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)},$$

Širina optičkog snopa na udaljenosti  $L$  od predajnika,  $w_L$ , povezana je sa širinom snopa na izlazu iz predajnog teleskopa,  $w_0$ , i poluprečnikom zakrivljenja,  $F_0$ , na sledeći način [47]

$$w_L = w_0 \sqrt{(\Theta_o + \Lambda_o)(1 + 1.63\sigma_R^{12/5}\Lambda_1)}, \quad (2.3.21)$$

gde je

$$\Theta_o = 1 - \frac{L}{F_0}, \quad \Lambda_o = \frac{2L}{kw_0^2}, \quad (2.3.22)$$

$$\Lambda_1 = \frac{\Lambda_o}{\Theta_o^2 + \Lambda_o^2}.$$

Kombinovanjem (2.3.18) i (2.3.19), izveden je konačan izraz za funkciju gustine verovatnoće slabljenja usled greške pozicioniranja,  $I_p$ , kao [48], [147]

$$f_{I_p}(I_p) = \frac{\xi^2}{A_0^{\xi^2}} I_p^{\xi^2-1}, \quad 0 \leq I_p \leq A_0, \quad (2.3.23)$$

gde je parametar  $\xi$  definisan kao odnos ekvivalentnog poluprečnika snopa i standardne devijacije džitera na prijemu, što se može napisati kao

$$\xi = \frac{w_{Leq}}{2\sigma_s}. \quad (2.3.24)$$

Kada  $\xi \rightarrow \infty$  greška pozicioniranja je zanemarljivo mala, i može se smatrati da fluktuacije optičkog signala potiču samo od atmosferske turbulencije.

### 2.3.4. Kombinovani model

Ukoliko je optički signal prilikom prenosa kroz slobodan prostor oslabljen usled atmosferskog slabljenja, gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja, intenzitet signala definisan je kao

$$I = I_a I_p I_l. \quad (2.3.25)$$

Pošto je atmosfersko slabljenje usled prostiranja, koje je definisano jednačinom (2.3.1), konstantno tokom dužeg vremenskog perioda, funkcija gustine verovatnoće koji opisuje intenzitet  $I$  može se naći kao

$$f_I(I) = \int f_{I|I_a}(I|I_a) f_{I_a}(I_a) dI_a, \quad (2.3.26)$$

gde je  $f_{I_a}(I_a)$  dato izrazom (2.3.6), i  $f_{I|I_a}(I|I_a)$  predstavlja uslovnu verovatnoću određenu kao

$$f_{I|I_a}(I|I_a) = \frac{1}{I_a I_l} f_{I_p}\left(\frac{I}{I_a I_l}\right) = \frac{\xi^2}{A_0^{\xi^2} I_a I_l} \left(\frac{I}{I_a I_l}\right)^{\xi^2-1}, \quad 0 \leq I \leq A_0 I_a I_l. \quad (2.3.27)$$

Zamenom (2.3.6) i (2.3.27) u (2.3.26), dobija se

$$f_I(I) = \frac{2\xi^2 (\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{(A_0 I_l)^{\xi^2} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\xi^2-1} \int_{I/(A_0 I_l)}^{\infty} I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1-\xi^2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_a}) dI_a. \quad (2.3.28)$$

Ovaj integral rešen je predstavljanjem modifikovane Beselove funkcije druge vrste preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.1) koje je dato u dodatku na kraju disertacije, kao

$$K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_a}) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha\beta I_a \left| \begin{matrix} - \\ \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2} \end{matrix} \right. \right). \quad (2.3.29)$$

Zamenom (2.3.29) u (2.3.28), dobija se izraz za funkciju gustine verovatnoće

$$f_I(I) = \frac{\xi^2 (\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} I^{\xi^2-1}}{(A_0 I_l)^{\xi^2} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_{I/(A_0 I_l)}^{\infty} I_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1-\xi^2} G_{0,2}^{2,0} \left( \alpha\beta I_a \left| \begin{matrix} - \\ \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2} \end{matrix} \right. \right) dI_a. \quad (2.3.30)$$

U cilju rešavanja integrala u (2.3.30), koristi se pravila (A.2), (A.3), (A.4) koja su definisana u dodatku, pa je izraz za funkciju gustine verovatnoće intenziteta signala  $I$  dobijen kao

$$f_I(I) = \frac{\xi^2 (\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} I^{\xi^2-1} \left(\frac{I}{A_0 I_l}\right)^{\frac{\alpha+\beta}{2}-\xi^2}}{(A_0 I_l)^{\xi^2} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha\beta}{A_0 I_l} I \left| \begin{array}{c} 1 - \frac{\alpha+\beta}{2} + \xi^2 \\ \xi^2 - \frac{\alpha+\beta}{2}, \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2} \end{array} \right. \right). \quad (2.3.31)$$

Primenom pravila (A.5) za transformaciju Mejerove  $G$ -funkcije, dobijen je jednostavniji izraz za funkciju gustine verovatnoće ukupnog intenziteta signala  $I$  kao [148]

$$f_I(I) = \frac{\xi^2 \alpha\beta}{A_0 I_l \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha\beta}{A_0 I_l} I \left| \begin{array}{c} \xi^2 \\ \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{array} \right. \right). \quad (2.3.32)$$

Na osnovu izvedene funkciju gustine verovatnoće, lako se može naći

$$E[I] = A_0 I_l \frac{\xi^2}{\xi^2 + 1}, \quad E[I^2] = A_0^2 I_l^2 \frac{\xi^2 (\alpha + 1)(\beta + 1)}{\alpha\beta (\xi^2 + 2)}, \quad (2.3.33)$$

pa je indeks scintilacije na osnovu definicije (2.3.2) dat

$$\text{S.I.} = \frac{(\alpha + 1)(\beta + 1)(\xi^2 + 1)^2}{\alpha\beta \xi^2 (\xi^2 + 2)} - 1. \quad (2.3.34)$$

Zamenom  $E[I]$  iz (2.3.33) u (2.2.13), odnos trenutnog i električnog SNR-a je u ovom slučaju određen kao

$$\gamma = \frac{\mu}{A_0^2 I_l^2 \kappa^2} I^2, \quad (2.3.35)$$

gde je  $\kappa = \frac{\xi^2}{\xi^2 + 1}$ . Primenom transformacije slučajnih promenljivih  $f_\gamma(\gamma) = \frac{f_I(I)}{\left| \frac{\partial \gamma}{\partial I} \right|} \Big|_{I = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} A_0 I_l \kappa}$ , i

jednačina (2.3.32) i (2.3.35), izvedena je funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a kao

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{\xi^2 \alpha\beta \kappa}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{\mu\gamma}} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta \kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \left| \begin{array}{c} \xi^2 \\ \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{array} \right. \right). \quad (2.3.36)$$

Daljom primenom pravila (A.5) za transformaciju Mejerove  $G$ -funkcije, dobija se jednostavniji oblik funkcije gustine verovatnoće trenutnog SNR-a kao [45]

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right). \quad (2.3.37)$$

Na osnovu jednačine (2.3.33) i jednačine (2.2.12) za FSO sistem sa IM/DD OOK, električni SNR određen je kao

$$\mu = \frac{(2P_t R)^2}{2\sigma_n^2} A_0^2 I_l^2 \kappa^2, \quad (2.3.38)$$

dok je za FSO sistem sa SIM tehnikom na osnovu jednačine (2.2.18) određen kao

$$\mu = \frac{(RP_t m)^2}{2\sigma_n^2} A_0^2 I_l^2 \kappa^2. \quad (2.3.39)$$

### 2.3.5. Kratkotrajna blokada signala usled fizičkih prepreka

Pored pomenutih pojava koje mogu znatno oslabiti signal na prijemu, izdvaja se i prekid laserskog snopa usled mogućih fizičkih prepreka (npr. ptice, insekti i druge pokretne prepreke) [27], [80], [175]. U tom slučaju dolazi do kratkotrajne blokade optičkog signala, i predajnik privremeno neće biti u mogućnosti da komunicira sa prijemnikom. Ako je verovatnoća pojavljivanja prepreke, tj. blokade signala, označena sa  $p_s$ , funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a može se naći kao

$$f_N(\gamma) = p_s \delta(\gamma) + (1 - p_s) f_{\gamma}(\gamma), \quad (2.3.40)$$

gde je  $f_{\gamma}(\gamma)$  funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a definisanog u jednačini (2.3.37) (ili (2.3.9) kada je signal pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije), i  $\delta(\cdot)$  je Dirakova (*Dirac*) delta funkcija definisana kao [166, (14.03.02.0001.01)].

Prilikom dobijanja numeričkih rezultata u obzir su uzeti ravanski talasi kada je  $l_0 = 0$ , pa su parametri  $\alpha$  i  $\beta$  određeni na osnovu izraza u jednačini (2.3.10). Vrednosti ostalih parametra koji su uzimani prilikom računanja performansi FSO sistema (ukoliko nije drugačije naglašeno) prikazani su u Tabli 2.2.

**Tabela 2.2.** Pregled vrednosti korišćenih parametara

<b>Parametar</b>	<b>Simbol</b>	<b>Vrednost</b>
talasna dužina	$\lambda$	1.55 $\mu\text{m}$
indeks prelamanja za slabu atmosfersku turbulenciju	$C_n^2$	$6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$
indeks prelamanja za umerenu atmosfersku turbulenciju	$C_n^2$	$2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$
indeks prelamanja za jaku atmosfersku turbulenciju	$C_n^2$	$5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$
dužina FSO deonice	$L$	2000 m
koeficijent atmosferskog slabljenja	$\sigma$	0.43 dB/km
poluprečnik detektora	$a$	5 cm
poluprečnik zakrivljenja	$F_0$	-10
osetljivost fotodiode	$R$	1 A/W
ugao divergencije	$\theta$	$10^{-3}$ rad
koeficijent konverzije fotodetektora	$\eta$	0.8
opterećenje elektrona	$q$	$1.6 \times 10^{-19}$ C
ekvivalentna otpornost	$R_L$	1000 $\Omega$
stepen pojačanja šuma	$F_n$	2
bitska brzina	$R_b$	2 Gb/s
Bolcmanova konstanta	$k_B$	$1.38 \times 10^{-23}$ W/kHz
apsolutna temperatura prijemnika	$T$	300 K
faktor jonizacije	$k_A$	0.7 (InGaAs APD)

### 3. Performanse FSO sistema sa PIN fotodiodom

U ovom poglavlju razmatraće se performanse FSO sistema koji koriste prijemnik sa PIN fotodiodom. U sistemu postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika. Optički signal se prenosi kroz slobodan prostor, koji je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije, atmosferskog slabljenja i greške pozicioniranja. Prijemni deo FSO sistema podrazumeva direktnu detekciju i PIN fotodiodu, dok se na predaji vrši ili intenzitetska modulacija bazirana na OOK formatu, ili intenzitetska modulacija podnosiocem u kombinaciji sa različitim vrstama RF modulacija. Kod FSO sistema sa PIN fotodetektorom smatra se da je termički šum dominantan, pa je uticaj šot šuma tokom analize u ovom poglavlju zanemaren [4]. Za navedene sisteme biće određene razne performanse sistema, kao što su verovatnoća prekida, verovatnoća greške, ergodični kapacitet i kapacitet prekida.

#### 3.1. Verovatnoća prekida FSO sistema sa PIN fotodiodom

Verovatnoća prekida definiše se kao verovatnoća da je odnos trenutne snage signala i šuma manji od određenog praga, koji je unapred definisan i koji se bira tako da obezbeđuje određeni kvalitet usluga. Drugim rečima, verovatnoća prekida predstavlja kumulativnu funkciju raspodele (CDF – *Cumulative Distribution Function*) trenutnog SNR-a

$$P_{out} = F_{\gamma}(\gamma_{th}) = \Pr[\gamma < \gamma_{th}] = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma}(\gamma) d\gamma, \quad (3.1.1)$$

gde je sa  $\Pr[\cdot]$  označena verovatnoća i  $f_{\gamma}(\gamma)$  predstavlja funkciju gustine verovatnoće trenutnog SNR-a. Za određivanje performansi sistema potrebno je poznavati statistiku FSO

kanala. Kada je optički signal pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije, atmosferskog slabljenja i greške pozicioniranja,  $f_\gamma(\gamma)$  je data jednačinom (2.3.37), pri čemu se verovatnoća prekida može odrediti kao

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_\gamma(\gamma) d\gamma = \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\gamma_{th}} \gamma^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) d\gamma, \quad (3.1.2)$$

gde  $\mu$  predstavlja električni SNR definisan jednačinama (2.3.38) i (2.3.39) u zavisnosti od tipa primenjene modulacije.

Integral u jednačini (3.1.2) rešava se primenom pravila (A.3), (A.4) i (A.6), pri čemu se dobija izraz za verovatnoću prekida [23, (5)]

$$P_{out} = \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{3,7}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}}{16\mu} \middle| \begin{matrix} 1, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right). \quad (3.1.3)$$

Nakon permutacije parametara Mejerove  $G$ -funkcije korišćenjem identiteta (A.7) i (A.8), Mejerova  $G$ -funkcija može se uprostiti primenom pravila (A.9), čime je konačan izraz za verovatnoću prekida FSO sistema, koji je pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije, atmosferskog slabljenja i greške pozicioniranja, izveden kao

$$P_{out} = \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,6}^{5,1} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}}{16\mu} \middle| \begin{matrix} 1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right). \quad (3.1.4)$$

Alternativni oblik izraza za verovatnoću prekida FSO sistema može se dobiti rešavanjem integrala u (3.1.2) uvođenjem smene  $\sqrt{\gamma} = t$  i primenom pravila koje je definisano jednačinom (A.10), nakon čega se dobija [46, (20)]

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\sqrt{\gamma_{th}}} t^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha\beta\kappa}{\sqrt{\mu}} t \middle| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) dt \\ &= \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\mu}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right). \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

U slučaju kada je FSO kanal pod uticajem samo gama-gama atmosfere turbulencije, verovatnoće prekida može se naći zamenom funkcije gustine verovatnoće trenutnog SNR-a

koja je data jednačinom (2.3.9), u izraz (3.1.1), ili jednostavnije nalaženjem granične vrednosti izraza (3.1.4) ili (3.1.5) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ . Primenom pravila (A.11), (A.12) i (A.13), i uzimajući u obzir da je  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1 + 2/\xi^2) = 1$  i  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} \kappa^2 = \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1 + 1/\xi^2) = 1$ , izveden je izraz za verovatnoću prekida FSO sistema koji je pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije [129, (10)]

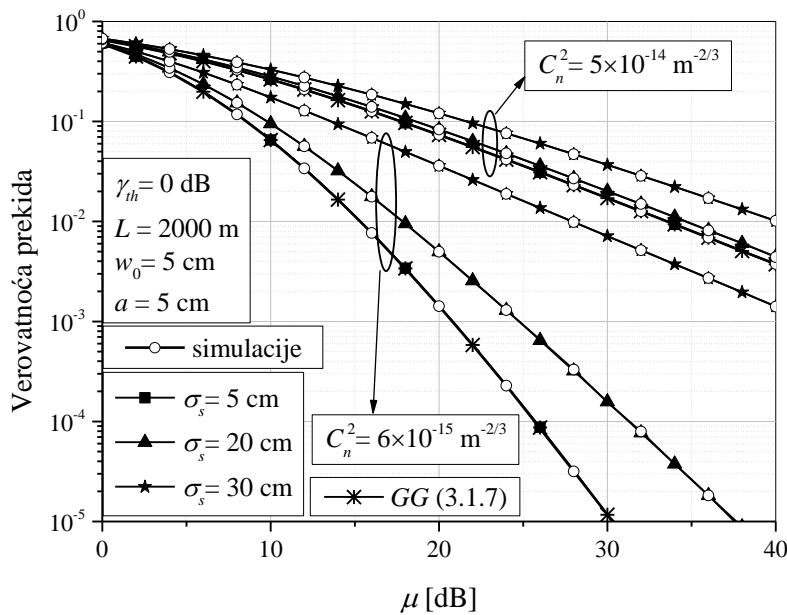
$$P_{out}^{GG} = \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,5}^{4,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \gamma_{th}}{16\mu_a} \middle| \frac{1}{\alpha}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right), \quad (3.1.6)$$

ili

$$P_{out}^{GG} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left( \alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\mu_a}} \middle| \alpha, \beta, 0 \right), \quad (3.1.7)$$

gde  $\mu_a$  predstavlja električni SNR kada je uticaj greške pozicioniranja zanemaren. Gama-gama model se za slučaj  $\beta = 1$  svodi na K raspodelu, koja se koristi za opisivanje statistike FSO kanala u slučaju jake atmosfarske turbulencije. Zamenom  $\beta = 1$  u (3.1.7), dobija se izraz za verovatnoću prekida u [147, (5)].

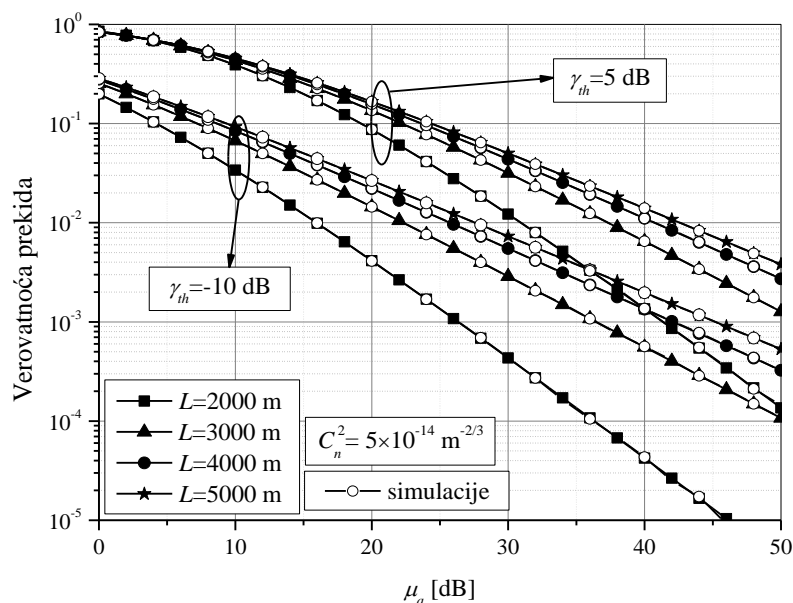
Rezultati za performanse FSO sistema sa PIN fotodiodom kada su primenjene neke od najjednostavnijih tehnika kombinovanja signala prezentovani su na konferencijama i dati su u [112], [114], [126], [127].



**Slika 3.1.1.** Verovatnoća prekida FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfarske turbulencije



Na slici 3.1.1 prikazana je zavisnost verovatnoće prekida FSO sistema u funkciji električnog SNR-a za različite vrednosti standardne devijacije džitera u uslovima slabe i jake atmosferske turbulencije. Može se primetiti da dolazi do pogoršanja performansi sistema u uslovima jake turbulencije. Što je džiter blaži (tj. vrednost parametra  $\sigma_s$  manja), uticaj greške pozicioniranja je slabiji. Drugim rečima, neusklađenost između predajnog lasera i prijemnog detektora je manja, što se manifestuje u boljim performansama sistema. Kada je džiter dovoljno mali, tj. može da se smatra da je  $\xi \rightarrow \infty$ , vibracije optičkog snopa su minimalne i usklađenost predajnika i prijemnika je zadovoljavajuća. U tom slučaju greška pozicioniranja se može zanemariti, što je potvrđeno preklapanjem rezultata na slici 3.1.1. sa krivama koje su dobijene na osnovu jednačine (3.1.7). Može se uočiti da je uticaj džitera izraženiji u uslovima slabe turbulencije. Kada je prenos optičkog signala kroz slobodan prostor ugrožen jakom atmosferskom turbulencijom, greška pozicioniranja imaće slabiji uticaj na performanse sistema. Sa druge strane, ako se prenos optičkog signala vrši kroz povoljnu sredinu, vibracija optičkog snopa dovešće do velikog gubitka snage i do povećanja verovatnoće prekida.



**Slika 3.1.2.** Verovatnoća prekida FSO sistema za različite vrednosti praga prekida i dužine linka

Na slici 3.1.2 prikazana je zavisnost verovatnoće prekida sistema koji je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije za različite vrednosti dužine FSO linka i praga  $\gamma_{th}$ . Sa smanjenjem praga i dužine deonice, poboljšavaju se performanse sistema.

## 3.2. Verovatnoća greške FSO sistema sa PIN fotodiodom

U nastavku disertacije biće prikazana analiza verovatnoće greške FSO sistema sa PIN fotodetektorom. Verovatnoća greške zavisi od statistike kanala i od primenjene modulacione tehnike. Najpre će biti predstavljena analiza verovatnoće greške po bitu, koja predstavlja odnos broja pogrešno detektovanih bita i ukupnog broja poslanih bita. Izrazi za verovatnoću greške po bitu biće izvedeni kako za FSO sistem sa IM/DD i OOK šemom, tako i za FSO sistem sa intenzitetskom modulacijom podnosiocem, dok se kao modulaciona tehnika u RF domenu koristi neka od binarnih modulacija ili QAM različitih konstelacija. Nakon toga, pažnja će biti posvećena analizi verovatnoće greške po simbolu FSO sistema koji koriste SIM-MPSK ili SIM-MDPSK. Takođe, za dati sistem ispitaće se i uticaj hardverskih nesavršenosti faznog prijemnika na verovatnoću greške.

### 3.2.1. Verovatnoća greške FSO sistema sa IM/DD i OOK

Komercijalni FSO sistemi najčešće koriste baš ovaj tip modulacione tehnike, pre svega zbog jednostavnosti implementacije i projektovanja. Verovatnoća greške ovakvog FSO sistema može se naći kao [4]

$$P_b = P(on)P(off | on) + P(off)P(on | off), \quad (3.2.1)$$

gde  $P(on)$  i  $P(off)$  predstavljaju verovatnoće da je primljen bit „1“ i „0“, respektivno,  $P(off|on)$  je verovatnoća da je detektovan bit „0“ kada je poslat bit „1“, i  $P(on|off)$  je verovatnoća koja odgovara obrnutom slučaju. Smatra se da je  $P(on) = P(off) = 0.5$ , pa će prethodni izraz biti

$$P_b = \frac{1}{2} [P(off | on) + P(on | off)]. \quad (3.2.2)$$

Kao što je već naglašeno, sistem koji se analizira na prijemu koristi PIN fotodiodu, pa se može smatrati da je termički šum dominantan [4]. Stoga, varijanse šuma u „on“ i „off“ stanju su jednake, i ukupni šum modeluje se Gausovom raspodelom nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_n^2 = \sigma_{n/on}^2 = \sigma_{n/off}^2$ . U ovom slučaju, prag odlučivanja se postavlja na sredinu. Uzimajući u obzir postojanje fluktuacija intenziteta optičkog signala usled atmosferske

turbulencije i greške pozicioniranja, na osnovu jednačine (2.2.9), uslovne verovatnoće greške su određene kao [123], [149], [173]

$$P(off | on, I) = P(on | off, I) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{PRI}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right), \quad (3.2.3)$$

gde je  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  komplementarna funkcija greške definisana kao [55, (8.250.4)]. Zamenom (3.2.3) u (3.2.2), i na osnovu (2.2.10), dobija se

$$P_{b/I} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{PRI}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\gamma}}{2} \right). \quad (3.2.4)$$

Verovatnoća greške posmatranog sistema nalazi se usrednjavanjem izraza u jednačini (3.2.4) po  $\gamma$ , primenom funkcije gustine verovatnoće trenutnog SNR-a iz jednačine (2.3.37), kao

$$\begin{aligned} P_b &= \int_0^{\infty} f_{\gamma}(\gamma) \left( \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\gamma}}{2} \right) \right) d\gamma \\ &= \frac{\xi^2}{4\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} \gamma^{-1} \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\gamma}}{2} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right) d\gamma. \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

Predstavljanje komplementarne funkcije greške preko Mejerove  $G$ -funkcije vrši se korišćenjem identiteta (A.14) kao

$$\operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\gamma}}{2} \right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left( \frac{\gamma}{4} \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right), \quad (3.2.6)$$

i nakon zamene u (3.2.5), dobija se integral

$$P_b = \frac{\xi^2}{4\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \gamma^{-1} G_{1,2}^{2,0} \left( \frac{\gamma}{4} \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right) d\gamma. \quad (3.2.7)$$

Ovaj integral se može rešiti pomoću pravila (A.15), uz pomoć jednačina (A.3), (A.4), (A.16), (A.17), kao

$$P_b = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{4,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{4\mu} \left| \begin{matrix} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (3.2.8)$$

Nakon permutacije parametara Mejerove  $G$ -funkcije pomoću izraza (A.7) i (A.8), i uprošćavanja dobijene Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.9), dobija se konačni oblik verovatnoće greške FSO sistema sa IM/DD i OOK u funkciji električnog SNR-a kao

$$P_b = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{4\mu} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.9)$$

Na osnovu definicije električnog SNR-a u jednačini (2.3.38), verovatnoća greške može se predstaviti u funkciji srednje optičke snage na predaji,  $P_t$ , kao

$$P_b = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \sigma_n^2}{8P_t^2 R^2 A_0^2 I_l^2} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.10)$$

Transformacijom Mejerove  $G$ -funkcije primenom identiteta (A.18), prethodni izraz svodi se na rezultat objavljen u radu [123]. Izvedeni izrazi opisuju verovatnoću greške po bitu FSO sistema koji je pod uticajem greške pozicioniranja i gama-gama atmosferske turbulencije. Ako se u (3.2.9) i (3.2.10) zameni  $\beta=1$ , čime se gama-gama raspodela svodi na K raspodelu, dobijaju se izrazi za verovatnoću greške po bitu FSO sistema koji je pod uticajem greške pozicioniranja i jake atmosferske turbulencije, koji se mogu naći u [149], [173].

Ako se greška pozicioniranja zanemari, i FSO sistem je pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije, verovatnoća greške po bitu može se naći zamenom jednačine (2.3.9) u (3.2.5). Kao i kod verovatnoće prekida, jednostavniji metod je nalaženje granične vrednosti izraza u (3.2.9) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ . Primenom pravila (A.11), (A.12) i (A.13) i  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1+2/\xi^2) = 1$  i  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} \kappa^2 = \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1+1/\xi^2) = 1$ , dobijen je izraz za verovatnoću greške po bitu FSO prenosa koji je pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije

$$P_b^{GG} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,5}^{4,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2}{4\mu_a} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2} \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.11)$$

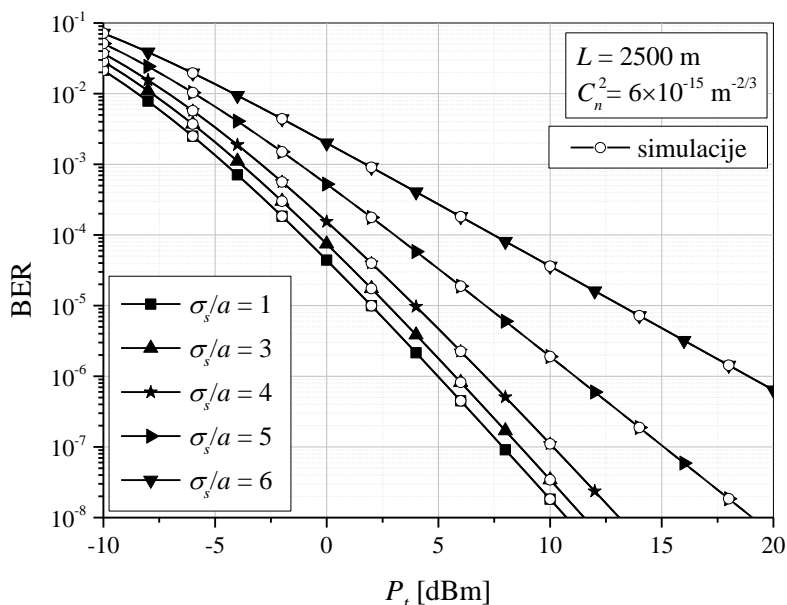
Verovatnoća greške po bitu izražena u funkciji srednje predajne optičke snage je

$$P_b^{GG} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,5}^{4,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \sigma_n^2}{8P_t^2 \eta^2 R^2} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2} \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.12)$$

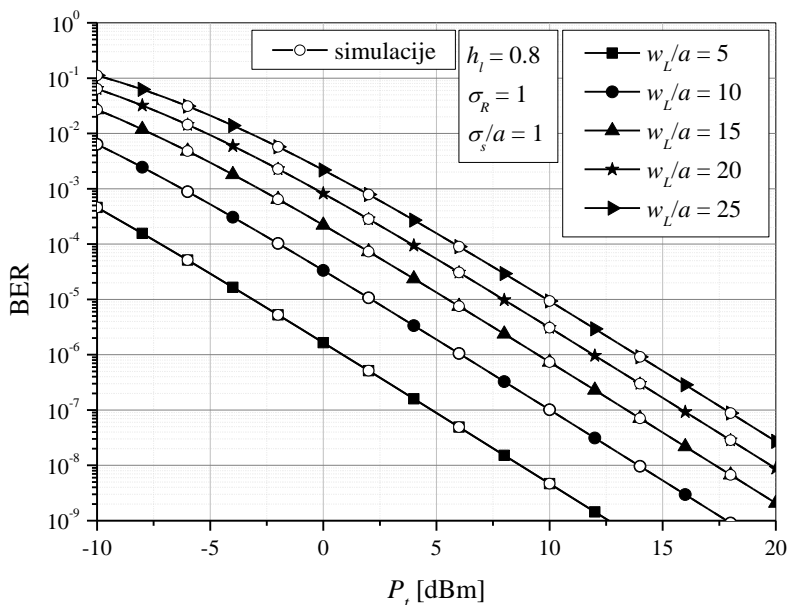
Alternativni oblici izraza za verovatnoću greške po bitu koji su dati jednačinama (3.2.11) i (3.2.12) publikovani su u zborniku međunarodne konferencije [129].

Zamenom  $\beta = 1$  u (3.2.12), i primenom pravila (A.18) za transformaciju Mejerove  $G$ -funkcije, dobija se izraz za verovatnoću greške FSO sistema koji je pod uticajem jake atmosferske turbulencije opisane K raspodelom [168], [169].

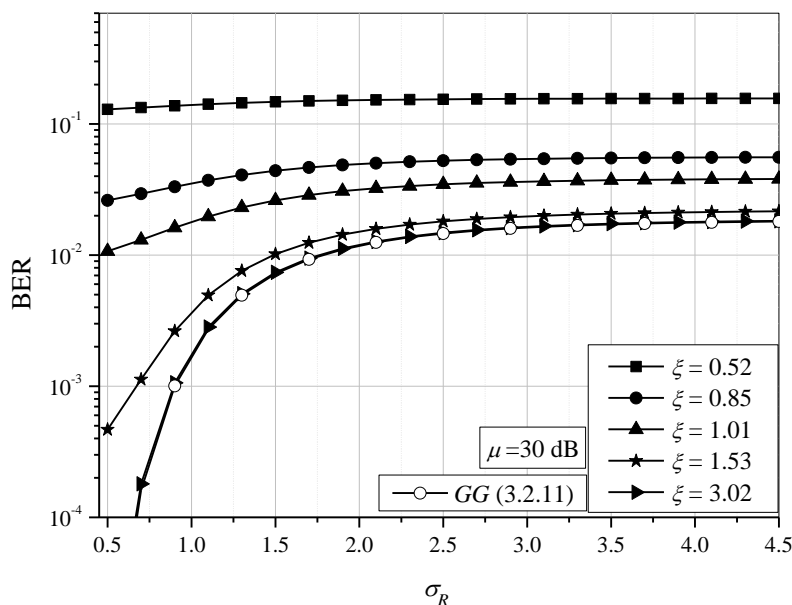
Na slici 3.2.1. prikazana je zavisnost verovatnoće greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK šemom u funkciji srednje predajne optičke snage za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera. Loše pozicioniranje predajnog lasera i prijemnog detektora manifestuje se kroz veće vrednosti  $\sigma_s/a$ , što dovodi do pogoršanja performansi sistema.



**Slika 3.2.1.** Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera



**Slika 3.2.2.** Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom za različite vrednosti normalizovane širine optičkog snopa na prijemu



**Slika 3.2.3.** Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom u zavisnosti od Rojtove standardne devijacije

Slika 3.2.2. prikazuje zavisnost verovatnoće greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK modulacijom u funkciji srednje predajne optičke snage za različite vrednosti normalizovane širine optičkog snopa na prijemu. Manja vrednost poluprečnika detektora  $a$  ili veća širine optičkog snopa na rastojanju  $L$  od predajnika, tj. veća vrednost  $w_L/a$ , dovodi do pogoršanja BER performansi. Poželjno je imati uži snop, jer se time može izbeći rasipanje snage na prijemu. Ipak, nije poželjno ni da širina optičkog snopa bude previše mala, što znači da postoji optimalna vrednost parametra  $w_L/a$ , o čemu će biti reči kasnije. Veličina  $w_L/a$  zavisi od dužine FSO deonice, koja takođe utiče na uslove atmosferske turbulencije, što će biti uzeto u obzir u kasnijoj analizi sistema.

Zavisnost verovatnoće greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK formatom od Rojtove standardne devijacije,  $\sigma_R$ , kojom je određena jačina atmosferske turbulencije, prikazana je na slici 3.2.3. Uticaj greške pozicioniranja opisan je parametrom  $\xi$ . Manja vrednost Rojtove standardne devijacije odgovara povoljnijim uslovima prenosa u kanalu i slabijoj atmosferskoj turbulenciji. Veća vrednost parametra  $\xi$  dovodi do bolje usklađenosti predajnika i prijemnika, što se ogleda u poboljšanju BER performansi. Za dovoljno veliko  $\xi$  može se smatrati da je greška pozicioniranja zanemarljivo mala, što se manifestuje u preklapanju krive za  $\xi = 3.02$  i one koja je dobijena na osnovu jednačine (3.2.11). Dalje, uticaj parametra  $\sigma_R$  izraženiji je kada je  $\xi$  veće. Za male vrednosti parametra  $\xi$ , kada je greška pozicioniranja dominantna i vibracije optičkog snopa u velikoj meri narušavaju

kvalitet prenosa, uticaj atmosferske turbulencije neće biti od velike važnosti, što je na slici 3.2.3. prikazano konstantnom vrednošću verovatnoće greške za slučaj  $\xi = 0.52$ .

### 3.2.2. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM u kombinaciji sa binarnim modulacijama

Iako se u praksi najčešće koriste FSO sistemi sa OOK IM/DD, u cilju daljeg poboljšanja performansi sistema dolazi do interesovanja za intenzitetsku modulaciju podnosiocem u kombinaciji sa različitim vrstama modulacija. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM tehnikom u kombinaciji sa nekom od binarnih modulacija može se odrediti na osnovu kumulativne funkcije raspodele trenutnog SNR-a,  $F_\gamma(\gamma)$ , kao [15, (12)]

$$P_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} F_\gamma(\gamma) d\gamma, \quad (3.2.13)$$

gde su parametri  $p$  i  $q$  određeni na osnovu primenjene binarne modulacije:  $(p, q) = (0.5, 0.5)$  za BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*),  $(p, q) = (0.5, 1)$  za BPSK,  $(p, q) = (1, 0.5)$  za NBFSK (*Non-coherent Binary Frequency Shift Keying*),  $(p, q) = (1, 1)$  za DBPSK [20], [24].

Verovatnoća greške FSO sistema koji je pod uticajem greške pozicioniranja i gama-gama atmosferske turbulencije može se dobiti zamenom (3.1.4) u (3.2.13) i predstavljanjem eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije korišćenjem pravila (A.19), nakon čega se dobija

$$P_b = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi\Gamma(p)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} G_{0,1}^{1,0} \left( q\gamma \left| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \times G_{2,6}^{5,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma}{16\mu} \left| \begin{matrix} \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right) d\gamma. \quad (3.2.14)$$

Integral u (3.2.14) rešen je korišćenjem pravila (A.20), čime se dobija izraz za verovatnoću greške po bitu FSO sistema koji je pod uticajem greške pozicioniranja i gama-gama atmosferske turbulencije

$$P_b = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(p)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu q} \left| \begin{matrix} 1, 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (3.2.15)$$

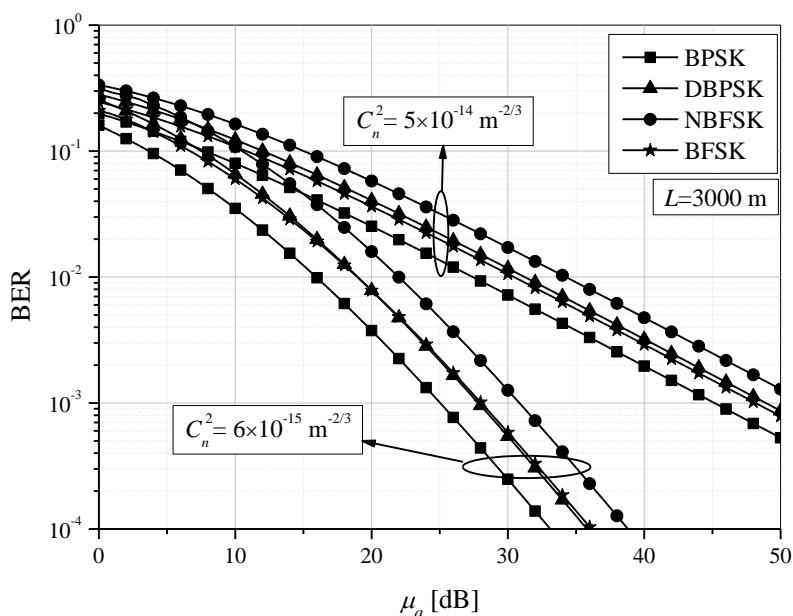
Alternativni oblik izraza (3.2.15), koji sadrži Mejerovu  $G$ -funkciju višeg reda, za verovatnoću greške po bitu analiziranog sistema može se naći u [23, (15)].

Zamenom izraza za verovatnoću prekida (3.1.7) u (3.2.13), ili jednostavnije određivanjem granične vrednosti izraza (3.2.15) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , dobija se izraz za verovatnoću greške po bitu FSO sistema pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije kao

$$P_b^{GG} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(p)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,5}^{4,2} \left( \frac{\alpha^2\beta^2}{16\mu_a q} \middle| \alpha, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right). \quad (3.2.16)$$

Dobijen izraz za verovatnoću greške u jednačini (3.2.16) objavljen je u međunarodnom zborniku radova [128].

Zavisnost verovatnoće greške FSO sistema sa SIM tehnikom u kombinaciji sa nekom od binarnih modulacija od električnog SNR-a pod uticajem slabe i jake gama-gama atmosfere turbulencije prikazan je na slici 3.2.4. U skladu sa očekivanjima, sistem ima bolje performanse kada je pod uticajem slabe atmosfere turbulencije. Verovatnoća greške FSO sistema je najmanja kada se primenjuje SIM-BPSK, dok je najveća kada se koristi SIM-NBFSK. Može se primetiti da su BER performanse FSO sistema slične kada se koristi SIM-DBPSK i SIM-BFSK, naročito kada su povoljni uslovi prenosa optičkog signala kroz slobodan prostor.



**Slika 3.2.4.** Verovatnoća greške po bitu FSO sistema sa SIM u kombinaciji sa binarnim modulacijama pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije za različite vrste binarnih modulacija



### 3.2.3. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-QAM

Kvadraturna amplitudska modulacija ili QAM predstavlja korisnu modulacionu tehniku kojom se postižu velike brzine prenosa bez povećanja propusnog opsega u bežičnim komunikacionim sistemima. Nakon primene u RF sistemima, došlo se na ideju korišćenja QAM tehnike kod FSO sistema sa intenzitetskom modulacijom podnosiocem. Razlikuju se dve različite QAM konstelacije: kvadraturna konstelacija tačaka, sa parnim brojem bita po simbolu, i pravougaona konstelacija tačaka, u kojima je broj bita po simbolu neparan.

*Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-QAM sa kvadraturnom konstelacijom tačaka*

Na osnovu analize prenosa QAM signala kroz AWGN kanal prikazanoj u [35], uslovna verovatnoća da je  $k$ -ti bit pogrešno prenesen ( $k$ -ta verovatnoća greške), FSO sistema koji je pod uticajem greške pozicioniranja i gama-gama atmosfere turbulencije data je izrazom [35, (14)]

$$P_{b/\gamma}(k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times \operatorname{erfc} \left( (2i+1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \gamma} \right), \quad (3.2.17)$$

gde  $\gamma$  predstavlja trenutni SNR po bitu. Korišćenjem funkcije gustine verovatnoće trenutnog SNR-a, koja je data jednačinom (2.3.37), nakon usrednjavanja izraza u (3.2.17) po  $\gamma$ , verovatnoća da je  $k$ -ti bit pogrešno prenesen je

$$P_b(k) = \int_{\gamma=0}^{\infty} P_{b/\gamma}(k) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma = \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{M}} \times \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times \int_{\gamma=0}^{\infty} \gamma^{-1} \operatorname{erfc} \left( (2i+1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \gamma} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \xi^2, \alpha, \beta \right) d\gamma. \quad (3.2.18)$$

Predstavljanjem komplementarne funkcije greške preko Mejerove  $G$ -funkcije korišćenjem pravila (A.14), verovatnoća da je  $k$ -ti bit pogrešno prenesen je data kao

$$\begin{aligned}
P_b(k) &= \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{\pi}\sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \\
&\times \int_{\gamma=0}^{\infty} \gamma^{-1} G_{1,2}^{2,0} \left( (2i+1)^2 \frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \gamma \middle| 0, \frac{1}{2} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \xi^2, \alpha, \beta \right) d\gamma.
\end{aligned} \tag{3.2.19}$$

Integral u prethodnoj jednačini rešava se primenom pravila (A.15), uz pomoć identiteta (A.3), (A.4), (A.16) i (A.17), nakon čega se dobija verovatnoća da je  $k$ -ti bit pogrešno prenesen kao

$$\begin{aligned}
P_b(k) &= \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \\
&\times G_{4,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (M-1)}{24 \mu (2i+1)^2 \log_2 M} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right).
\end{aligned} \tag{3.2.20}$$

Primenom pravila definisanog jednačinom (A.9), vrši se smanjenje reda Mejerove  $G$ -funkcije u (3.2.20), pa je konačan oblik verovatnoće da je  $k$ -ti bit pogrešno prenesen dat kao

$$\begin{aligned}
P_b(k) &= \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \\
&\times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (M-1)}{24 \mu (2i+1)^2 \log_2 M} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right).
\end{aligned} \tag{3.2.21}$$

Tačan izraz za verovatnoću greške po bitu posmatranog sistema dobija se sumiranjem  $k$ -tih verovatnoća greške, što je predstavljeno izrazom [35, (16)]

$$P_b = \frac{1}{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M}} P_b(k). \tag{3.2.22}$$

Na osnovu jednačine (3.2.22) mogu se odrediti aproksimativni izrazi zanemarivanjem viših članova sume. Ako se u obzir uzmu samo prvi i drugi član sume ( $i = 0, 1$ ) u (3.2.21), aproksimativna vrednost verovatnoće greške je

$$\begin{aligned}
P_b \cong & \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2 (\sqrt{M} - 1)}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \\
& \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (M-1)}{24 \mu \log_2 M} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right) + \\
& + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2 (\sqrt{M} - 2)}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \\
& \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (M-1)}{216 \mu \log_2 M} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right).
\end{aligned} \tag{3.2.23}$$

Pod pretpostavkom da je prvi član sume dominantan ( $i = 0$ ), izraz za verovatnoću greške može se aproksimirati sa određenom tačnošću zanemarivanjem ostalih članova sume kao

$$\begin{aligned}
P_b \cong & \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2 (\sqrt{M} - 1)}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \\
& \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (M-1)}{24 \mu \log_2 M} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right).
\end{aligned} \tag{3.2.24}$$

Kada je prenos optičkog signala kroz slobodan prostor pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije, verovatnoća greške se takođe dobija na osnovu izraza (3.2.22). Primenom istih identiteta kao i do sada, verovatnoće da je  $k$ -ti bit pogrešno prenesen izvedena nalaženjem granične vrednosti izraza (3.2.21) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , pri čemu se dobija

$$\begin{aligned}
P_b^{GG}(k) \cong & \frac{\xi^2 2^{\alpha+\beta-2}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \\
& \times G_{2,5}^{4,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 (M-1)}{24 \mu_a (2i+1)^2 \log_2 M} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2} \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right).
\end{aligned} \tag{3.2.25}$$

Alternativni oblik izraza za verovatnoću greške FSO u jednačini (3.2.25) objavljen je u zborniku radova [119].

Zanemarivanjem članova sume višeg reda, tj. uzimajući u obzir prvi ili prva dva člana sume u (3.2.25), mogu se izvesti aproksimativni izraz za verovatnoću greške FSO sistema koji je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije.

*Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-QAM sa pravougaonom konstelacijom tačaka*

Na sličan način može se odrediti verovatnoća greške po bitu FSO sistema koji koristi intenzitetsku modulaciju podnosiocem u kombinaciji sa  $I \times J$  QAM sa pravougaonom konstelacijom tačaka. Uslovne verovatnoće da su pogrešno preneseni  $k$ -ti bit komponente u fazi i  $l$ -ti bit komponente u kvadraturi, date su izrazima [35, (20)]

$$P_{I/\gamma}(k) = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})I-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{I} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{I} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times \operatorname{erfc} \left( (2i+1) \sqrt{\frac{3 \log_2(I \cdot J) \gamma}{I^2 + J^2 - 2}} \right), \quad (3.2.26)$$

i [35, (21)]

$$P_{J/\gamma}(l) = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{(1-2^{-l})J-1} (-1)^{\lfloor \frac{j \cdot 2^{l-1}}{J} \rfloor} \left( 2^{l-1} - \left\lfloor \frac{j \cdot 2^{l-1}}{J} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times \operatorname{erfc} \left( (2j+1) \sqrt{\frac{3 \log_2(I \cdot J) \gamma}{I^2 + J^2 - 2}} \right). \quad (3.2.27)$$

Nakon usrednjavanja izraza (3.2.26) i (3.2.27) po  $\gamma$ , korišćenjem istih koraka i pravila kao i kod QAM sa kvadraturnom konstelacijom tačaka, verovatnoća greške da je  $k$ -ti bit i  $l$ -ti bit pogrešno prenesen izvedene su kao

$$P_I(k) = \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) I} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})I-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{I} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{I} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (I^2 + J^2 - 2)}{48 \mu (2i+1)^2 \log_2(I \cdot J)} \left| \begin{matrix} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right), \quad (3.2.28)$$

$$P_J(l) = \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) J} \sum_{j=0}^{(1-2^{-l})J-1} (-1)^{\lfloor \frac{j \cdot 2^{l-1}}{J} \rfloor} \left( 2^{l-1} - \left\lfloor \frac{j \cdot 2^{l-1}}{J} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (I^2 + J^2 - 2)}{48 \mu (2j+1)^2 \log_2(I \cdot J)} \left| \begin{matrix} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (3.2.29)$$

Tačan izraz za verovatnoću greške po bitu FSO sistema sa SIM-QAM sa pravougaonom konstelacijom tačaka dobija se kao [35, (22)]

$$P_b = \frac{1}{\log_2(I \cdot J)} \left( \sum_{k=1}^{\log_2 I} P_I(k) + \sum_{l=1}^{\log_2 J} P_J(l) \right). \quad (3.2.30)$$

Aproksimativni izraz dobija se ako se u obzir uzmu samo prvi članovi sume ( $i = 0$  i  $j = 0$ ) u (3.2.28) i (3.2.29)

$$P_b \cong \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \log_2(I \cdot J)} \left( \frac{I-1}{I} + \frac{J-1}{J} \right) \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (I^2 + J^2 - 2)}{48 \mu \log_2(I \cdot J)} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.31)$$

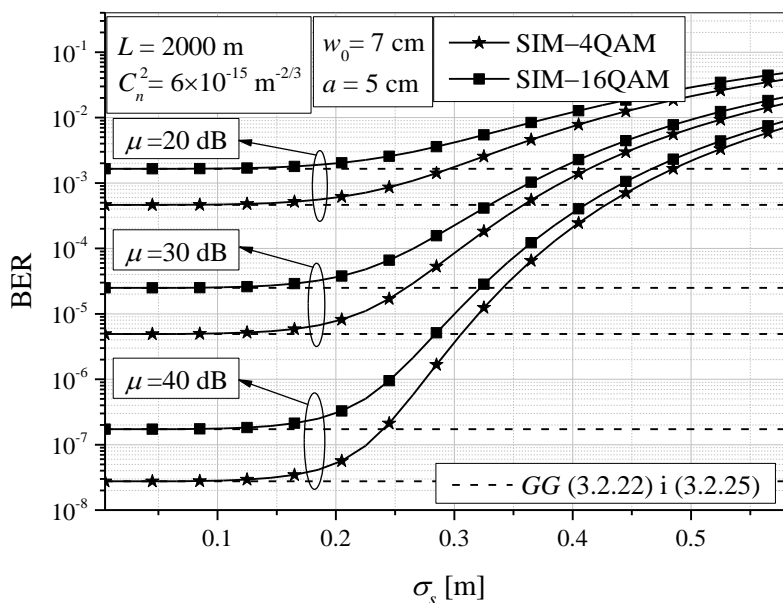
Kada se posmatra FSO sistem koji je pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije, verovatnoća greške se dobija na osnovu izraza (3.2.30), dok su verovatnoće greške da je  $k$ -ti bit i  $l$ -ti bit pogrešno prenesen dobijene nalaženjem granične vrednosti izraza (3.2.28) i (3.2.29), respektivno, kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$

$$P_I^{GG}(k) = \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) I} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})I-1} (-1)^{\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{I} \rfloor} \left( 2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i \cdot 2^{k-1}}{I} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times G_{2,5}^{4,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 (I^2 + J^2 - 2)}{48 \mu_a (2i+1)^2 \log_2(I \cdot J)} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2} \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right), \quad (3.2.32)$$

$$P_J^{GG}(l) = \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \pi^{3/2} J} \sum_{j=0}^{(1-2^{-l})J-1} (-1)^{\lfloor \frac{j \cdot 2^{l-1}}{J} \rfloor} \left( 2^{l-1} - \left\lfloor \frac{j \cdot 2^{l-1}}{J} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \times G_{2,5}^{4,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 (I^2 + J^2 - 2)}{48 \mu_a (2j+1)^2 \log_2(I \cdot J)} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{1}{2} \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.33)$$

Aproksimativni izraz za verovatnoću greške FSO sistema koji je samo pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije u opsegu velikih vrednosti električnog SNR-a, dobija se ako se u obzir uzmu samo prvi članovi sume ( $i = 0$  i  $j = 0$ ) u (3.2.32) i (3.2.33).

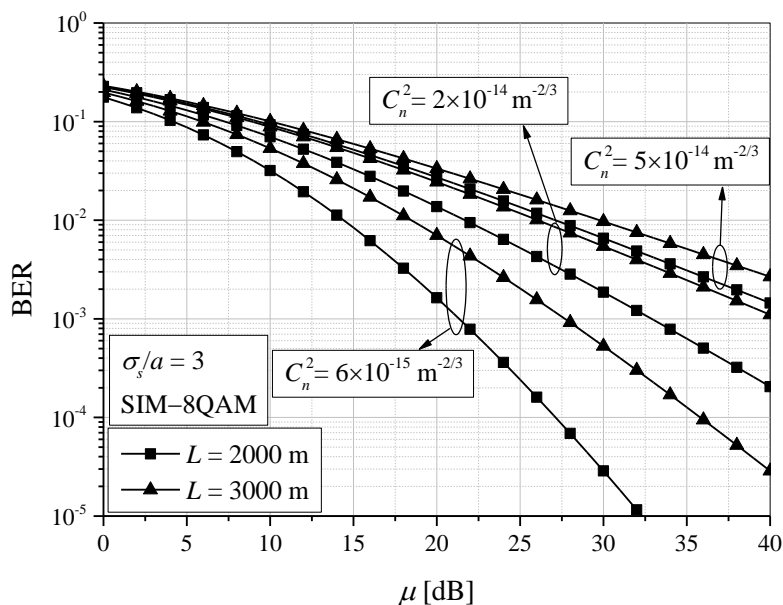
Dobijeni rezultati u ovom delu disertacije prikazani su u radu [44].



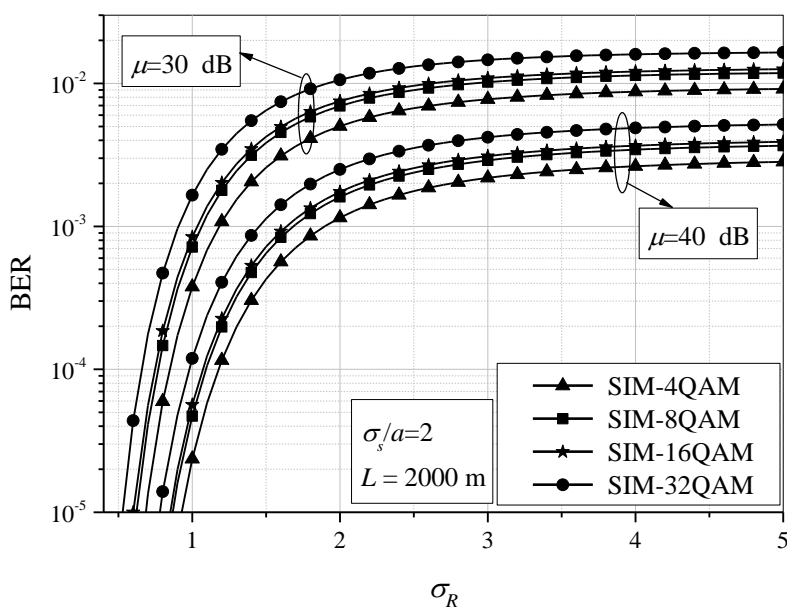
**Slika 3.2.5.** Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema u zavisnosti od standardne devijacije džitera

Slika 3.2.5. prikazuje zavisnost verovatnoće greške po bitu od standardne devijacije džitera FSO sistema koji koristi intenzitetsku modulaciju podnosiocem u kombinaciji sa  $M$ -arnom QAM modulacijom i kvadraturnom konstelacijom tačaka. Prikazani su rezultati za SIM-4QAM i SIM-16QAM modulacije za različite vrednosti električnog SNR-a. Što je veća vrednost električnog SNR-a, vrednost verovatnoće greške je manja. Sa povećanjem standardne devijacije džitera, greška pozicioniranja je izraženija zbog veće neusklađenosti predajnika i prijemnika, što se reflektuje u pogoršanju performansi sistema. Smanjenjem standardne devijacije džitera, greška pozicioniranja može se zanemariti, i time je FSO sistem pod uticajem samo gama-gama atmosfere turbulencije. U ovom opsegu vrednosti parametra  $\sigma_s$ , BER krive imaju konstantne vrednosti, koje se preklapaju sa krivama koje su dobijene na osnovu jednačina (3.2.22) i (3.2.25), kao što se može videti na slici 3.2.5. Primećuje se da greška pozicioniranja ima veći uticaj na performanse sistema kada je vrednost električnog SNR-a veća (kada je veća vrednost optičke snage). Što je neusklađenost predajnika i prijemnika veća, veći je i gubitak optičke snage na prijemu.

Zavisnost verovatnoće greške SIM-8QAM FSO sistema od električnog SNR-a u različitim uslovima atmosfere turbulencije prikazana je na slici 3.2.6. Takođe, rezultati su dobijeni kada je dužina FSO linka 2 km i 3 km. Performanse sistema su najbolje kada je indeks prelamanja manji, što odgovara slabijoj atmosferskoj turbulenciji. Kao što se i očekivalo, sistem ima bolje performanse što je dužina deonice kraća. Takođe, uticaj dužine deonice na performanse sistema izraženiji je u povoljnim uslovima atmosfere turbulencije.



**Slika 3.2.6.** Verovatnoća greške SIM-8QAM FSO sistema za različite dužine FSO linka u različitim uslovima atmosfertske turbulencije

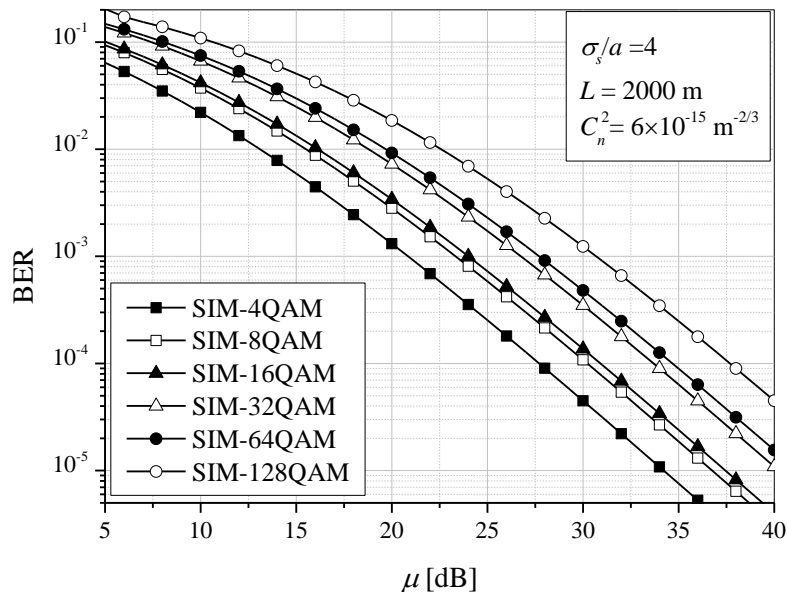


**Slika 3.2.7.** Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema u zavisnosti od Rojtove standardne devijacije

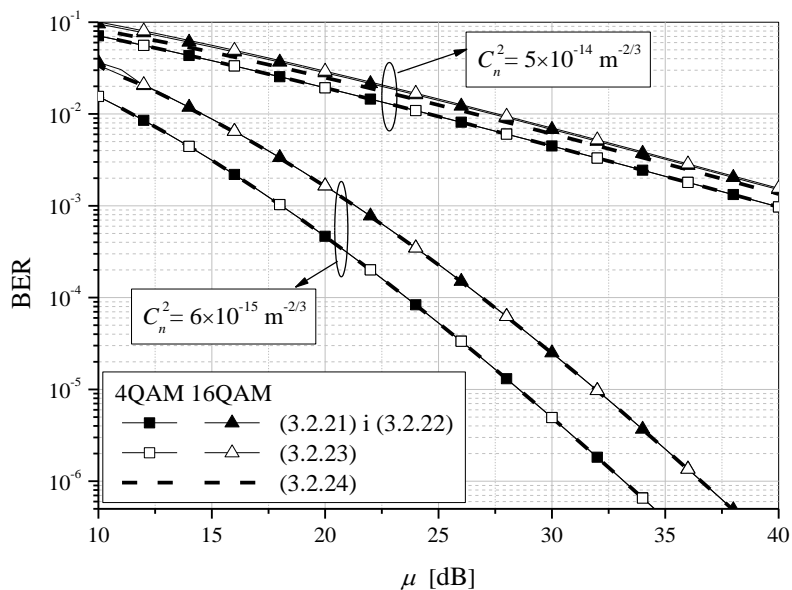
Zavisnost verovatnoće greške po bitu SIM-QAM FSO sistema od Rojtove standardne devijacije prikazana je na slici 3.2.7. Posmatraju se različiti nivoi SIM-QAM modulacije. Veće vrednosti Rojtove varijanse dovode do pogoršanja BER performansi sistema, jer je prenos optičkog signala kroz slobodan prostor pod uticajem jače atmosfertske turbulencije. Ako se zahteva određena vrednost verovatnoće greške, potrebna je veća vrednost električnog SNR-a kada je veća vrednost Rojtove varijanse, tj. kada su uslovi atmosfertske turbulencije gori. Za manje vrednosti  $\sigma_R$ , može se primetiti drastičan porast vrednosti BER-a, dok su BER

krive su u slabom porastu kada je  $\sigma_R > 2$ . To znači da je verovatnoća greške po bitu skoro konstantna sa daljim povećanjem vrednosti Rojtove varijanse i pogoršanjem uslova atmosferske turbulencije.

Na slici 3.2.8. prikazana je zavisnost verovatnoće greške po bitu od električnog SNR-a FSO sistema koji koristi SIM-QAM. Posmatra se uticaj nivoa QAM modulacije. Sistem ima gore performanse kada se koristi intenzitetska modulacija podnosiocem u kombinaciji sa višim formatom modulacije, ali u isto vreme veća količina informacija može biti prenet.

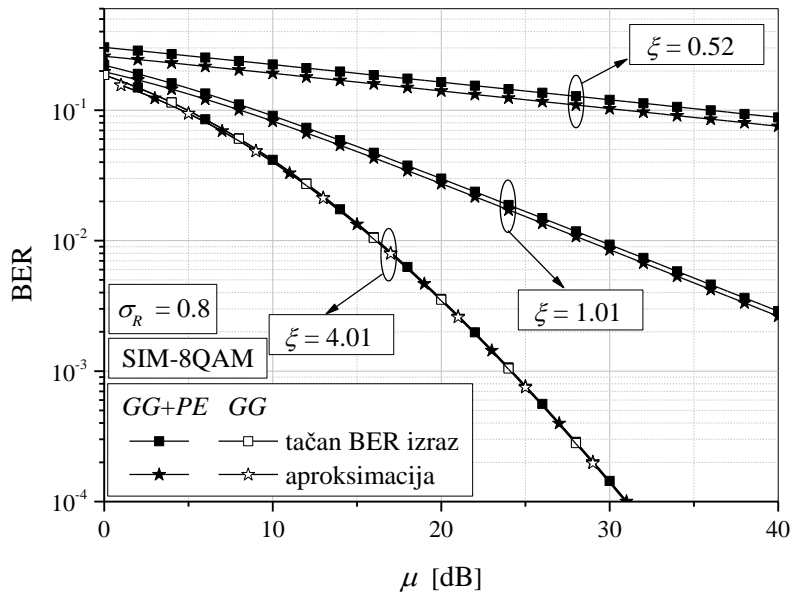


**Slika 3.2.8.** Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema za različite nivoe modulacije



**Slika 3.2.9.** Verovatnoća greške SIM-QAM FSO sistema na osnovu tačnog i aproksimativnih izraza





**Slika 3.2.10.** Verovatnoća greške SIM-8QAM FSO sistema na osnovu tačnog i aproksimativnog izraza

Sa slike 3.2.9. može se videti zavisnost verovatnoće greške od električnog SNR-a u uslovima slabe i jake turbulencije. Posmatraju se SIM-4QAM i SIM-16QAM modulacije. Pored tačnih, prikazani su i rezultati dobijeni na osnovu aproksimativnih izraza (3.2.23) i (3.2.24). Primećuje se bolje poklapanje rezultata u slučaju QAM nižeg formata i u uslovima slabije atmosferske turbulencije. U skladu sa očekivanjima, aproksimacija (3.2.23) koja uzima prva dva člana sume, daje tačnije rezultate od aproksimacije (3.2.24), koja uzima samo prvi član sume, što se može zaključiti na osnovu rezultata za SIM-16QAM u uslovima jake turbulencije.

Na slici 3.2.10. prikazana je zavisnost verovatnoće greške od električnog SNR-a FSO sistema sa SIM-8QAM tehnikom za različite vrednosti parametra  $\xi$ , koji određuje grešku pozicioniranja. Što je vrednost parametra  $\xi$  veća, tj. što je greška pozicioniranja slabija, aproksimacija je preciznija. Što su uslovi prenosa u kanalu gori, aproksimacije će biti nepouzdanija. Takođe, prikazani su tačni i aproksimativni rezultati za FSO kanal koji je pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije. Preklapanje ovih rezultata sa rezultatima dobijenih za veliku vrednost parametra  $\xi$ , potvrđuje se da je greška pozicioniranja zanemarujuće mala kada je vrednost parametra  $\xi$  dovoljno velika.

Na osnovu slika 3.2.9. i 3.2.10. može se zaključiti da su aproksimacije koje uzimaju samo prvi član sume ((3.2.24) i (3.2.31)) najpreciznije u povoljnim uslovima prenosa i kada se koristi niži format SIM-QAM modulacije.

### 3.2.4. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-MPSK

U RF komunikacijama  $M$ -arna fazna modulacija primenjuje se u cilju postizanja velike spektralne efikasnosti. Da bi se izbeglo podešavanje praga tokom detekcije kod FSO sistema sa IM/DD OOK, uvodi se SIM tehnika. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-BPSK razmatrana je u odeljku 3.2.2. U nastavku disertacije biće prikazana analiza FSO sistema sa SIM u kombinaciji sa  $M$ -arnom faznom modulacijom. Pošto je broj nivoa modulacije povećan, uticaj hardverskih nesavršenosti električnog dela sistema imaće znatan uticaj na performanse sistema [82], [83], [85]. Prilikom korišćenja MPSK, hardverske nesavršenosti se javljaju i u PSK modulatoru i u PSK detektoru. Predstojeća analiza izvedena je pod pretpostavkom da je uticaj nesavršenosti u detektoru [85] dominantan, pa će nedostaci električnog dela modulatora biti zanemareni.

Najpre će biti izvedeni izrazi za verovatnoću greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema, kada se podrazumeva hardverska savršenost. Nakon toga, u obzir će biti uzete amplitudski disbalans (razdešenost) kvadrturnih grana, i konačno fazni šum regenerisanog referentnog nosioca. Analitički rezultati za verovatnoću greške po simbolu biće izvedeni korišćenjem FSM metoda (*Fourier Series Method*), koji je baziran na funkciji gustine verovatnoće faze predstavljene u vidu Furijeovog reda [82]–[85], [163].

#### *SIM-MPSK FSO sistem bez uticaja hardverskih nesavršenosti prijemnika*

Za određivanje verovatnoće greške po simbolu posmatranog sistema koristi se FSM metod koji zahteva poznavanje funkcije gustine verovatnoće faze primljenog signala. Signal se najpre moduliše PSK modulatorom, nakon čega se vrši intenzitetska modulacija i prenos kroz slobodan prostor, koji je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Vršiti se direktna detekcija optičkog signala na prijemu, i konverzija optičkog signala u električni pomoću PIN fotodiode. Konačno, signal se demoduliše pomoću PSK detektora. U ovom slučaju pretpostavlja se da je sinhronizacija faze u detektoru savršena.

Pošto je optički signal nakon prenosa kroz slobodan prostor pod uticajem kanalnih smetnji, funkcije gustine verovatnoće faze ukupnog signala koji se detektuje,  $\psi$ , može se odrediti usrednjavanjem po trenutnom SNR-u,  $\gamma$ , na sledeći način [83]

$$f_{\psi}(\psi) = \int_0^{\infty} f_{\psi}(\psi/\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma, \quad (3.2.34)$$

gde je  $f_\gamma(\gamma)$  funkcije gustine verovatnoće trenutnog SNR-a data jednačinom (2.3.37). Uslovna funkcija gustine verovatnoće faze primljenog signala predstavljena preko Furijeovog reda za kanal sa AWGN šumom,  $f_\psi(\psi/\gamma)$ , određena je kao [83]

$$f_\psi(\psi/\gamma) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n(\gamma) \cos(n\psi), \quad |\psi| \leq \pi. \quad (3.2.35)$$

Furijeov koeficijent  $a_n(\gamma)$  za kanal sa AWGN šumom definisan je pomoću [83]

$$a_n(\gamma) = \frac{1}{n!\pi} \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right) \gamma^{\frac{n}{2}} \exp(-\gamma) {}_1F_1\left(\frac{n}{2} + 1; n + 1; \gamma\right). \quad (3.2.36)$$

pri čemu je  ${}_1F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$  konfluentna hipergeometrijska funkcija [55, (9.21)]. Zamenom (2.3.37), (3.2.35) i (3.2.36) u (3.2.34), dobija se

$$f_\psi(\psi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!\pi} \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right) \cos(n\psi) \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \int_0^{\infty} \gamma^{\frac{n}{2}-1} \exp(-\gamma) {}_1F_1\left(\frac{n}{2} + 1; n + 1; \gamma\right) G_{1,3}^{3,0}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix}\right) d\gamma. \quad (3.2.37)$$

Proizvod eksponencijalne i konfluentne hipergeometrijske funkcije može se izraziti preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom transformacije koja je definisana identitetom (A.21) na sledeći način

$$\exp(-\gamma) {}_1F_1\left(\frac{n}{2} + 1; n + 1; \gamma\right) = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} G_{1,2}^{1,1}\left(\gamma \middle| \begin{matrix} 1 - \frac{n}{2} \\ 0, -n \end{matrix}\right). \quad (3.2.38)$$

Zamenom jednačine (3.2.38) u (3.2.37), nakon primene pravila (A.13), funkcija gustine verovatnoće faze primljenog signala biće

$$f_\psi(\psi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\Gamma(n+1)}{n!\pi} \cos(n\psi) \frac{\xi^2}{4\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \int_0^{\infty} \gamma^{\frac{n}{2}-1} G_{1,2}^{1,1}\left(\gamma \middle| \begin{matrix} 1 - \frac{n}{2} \\ 0, -n \end{matrix}\right) G_{1,3}^{3,0}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix}\right) d\gamma. \quad (3.2.39)$$

Prethodni integral može se rešiti pomoću pravila (A.15), uz pomoć (A.3), (A.4), (A.16) i (A.17), nakon čega se red dobijene Mejerove  $G$ -funkcije može smanjiti primenom pravila (A.7), (A.8) i (A.9). Konačno, funkcija gustine verovatnoće faze primljenog signala je

$$f_{\psi}(\psi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\Gamma(n+1)}{n!\pi} \cos(n\psi) \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{3,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu} \left| \begin{array}{c} 1-\frac{n}{2}, 1+\frac{n}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right), \quad (3.2.40)$$

i može biti napisana kao

$$f_{\psi}(\psi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\psi), \quad |\psi| \leq \pi, \quad (3.2.41)$$

pri čemu je Furijeov koeficijent  $b_n$  definisan kao

$$b_n = \frac{n\Gamma(n+1)2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{n!\pi^2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{3,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu} \left| \begin{array}{c} 1-\frac{n}{2}, 1+\frac{n}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.42)$$

Kada je optički signal prilikom prenosa kroz slobodan prostor jedino pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije, Furijeov koeficijent se može dobiti zamenom (2.3.9) umesto (2.3.37) u (3.2.34). Kao i do sada, jednostavnije je naći graničnu vrednost jednačine (3.2.42) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ . Primenom identiteta (A.11), (A.12) i (A.13), dobija se Furijeov koeficijent za slučaj kada je FSO sistem samo pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije kao

$$b_n^{GG} = \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} b_n = \frac{n\Gamma(n+1)2^{\alpha+\beta-3}}{n!\pi^2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,5}^{5,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2}{16\mu_a} \left| \begin{array}{c} 1-\frac{n}{2}, 1+\frac{n}{2} \\ \alpha, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right). \quad (3.2.43)$$

Na osnovu izvedene funkciju gustine verovatnoće faze primljenog signala predstavljene u zavisnosti od Furijeovog koeficijenta  $b_n$ , može se naći verovatnoće greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema, uz pretpostavku savršene sinhronizacije faze u PSK detektoru, kao [82]–[85], [163]

$$P_s^{MPSK} = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} f_{\psi}(\psi) d\psi = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2b_n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right), \quad (3.2.44)$$

gde je Furijeov koeficijent  $b_n$  prethodno izveden i dat jednačinom (3.2.42).

### *SIM-MPSK FSO sistem sa amplitudskim disbalansom kvadraturnih grana*

Kada postoji amplitudski disbalans I- i Q- grana MPSK detektora u električnom delu prijemnika FSO sistema, dolazi do izobličenja u konstelacionom dijagramu, što dovodi do greške prilikom detektovanja signala. Zbog kvadraturnih nesavršenosti, I- i Q- grane različito doprinose ukupnoj verovatnoći greške po simbolu, što može biti zapisano kao [85]

$$P_s^{MPSK} = \frac{P_I^{MPSK} + P_Q^{MPSK}}{2}, \quad (3.2.45)$$

gde su verovatnoće greške za I- i Q- grane definisane kao

$$P_I^{MPSK} = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} f_I(\psi) d\psi = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2b_{nI}(\mu_I)}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right), \quad (3.2.46)$$

$$P_Q^{MPSK} = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} f_Q(\psi) d\psi = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2b_{nQ}(\mu_Q)}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right) \quad (3.2.47)$$

respektivno. Funkcije gustine verovatnoće faze primljenog signala predstavljene preko Furijeovog reda za I- i Q- grane su definisane kao  $f_I(\psi)$  i  $f_Q(\psi)$ , dok su Furijeovi koeficijenti  $b_{nI}(\mu_I)$  i  $b_{nQ}(\mu_Q)$  prethodno definisani preko jednačine (3.2.42), uz pretpostavku da su električni SNR-ovi određeni kao  $\mu_I = \mu$  i  $\mu_Q = \varepsilon\mu$  ( $0 < \varepsilon < 1$ ). Uzimajući u obzir (3.2.45)-(3.2.47), verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema sa amplitudskim disbalansom kvadraturnih grana je

$$P_s^{MPSK} = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_{nI}(\mu_I)}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_{nQ}(\mu_Q)}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.48)$$

Može se primetiti da se u slučaju  $\varepsilon = 1$  verovatnoća greške data jednačinom (3.2.48) svodi na jednačinu (3.2.44).

### *SIM-MPSK FSO sistem pod uticajem faznog šuma*

U električnom delu FSO prijemnika, PSK detektor sadrži referentni nosilac, koji se regeneriše iz prijemnog signala. Usled nesavršenosti referentnog nosioca, dolazi do faznog šuma, koja ima Tihonovljevu funkciju gustine verovatnoće [83], [85]

$$f_\varphi(\varphi) = \frac{\exp(\cos \varphi / \sigma_\varphi^2)}{2\pi I_0(1/\sigma_\varphi^2)}, \quad |\varphi| \leq \pi, \quad (3.2.49)$$

gde je  $\sigma_\varphi^2$  varijansa faznog šuma ekstraktora ( $1/\sigma_\varphi^2$  predstavlja SNR meren u propusnom opsegu petlje ekstraktora nosioca). Tihonovljeva funkcija gustine verovatnoće može se razviti u Furijeov red kao [82], [84], [85], [171, p. 92]

$$f_\varphi(\varphi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\varphi), \quad |\varphi| \leq \pi, \quad (3.2.50)$$

gde je Furijeov koeficijent  $c_n$  definisan kao

$$c_n = \frac{I_n(1/\sigma_\varphi^2)}{\pi I_0(1/\sigma_\varphi^2)}. \quad (3.2.51)$$

Kada je FSO sistem pored greške pozicioniranja i gama-gama atmosfere turbulencije, pod uticajem i faznog šuma, uslovna verovatnoće greške po simbolu ovog sistema je [82]

$$P_s^{MPSK}(\varphi) = 1 - \int_{\varphi-\pi/M}^{\varphi+\pi/M} f_\psi(\psi) d\psi = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2b_n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right) \cos(n\varphi), \quad (3.2.52)$$

gde je Furijeov koeficijent prethodno definisan jednačinom (3.2.42). Verovatnoća greške po simbolu FSO sistema sa faznim šumom može se naći usrednjavanjem izraza (3.2.52) po  $\varphi$

$$P_s^{MPSK} = \int_{-\pi}^{\pi} P_s^{MPSK}(\varphi) f_\varphi(\varphi) d\varphi = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi b_n c_n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.53)$$

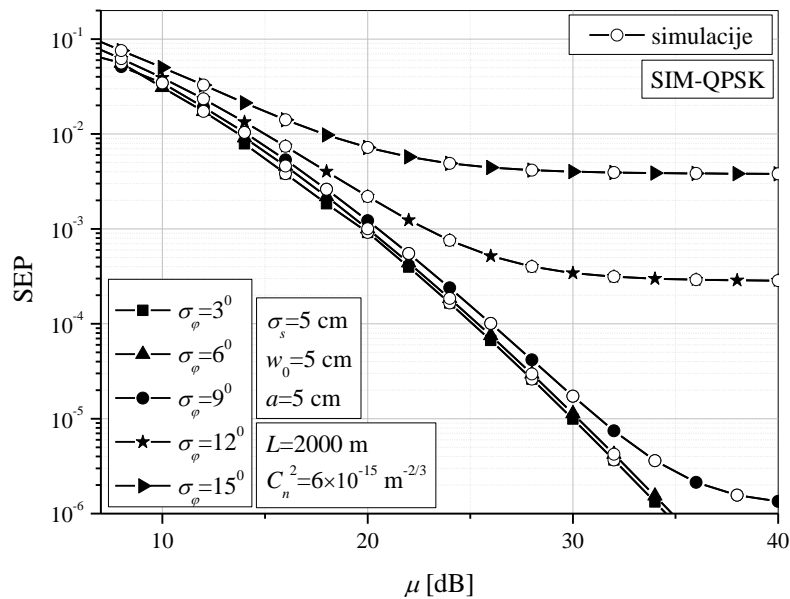
Kada je prenos optičkog signala pod uticajem jake atmosfere turbulencije opisane K raspodelom, a greška pozicioniranja zanemarena, verovatnoća greške se može izračunati korišćenjem (3.2.53), dok je koeficijent  $b_n$  određen je jednačinom (3.2.43) za  $\beta = 1$ . Dobijeni rezultati publikovani su u [113].

Ako je uzet u obzir i fazni šum i amplitudski disbalans kvadrature grana, verovatnoća greške po simbolu određena je kao

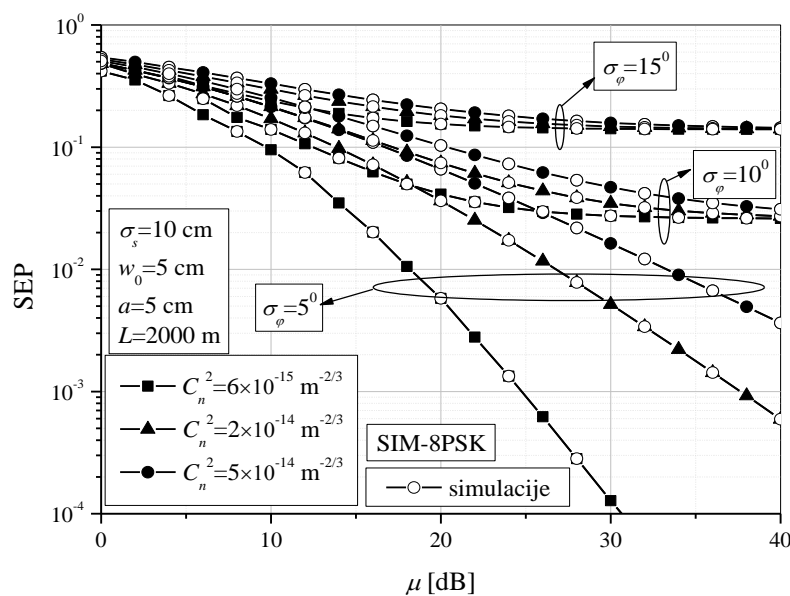
$$P_s^{MPSK} = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi b_{nI}(\mu_I) c_n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi b_{nQ}(\mu_Q) c_n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.54)$$

Slika 3.2.11. predstavlja zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-QPSK FSO sistema od električnog SNR-a za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma ekstraktora. Što je vrednost parametra  $\sigma_\varphi$  veća, uticaj fazne greške je izraženiji i dolazi do pogoršanja performansi sistema. U oblasti nižih i srednjih vrednosti električnog SNR-a, vrednost verovatnoće greške po simbolu intenzivno se smanjuje. U oblasti većih vrednosti

električnog SNR-a, dobijene krive ulaze u zasićenje i može se primetiti postojanje neotklonljive verovatnoće greške. Ova konstantna vrednost verovatnoće greške znači da se daljim povećanjem vrednosti električnog SNR-a, tj. optičke snage, ne mogu poboljšati performanse sistema. Neotklonljiva verovatnoće greške može se smanjiti usled poboljšanja karakteristika PSK prijemnika, čime se smanjuje uticaj faznog šuma i time vrednosti standardne devijacije fazne greške ekstraktora.



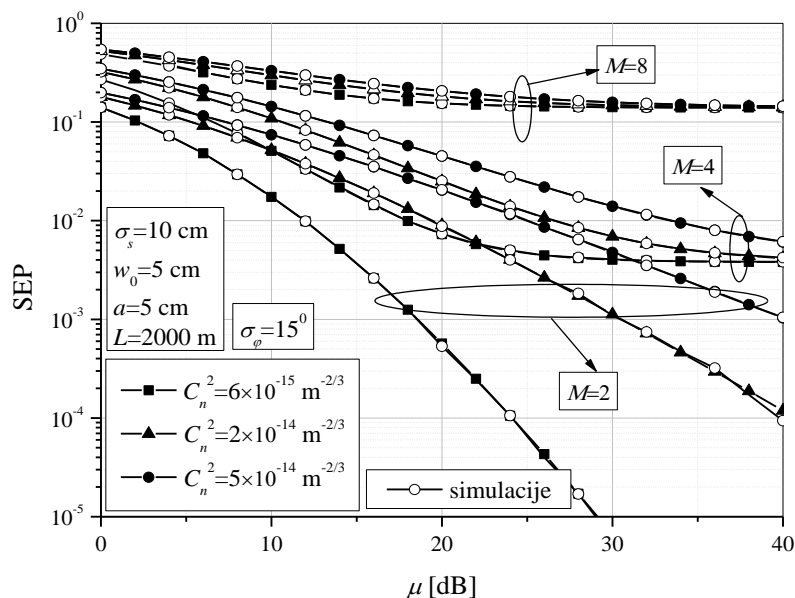
*Slika 3.2.11. Verovatnoća greške po simbolu SIM-QPSK FSO sistema pod uticajem faznog šuma*



*Slika 3.2.12. Verovatnoća greške po simbolu SIM-8PSK FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma u različitim uslovima atmosfere turbulencije*

Na slici 3.2.12. prikazana je zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-8PSK FSO sistema od električnog SNR-a za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma ekstraktora u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Kada je atmosferski kanal pod uticajem veoma loših uslova, tj. jake atmosfere turbulencije, uticaj fazne greške na SEP performanse sistema je slabiji. Takođe, uticaj uslova FSO kanala i jačine turbulencije je dominantan faktor prilikom određivanja performansi sistema kada je fazni šum manji i PSK prijemnik savršeniji. Kao i u prošlom primeru, može se zaključiti da neotklonljiva verovatnoća greške zavisi od vrednosti standardne devijacije faznog šuma. Sa smanjenjem vrednosti  $\sigma_\varphi$ , smanjuje se i vrednost neotklonljive verovatnoće greške. Takođe, primećuje se da se neotklonljiva verovatnoća greška javlja na nižim vrednostima električnog SNR-a kada se prenos optičkog signala vrši kroz sredinu koja je pod uticajem povoljnijih uslova atmosfere turbulencije.

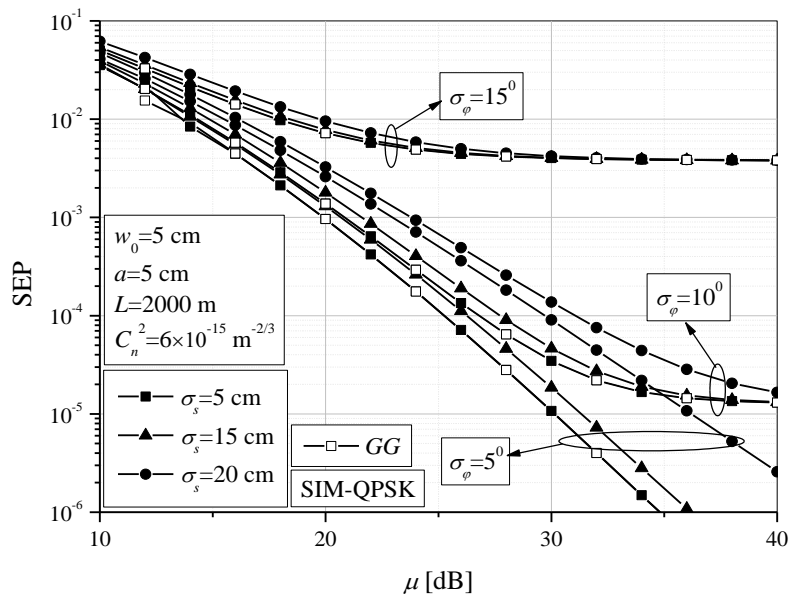
Slika 3.2.13. predstavlja zavisnost verovatnoće greške po simbolu od električnog SNR-a u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Posmatra se FSO sistem sa SIM tehnikom u kombinaciji sa BPSK, QPSK i 8PSK. Standardna devijacija faznog šuma ekstraktora iznosi  $\sigma_\varphi = 15^\circ$ . U slučaju PSK modulacije nižeg reda, atmosfere turbulencija ima veći uticaj na performanse sistema. Za veći modulacioni format dolazi do povećanja SEP-a, ali se veća količina informacija može preneti. Neotklonljiva verovatnoća greške najpre se javlja tokom slabe atmosfere turbulencije, i korišćenjem SIM-8PSK.



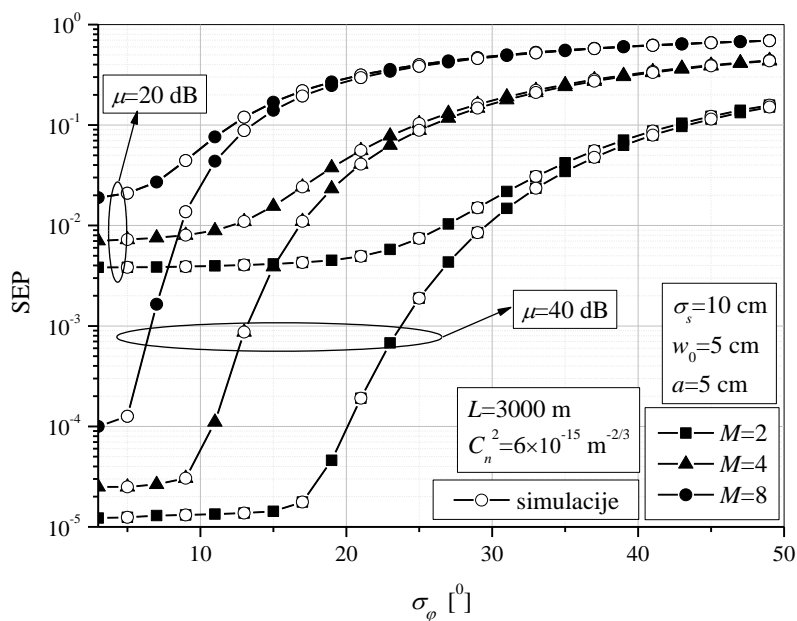
**Slika 3.2.13.** Verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema za različite nivoe modulacije u različitim uslovima atmosfere turbulencije



Slika 3.2.14. prikazuje zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-QPSK FSO sistema od električnog SNR-a za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma i standardne devijacije džitera. Neotklonljiva verovatnoća greške najpre se javlja kada je vrednost standardne devijacije džitera manja, što odgovara manjoj grešci pozicioniranja. Krive koje odgovaraju slučaju  $\sigma_s = 5$  cm preklapaju se rezultatima koji su dobijeni na osnovu jednačina (3.2.43) i (3.2.53), čime je potvrđeno da male vrednosti džitera dovode do zanemarljivo male greške pozicioniranja.

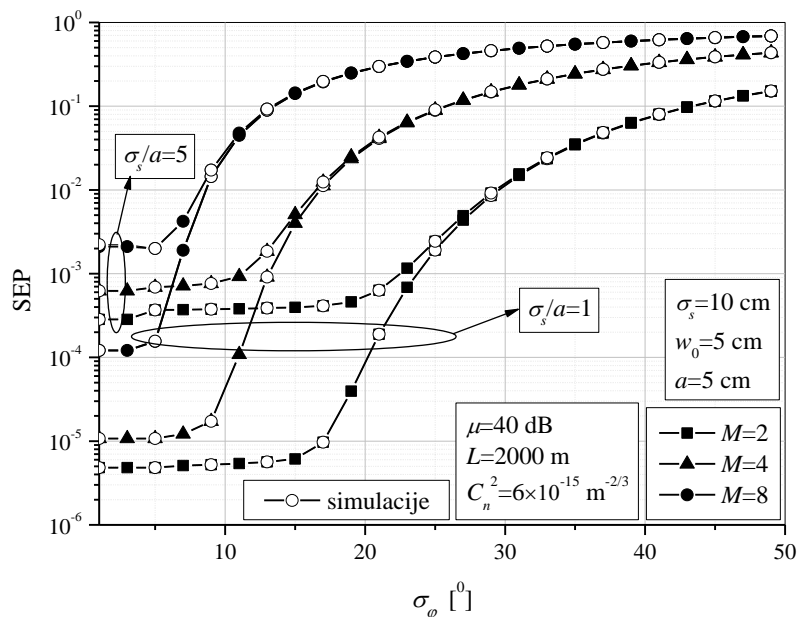


**Slika 3.2.14.** Verovatnoća greške po simbolu SIM-QPSK FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma i standardne devijacije džitera



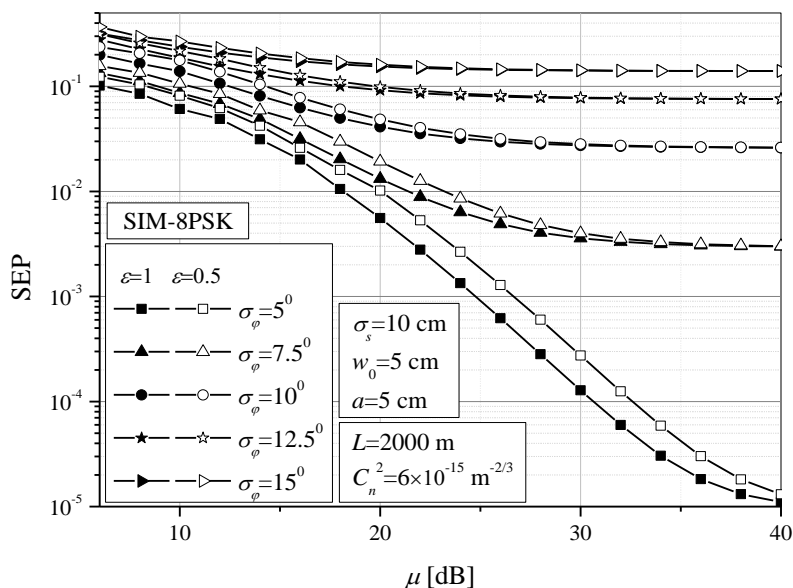
**Slika 3.2.15.** Zavisnost verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti električnog SNR-a

Zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti električnog SNR-a prikazana je na slici 3.2.15. Posmatra se FSO sistem koji koristi SIM-BPSK, SIM-QPSK, SIM-8PSK, dok je vrednost električnog SNR-a  $\mu = 20$  dB i  $\mu = 40$  dB. Povećanje električnog SNR-a i smanjenje standardne devijacije faznog šuma dovodi do poboljšanja performansi sistema. Uticaj modulacionog formata na performanse sistema je veći kada je fazni šum slabiji. Kada je vrednost  $\sigma_\varphi$ , a time i sam fazni šum, veoma velika, izbor nivoa modulacije nema uticaj na performanse sistema. Kada je  $\sigma_\varphi \rightarrow 0^\circ$ , uticaj faznog šuma je veoma mali i može biti zanemaren, što se ispoljava konstantnim vrednostima verovatnoće greške po simbolu u ovoj oblasti. Slično se može primetiti na slici 3.2.16, koja prikazuje zavisnost verovatnoće greške po simbolu od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera. Uticaj greške pozicioniranja na performanse sistema je veći kada je vrednost  $\sigma_\varphi$  manja.



**Slika 3.2.16.** Zavisnost verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera

Slika 3.2.17. prikazuje zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-8PSK FSO sistema od električnog SNR-a uzimajući u obzir i fazni šum i amplitudski disbalans kvadraturnih grana. Može se primetiti da amplitudski disbalans može dodatno narušiti performanse sistema, naročito u oblasti nižih vrednosti električnog SNR-a i kada je uticaj faznog šuma manji.



*Slika 3.2.17. Verovatnoća greške po simbolu SIM-MPSK FSO sistema sa amplitudskim disbalansom kvadraturnih grana*

### 3.2.5. Verovatnoća greške FSO sistema sa SIM-MDPSK

Usled problema sa preskokom faze prilikom ekstrakcije referentnog nosioca iz primljenog signala koji je bio izložen kanalskim smetnjama, MPSK se u praktičnim RF sistemima često zamenjuje DPSK modulacijom, koja predstavlja PSK sa diferencijalnim prijemnikom. DPSK predstavlja faznu modulaciju gde se koristi diferencijalno kodovanje na predajnom, i diferencijalna detekcija na prijemnom delu sistema, tj. faza detektovanog signala se određuje na osnovu fazne razlike primljenih signala na dva uzastopna signalizaciona intervala [84], [85]. Za razliku od PSK, DPSK prijemnik ne regeneriše referenti nosilac, ali fazni šum i dalje postoji i generisan je od strane lokalnog oscilatora. Kod FSO sistema sa SIM-MDPSK, fazni šum je posledica nesavršenog oscilatora u električnom delu prijemnika.

Za početak biće izvedeni izrazi za verovatnoću greške po simbolu SIM-MDPSK FSO sistema bez hardverskih nesavršenosti. U nastavku biće prikazani analitički rezultati za sistem kada postoji amplitudski disbalans između električnih SNR-ova na uzastopnim signalizacionim intervalima, kao i za slučaj kada je prisutan fazni šum. Kao i kod SIM-PSK, analitički rezultati za verovatnoću greške po simbolu biće izvedeni korišćenjem FSM metoda.

### *SIM-MDPSK FSO sistem bez uticaja hardverskih nesavršenosti prijemnika*

Električni deo prijemnog dela SIM FSO sistema sadrži DPSK detektor, pa će varijabla odlučivanja pri diferencijalnoj detekciji na uzastopnim signalizacionim intervalima ( $k$ -tom i  $(k+1)$ -tom), uz pretpostavku da nema hardverskih nesavršenosti, biti

$$\lambda = [\psi_{k+1} - \psi_k] \bmod 2\pi. \quad (3.2.55)$$

gde su  $\psi_{k+1}$  i  $\psi_k$  faze uzastopnih primljenih signala. U cilju određivanja verovatnoće greške po simbolu, potrebno je odrediti funkciju gustine verovatnoće varijable odlučivanja  $\lambda$ . Za posmatrani sistem, funkcija gustine verovatnoće faze primljenog signala nakon detekcije,  $\psi$ , predstavljena preko Furijeovog reda određena je u prethodnom poglavlju i data preko jednačine (3.2.41) kao

$$f_\psi(\psi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\psi), \quad |\psi| \leq \pi, \quad (3.2.56)$$

gde je Furijeov koeficijent  $b_n$  određen i dat jednačinom (3.2.42) za FSO sistem pod uticajem greške pozicioniranja i gama-gama atmosferske turbulencije, i jednačinom (3.2.43) za FSO sistem samo pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije. Na osnovu jednačine (3.2.55), funkcija gustine verovatnoće varijable odlučivanja  $\lambda$  određena je kao [84]

$$f_\lambda(\lambda) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \pi b_n^2 \cos(n\lambda), \quad |\lambda| \leq \pi. \quad (3.2.57)$$

Na osnovu prethodno prikazane funkcije gustine verovatnoće, lako se može dobiti izraz za verovatnoću greške po simbolu posmatranog sistema kao

$$P_s^{MDPSK} = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} f_\lambda(\lambda) d\lambda = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi b_n^2}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.58)$$

### *SIM-MDPSK FSO sistem sa amplitudskim disbalansom električnih SNR-ova*

Kada postoji amplitudski disbalans električnih SNR-ova na uzastopnim signalizacionim intervalima, tj.  $\mu$  i  $\varepsilon\mu$  ( $0 < \varepsilon < 1$ ), Furijeovi koeficijenti neće biti isti i važi  $b_n(\mu) = b_{1n}$  i  $b_n(\varepsilon\mu) = b_{2n}$ . Funkcija gustine verovatnoće varijable odlučivanja  $\lambda$  se u ovom slučaju definiše kao

$$f_\lambda(\lambda) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \pi b_{1n} b_{2n} \cos(n\lambda), \quad |\lambda| \leq \pi, \quad (3.2.59)$$

dok se verovatnoća greške po simbolu posmatranog sistema nalazi kao

$$P_s^{MDPSK} = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} f_\lambda(\lambda) d\lambda = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi b_{1n} b_{2n}}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.60)$$

Za  $\varepsilon=1$  (vrednosti električnih SNR-ova na uzastopnim signalizacionim intervalima su jednake), verovatnoća grešku u (3.2.60) svodi se na verovatnoću u (3.2.58).

#### *SIM-MDPSK FSO sistem pod uticajem faznog šuma*

Kod DPSK prijemnika fazni šum generisan je od strane lokalnog oscilatora kao posledica procesa internih šumova i javlja se usled nesavršenog nosioca u električnom delu prijemnika FSO sistema. Kao i kod PSK sistema, fazni šum lokalnog oscilatora ima Tihonovljevu funkciju gustine verovatnoće sa Furijeovim koeficijentom prethodno definisanim jednačinom (3.2.51) [84]

$$f_\varphi(\varphi) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\varphi), \quad |\varphi| \leq \pi, \quad c_n = \frac{I_n(1/\sigma_\varphi^2)}{\pi I_0(1/\sigma_\varphi^2)}, \quad (3.2.61)$$

gde je u ovom slučaju  $\sigma_\varphi^2$  varijansa faznog šuma lokalnog oscilatora. Parametar  $1/\sigma_\varphi^2$  predstavlja tzv. SNR petlje, i zavisi od konstrukcionih karakteristika fazne petlje. Kada uticaj faznog šuma nije zanemaren, varijabla odlučivanja pri diferencijalnoj detekciji na uzastopnim signalizacionim intervalima je

$$\lambda = [(\psi_{k+1} + \varphi_{k+1}) - (\psi_k + \varphi_k)] \bmod 2\pi = [(\psi_{k+1} - \psi_k) + (\varphi_{k+1} - \varphi_k)] \bmod 2\pi, \quad (3.2.62)$$

gde  $\varphi_{k+1}$  i  $\varphi_k$  predstavljaju fazni šum na dva uzastopna signalizaciona intervala. Ako definišemo promenljivu  $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$ , analogno prethodnom izvođenju promenljive  $\lambda$ , na osnovu jednačine (3.2.61) može se dobiti funkcija gustine verovatnoće promenljive  $\delta$

$$f_\delta(\delta) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \pi c_n^2 \cos(n\delta), \quad |\delta| \leq \pi. \quad (3.2.63)$$

Kao i kod SIM-PSK sistema, može se naći uslovna verovatnoća greške kao

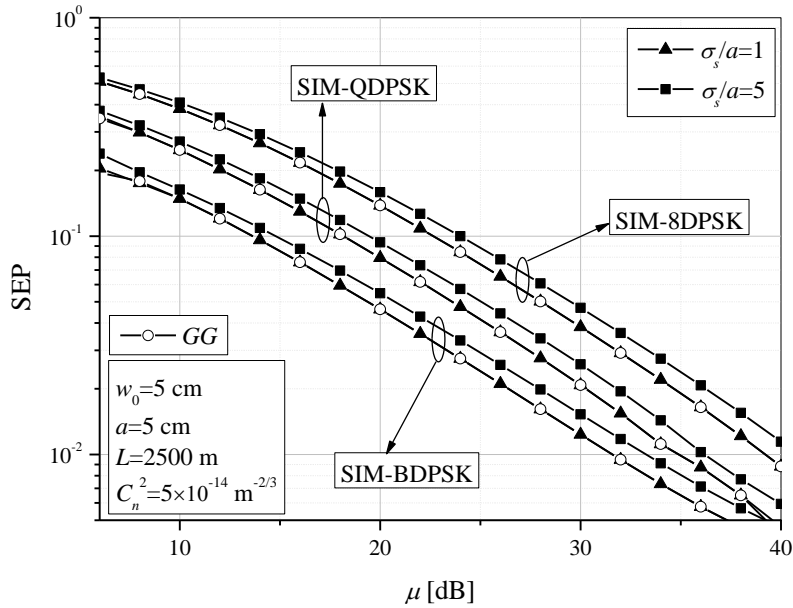
$$P_s^{MDPSK}(\delta) = 1 - \int_{\pi/M+\delta}^{\pi/M-\delta} f_\lambda(\lambda) d\lambda = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi b_n^2}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right) \cos(n\delta). \quad (3.2.64)$$

Nakon usrednjavanja izraza (3.2.64), verovatnoća greške po simbolu SIM-MDPSK FSO sistema sa faznim šumom je data u obliku [84]

$$P_s^{MDPSK} = \int_{-\pi}^{\pi} P_s^{MDPSK}(\delta) f_{\delta}(\delta) d\delta = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi^3 b_n^2 c_n^2}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.65)$$

Ako se u obzir uzmu i fazni šum lokalnog oscilatora i amplitudski disbalans SNR-ova, verovatnoća greške po simbolu je [85]

$$P_s^{MDPSK} = 1 - \frac{1}{M} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi^3 b_{1n} b_{2n} c_n^2}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{M}\right). \quad (3.2.66)$$

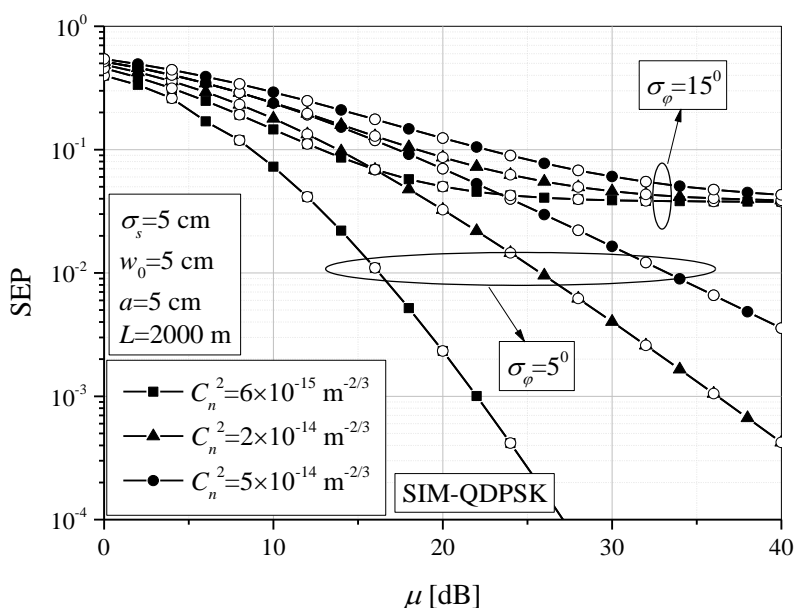


**Slika 3.2.18.** Verovatnoća greške po simbolu SIM-MDPSK FSO bez uticaja hardverskih nesavršenosti

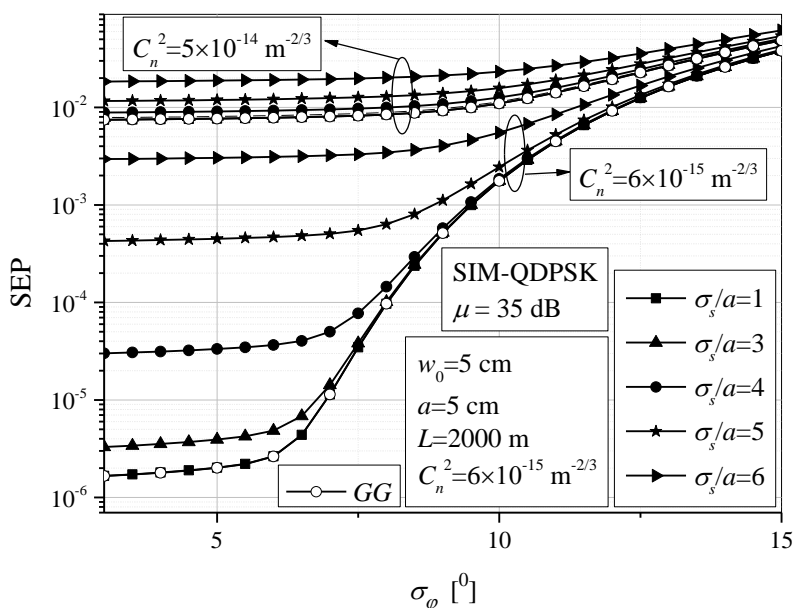
Zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-MDPSK FSO sistema bez uticaja hardverskih nesavršenosti prikazana je na slici 3.2.18. Rezultati su dobijeni na osnovu izraza za verovatnoću greške po simbolu koji je dat jednačinom (3.2.58), dok je Furijeov koeficijent definisan jednačinom (3.2.42), ili jednačinom (3.2.43) za slučaj kada je prenos optičkog signala kroz slobodan prostor ugrožen samo gama-gama atmosferskom turbulencijom. Posmatra se FSO sistem sa intenzitetskom modulacijom podnosiocem u kombinaciji sa BDPSK, QDPSK i 8DPSK, dok je normalizovana standardna devijacija džitera  $\sigma_s/a=1$  i  $\sigma_s/a=5$ . Performanse sistema su bolje kada je vrednost normalizovane standardne devijacije džitera manja i greška pozicioniranja zanemarljivo mala, što je potvrđenom preklapanjem rezultata za slučaj  $\sigma_s/a=1$  i krivih dobijenih za slučaj kada je FSO sistem pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije.

Zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-QDPSK FSO sistema od električnog SNR-a u različitim uslovima atmosferske turbulencije, dok vrednost standardne devijacije

faznog šuma iznosi  $\sigma_\varphi = 5^\circ$  i  $\sigma_\varphi = 15^\circ$ , prikazana je na slici 3.2.19. Kada je vrednost parametra  $\sigma_\varphi$  manja, uticaj faznog šuma je slabiji i performanse sistema su bolje. Promena uslova FSO kanala, koji se ogledaju kroz jačinu turbulencije, u velikoj meri određuje performanse sistema. Kada je fazni šum veoma veliki ( $\sigma_\varphi = 15^\circ$ ), uticaj atmosfereke turbulencije na SEP performanse je znatno manji nego kada je fazni šum slabiji ( $\sigma_\varphi = 5^\circ$ ).



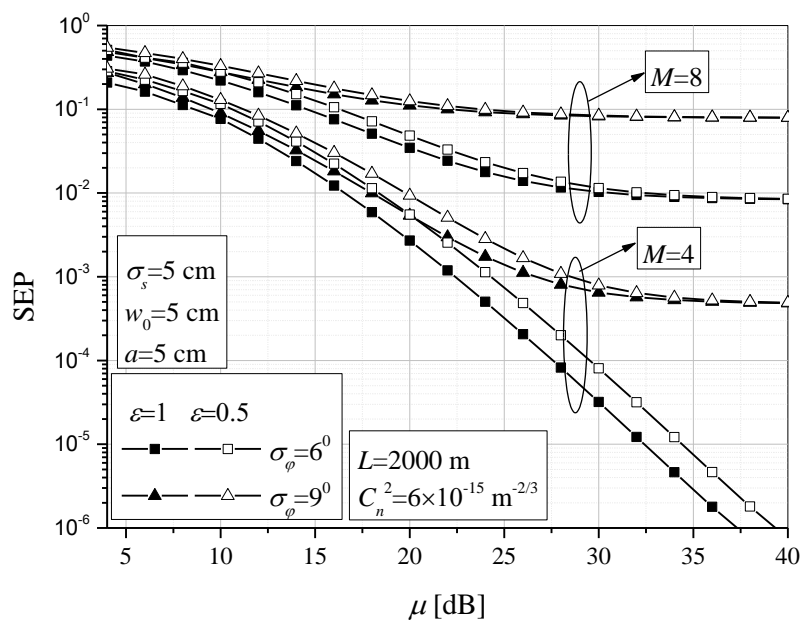
**Slika 3.2.19.** Verovatnoća greške po simbolu SIM-QDPSK FSO sistema za različite vrednosti standardne devijacije faznog šuma u različitim uslovima atmosfereke turbulencije



**Slika 3.2.20.** Verovatnoća greške po simbolu SIM-QDPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera

Slika 3.2.20. prikazuje zavisnost verovatnoće greške po simbolu SIM-QDPSK FSO sistema od standardne devijacije faznog šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera u uslovima jake i slabe atmosferske turbulencije. Kao i kod MPSK, sa smanjenjem standardne devijacije faznog šuma dolazi do poboljšanja performansi sistema. Takođe, uticaj greške pozicioniranja na performanse sistema veći je kada je fazni šum manji, kao i kada je atmosferska turbulencija slabija. Kada je vrednost  $\sigma_\varphi$  veoma velika, a time i fazni šum veći, uticaj turbulencije i greške pozicioniranja na performanse sistema je minimalan. Kada  $\sigma_\varphi \rightarrow 0^\circ$ , fazni šum može biti zanemaren, što se ogleda u konstantnim vrednostima SEP-a. Prikazani su i rezultati za FSO sistem bez greške pozicioniranja, koji su dobijeni uzimajući u obzir Furijeov koeficijent  $b_n$  koji je dat jednačinom (3.2.43). Dobijeni rezultati poklapaju se sa krivama koje odgovaraju slučaju  $\sigma_s/a = 1$ . Stoga, opravdana je tvrdnja da male vrednosti standardne devijacije džitera predstavljaju mali pomeraj FSO sklopova na predaji i prijemu (minimalne vibracije optičkog snopa), što čini grešku pozicioniranja zanemarljivom.

Slika 3.2.21. oslikava zavisnost verovatnoće greške po simbolu od električnog SNR-a, dok se razmatra SIM-MDPSK FSO sistem pod uticajem i faznog šuma i amplitudskog disbalansa SNR-ova. Amplitudski disbalans dodatno narušava SEP performanse sistema, što je naročito naglašeno za manje vrednosti standardne devijacije faznog šuma i kada se koristi intenzitetska modulacija podnosiocem sa nižim nivoom MDPSK modulacije.



**Slika 3.2.21.** Verovatnoća greške po simbolu SIM-MDPSK FSO sistema sa amplitudskim disbalansom SNR-ova



### 3.3. Kapacitet FSO sistema sa PIN fotodiodom

U ovom delu disertacije pažnja će biti posvećena određivanju kapaciteta FSO kanala, koji predstavlja još jednu bitnu performansu sistema korisnu za procenu i upoređivanje kvaliteta različitih telekomunikacionih sistema. Najpre će se razmatrati ergodični kapacitet, koji predstavlja najveću ostvarivu brzinu prenosa informacija u slučaju brzog fedinga u kanalu. U tom slučaju, fluktuacije intenziteta signala su veoma brze i odmerci fedinga na susednim simbolima su nezavisni i različiti. Međutim, poznato je da atmosfersku turbulenciju odlikuje statistika koja odgovara sporom fedingu (spore promene fluktuacije intenziteta), jer vreme koherencije kanala je oko 1-100 ms, i odmerci fedinga nastali zbog turbulencije ostaju konstantni tokom velikog broja prenesenih simbola [48], [53], [87]. Upotreba veoma dugih interlivera u cilju postizanja nezavisnosti odmeraka fedinga na uzastopnim simbolima je nepraktična u FSO sistemima. Iz tog razloga, ergodični kapacitet ne predstavlja odgovarajuću meru za opisivanje performansi FSO sistema, već kapacitet prekida. Prilikom analize kapaciteta FSO sistema, pored gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja, u obzir će biti uzeta i verovatnoća kratkotrajne blokade signala usled fizičkih prepreka.

#### 3.3.1. Ergodični kapacitet FSO sistema

Analiza ergodičnog kapaciteta FSO sistema opravdana je samo uz pretpostavku da je trajanje simbola dovoljno dugo da obezbedi dugoročne ergodične osobine atmosferske turbulencije. Uzimajući u obzir ovu pretpostavku, i smatrajući da je FSO kanal pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije, greške pozicioniranja i slučajne kratkotrajne blokade signala, čija je verovatnoća označena sa  $p_s$ , ergodični kapacitet može se odrediti pomoću izraza

$$\langle C \rangle = B \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_N(\gamma) d\gamma, \quad (3.3.1)$$

gde  $B$  predstavlja propusni opseg kanala, i  $f_N(\gamma)$  predstavlja funkciju gustine verovatnoće trenutnog SNR-a koja je data jednačinom (2.3.40). Zamenom (2.3.40) u (3.3.1), dobija se

$$\langle C \rangle = B p_s \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) \delta(\gamma) d\gamma + B(1 - p_s) \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma, \quad (3.3.2)$$

gde je  $f_\gamma(\gamma)$  funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a kada nema blokade signala usled slučajnih prepreka, koja je definisana jednačinom (2.3.37).

Prvi integral u (3.3.2) rešava se na osnovu pravila (A.22) koje je dato u dodatku na kraju disertacije, pri čemu se dobija

$$Bp_s \int_0^{\infty} \log_2(1+\gamma) \delta(\gamma) d\gamma = Bp_s \log_2(1+0) = 0. \quad (3.3.3)$$

Zamenom (3.3.3) i (2.3.37) u (3.3.2), izraz za ergodični kapacitet je

$$\langle C \rangle = B \frac{\xi^2(1-p_s)}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} \gamma^{-1} \log_2(1+\gamma) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) d\gamma. \quad (3.3.4)$$

Primenom identiteta (A.22) za predstavljanje logaritamske funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije kao

$$\log_2(1+\gamma) = \frac{1}{\ln(2)} G_{2,2}^{1,2} \left( \gamma \middle| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right), \quad (3.3.5)$$

nakon zamene u (3.3.4), ergodični kapacitet je predstavljen preko integrala

$$\langle C \rangle = B \frac{(1-p_s)\xi^2}{2\ln(2)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} \gamma^{-1} G_{2,2}^{1,2} \left( \gamma \middle| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) d\gamma. \quad (3.3.6)$$

Integral u (3.3.6) rešava se pomoću pravila (A.15), uz pomoć pravila (A.2), (A.3), (A.16) i (A.17), nakon čega je ergodični kapacitet dat u obliku

$$\langle C \rangle = B \frac{(1-p_s)2^{\alpha+\beta-3}\xi^2}{\pi \ln(2)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{4,8}^{8,1} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2}{16\mu} \middle| \begin{matrix} 0, 1, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\xi^2+1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0, 0 \end{matrix} \right). \quad (3.3.7)$$

Red Mejerove  $G$ -funkcije u (3.3.7) može se smanjiti nakon permutacije parametara primenom pravila (A.7), (A.8) i (A.9), koja su definisana u dodatku na kraju disertacije. Konačan izraz za ergodični kapacitet FSO sistema sa verovatnoćom blokade signala  $p_s$  je

$$\langle C \rangle = B \frac{(1-p_s)2^{\alpha+\beta-3}\xi^2}{\pi \ln(2)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{3,7}^{7,1} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2}{16\mu} \middle| \begin{matrix} 0, 1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0, 0 \end{matrix} \right). \quad (3.3.8)$$

Kada je verovatnoća blokade signala jednaka nuli, tj.  $p_s = 0$ , sigurno neće doći do prekida prenosa signala kroz FSO kanal. Stoga, prenos optičkog signala kroz slobodan prostor biće pod uticajem samo greške pozicioniranja i gama-gama atmosfarske turbulencije. Sa druge strane, kada je  $p_s = 1$ , optički snop biće sigurno blokiran, i prenos FSO signala biće prekinut.

Nalaženjem granične vrednosti izraza koji je dat jednačinom (3.3.8) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$  primenom istih pravila kao i do sada, izveden je izraz za ergodični kapacitet FSO sistema koji je pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije u obliku

$$\langle C \rangle^{GG} = B \frac{(1-p_s)2^{\alpha+\beta-2}}{\pi \ln(2)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2}{16\mu_a} \left| \begin{matrix} 0, 1 \\ \alpha, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (3.3.9)$$

Kada nema blokade signala ( $p_s = 0$ ), ergodični kapacitet u jednačini (3.3.9) se nakon korišćenja pravila (A.5) svodi na rezultat publikovan u [51, (11)], [102, (16)], [106, (21)], [108, (10)]. Kada je  $\beta = 1$ , gama-gama raspodela svodi se na K raspodelu povoljnu za opisivanje jake atmosfarske turbulencije. Primenom pravila (A.5) i zamenom  $p_s = 0$  i  $\beta = 1$  u (3.3.9), ergodični kapacitet svodi se na rezultat objavljen u [103, (7)].

### 3.3.2. Kapacitet prekida FSO sistema

Kada su fluktuacije intenziteta primljenog optičkog signala opisane sporom statistikom fedinga, performanse FSO sistema adekvatno se određuju kapacitetom prekida,  $C_{out}$  [100], [104]. Verovatnoća prekida sistema označena se  $r$  jednaka je verovatnoći da trenutni kapacitet  $C$  bude manji od kapacitet prekida

$$\Pr[C < C_{out}] = r. \quad (3.3.10)$$

Pošto je trenutni SNR  $\gamma$  slučajna veličina, trenutni kapacitet  $C$  je takođe slučajna promenljiva. Stoga, verovatnoća definisana jednačinom (3.3.10) može se proceniti kao [106]

$$r = \int_0^{C_{out}} f_C(C) dC, \quad (3.3.11)$$

gde  $f_c(C)$  predstavlja funkciju gustine verovatnoće trenutnog kapaciteta  $C$ . Uzimajući u obzir funkciju gustine verovatnoće trenutnog SNR-a koja je data jednačinom (2.3.40) i definiciju ergodičnog kapaciteta [104]

$$C = B \log_2(1 + \gamma) = B \frac{\ln(1 + \gamma)}{\ln(2)}, \quad (3.3.12)$$

funkcija gustine verovatnoće trenutnog kapaciteta  $C$  može se naći transformacijom slučajnih promenljivih kao

$$f_c(C) = \frac{f_N(\gamma)}{\left| \frac{\partial C}{\partial \gamma} \right|} \Big|_{\gamma=2^{C/B}-1}, \quad (3.3.13)$$

gde je  $\left| \frac{\partial C}{\partial \gamma} \right| = \frac{B}{(1 + \gamma) \ln(2)}$ . Posle par koraka matematičkih manipulacija, dobija se

$$f_c(C) = \frac{2^{C/B} \ln(2)}{B} p_s \delta(2^{C/B} - 1) + \frac{(1 - p_s) \ln(2) \xi^2}{B 2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} 2^{C/B} (2^{C/B} - 1)^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{2^{C/B} - 1}{\mu}} \Big|_{\xi^2, \alpha, \beta}^{\xi^2 + 1} \right). \quad (3.3.14)$$

Zamenom (3.3.14) u (3.3.11), verovatnoća prekida  $r$  data je u obliku

$$r = \frac{\ln(2) p_s}{B} \int_0^{C_{out}} 2^{C/B} \delta(2^{C/B} - 1) dC + \frac{(1 - p_s) \ln(2) \xi^2}{B 2 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \int_0^{C_{out}} 2^{C/B} (2^{C/B} - 1)^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{2^{C/B} - 1}{\mu}} \Big|_{\xi^2, \alpha, \beta}^{\xi^2 + 1} \right) dC. \quad (3.3.15)$$

Prvi integral u jednačini (3.3.15) može se rešiti uvođenjem smene  $2^{C/B} - 1 = x$  kao

$$\begin{aligned} \frac{\ln(2) p_s}{B} \int_0^{C_{out}} 2^{C/B} \delta(2^{C/B} - 1) dC &= \frac{\ln(2) p_s}{B} \int_0^{2^{C_{out}/B} - 1} (x + 1) \delta(x) \frac{B}{(x + 1) \ln 2} dx \\ &= p_s \int_0^{2^{C_{out}/B} - 1} \delta(x) dx = p_s, \end{aligned} \quad (3.3.16)$$

dok se drugi integral transformiše uvođenjem smene  $2^{C/B} - 1 = h^2$  i rešava pomoću pravila (A.10) kao

$$\begin{aligned}
& \frac{(1-p_s)\ln(2)\xi^2}{B2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{C_{out}} 2^{C/B} (2^{C/B} - 1)^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{2^{C/B} - 1}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) dC \\
&= \frac{(1-p_s)\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\sqrt{2^{C_{out}/B} - 1}} h^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha\beta\kappa}{\sqrt{\mu}} h \middle| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) dh \\
&= \frac{(1-p_s)\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left( \frac{\alpha\beta\kappa}{\sqrt{\mu}} \sqrt{2^{C_{out}/B} - 1} \middle| \begin{matrix} 1, \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right).
\end{aligned} \tag{3.3.17}$$

Konačan izraz za verovatnoću prekida FSO sistema sa verovatnoćom blokade signala  $p_s$  dobija se zamenom (3.3.16) i (3.3.17) u (3.3.15) kao

$$r = p_s + \frac{(1-p_s)\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left( \frac{\alpha\beta\kappa}{\sqrt{\mu}} \sqrt{2^{\tilde{C}_{out}} - 1} \middle| \begin{matrix} 1, \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right), \tag{3.3.18}$$

gde je  $\tilde{C}_{out} = C_{out}/B$ .

Za slučaj kada je greška pozicioniranja zanemarena, nalaženjem granične vrednosti izraza (3.3.18) kada  $\xi \rightarrow \infty$ , dobija se

$$r^{GG} = p_s + \frac{(1-p_s)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left( \frac{\alpha\beta}{\sqrt{\mu_a}} \sqrt{2^{\tilde{C}_{out}} - 1} \middle| \begin{matrix} 1 \\ \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right). \tag{3.3.19}$$

Primenom pravila (A.5), uz pretpostavku  $p_s = 0$ , jednačina (3.3.19) svodi se na rezultat publikovan u [101, (13)]. Takođe, primenom pravila (A.5), i zamenom  $p_s = 0$  i  $\beta = 1$  u (3.3.19), prethodni rezultat se svodi na [103, (10)] i [107, (11)].

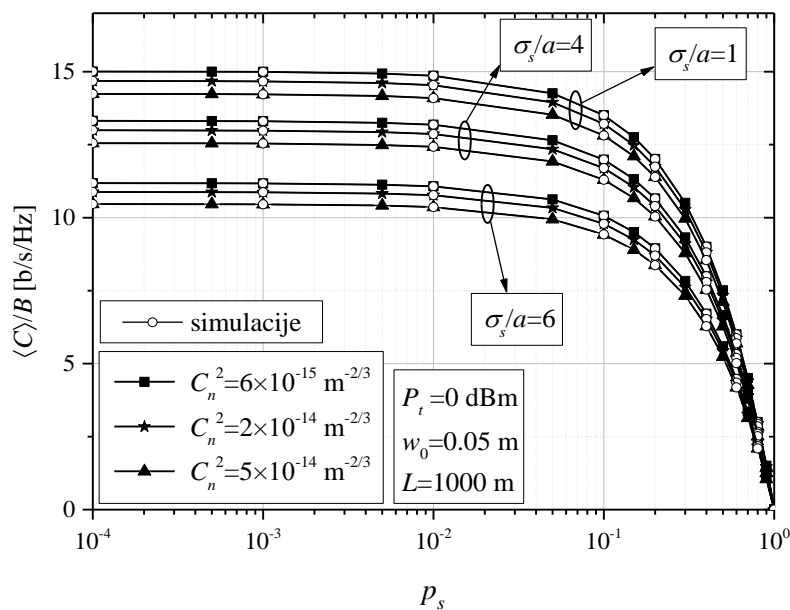
U opsegu velikih vrednosti električnog SNR-a, Mejerova  $G$ -funkcija u jednačini (3.3.18) teži nuli na osnovu pravila (A.24), pa će izraz koji povezuje verovatnoću prekida  $r$  i kapacitet prekida biti

$$\lim_{\mu \rightarrow \infty} r = p_s, \tag{3.3.20}$$

što se odražava u postojanju neotklonljive verovatnoće prekida sistema, o čemu će biti reči u nastavku disertacije.

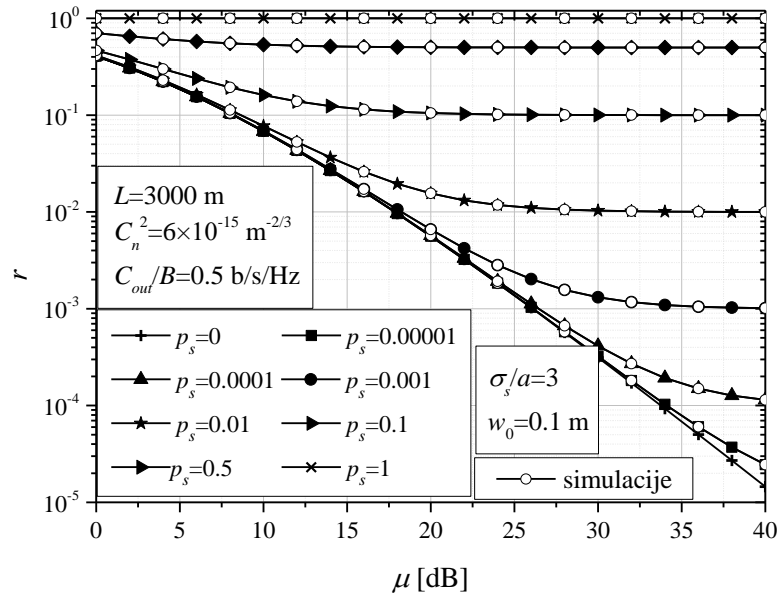
Na osnovu izraza za ergodični kapacitet koji je dat u jednačini (3.3.8), pri čemu je električni SNR predstavljen u funkciji srednje optičke snage, dobijeni numerički rezultati su prikazani na slici 3.3.1. Prikazana je zavisnost ergodičnog kapaciteta od verovatnoće blokade signala za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije. Najbolje performanse sistema su postignute kada  $p_s \rightarrow 0$ , što odgovara slučaju kada sa sigurnošću možemo tvrditi da ne dolazi do blokade signala. Sa povećanjem verovatnoće  $p_s$ , ergodični kapacitet se smanjuje. U slučaju  $p_s = 1$ , optički snop

biće sigurno blokiran nekom vrstom prepreke prilikom prenosa kroz slobodan prostor, što dovodi do prekida sistema. U svim uslovima atmosfertske turbulencije i za sve vrednosti  $\sigma_s/a$ , ergodični kapacitet je relativno konstantan u opsegu kada je verovatnoća blokade signala manja od  $10^{-2}$ , dok se naglo smanjuje kada je verovatnoća blokada signala veća od  $10^{-1}$ . Može se primetiti da je za veoma velike vrednosti verovatnoće blokade, tj.  $p_s > 0.7$ , uticaj greške pozicioniranja i atmosfertske turbulencije od manjeg značaja na performanse sistema.

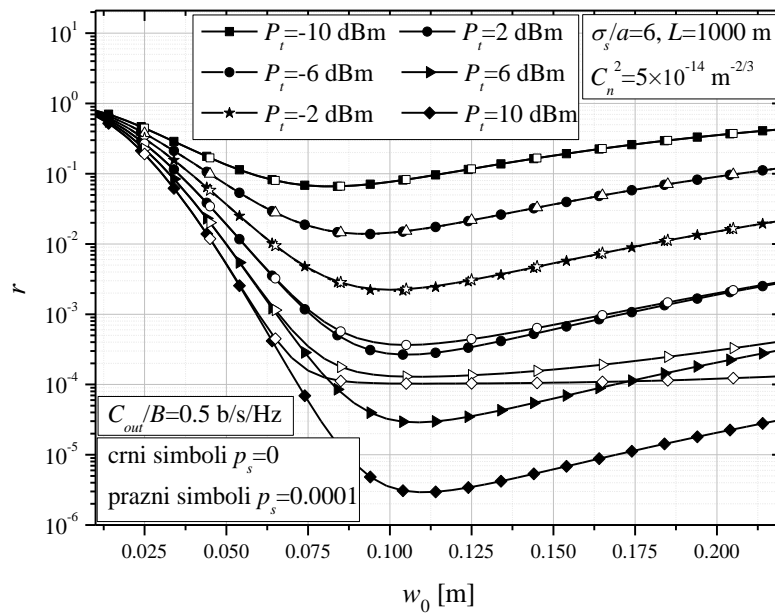


**Slika 3.3.1.** Normalizovani ergodični kapacitet FSO sistema u zavisnosti od verovatnoće blokade signala

Na slici 3.3.2. prikazana je zavisnost verovatnoće prekida sistema od električnog SNR-a za različite vrednosti verovatnoće blokade signala. Kada sa sigurnošću možemo tvrditi da neće doći do blokade optičkog snopa ( $p_s = 0$ ), verovatnoća prekida smanjuje se kroz ceo opseg električnog SNR-a. Kada postoji šansa da će optički snop biti prekinut nekom vrstom prepreke, verovatnoća prekida se smanjuje u opsegu niskih i srednjih vrednosti električnog SNR-a, dok za velike vrednosti teži konstantnoj vrednosti. Ova konstantna vrednost predstavlja neotklonljivu verovatnoću prekida sistema, koja je jednaka vrednosti koju ima verovatnoća blokade signala. Znači, kada je vrednost verovatnoće blokade  $p_s$  manja, vrednost neotklonljive verovatnoće prekida sistema je manja. Pored toga, kada je vrednost  $p_s$  veća, neotklonljiva verovatnoća prekida se javlja na manjim vrednostima električnog SNR-a. Sa povećanjem verovatnoće blokade, verovatnoća prekida je sve veća i veća, pri čemu se približava slučaju sigurnog prekida sistema, tj.  $p_s = 1$ .



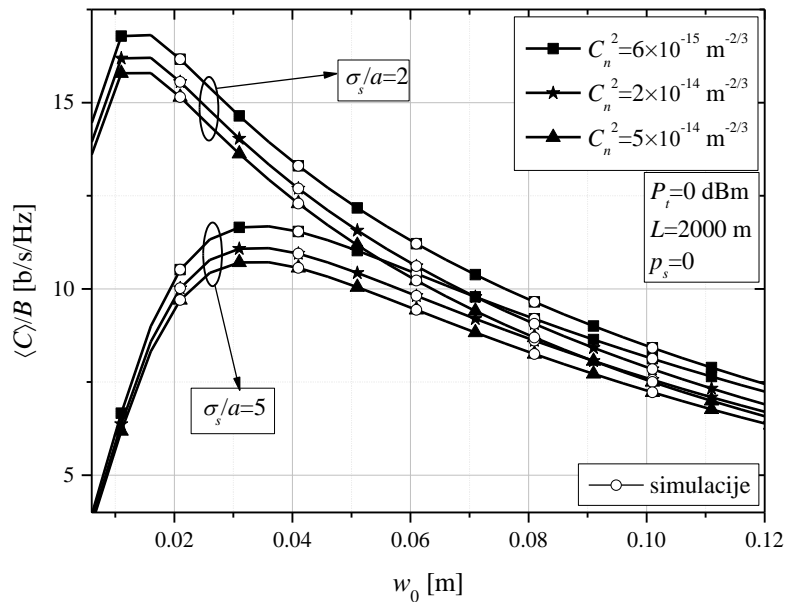
**Slika 3.3.2.** Verovatnoća prekida FSO sistema u zavisnosti od električnog SNR-a za različite vrednosti verovatnoće blokade signala



**Slika 3.3.3.** Verovatnoća prekida FSO sistema u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti optičke snage

Slika 3.3.3. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti optičke snage na predaji. Posmatraju se dva slučaja: kada nema blokade signala ( $p_s = 0$ ) i kada je verovatnoća blokade signala jednaka  $p_s = 0.0001$ . Kada je  $p_s = 0$  može se uočiti minimum verovatnoće prekida  $r$ , koji se javlja na određenim vrednostima širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa,  $w_0$ . Stoga, prilikom projektovanja FSO linka, performanse sistema mogu biti znatno poboljšane pravilnim izborom sklopa FSO predajnika, koji će biti u blizini optimalne vrednosti,  $w_{0opt}$ .

Ova optimalna vrednost javlja se usled balansiranja širine optičkog snopa i primljene optičke snage. Što je širi optički snop, uticaj greške pozicioniranja biće manji, ali dolazi do rasipanja i smanjenja primljene optičke snaga. Sa druge strane, ako je širina optičkog snopa na prijemu manja, dolazi do uštede u optičkoj snazi jer su manji gubici usled divergencije snopa, ali će greška pozicioniranja imati glavnu ulogu u degradaciji performansi sistema. Ako FSO predajni sklop obezbeđuje širinu izlaznog optičkog snopa,  $w_0$ , manju od optimalne vrednosti,  $w_{0opt}$ , smanjenje verovatnoće prekida sa promenom vrednosti  $w_0$  izraženija je nego u slučaju kada je  $w_0$  veće od  $w_{0opt}$ . Kada je verovatnoća blokade signala veća od nule, verovatnoća prekida ne može pasti ispod te vrednosti, tj. minimalna vrednost verovatnoće prekida je jednaka ili veća od verovatnoće blokade signala. Ovo zapažanje sa slike 3.3.3. je u saglasnosti sa jednačinom (3.3.20).



**Slika 3.3.4.** Normalizovani ergodični kapacitet FSO sistema u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa

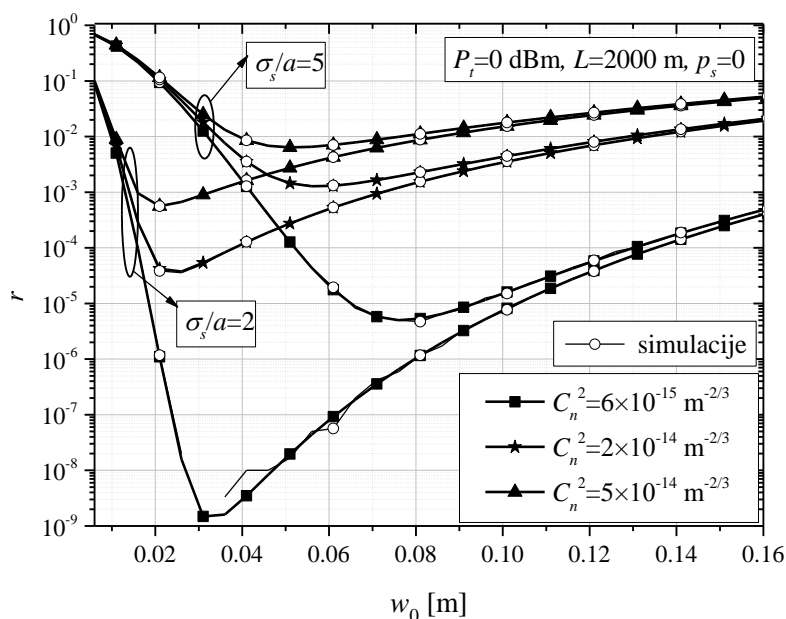
Zavisnost ergodičnog kapaciteta od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere prikazana je na slici 3.3.4. Performanse sistema su najbolje u uslovima slabe atmosfere. Takođe, manja vrednost normalizovane standardne devijacije džitera predstavlja bolje pozicioniranje predajnog lasera i detektora na prijemu, što dovodi do boljih performansi sistema. Pored toga, maksimum ergodičnog kapaciteta postoji za određenu optimalnu vrednost širine optičkog snopa. Kao i u slučaju kapaciteta prekida, odabir FSO predajnika ima veliki uticaj na performanse sistema. Može se



primetiti da vrednost  $w_{0opt}$  u velikoj meri zavisi od normalizovane standardne devijacije džitera, dok je atmosferska turbulencija od manjeg značaja.

**Tabela 3.1.** Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa [cm]

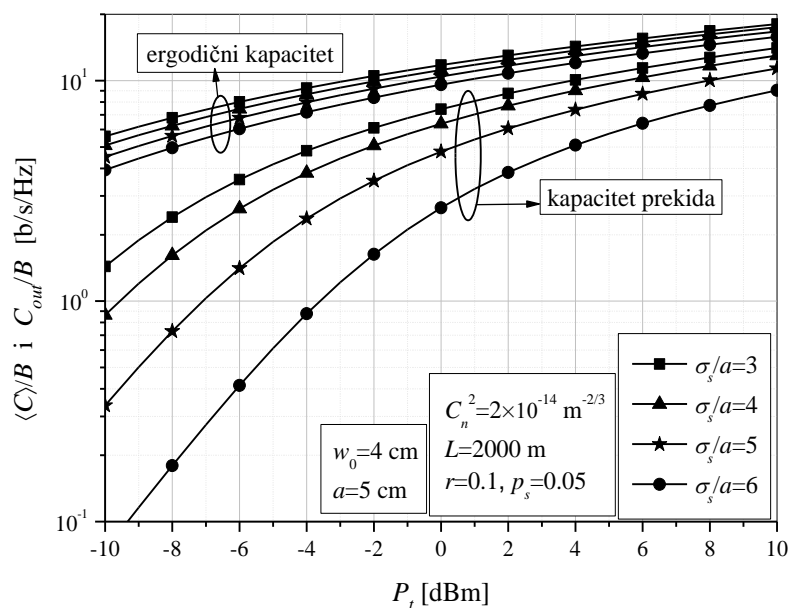
normalizovan džiter	$\sigma_s/a = 2$						$\sigma_s/a = 5$					
	slaba		umerena		jaka		slaba		umerena		jaka	
atmosferska turbulencija	E	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E	O
$P_t$ [dBm]												
-10	1.28	2.94	1.27	2.22	1.25	2.00	2.96	5.87	2.91	4.81	2.89	4.49
-6	1.31	3.12	1.3	2.31	1.3	2.05	3.22	6.76	3.17	5.30	3.14	4.86
-2	1.33	3.25	1.32	2.37	1.32	2.09	3.36	7.42	3.33	5.70	3.30	5.09
2	1.34	3.33	1.33	2.39	1.33	2.1	3.44	7.87	3.41	5.85	3.39	5.23
6	1.34	3.38	1.34	2.41	1.34	2.11	3.47	8.18	3.46	5.98	3.45	5.31
10	1.34	3.41	1.34	2.41	1.34	2.12	3.49	8.37	3.48	6.05	3.47	5.35



**Slika 3.3.5.** Verovatnoća prekida FSO sistema u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa

Slično kao na slici 3.3.4, zavisnost verovatnoće prekida od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije prikazana je na slici 3.3.5. Može se primetiti da postoji minimum verovatnoće prekida. Kao i kod ergodičnog kapaciteta, normalizovana standardna devijacija džitera je dominantan parametar u određivanju vrednosti  $w_{0opt}$ , koja odgovara minimumu verovatnoće prekida  $r$ . To se takođe može zapaziti iz Tabele

3.1, koja prikazuje estimirane optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije, različite uslove atmosfertske turbulencije, i za različite vrednosti predajne optičke snage. Optimalne vrednosti  $w_{0opt}$  su procenjene i za ergodični kapacitet (E), i za verovatnoću prekida (O). Kao što je već naglašeno, normalizovana standardna devijacija džitera ima veoma jak uticaj na odabir optimalne vrednosti širine snopa. Vrednost  $w_{0opt}$  određena na osnovu minimuma verovatnoće prekida drugačija je od vrednosti koja je dobijena za maksimum ergodičnog kapaciteta. Iz tabele se može zaključiti da su optimalne vrednosti širine snopa veće kada je vrednost  $\sigma_s/a$  veća, kao i kad je vrednost optičke snage veća. Zatim, pogoršanje uslova atmosfertske turbulencije održava se na smanjenje vrednosti  $w_{0opt}$ . Zaključno, optimalna vrednost širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa nije ista za minimum verovatnoće prekida i maksimum ergodičnog kapaciteta, ali obe vrednosti u velikoj meri zavise od parametra  $\sigma_s/a$ . Uslovi atmosfertske turbulencije imaju efekat samo na optimizaciju verovatnoće prekida. Drugim rečima, vrednost  $w_{0opt}$  koja odgovara minimumu verovatnoće prekida u većoj meri zavisi od uslova prenosa FSO signala nego vrednost  $w_{0opt}$  koja odgovara maksimumu ergodičnog kapaciteta.

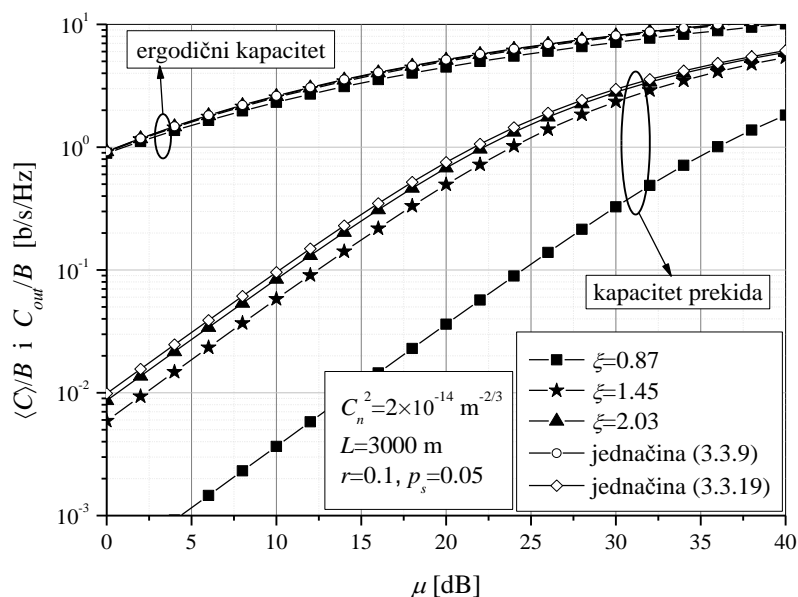


**Slika 3.3.6.** Normalizovani ergodični kapacitet i kapacitet prekida u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera

Zavisnost ergodičnog kapaciteta i kapaciteta prekida od optičke snage na predaji za različite vrednosti parametra  $\sigma_s/a$  prikazana je na slici 3.3.6. Manja vrednost normalizovane standardne devijacije džitera dovodi do većeg kapaciteta sistema. Uticaj džitera na kapaciteta

prekida je značajan. Na primer, kada je vrednost predajne optičke snage  $-2$  dBm, kapacitet prekida se smanjuje od 6.08 b/s/Hz na 1.63 b/s/Hz prilikom povećanja vrednosti parametra  $\sigma_s/a$  sa 3 na 6. Normalizovana standardna devijacija džitera ima veći uticaj na kapaciteta prekida nego na ergodični kapacitet.

Slika 3.3.7. prikazuje zavisnost ergodičnog kapaciteta i kapaciteta prekida od električnog SNR-a, dok se posmatra uticaj parametra  $\xi$  koji određuje grešku pozicioniranja. U obzir su uzeti sledeće vrednosti parametra:  $\xi = 1.45$  ( $w_0 = 3$  cm,  $w_L/a = 10.45$ ,  $\sigma_s/a = 6$ ),  $\xi = 0.87$  ( $w_0 = 5$  cm,  $w_L/a = 17.37$ ,  $\sigma_s/a = 6$ ), i  $\xi = 2.03$  ( $w_0 = 7$  cm,  $w_L/a = 24.3$ ,  $\sigma_s/a = 6$ ), u uslovima umerene atmosferske turbulencije i dužine FSO linka od  $L = 3000$  m. Može se primetiti da parametar  $\xi$ , tj. greška pozicioniranja, ima veći uticaj na kapacitet prekida nego na ergodični kapacitet. Kada je vrednost električnog SNR-a  $\mu = 20$  dB, povećanje parametra  $\xi$  sa 0.87 na 2.03 povećaće kapacitet prekida 18 puta, dok će ergodični kapacitet biti povećan 1.14 puta. Veća vrednost parametra  $\xi$  daje bolje performanse sistema. Na slici 3.3.7 su takođe prikazani rezultati za kapacitet FSO sistema koji je pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije (jednačine (3.3.9) i (3.3.19)). Kada je parametar  $\xi$  dovoljno velik, uticaj greške pozicioniranja se može zanemariti, što je potvrđeno preklapanjem rezultata za slučaj  $\xi = 2.03$  i za slučaj kada je FSO sistem pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije.



**Slika 3.3.7.** Normalizovani ergodični kapacitet i kapacitet prekida u zavisnosti od električnog SNR-a za različite vrednosti parametra greške pozicioniranj

## 4. Performanse FSO sistema sa APD fotodiodom

Predmet analize u ovom delu disertacije biće performanse FSO sistema koji koriste prijemnik sa APD fotodiodom. Za razliku od analiziranih FSO sistema sa PIN fotodetektorom kod kojih je termički šum dominantan, šot šum je glavni izvor smetnji kod prijemnika sa APD fotodiodom [4]. U ovom poglavlju biće prikazana analiza verovatnoće greške po bitu FSO sistema čiji prijemnik podrazumeva direktnu detekciju, dok se na predaji vrše različite vrste modulacija. Najpre će biti izvršena analiza FSO sistema sa IM/DD i OOK formatom. Što se tiče intenzitetske modulacije podnosiocem, razmatraće se FSO sistemi koji koriste SIM-BPSK i SIM-BDPSK.

### 4.1. Verovatnoća greške FSO sistema sa IM/DD i OOK i APD fotodiodom

Model FSO sistema sa IM/DD i OOK i prijemnikom sa APD fotodiodom prikazan je na slici 4.1.1. Nakon prenosa kroz slobodan prostor, signal je oslabljen usled postojanja atmosferske turbulencije i uslova u kanalu. Tokom analize ovog sistema smatra se da je usmerenost optičkog snopa zadovoljavajuća, pa je greška pozicioniranja zanemarena. Nakon direktne detekcija na prijemu, optički signal se konvertuje u električni pomoću APD fotodiode. Analizira se FSO sistem sa IM/DD i OOK formatom sa srednjom predajnom optičkom snagom  $P_t$ , pa će vrednost signala koji nosi informaciju,  $x$ , biti 0 u „on“ stanju, ili  $2P_t$  u „off“ stanju. Stoga, trenutna vrednost fotostruje na ulazu APD fotodiode je u ovom slučaju različita kada se prenosi „on“ i „off“ bit. Nakon direktne detekcije, optički signal na ulazu APD fotodiode definisan je kao

$$r = I_l' x I = \begin{bmatrix} r_{on} \\ r_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_l' 2 P I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.1.1)$$

gde  $I_l'$  predstavlja ukupne atmosferske gubitke. Pored atmosferskog slabljenja koje je ranije definisano jednačinom (2.3.1), predstojeća analiza pretpostavlja da ukupni atmosferski gubici obuhvataju i geometrijske gubitke. Ukupni atmosferski gubici su definisani kao [92], [120], [171]

$$I_l' = \frac{A}{\pi(\theta L/2)^2} I_l = \frac{A}{\pi(\theta L/2)^2} \exp(-\sigma L), \quad (4.1.2)$$

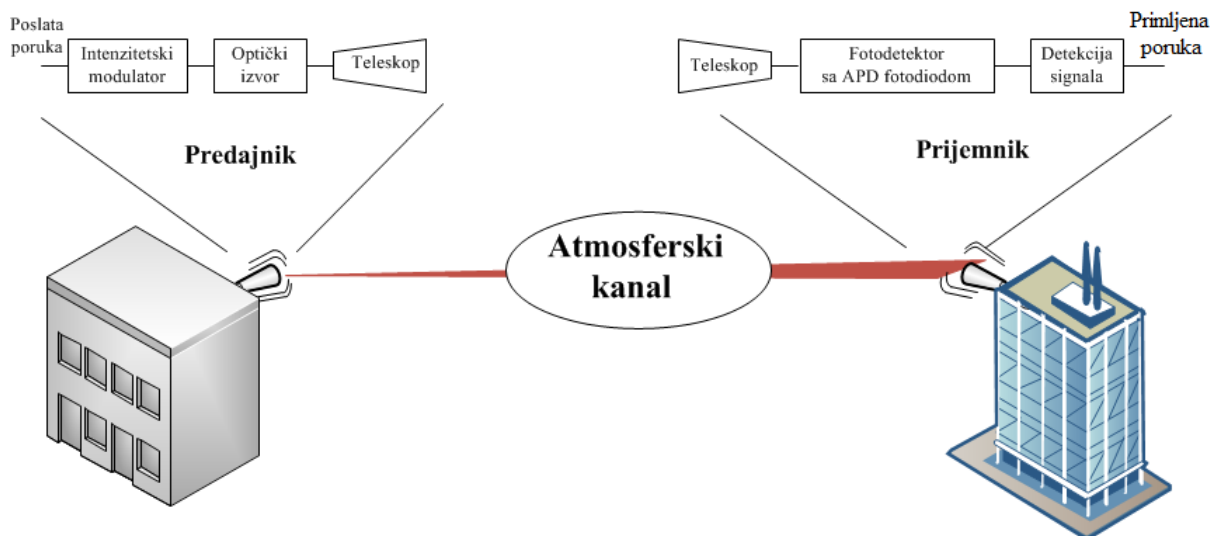
gde je  $A$  površina detektora poluprečnika  $a$ , i  $\theta$  označava ugao divergencije u radijanima. Nakon konverzije optičkog signala u električni pomoću APD fotodiode, električni signal je

$$r_e = \begin{bmatrix} r_{e/on} \\ r_{e/off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g R r_{on} + n_{on} \\ g R r_{off} + n_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g R I_l' 2 P I + n_{on} \\ 0 + n_{off} \end{bmatrix}, \quad (4.1.3)$$

gde je  $g$  i  $R$  predstavljaju pojačanje i osetljivost fotodiode, redom. Ukupni APD šum označen sa  $n$  različit je u „on“ i „off“ stanju ( $n_{on}$  i  $n_{off}$ ). U analizi FSO sistema sa APD fotodiodom smatra se da se ukupni šum sastoji od termičkog šuma,  $n_{th}$ , i šot šuma,  $n_{sh}$ , što je zapisano kao

$$n = n_{th} + n_{sh}. \quad (4.1.4)$$

Termički šum ne zavisi od intenziteta signala, i biće isti u „on“ i „off“ stanju. Kao što je ranije naglašeno, modeluje se kao stacionarni Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{th}^2$ , koja je ranije definisana jednačinom (2.2.2) [92]



Slika 4.1.1. Model FSO sistema sa IM/OOK i APD prijemnikom

Termički šum ne zavisi od intenziteta signala, i biće isti u „on“ i „off“ stanju. Kao što je ranije naglašeno, modeluje se kao stacionarni Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{th}^2$ , koja je ranije definisana jednačinom (2.2.2) [92]

$$\sigma_{th}^2 = \sigma_{th/on}^2 = \sigma_{th/off}^2 = 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f. \quad (4.1.5)$$

Za razliku od termičkog, šot šum zavisi od intenziteta signala. Stoga, biće različit u „on“ i „off“ stanju. Modeluje se kao Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{sh}^2$ , koja je definisana jednačinom (2.2.3) na sledeći način

$$\sigma_{sh}^2 = \begin{bmatrix} \sigma_{sh/on}^2 \\ \sigma_{sh/off}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2qg^2 F_A R I_l' 2P_i \Delta f I \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.1.6)$$

Na osnovu navedenog, ukupni šum modeluje se kao Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_n^2$ , koja se nalazi kao zbir varijansi termičkog i šot šuma

$$\sigma_n^2 = \begin{bmatrix} \sigma_{n/on}^2 \\ \sigma_{n/off}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh/on}^2 \\ \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh/off}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + 2qg^2 F_A R I_l' 2P_i \Delta f I \\ 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f \end{bmatrix}. \quad (4.1.7)$$

U prethodnom delu disertacije izveden je izraz za verovatnoću greške po bitu FSO sistema sa IM/DD i OOK kada se koristi PIN fotodioda na prijemnom delu. U slučaju APD prijemnika važi isti izraz za uslovnu verovatnoću greške FSO sistema, uz pretpostavku  $P(on) = P(off) = 0.5$ , i na osnovu jednačine (3.2.2)

$$P_{b/I} = \frac{1}{2} [P(off | on) + P(on | off)]. \quad (4.1.8)$$

Pošto kod FSO sistema sa APD prijemnikom varijanse šuma u „on“ i „off“ stanju nisu jednake, verovatnoće  $P(off|on)$  i  $P(on|off)$  su razlikuju, i mogu se odrediti kao [4, p. 163]

$$P(off | on) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{d_{on} - d_{th}}{\sqrt{2\sigma_{n/on}^2}} \right), \quad (4.1.9)$$

$$P(on | off) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{d_{th} - d_{off}}{\sqrt{2\sigma_{n/off}^2}} \right), \quad (4.1.10)$$

gde  $d_{on} = gRI_l 2P_t$  predstavlja električni „on“ signal,  $d_{off} = 0$  je električni „off“ signal, i  $d_{th}$  je prag odlučivanja. Uzimajući u obzir (4.1.9) i (4.1.10), uslovna verovatnoća greške data jednačinom (4.1.8) može se napisati kao

$$P_{b/I} = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{d_{on} - d_{th}}{\sqrt{2\sigma_{n/on}^2}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{d_{th} - d_{off}}{\sqrt{2\sigma_{n/off}^2}} \right) \right]. \quad (4.1.11)$$

Glavni nedostatak FSO sistema sa OOK formatom je potreba za podešavanjem praga  $d_{th}$ . Iz prethodnog izraza može se primetiti da verovatnoća greške zavisi od ovog praga. U praksi se često vrši optimizacija praga odlučivanja pod uslovom  $P(on|off) = P(off|on)$  [4, p. 164] kao

$$d_{th} = \frac{\sigma_{n/off} d_{on} + \sigma_{n/on} d_{off}}{\sigma_{n/off} + \sigma_{n/on}}. \quad (4.1.12)$$

Kada je  $\sigma_{n/off} = \sigma_{n/on}$ , prag odlučivanja je  $d_{th} = (d_{on} + d_{off})/2$ , tj. podešavanje je na sredini, što odgovara situaciji sa PIN fotodetektorom kada je termički šum dominantan.

Na osnovu jednačina (4.1.11) i (4.1.12), uslovna verovatnoća greške određena je kao

$$P_{e/I} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q(I)}{\sqrt{2}} \right), \quad (4.1.13)$$

gde je parametar  $Q(I)$  definisan kao [4, p. 164]

$$Q(I) = \frac{d_{on} - d_{off}}{\sigma_{n/on} + \sigma_{n/off}} = \frac{gRI_l 2P_t I}{\sigma_{n/on} + \sigma_{n/off}}. \quad (4.1.14)$$

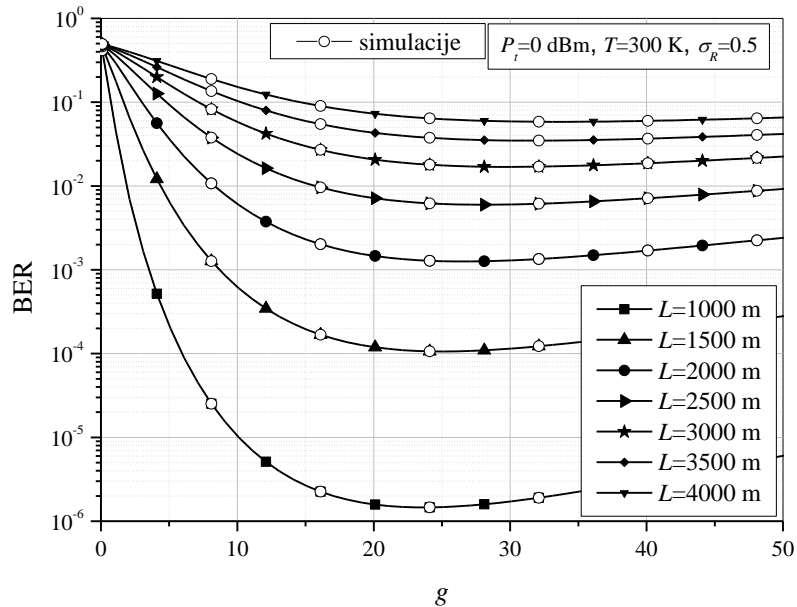
Verovatnoća greške po bitu posmatranog sistema može se odrediti usrednjavanjem izraza u (4.1.13) po promenljivoj  $I$  na sledeći način

$$P_b = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left( \frac{gRI_l 2P_t I}{\sqrt{2}(\sigma_{n/on} + \sigma_{n/off})} \right) f_{I_a}(I) dI, \quad (4.1.15)$$

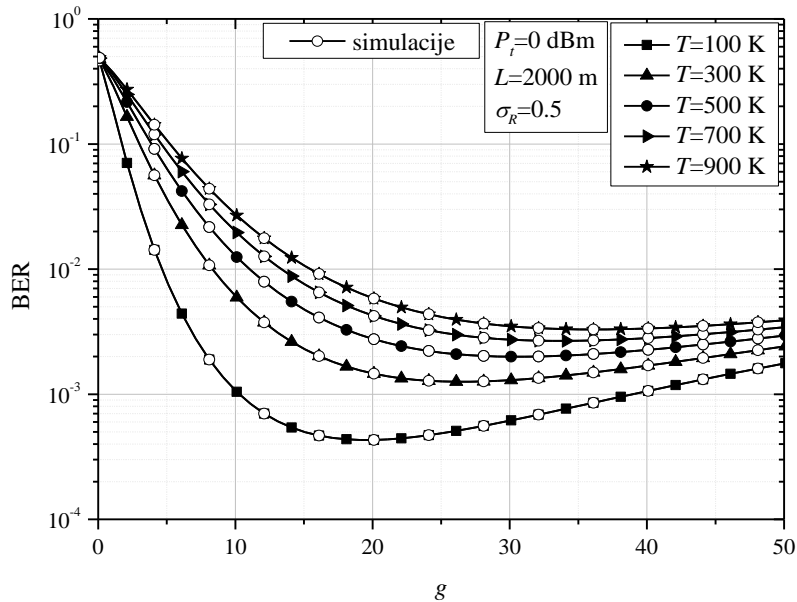
gde je  $f_{I_a}(I)$  gama-gama funkcija gustine verovatnoće definisana jednačinom (2.3.6). Zamenom (2.3.6) u (4.1.15), dobija se verovatnoća greške FSO sistema sa IM/DD OOK [120]

$$P_b = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \operatorname{erfc} \left( \frac{gRI_l 2P_t I}{\sqrt{2}(\sigma_{n/on} + \sigma_{n/off})} \right) dI, \quad (4.1.16)$$

gde su varijanse  $\sigma_{n/on}$  i  $\sigma_{n/off}$  definisane jednačinom (4.1.7). Prethodni izraz nije moguće izvesti u zatvorenom obliku, ali moguće je rezultate odrediti numeričkom integracijom u programu Mathematica.



**Slika 4.1.2.** Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite dužine linka



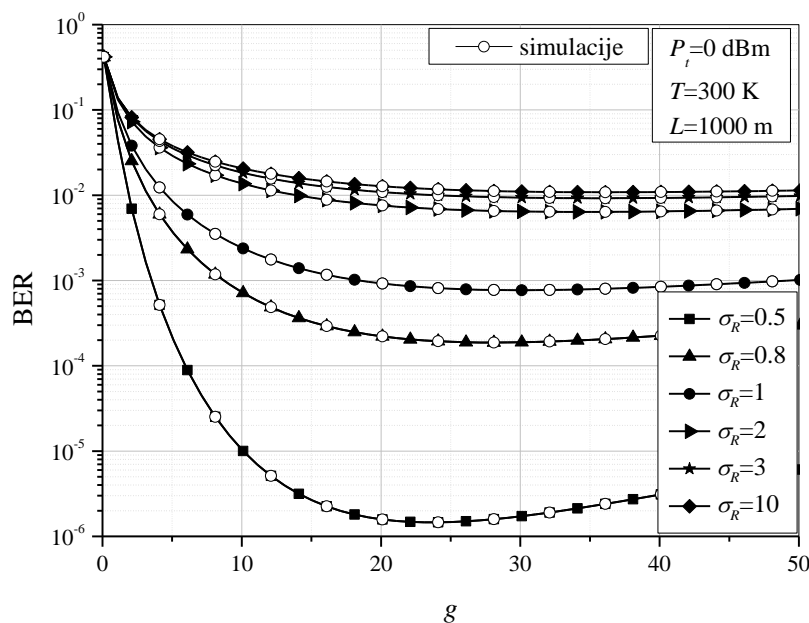
**Slika 4.1.3.** Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti temperature prijemnika

Na slici 4.1.2. prikazana je zavisnost verovatnoće greške od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti dužine FSO linka. Može se primetiti da postoji minimum prikazanih krivih, stoga je moguće izvršiti optimizaciju BER performansi pravilnim izborom pojačanja



fotodiode. Vrednost optimalnog pojačanja fotodiode zavisi od dužine FSO deonice. Što je veće rastojanje između predajnika i prijemnika, veća je vrednost optimalnog pojačanja. Na primer, optimalno pojačanje se povećava sa  $g = 24.1$  na  $g = 30.5$  kada se dužina deonice povećava sa  $L = 1$  km na  $L = 3$  km.

Uticaj temperature prijemnika na optimalnu vrednost APD pojačanja prikazan je na slici 4.1.3. Kada je  $T = 100$  K, optimalna vrednost APD pojačanja je  $g_{opt} = 19.6$ , a kada je  $T = 900$  K, važi da je  $g_{opt} = 36.1$ . Može se primetiti da promena temperature u velikoj meri utiče na optimalnu vrednost pojačanja fotodiode. Kada je vrednost pojačanja veoma velika, uticaj temperature na verovatnoću grešku je sve manji. Sa nižom temperaturom prijemnika, dolazi do poboljšanja BER performansi sistema.



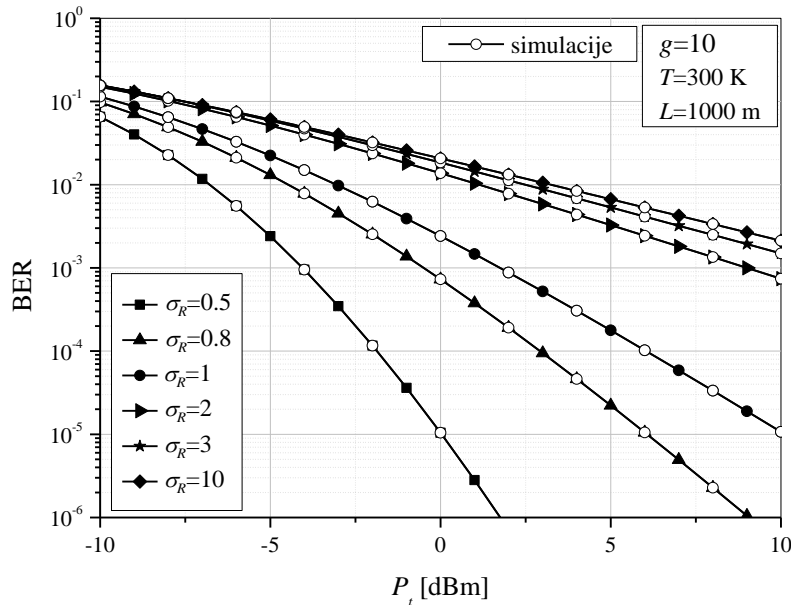
**Slika 4.1.4.** Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode u različitim uslovima atmosfere turbulencije

Sa slike 4.1.4. može se videti zavisnost verovatnoće greške od APD pojačanja za različite vrednosti jačine atmosfere turbulencije koja je određena Rojtovom standardnom devijacijom  $\sigma_R$ . Sistem ima bolje performanse kada je vrednost Rojtove varijanse manja, što odgovara povoljnijim uslovima prenosa. Uticaj APD pojačanja je manje izražen kada su uslovi prenosa FSO signala loši, tj. tokom jake atmosfere turbulencije. Takođe, vrednost optimalnog pojačanja fotodiode je manja u uslovima slabe atmosfere turbulencije.

Na slici 4.1.5. prikazana je zavisnost verovatnoće greške od srednje optičke snage na predaji u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Da bi se dostigla određena vrednost verovatnoće greške, potrebna je veća snaga  $P_t$  kada su uslovi prenosa gori (veća vrednost

$\sigma_R$ ). Kada je vrednost srednje predajne optičke snage 0 dBm, vrednost verovatnoće greške je  $10^{-5}$  i  $2 \times 10^{-2}$  u uslovima slabe ( $\sigma_R = 0.5$ ) i jake ( $\sigma_R = 10$ ) atmosfere turbulencije, respektivno.

Deo predstavljenih rezultata za verovatnoću greške publikovani su u [122], [124].



**Slika 4.1.5.** Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od optičke snage u različitim uslovima atmosfere turbulencije

Verovatnoća greške FSO sistema sa IM/DD i OOK i APD fotodiodom i primenom EGC diverziti tehnike sa dve grane na prijemu

U cilju poboljšanja performansi sistema primenom diverziti tehnike, u nastavku će biti prikazano izvođenje verovatnoće greške po bitu posmatranog FSO sistema koji koristi EGC (Equal Gain Combining) prijemnik sa dve grane.

Površina na koju padaju oba optička snopa jednaka je površini na koji pada snop kada diverziti nije primenjen [168]. Stoga, površina detektora kada je EGC sa dve grane primenjen,  $A_{EGC}$ , duplo je manja od površine detektora kada nema diverzitija,  $A$ , pa su ukupni atmosferski gubici ovog sistema

$$I'_{l,EGC} = \frac{A_{EGC}}{\pi \left( \frac{\theta L}{2} \right)^2} e^{-\beta_v L} = \frac{I'_l}{2}. \quad (4.1.17)$$

Varijanasa Gausove raspodele kojom se modeluje ukupni APD šum predstavlja zbir varijansi šuma prvog i drugog prijemnog sklopa

$$\sigma_{EGC}^2 = \begin{bmatrix} \sigma_{EGC/on}^2 \\ \sigma_{EGC/off}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{I_1/on}^2 + \sigma_{I_2/on}^2 \\ \sigma_{I_1/off}^2 + \sigma_{I_2/off}^2 \end{bmatrix}. \quad (4.1.18)$$

Pošto termički šum ne zavisi od APD prijemnika, biće isti za obe grane. Sa druge strane, dioda i fluktuacije intenziteta optičkog signala utiču na šot šum, pa su varijanse šot šuma prve i druge grane različite. Pošto je  $I_{EGC} = I_1 + I_2$ , na osnovu jednačine (4.1.7), varijansa ukupnog šuma u „on“ i „off“ stanju je

$$\sigma_{EGC}^2 = \begin{bmatrix} \sigma_{EGC/on}^2 \\ \sigma_{EGC/off}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + 2qg^2 F_A R I'_{1,EGC} 2P_t \Delta f I_{EGC} \\ 2 \cdot 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f \end{bmatrix}. \quad (4.1.19)$$

Kada se primenjuje EGC sa dve grane na prijemu, funkcija gustine verovatnoće intenziteta optičkog signala na izlazu EGC kombajnera,  $f_{I_{EGC}}(I)$ , predstavlja združenu funkciju gustine verovatnoće vektora  $\mathbf{I} = (I_1, I_2)$  [168]. Pod pretpostavkom da su intenziteti signala obe grane identične i nezavisne slučajne promenljive, njihove funkcije gustine verovatnoće biće iste, tj.  $f_{I_1}(I) = f_{I_2}(I) = f_{I_a}(I)$ . Stoga, funkcija gustine verovatnoće intenziteta signala na izlazu iz EGC kombajnera sa dve grane određena je kao [120]

$$f_{I_{EGC}}(I) = \int_0^I f_{I_a}(I - I_2) f_{I_a}(I_2) dI_2. \quad (4.1.20)$$

Verovatnoće greške FSO sistema može se odrediti usrednjavanjem izraza datog jednačinom (4.1.13) po  $I_{EGC}$  kao [120]

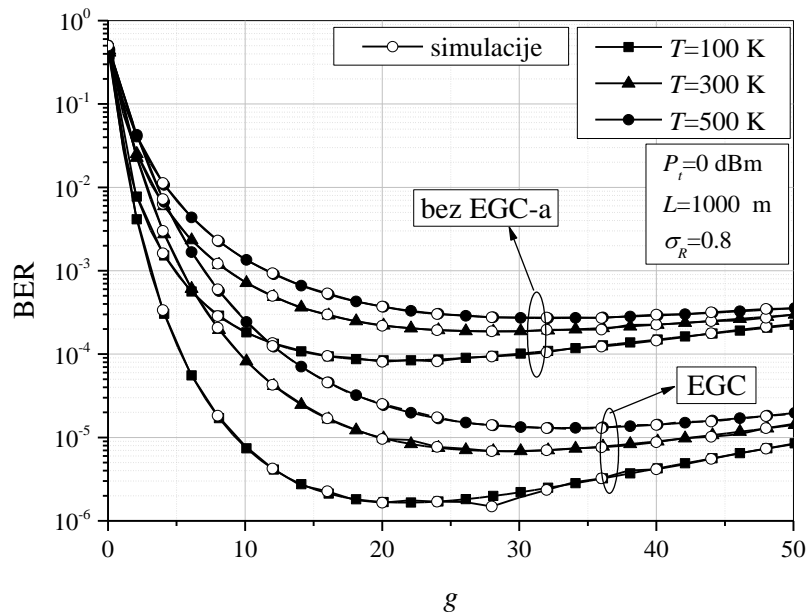
$$P_b = \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left( \frac{g R I'_{1,EGC} 2P_t I_{EGC}}{\sqrt{2} (\sigma_{EGC/on} + \sigma_{EGC/off})} \right) f_{I_{EGC}}(I_{EGC}) dI_{EGC}. \quad (4.1.21)$$

Dobijeni rezultati u ovom delu četvrtog odeljka publikovani su u radu [120].

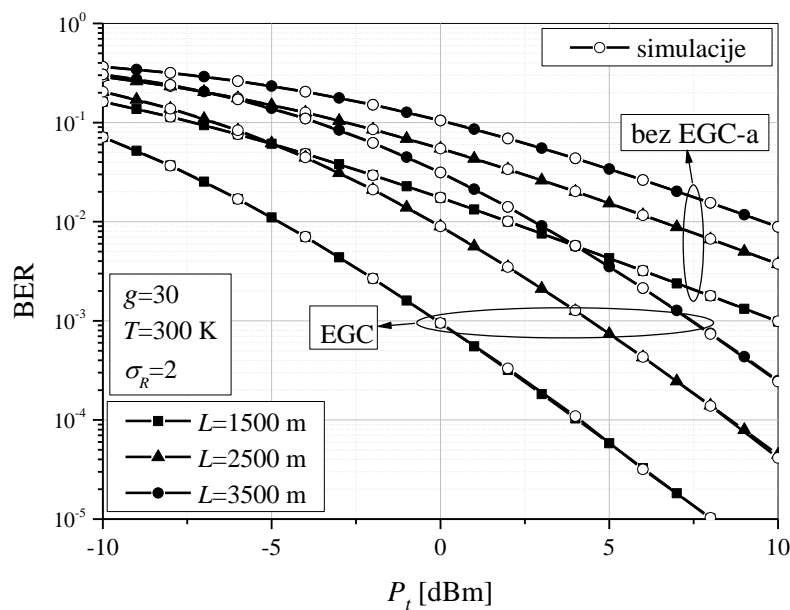
Na slici 4.1.6. prikazana je zavisnost verovatnoće greške FSO sistema od APD pojačanja za različite temperature prijemnika. Posmatra se sistem sa i bez EGC prijemnika. Promenom temperature  $T$  menja se vrednost optimalnog pojačanja fotodiode. Sa promenom temperature od  $T = 100$  K do  $T = 500$  K, optimalno APD pojačanje menja se sa  $g_{opt} = 21.08$  na  $g_{opt} = 32.03$ . Primena EGC diverziteti tehnike na prijemu dovodi da povećanja optimalne vrednosti APD pojačanja. Performanse sistema su poboljšane smanjenjem temperature.

Zavisnost verovatnoće greške od srednje optičke snage na predaji za različite vrednosti dužine FSO linka prikazana je na slici 4.1.7. Posmatra se FSO sistem sa i bez EGC kombinovanja sa dve grane na prijemu. U skladu sa očekivanjima, veća vrednost verovatnoće

greške dobija se smanjenjem optičke snage i/ili povećanjem dužine FSO linka. Ako je potrebna vrednost verovatnoće greške  $10^{-2}$ , kod sistema bez EGC diverzitija na prijemu potrebno je povećati vrednost optičke snage  $P_t$  za 7.59 dBm kada se dužina linka menja sa  $L = 1500$  m na  $L = 3500$  m. Kada je  $L = 1500$  m i potrebna vrednost verovatnoće greške  $10^{-3}$ , primenom EGC tehnike sa dve grane na prijemu dobija se ušteda optičke snage  $P_t$  od 10.1 dBm, ali je realizacija sistema kompleksnija.



Slika 4.1.6. Verovatnoća greške FSO sistema, sa i bez EGC prijemnika, u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti temperature prijemnika



Slika 4.1.7. Verovatnoća greške FSO sistema, sa i bez EGC prijemnika, u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti dužine FSO deonice

## 4.2. Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom

U nastavku je prikazana analiza verovatnoće greške po bitu FSO sistema sa intenzitetskom modulacijom podnosiocem u kombinaciji sa BPSK. Smatra se da je optički signal pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije i greške pozicioniranja.

Ovakav sistem podrazumeva da su biti koji nose informaciju najpre modulirani pomoću standardnog BPSK modulatora, čiji izlaz moduliše intenzitet optičkog lasera, pri čemu se dodaje jednosmerna komponenta. Nakon prenosa kroz atmosferski kanal, optički signal na prijemu je [125]

$$s = P_t I \left[ 1 + m \cos(2\pi f_c t + x_i \pi) \right], \quad (4.2.1)$$

gde  $x_i \in \{0,1\}$  predstavlja bit koji nosi informaciju, i  $f_c$  je frekvencija podnosioca. Indeks modulacije označen sa  $m$  je zanemaren u nastavku analize zbog pretpostavke da je  $m = 1$ .

Nakon uklanjanja jednosmerne komponente i konverzije optičkog signala u električni pomoću APD fotodiode pojačanja  $g$ , električni signal definisan je kao

$$s_e = g R P_t I \cos(2\pi f_c t + x_i \pi) + \mathcal{G}, \quad (4.2.2)$$

gde  $\mathcal{G}$  predstavlja šum APD prijemnika. Sledi demodulacija signala pomoću BPSK detektora, čiji izlaz predstavlja električni signal

$$r = \begin{cases} \frac{1}{2} g R P_t I + n, & x_i = 1, \\ -\frac{1}{2} g R P_t I + n, & x_i = 0, \end{cases} \quad (4.2.3)$$

gde  $n$  predstavlja komponentu šuma u fazi APD prijemnika, koji se sastoji od termičkog šuma i šot šuma kao

$$n = n_{th} + n_{sh}. \quad (4.2.4)$$

Kao što je već objašnjeno, termički šum se modeluje Gausovom raspodelom nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{th}^2$ , koja je ranije data jednačinom (2.2.2). Šot šum se takođe modeluje kao Gausov slučajni proces, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{sh}^2$ , koja je definisana jednačinom (2.2.3), i za posmatrani SIM-BPSK FSO sistem sa APD prijemnikom je

$$\sigma_{sh}^2 = 2qg^2 F_A R \frac{1}{2} P_t \Delta f. \quad (4.2.5)$$

Pošto su termički i šot šum nezavisne Gausove slučajne promenljive, ukupni APD šum se takođe se modeluje Gausovom raspodelom sa varijansom određenom kao

$$\sigma_n^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh}^2 = 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + qg^2 F_A R P_t \Delta f. \quad (4.2.6)$$

Na osnovu (4.2.3) i (4.2.6), definiše se trenutni SNR

$$\gamma = \frac{\left(\frac{1}{2} g R P_t I\right)^2}{2\sigma_n^2} = \frac{(g R P_t I)^2}{8 \left(4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + qg^2 F_A R P_t \Delta f\right)}. \quad (4.2.7)$$

Verovatnoća greške po bitu SIM-BPSK FSO sistema sa APD prijemnikom može se odrediti pomoću dobro poznate formule za verovatnoću greške BPSK modulacije. Uslovna verovatnoća greške posmatranog sistema je definisana kao [141]

$$P_{b/I} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{g R P_t I}{2\sqrt{2\sigma_n^2}}\right). \quad (4.2.8)$$

Zamenom (4.2.7) u (4.2.8), verovatnoća greške se dobija usrednjavanjem izraza (4.2.8) po intenzitetu primljenog signala kao

$$P_b = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{g R P_t I}{2\sqrt{2\sigma_n^2}}\right) f_I(I) dI, \quad (4.2.9)$$

gde je  $f_I(I)$  funkcija gustine verovatnoće definisana jednačinom (2.3.32). Zamenom (2.3.32) u (4.2.9), dobija se izraz za verovatnoću greške po bitu FSO sistema sa SIM-BPSK i APD prijemnikom [125]

$$P_b = \frac{\xi^2 \alpha \beta}{2A_0 I_l \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{g R P_t I}{2\sqrt{2\sigma_n^2}}\right) G_{1,3}^{3,0}\left(\frac{\alpha \beta}{A_0 I_l} I \middle| \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1\right) dI, \quad (4.2.10)$$

gde je varijansa  $\sigma_n^2$  definisana jednačinom (4.2.6). Verovatnoća greške u prethodnoj jednačini sadrži integral koji se ne može rešiti u zatvorenom obliku, pa su rezultati dobijeni numeričkom integracijom u programu Mathematica.

U nastavku biće prikazana analiza verovatnoće greške dva granična slučaja FSO sistema.

*Sistem u prisustvu termičkog šuma (TNL – Thermal-Noise-Limited system)*

Za dalju analizu sistema definiše se Q-faktor termičkog šuma kao

$$\hat{Q}_{th} = \frac{gRP_t}{2\sigma_{th}} = \frac{gRP_t}{4} \sqrt{\frac{R_L}{k_B T F_n \Delta f}}. \quad (4.2.11)$$

Na osnovu prethodnog izraza, verovatnoća greške u (4.2.9) može se zapisati kao

$$P_b = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left( \frac{\hat{Q}_{th} I}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \hat{Q}_{th} I n_r}} \right) f_I(I) dI, \quad (4.2.12)$$

gde je konstanta  $n_r$  data u obliku

$$n_r = qgF_A \sqrt{\frac{R_L \Delta f}{k_B T F_n}}. \quad (4.2.13)$$

Na osnovu prikazanih jednačina može se definisati odnos šot i termičkog šuma kao  $n_r \hat{Q}_{th} I$ .

Kod sistema u prisustvu termičkog šuma važi da je  $n_r \rightarrow 0$ , pa je verovatnoća greške na osnovu (4.2.12) i (2.3.32) određena kao

$$P_b^{th} = \frac{\xi^2 \alpha \beta}{2A_0 I_t \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left( \frac{\hat{Q}_{th} I}{\sqrt{2}} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha \beta}{A_0 I_t} I \middle| \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \right) dI. \quad (4.2.14)$$

Predstavljanjem komplementarne funkcije greške preko Mejerove  $G$ -funkcije korišćenjem identiteta (A.14), dobija se

$$P_b^{th} = \frac{\xi^2 \alpha \beta}{2A_0 I_t \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \sqrt{\pi}} \times \int_0^{\infty} G_{1,2}^{2,0} \left( \frac{\hat{Q}_{th}^2 I^2}{2} \middle| 0, \frac{1}{2} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha \beta}{A_0 I_t} I \middle| \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \right) dI. \quad (4.2.15)$$

Prethodni integral rešava se primenom pravila za rešavanje integrala koji sadrži proizvod dve Mejerova  $G$ -funkcije, koje je definisano pravilom (A.15), uz pomoć (A.3), (A.4), (A.16) i (A.17), pri čemu se dobija

$$P_b^{th} = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{7,4}^{2,6} \left( \left( \frac{2\sqrt{2}A_0 I_l \hat{Q}_{th}}{\alpha\beta} \right)^2 \left| \begin{array}{l} \frac{1-\xi^2}{2}, \frac{2-\xi^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2}, -\frac{\xi^2}{2}, \frac{1-\xi^2}{2} \end{array} \right. \right) \quad (4.2.16)$$

Prikazano rešenje sadrži Mejerovu  $G$ -funkciju koja se dalje može transformisati primenom pravila (A.18), pa je prethodni izraz za verovatnoću greške zapisan kao

$$P_b^{th} = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{4,7}^{6,2} \left( \left( \frac{\alpha\beta}{2\sqrt{2}A_0 I_l \hat{Q}_{th}} \right)^2 \left| \begin{array}{l} 1, \frac{1}{2}, \frac{2+\xi^2}{2}, \frac{1+\xi^2}{2} \\ \frac{1+\xi^2}{2}, \frac{\xi^2}{2}, \frac{1+\alpha}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{1+\beta}{2}, \frac{\beta}{2}, 0 \end{array} \right. \right) \quad (4.2.17)$$

Nakon toga, vrši se permutacija parametara Mejerove  $G$ -funkcije primenom (A.7) i (A.8), i zatim smanjenje reda dobijene Mejerove  $G$ -funkcije primenom identiteta (A.9). Izraz za verovatnoću greške sistema u prisustvu termičkog šuma je

$$P_b^{th} = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{3,6}^{5,2} \left( \left( \frac{\alpha\beta}{2\sqrt{2}A_0 I_l \hat{Q}_{th}} \right)^2 \left| \begin{array}{l} \frac{1}{2}, 1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right) \quad (4.2.18)$$

*Sistem u prisustvu šot šuma (SNL – Shot-Noise-Limited system)*

Kod sistema u prisustvu šot šuma važi da je  $n_r \gg 1$ . Na osnovu jednačine (4.2.12) verovatnoće greške je određena kao

$$P_b^{sh} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left( \frac{\sqrt{\hat{Q}_{th}} I}{\sqrt{2n_r}} \right) f_l(I) dI. \quad (4.2.19)$$

Zamenom (2.3.32) u (4.2.19), i predstavljanjem komplementarne funkcije greške preko Mejerove  $G$ -funkcije korišćenjem identiteta (A.14), dobija se



$$P_b^{sh} = \frac{\alpha\beta\xi^2}{2A_0I_l\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sqrt{\pi}} \times \int_0^\infty G_{1,2}^{2,0} \left( \frac{\hat{Q}_{th}I}{2n_r} \middle| \begin{matrix} 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha\beta}{A_0I_l} I \middle| \begin{matrix} \xi^2 \\ \xi^2-1, \alpha-1, \beta-1 \end{matrix} \right) dI. \quad (4.2.20)$$

Integral u (4.2.20) rešen je primenom pravila (A.20) kao

$$P_b^{sh} = \frac{\xi^2}{2\sqrt{\pi}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{4,3}^{2,3} \left( \frac{A_0I_l\hat{Q}_{th}}{2n_r\alpha\beta} \middle| \begin{matrix} 1-\xi^2, 1-\alpha, 1-\beta, 1 \\ \frac{1}{2}, 0, -\xi^2 \end{matrix} \right). \quad (4.2.21)$$

Mejerova  $G$ -funkcija može se transformisati primenom identiteta (A.18), nakon čega je izraz za verovatnoću greške sistema u prisustvu šot šuma izveden kao

$$P_b^{sh} = \frac{\xi^2}{2\sqrt{\pi}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{3,4}^{3,2} \left( \frac{2n_r\alpha\beta}{A_0I_l\hat{Q}_{th}} \middle| \begin{matrix} \frac{1}{2}, 1, 1+\xi^2 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right). \quad (4.2.22)$$

Pošto se analizira sistema u prisustvu šot šuma, definiše se Q-faktor šot šuma kao

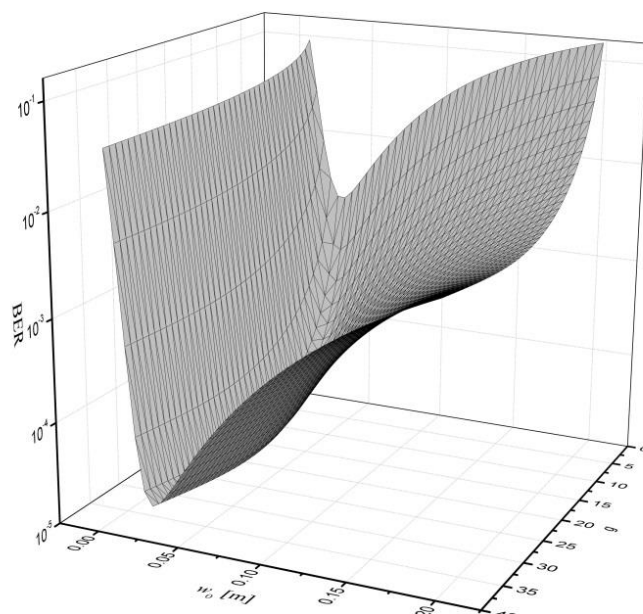
$$\hat{Q}_{sh} = \sqrt{\frac{P_t R}{2qF_A \Delta f}} = \sqrt{\frac{\hat{Q}_{th}}{n_r}}. \quad (4.2.23)$$

Izraz za verovatnoću greške posmatranog sistema izražen preko Q-faktora šot šuma je

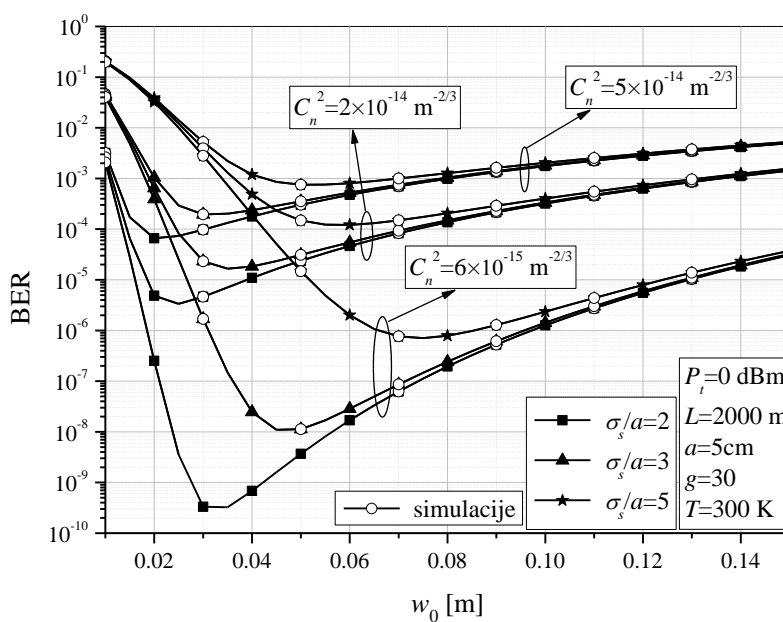
$$P_b^{sh} = \frac{\xi^2}{2\sqrt{\pi}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{3,4}^{3,2} \left( \frac{2\alpha\beta}{A_0I_l\hat{Q}_{sh}^2} \middle| \begin{matrix} \frac{1}{2}, 1, \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right). \quad (4.2.24)$$

Prikazani rezultati u ovom delu disertacije dati su u radu [125].

Na slici 4.2.1. prikazan je 3D grafik koji oslikava zavisnost verovatnoće greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa i pojačanja fotodiode. Mogu se primetiti minimumi verovatnoće greške za određene optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnika, kao i za optimalne vrednosti pojačanja fotodiode. Stoga, pravilnim izborom FSO predajnika/prijemnika mogu se znatno poboljšati performanse sistema. Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa i pojačanja fotodiode zavise od parametra FSO sistema i kanala, što će biti analizirano u nastavku.



**Slika 4.2.1.** 3D grafik zavisnosti verovatnoće greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom

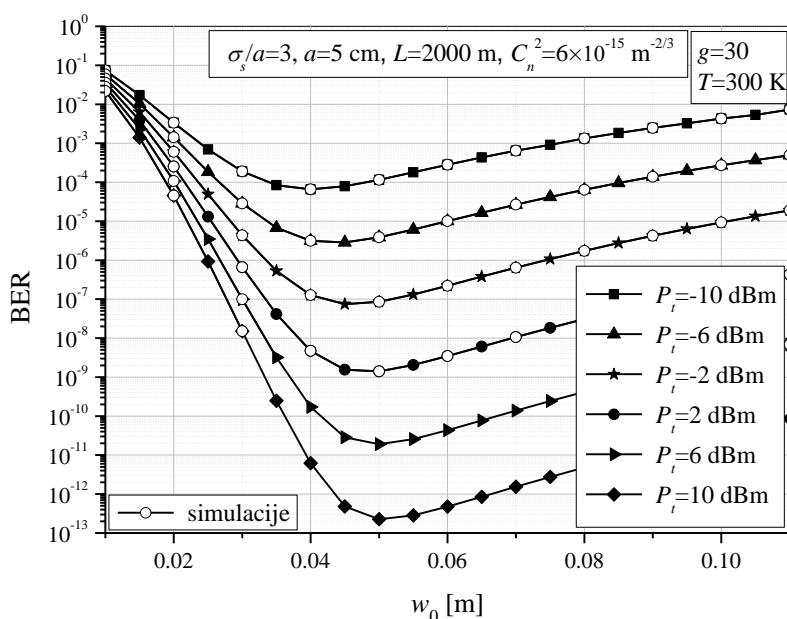


**Slika 4.2.2.** Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa

Slika 4.2.2. prikazuje zavisnost verovatnoće greške po bitu od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera. Posmatra se FSO prenos signala kroz sredinu koja je pod uticajem različitih uslova atmosfere turbulencije. Performanse sistema su najbolje u uslovima slabe turbulencije, kao i kada je vrednost parametra  $\sigma_s/a$  najmanja. Za određene optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa, koje su označene sa  $w_{0opt}$ , može se uočiti minimum

verovatnoće greške. Performanse sistema mogu biti znatno poboljšane odgovarajućim izborom FSO predajnog lasera i teleskopa tokom projektovanja sistema. Sa slike 4.2.2. može se videti da vrednost  $w_{0opt}$  u velikoj meri zavisi od normalizovane standardne devijacije džitera. Takođe, uslovi atmosferske turbulencije imaju veoma veliki uticaj na ovu optimalnu vrednost, naročito kada je džiter greške pozicioniranja jak.

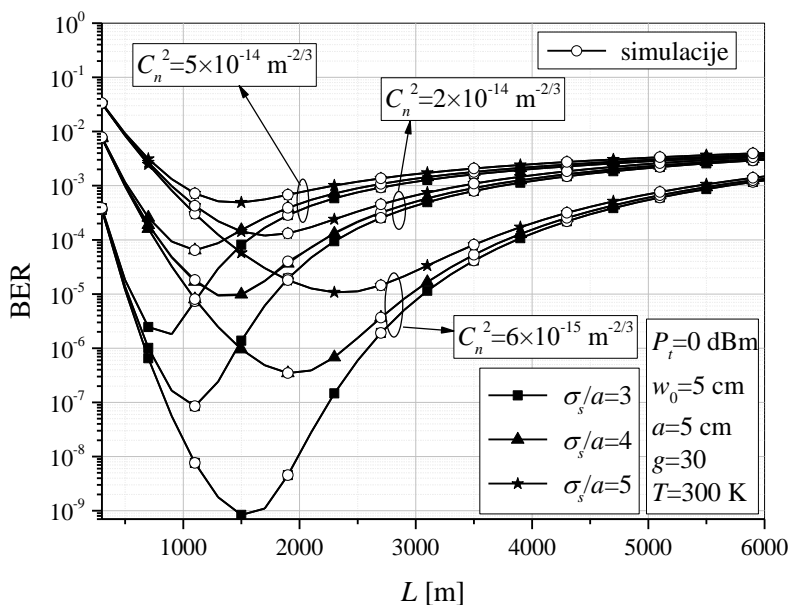
Zavisnost verovatnoće greške od širine optičkog snopa na izlazu iz FSO predajnika za različite vrednosti optičke snage na predaji prikazana je na slici 4.2.3. Kao što je i očekivano, veća vrednost snage dovodi do poboljšanja performansi sistema. Vrednosti minimuma verovatnoće greške i vrednosti  $w_{0opt}$  zavise od optičke snage na predaji.



**Slika 4.2.3.** Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od širine snopa na izlazu iz predajnog teleskopa za različite vrednosti optičke snage

**Tabela 4.1.** Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa  $w_{0opt}$  [cm]

$P_t$ [dBm]	slaba atmosferska turbulencija			umerena atmosferska turbulencija			jaka atmosferska turbulencija		
	$\sigma_s/a=1$	$\sigma_s/a=3$	$\sigma_s/a=5$	$\sigma_s/a=1$	$\sigma_s/a=3$	$\sigma_s/a=5$	$\sigma_s/a=1$	$\sigma_s/a=3$	$\sigma_s/a=5$
-10	1.5	4	5.95	1.1	3.25	5.1	0.95	3	4.75
0	1.65	4.7	4.7	1.15	3.55	5.8	1	3.15	5.25
10	1.65	5.05	8.25	1.15	3.65	6.05	1	3.2	5.35



**Slika 4.2.4.** Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od dužine FSO linka

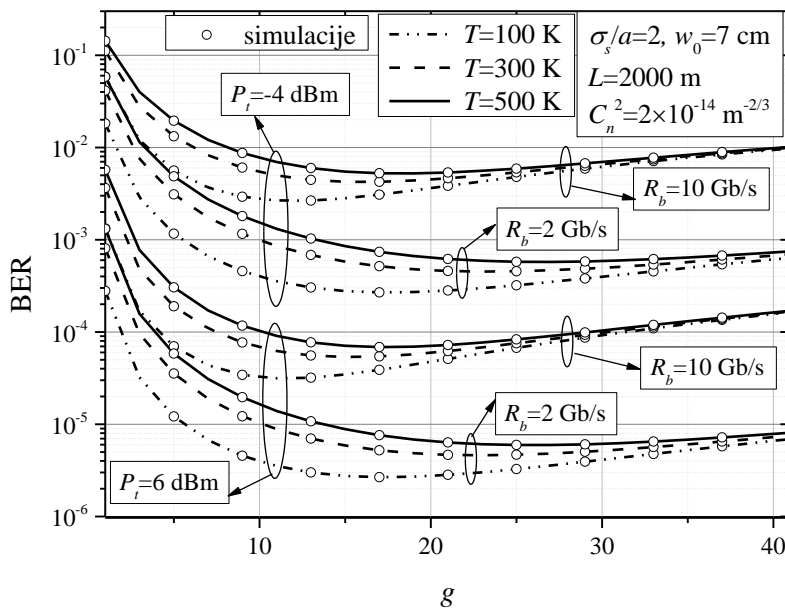
Na osnovu prethodnih komentara, u cilju ispitivanja uticaja parametra sistema i FSO kanala na vrednosti  $w_{0opt}$ , izvršen je proračun minimuma verovatnoće greške i odgovarajućih optimalnih vrednosti širine snopa. Uzimajući u obzir parametre sa prethodnih slika (slike 4.2.2. i 4.2.3.), izračunate su optimalne vrednosti širine optičkog snopa za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera i optičke snage na predaji u različitim uslovima atmosfere turbulencije, koje su prikazane u Tabeli 4.1. Normalizovana standardna devijacija džitera ima najveći uticaj na vrednost širine snopa  $w_{0opt}$ . Kada je  $\sigma_s/a=1$ , atmosfere turbulencija veoma malo utiče na  $w_{0opt}$ . Sa druge strane, kada je džiter jači, pogoršanje uslova turbulencije dovodi do smanjenja  $w_{0opt}$ , naročito kada je optička snaga velika. Povećanje optičke snage za posledicu daje veće vrednosti  $w_{0opt}$  samo kada je vrednost  $\sigma_s/a$  velika. Kada je  $\sigma_s/a=1$ , smanjenje optičke snage dovodi do veoma male promene optimalne vrednosti  $w_{0opt}$ . Sve u svemu, kada je vrednost  $\sigma_s/a$  relativno velika, predajna optička snaga i uslovi atmosfere turbulencije imaju bitan uticaj pri odabiru FSO predajnika. Kada je  $\sigma_s/a=1$ , vrednost  $w_{0opt}$  ne zavisi od ostalih parametra sistema. Standardna devijacija džitera određena je stepenom neusklađenosti predajnog lasera i detektora na prijemu. Mala vrednost  $\sigma_s/a$  znači da je vrednost parametra  $\xi$  velika, pa uticaj greške pozicioniranja može biti zanemaren. Sa druge strane, velika vrednost  $\sigma_s/a$  povezana

je sa velikim stepenom neslaganja FSO predajnika i prijemnika, što čini uticaja greške pozicioniranja dominantnim.

Zavisnost verovatnoće greške sistema od dužine FSO linka za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere prikazana je na slici 4.2.4. Primećeno je postojanje minimuma verovatnoće greške za određene optimalne vrednosti dužine FSO linka, označen sa  $L_{opt}$ . Usled divergencije optičkog snopa, njegova širina na izlazu iz predajnog teleskopa je manja nego na prijemu. Ovo širenje snopa zavisi od dužine FSO deonice između predajnika i prijemnika. Što je veća dužina FSO linka, primljena optička snaga je manja, što dovodi do pogoršanja performansi sistema.

**Tabela 4.2.** Optimalne vrednosti dužine FSO linka  $L_{opt}$  [m]

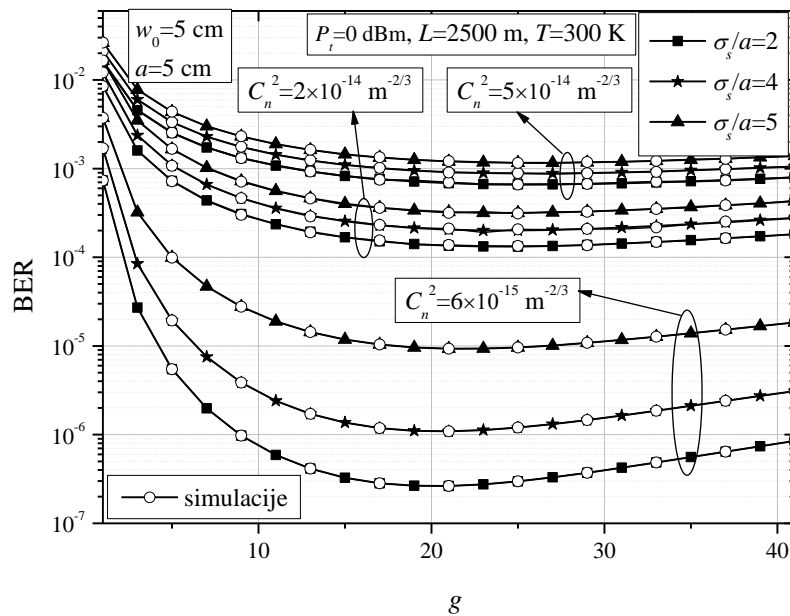
$P_t$ [dBm]	slaba atmosferska turbulencija			umerena atmosferska turbulencija			jaka atmosferska turbulencija		
	$\sigma_s/a=2$	$\sigma_s/a=4$	$\sigma_s/a=6$	$\sigma_s/a=2$	$\sigma_s/a=4$	$\sigma_s/a=6$	$\sigma_s/a=2$	$\sigma_s/a=4$	$\sigma_s/a=6$
-10	900	1700	2200	700	1200	1800	500	900	1600
0	1100	2000	2800	800	1400	2100	600	1100	1900
10	1300	2200	3100	800	1500	2300	600	1200	2000



**Slika 4.2.5.** Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od pojačanja fotodiode za različite vrednosti temperature prijemnika, optičke snage i za različite bitske brzine

Tabela 4.2. prikazuje procenjene optimalne vrednosti dužine FSO linka za koje se dobijaju minimalne vrednosti verovatnoće greške tokom različitih uslova prenosa. Što je

slabiji džiter, pozicioniranje lasera je bolje, pa je optimalna dužina linka kraća. U tom slučaju predajna optička snaga i uslovi turbulencije imaju veoma slab uticaj na  $L_{opt}$ . Kada se posmatra sistem sa jakim džiterom, pozicioniranje lasera na predaji i detektora na prijemu je veoma loše, pa se vrednost  $L_{opt}$  značajno menja prilikom promene ostalih parametra sistema i kanala. Nepovoljni uslovi turbulencije za posledicu imaju kraće optimalne razdaljine između predajnika i prijemnika. Veća vrednost optičke snage reflektuje se u većim vrednostima  $L_{opt}$ .

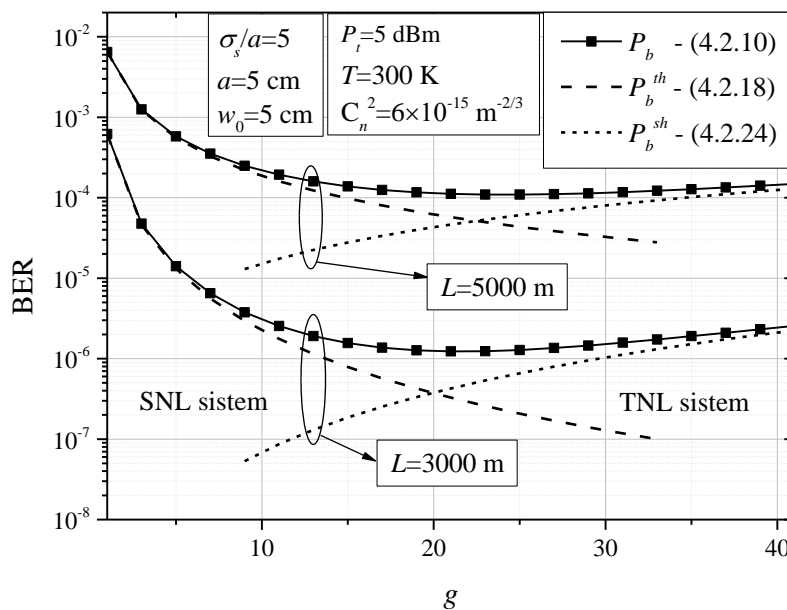


**Slika 4.2.6.** Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od pojačanja fotodiode za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere turbulencije

Pored širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa, pojačanje APD fotodiode je takođe parametar kojim se može izvršiti optimizacija performansi sistema. Na slici 4.2.5. prikazana je zavisnost verovatnoće greške od APD pojačanja za različite vrednosti temperature prijemnika  $T$ , optičke snage  $P_t$  i bitske brzine  $R_b$ . Sa promenom parametra sistema, menja se i vrednosti minimuma verovatnoće greške. Prilikom projektovanja FSO sistema, podešavanjem optimalnog pojačanja fotodiode može se uticati na verovatnoću greške. Sa slike se može videti da porast temperatura sa  $T = 100$  K na  $T = 300$  K ( $R_b = 2$  Gb/s,  $P_t = 6$  dBm), dovodi do povećavanja optimalne vrednosti pojačanja fotodiode sa  $g_{opt} = 17$  na  $g_{opt} = 23$ . Kada je vrednost APD pojačanja veoma velika (preko 40), uticaj temperature na verovatnoću greške može se zanemariti. Optimalna vrednost pojačanja fotodiode značajno se menja sa promenom bitske brzine. Na primer, povećanjem bitske brzine sa 2 na 10 Gb/s ( $T = 300$  K,  $P_t = 6$  dBm),  $g_{opt}$  se menja sa 23 na 15. Veće bitske brzine daju manje optimalne vrednosti APD pojačanja. Može se primetiti da vrednost snage  $P_t$  ne

utiče na optimalnu vrednost pojačanja  $g_{opt}$ . Stoga, vrednost predajne optičke snage nije od značaja na najperspektivnije podešavanje APD pojačanja fotodiode.

Verovatnoće greške u zavisnosti od APD pojačanja za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere prikazana je na slici 4.2.6. Vrednost optimalnog pojačanja razlikuje se u različitim uslovima turbulencije, dok je skoro ista za različite vrednosti standardne devijacije džitera. Na primer, sa slike 4.2.6. mogu se očitati sledeće vrednosti optimalnog APD pojačanja:  $g_{opt} = 21$  tokom slabe atmosfere ( $\sigma_s/a = 2$  ili  $\sigma_s/a = 5$ ), dok je  $g_{opt} = 25$  tokom jake atmosfere ( $\sigma_s/a = 2$  ili  $\sigma_s/a = 5$ ).

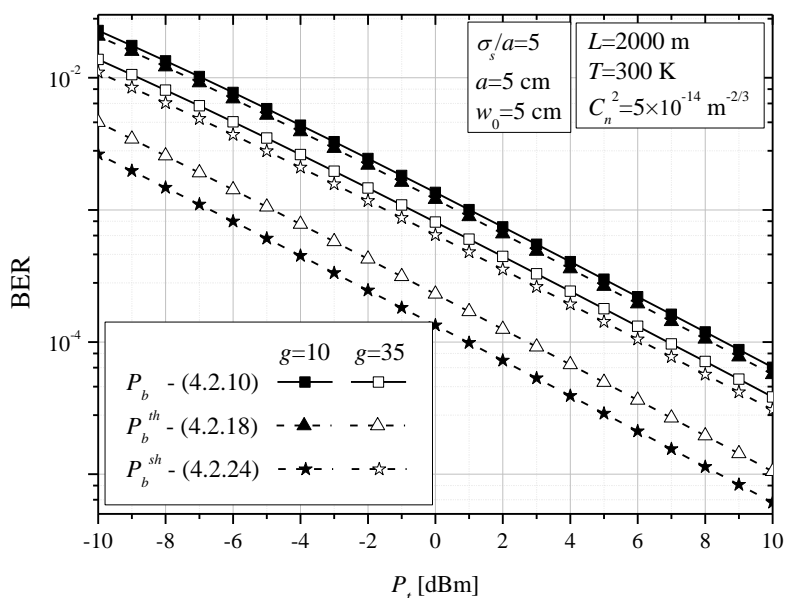


**Slika 4.2.7.** Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od pojačanja fotodiode za različite vrednosti dužine FSO linka

Verovatnoća greške FSO sistema u zavisnosti od pojačanja fotodiode, dok su vrednosti dužine FSO linka  $L = 3000$  m i  $L = 5000$  m, prikazana je na slici 4.2.7. Vrednost optimalnog APD pojačanja je veća pri dužim FSO deonicama. Na primer, optimalno APD pojačanje se povećava sa  $g_{opt} = 21$  na  $g_{opt} = 25$ , kada se razdaljina između predajnika i prijemnika povećava sa 3000 m na 5000 m. Na slici 4.2.7 takođe su prikazani rezultati za TNL i SNL sisteme, dobijeni na osnovu jednačina (4.2.18) i (4.2.24), respektivno. Kada je vrednost pojačanja APD fotodiode mala, odgovarajuća verovatnoća greške skoro je ista kao i performanse sistema u prisustvu termičkog šuma. Kada se vrednost APD pojačanja povećava, SNL kriva koja se odnosi na sistem u prisustvu šot šuma približava se performansama opšteg sistema. Drugim rečima, kada je vrednost pojačanja  $g$  mala, termički šum je dominantan, pa

se APD fotodioda ponaša kao PIN, dok je za velike vrednosti APD pojačanja dominantan šot šum. Na kraju, sa slike se može zaključiti da je  $P_e \geq \max(P_b^{th}, P_b^{sh})$ .

Na slici 4.2.8 prikazana je zavisnost verovatnoće greške sistema od predajne optičke snage, dok APD pojačanje uzima vrednosti  $g = 10$  i  $g = 35$ . Prikazani su i rezultati za TNL i SNL sisteme. Može se primetiti da sistem ima najgore performanse kada su oba šuma uzeta u obzir nezavisno od vrednosti APD pojačanja. U slučaju  $g = 10$ , sistem ima najgore performanse kada su oba šuma uzeta u obzir, dok su malo bolje performanse uočene za sistem pod uticajem termičkog šuma. Najmanja vrednost verovatnoće greške primećena je kod sistema u prisustvu šot šuma. Posmatrajući krive za sistem kada je  $g = 35$ , dolazi do obrnutog efekta, tj. performanse su najbolje za sistem u prisustvu termičkog šuma.



*Slika 4.2.8. Verovatnoća greške SIM-BPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti pojačanja fotodiode*

### 4.3. Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema sa APD fotodiodom

Slično kao u prethodnom odeljku, nastavak disertacije bavi se analizom verovatnoće greške FSO sistema sa intenzitetskom modulacijom podnosiocem u kombinaciji sa BDPSK, dok se APD fotodioda koristi na prijemu. Fluktuacije intenziteta primljenog optičkog signala posledica su gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja.

Nakon prenosa kroz atmosferski kanal primljeni optički signal je definisan kao



$$r_{opt} = P_t I [1 + ms]. \quad (4.3.1)$$

gde je  $s$  električni signal na izlazu BDPSK modulatora koji se nalazi u sklopu predajnog dela FSO sistema. Nakon direktne detekcije, uklanjanja jednosmerne komponente i konverzije optičkog signala u električni, vrši se BDPSK detekcija, nakon čega signal ima oblik

$$r = mgRP_t I + n, \quad (4.3.2)$$

gde je  $m = 1$  indeks modulacije, dok je  $n$  ukupni šum APD prijemnika, koji se, kao i u prethodnom slučaju, sastoji od termičkog šuma,  $n_{th}$ , i šot šuma,  $n_{sh}$ . Modeluje se Gausovom raspodelom nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_n^2$ , koja predstavlja zbir varijansi termičkog i šot šuma, i data je kao

$$\sigma_n^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh}^2 = 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + 2qg^2 F_A R P_t I \Delta f. \quad (4.3.3)$$

Trenutni SNR je u ovom slučaju definisan ka

$$\gamma = \frac{(gRP_t I)^2}{2\sigma_n^2} = \frac{(gRP_t I)^2}{2 \left( 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + 2qg^2 F_A R P_t I \Delta f \right)}. \quad (4.3.4)$$

Verovatnoće greške FSO sistema, koji koristi SIM-BDPSK i APD prijemnik, može se odrediti na osnovu poznatog izraza za verovatnoću greške BDPSK sistema koja se koristi kod RF komunikacija [121]. Uslovna verovatnoće greška sistema definisana je kao [141]

$$P_{b|\gamma(I)} = \frac{1}{2} \exp(-\gamma). \quad (4.3.5)$$

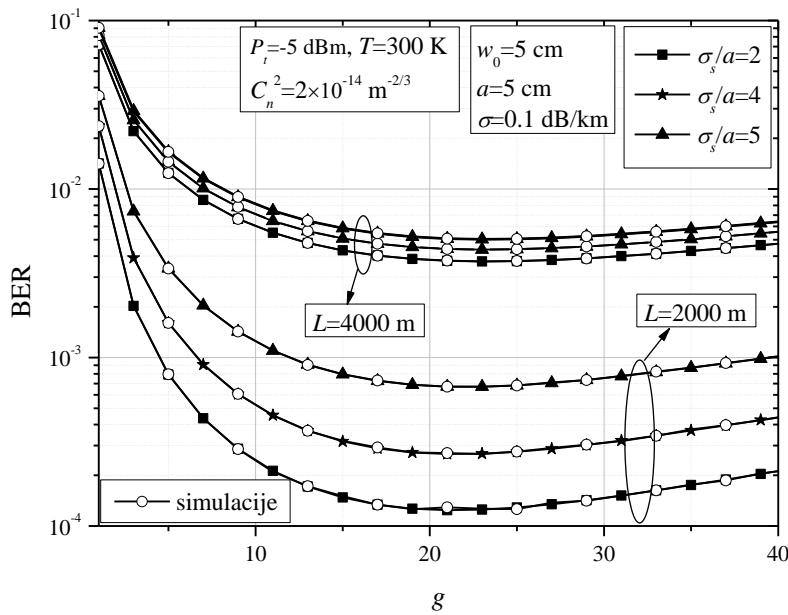
Korišćenjem izraza za trenutni SNR (4.3.4), verovatnoća greške posmatranog sistema se dobija usrednjavanjem jednačina (4.3.5) po intenzitetu primljenog signala kao

$$P_b = \frac{1}{2} \int_0^\infty \exp \left( - \frac{(gRP_t I)^2}{2 \left( 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + 2qg^2 F_A R P_t I \Delta f \right)} \right) f_I(I) dI, \quad (4.3.6)$$

gde je  $f_I(I)$  funkcija gustine verovatnoće fluktuacija intenziteta optičkog signala, koja je ranije data jednačinom (2.3.32). Zamenom (2.3.32) u (4.3.6), dobija se izraz za verovatnoću greške FSO sistema sa SIM-BDPSK i APD prijemnikom [121]

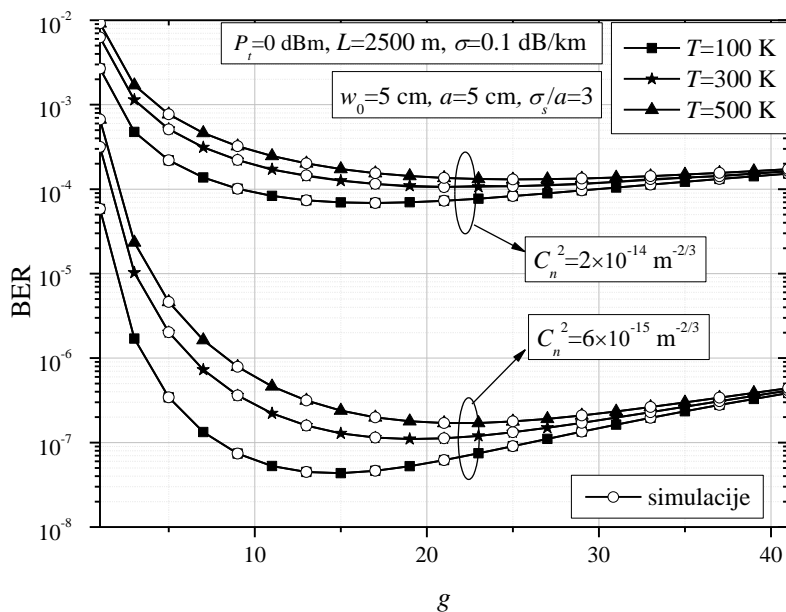
$$P_b = \frac{\xi^2 \alpha \beta}{2A_0 I_t \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \int_0^\infty \exp \left( - \frac{(g R P_t I)^2}{2 \left( 4k_B \frac{T}{R_L} F_n \Delta f + 2qg^2 F_A R P_t I \Delta f \right)} \right) \times G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\alpha \beta}{A_0 I_t} I \middle| \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \right) dI. \quad (4.3.7)$$

Pošto prethodni izraz sadrži integral koji se ne može rešiti u zatvorenom obliku, predstavljeni rezultati dobijeni su numeričkom integracijom u programu Mathematica. Rezultati dati u ovom delu disertacije objavljeni su u radu [121].

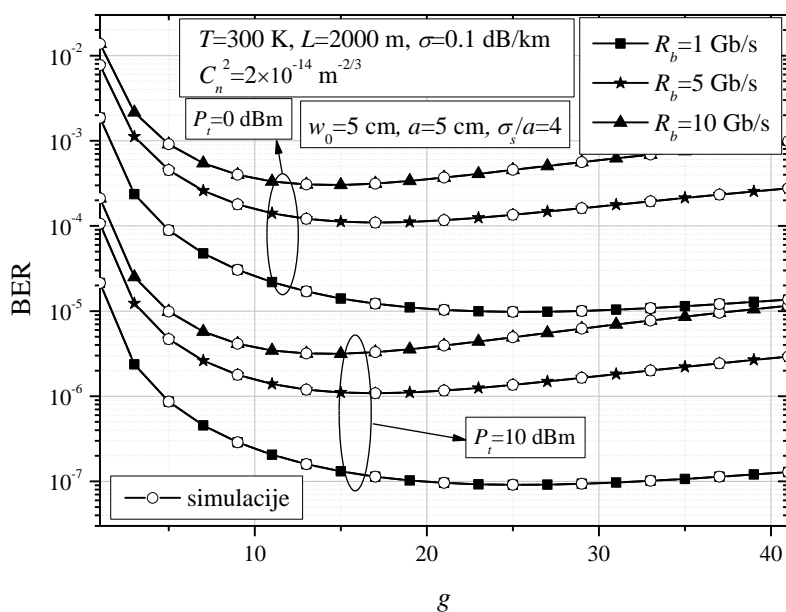


**Slika 4.3.1.** Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti dužine linka i normalizovane standardne devijacije džitera

Na slici 4.3.1. prikazana je zavisnost verovatnoće greške od pojačanja APD fotodiode FSO sistema sa intenzitetskom modulacijom koja koristi BDPSK. Posmatra se uticaj dužine FSO linka i normalizovane standardne devijacije džitera na vrednost optimalnog pojačanja fotodiode,  $g_{opt}$ . Na osnovu dobijenih rezultata, dolazi se do zaključka da normalizovana standardna devijacija džitera ne utiče na vrednost  $g_{opt}$ , dok je dužina deonice od manjeg značaja na istu vrednost. To se vidi iz očitanih vrednosti: za  $L = 2000$  m ( $\sigma_s/a = 2,4$  i  $5$ ), važi da je  $g_{opt} = 21$ ; za  $L = 4000$  m ( $\sigma_s/a = 2,4$  i  $5$ ), vidi se da je  $g_{opt} = 23$ . Takođe, može se zaključiti da je uticaj normalizovane standardne devijacije džitera izraženiji kod FSO deonica kraće dužine, tj. vibracije optičkog snopa i loše pozicioniranje FSO predajnika i prijemnika manje utiču na performanse sistema kod FSO deonica većih dužina.



**Slika 4.3.2.** Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite temperature prijemnika u različitim uslovima atmosfere turbulencije

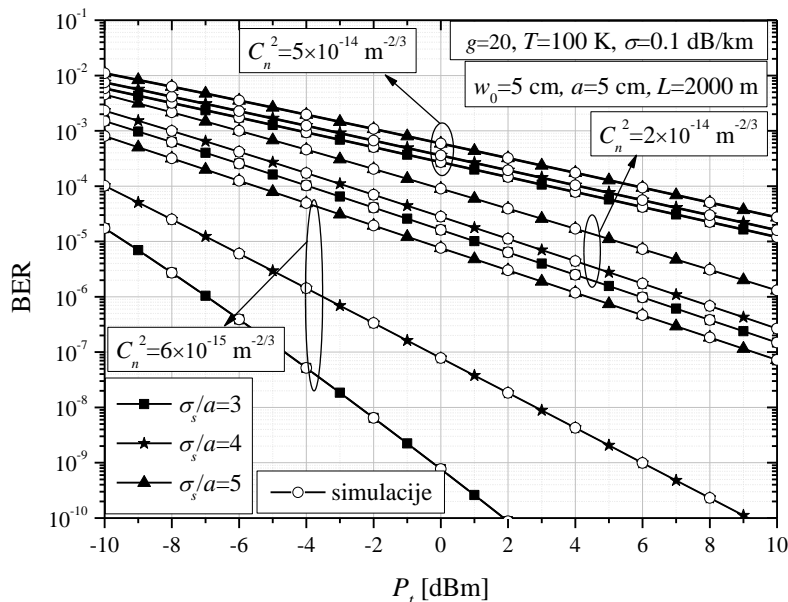


**Slika 4.3.3.** Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema u zavisnosti od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti bitske brzine i optičke snage

Zavisnost verovatnoće greške od pojačanja fotodiode FSO sistema za različite vrednosti temperature APD prijemnika u uslovima slabe i umerene atmosfere turbulencije prikazana je na slici 4.3.2. Može se primetiti da minimum verovatnoće greške, koji je određen optimalnom vrednošću pojačanja fotodiode, zavisi od temperature APD prijemnika. Što je temperatura viša, vrednost  $g_{opt}$  je veća. Prilikom konstruisanja FSO linka, uslovi okruženja su važni, jer pravilan izbor APD fotodiode sa optimalnim pojačanjem može dovesti do

značajnog poboljšanja performansi sistema. Na slici 4.3.2. se takođe može videti kako atmosferska turbulencija utiče na vrednost optimalnog pojačanja. Što su uslovi prenosa gori, to je vrednost  $g_{opt}$  veća, naročito kad je temperatura prijemnika veća. Takođe, uticaj temperature  $T$  na performanse sistema je izraženiji u povoljnim ulovima prenosa.

Slika 4.3.3. prikazuje zavisnost verovatnoće greške FSO sistema sa SIM-BDPSK od pojačanja APD fotodiode za različite vrednosti bitske brzine i predajne optičke snage. Na osnovu očitanih rezultata:  $g_{opt} = 25$  za  $R_b = 1$  Gb/s ( $P_t = 0$  dBm i  $P_t = 10$  dBm);  $g_{opt} = 17$  za  $R_b = 5$  Gb/s ( $P_t = 0$  dBm i  $P_t = 10$  dBm);  $g_{opt} = 15$  za  $R_b = 10$  Gb/s ( $P_t = 0$  dBm i  $P_t = 10$  dBm), zaključuje se da optimalna vrednost pojačanja fotodiode ne zavisi od optičke snage, ali se smanjuje pri većim bitskim brzinama. Takođe, manje vrednosti bitskih brzina dovode do boljih performansi posmatranog sistema.



**Slika 4.3.4.** Verovatnoća greške SIM-BDPSK FSO sistema sa APD fotodiodom u zavisnosti od optičke snage za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije

Zavisnost verovatnoće greške FSO sistema koji koristi SIM-BDPSK od optičke snage na predaji za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosferske turbulencije prikazana je na slici 4.3.4. Kao što je i ranije zaključeno, najbolje performanse FSO sistema postižu se u uslovima slabe atmosferske turbulencije, i kada je vrednost normalizovane standardne devijacije džitera najmanja, što odgovara boljem pozicioniranju FSO predajnika i prijemnika. Takođe, greška pozicioniranja je izraženija kada se optički signal prenosi kroz kanal koji je pod uticajem slabe atmosferske turbulencije.

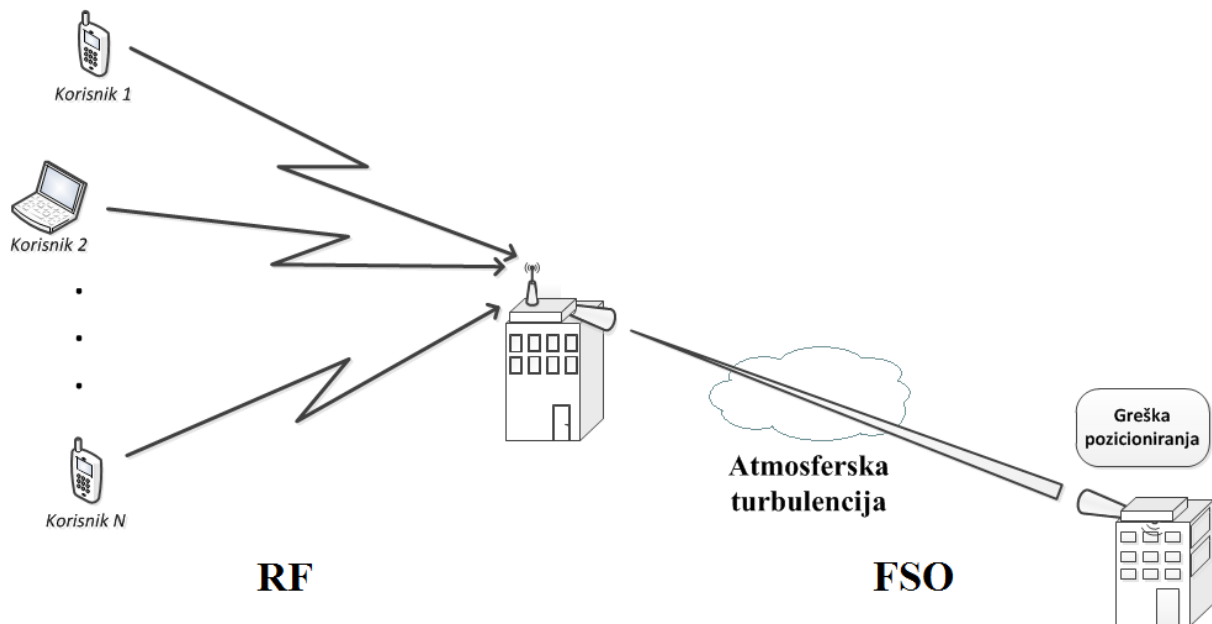
## 5. Asimetrični RF/FSO sistemi

U prethodnim poglavljima disertacije izložene su prednosti FSO sistema i izvedene su performanse sistema koji koriste različite vrste modulacionih tehnika, kao i različite vrste fotodetektora na prijemu. Naglašeno je da održivost FSO linka zahteva postojanje direktne linije optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika. Pošto u nekim situacijama i okruženjima nije moguće obezbediti liniju optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, došlo se na ideju primene relejne tehnologije kod bežičnog prenosa optičkih signala [1], [2], [5], [28], [33], [34], [72], [73], [98], [138], [142], [143], [172], [177].

Primenom relejne tehnologije obezbeđuje se povećanje kapaciteta i energetske efikasnosti sistema, kao i poboljšanje performansi sistema. Upotrebom releja moguće je smanjiti predajnu snagu, postići bolju pokrivenost, dok se u isto vreme većini korisnika pruža približno isti kvalitet usluga. Najjednostavniji relejni sistem sastoji se od predajnika, releja i prijemnika, odnosno od dva linka koja su povezana relejem. U zavisnosti od cilja koji je potrebno ostvariti, sistemi sa većim brojem releja mogu biti povezani redno, paralelno ili kombinovanjem redne i paralelne veze. Instaliranjem više releja može se potencijalno obezbediti veći broj nezavisnih kanala između predajnika i prijemnika, čime je omogućena primena diverzitetne tehnika i poboljšanje performansi sistema.

U literaturi najčešće se sreće podela releja na neregenerativne (AF – *Amplify and Forward*) i regenerativne (DF – *Decode and Forward*). U zavisnosti od vrste pojačanja, neregenerativni releji se mogu podeliti na AF releje konstantnog pojačanja i AF releje promenljivog pojačanja. Releji konstantnog pojačanja imaju, u određenom vremenskom intervalu, fiksno pojačanje koje zavisi od dugoročne statistike bežičnog kanala i uglavnom je funkcija srednje snage slabljenja u kanalu između predajnika i releja. Kod releja promenljivog pojačanja, pojačanje se menja u zavisnosti od trenutnih uslova u kanalu,

odnosno zavisi od trenutne informacije o stanju kanala (CSI). U literaturi se najčešće pod regenerativnim relejima podrazumevaju DF releji koji detektuju i dekoduju signal, zatim ga koduju istim ili nekim drugim kodom i ponovo šalju. Oni vrše obradu signala u digitalnom domenu i performanse sistema su tada donekle bolje u odnosu na sisteme sa neregenerativnim relejima [37]. Međutim, regenerativni releji znatno su složeniji, a samim tim i skuplji od neregenerativnih releja, pa se u ovoj disertaciji razmatraju samo sistemi sa neregenerativnim relejima.



*Slika 5.1. Asimetrični RF/FSO sistem*

Sprega relejne i FSO tehnologije intenzivno je razmatrana u skorijoj literaturi [1], [2], [5], [28], [33], [34], [72], [73], [98], [138], [142], [143], [172], [177]. Ako na svim deonicama postoji linija optičke vidljivosti, onda je moguće na svakoj deonici ostvariti FSO prenos signala. Ako na nekim deonicama nije ostvarena linija optičke vidljivosti, prenos je moguće obaviti u RF domenu. Ovakvi sistemi se sastoje od RF i FSO linkova, koji su povezani relejima, i nazivaju se asimetrični RF/FSO sistemi. Prvi rad koji je predložio i razmotrio ovakav sistem publikovan je 2011. godine [88]. Ključna ideja asimetričnih RF/FSO sistema je u tome da se istovremeno iskoriste prednosti koje se dobijaju implementacijom releja i prednosti FSO prenosa signala. U disertaciji razmatrani su sistemi kada na deonici od predajnika do releja ne postoji direktna linija optičke vidljivosti, i na njoj se ostvaruje RF prenos signala, dok je FSO prenos primenjen na drugom linku između releja i prijemnika za potrebe „poslednje milje“. Konverzija električnog signala u optički na releju se vrši primenom intenzitetske modulacije podnosiocem. Takođe, više RF nosioca mogu se

multipleksirati kroz jedan FSO link kojim će se dalje izvršiti prenos signala do krajnjeg odredišta, kao što je prikazano na slici 5.1. Usled postojanja jaza u konekciji između glavne mreže sa optičkim vlaknima i krajnjih korisnika, primenom FSO prenosa ostvaruje se pokrivenost „poslednje milje“ [24], [150]. Zbog komplikovane implementacije optičkih vlakana u cilju povećanja propusnog opsega i dometa do krajnjih korisnika, jednostavnije je i znatno jeftinije izvršiti instalaciju FSO predajnika i prijemnika na visokim objektima, pri čemu se dobija pokrivenost poslednje milje, i mogućnost multipleksiranja više korisnika. Time se obezbeđuju slične performanse kao i kod sistema sa optičkim vlaknima. Takođe, upotrebom FSO prenosa izbeći će se uticaj interferencije na destinaciji.

U prvom delu ovog odeljka, razmatraće se performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja. Biće izvedeni izrazi za verovatnoću prekida veze i verovatnoću greške sistema. Prvo će se ispitati performanse sistema kod kojih je feding na RF deonici modelovan Nakagami- $m$  raspodelom, dok je prenos optičkog signala pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Zatim, razmatraće se sistem kada je relej pod uticajem više interferencija iz susednih ćelija.

U nastavku, analiziraće se performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja. Razmatraće se sistem sa i bez uticaja interferencije na releju. Nakon toga, biće proučen efekat neidealne procene stanja RF kanala, koja je potrebna za određivanje pojačanja releja, na verovatnoću prekida veze i verovatnoću greške. Smatraće se da je feding na RF deonici, kao i interferencije na releju, opisan Nakagami- $m$  raspodelom, dok je FSO kanal pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja.

U nastavku je dat pregled funkcija gustina verovatnoća i kumulativnih funkcija raspodela trenutnih SNR-ova na RF i FSO deonici koje će se koristiti u predstojećoj analizi.

Za opisivanje modela fedinga na RF deonici, koriste se razni statistički modeli. Nakagami- $m$  raspodela se često koristi za opisivanje RF kanala, jer je pokazala dobro poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima. Funkcija gustine verovatnoće kvadrata anvelope fedinga (kao i trenutnog SNR-a,  $\gamma_1$ ) na prvoj deonici je oblika [99], [151]

$$f_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma_1) = \frac{m_1^{m_1}}{\mu_1^{m_1} \Gamma(m_1)} \gamma_1^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1 \gamma_1}{\mu_1}\right), \quad (5.1)$$

pri čemu  $m_1$  označava parametar fedinga, i  $\mu_1$  predstavlja srednje kvadratnu vrednost signala, ili srednji SNR, dok je kumulativna funkcija raspodele [151]

$$F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma_1) = 1 - \frac{1}{\Gamma(m_1)} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1 \gamma_1}{\mu_1}\right). \quad (5.2)$$

gde je  $\Gamma(\cdot, \cdot)$  nekompletna Gama funkcija definisana kao u [55, (8.350.2)]. Združena funkcija gustine verovatnoće dve korelisane Nakagami- $m$  promenljive je [151]

$$f_{\gamma_1, \tilde{\gamma}_1}^{Nak}(x, y) = \left( \frac{m_1}{\mu_1} \right)^{m_1+1} \frac{x^{\frac{m_1-1}{2}} y^{\frac{m_1-1}{2}}}{(1-\rho)\Gamma(m_1)\rho^{\frac{m_1-1}{2}}} e^{-\frac{m_1(x+y)}{(1-\rho)\mu_1}} I_{m_1-1} \left( \frac{2m_1\sqrt{\rho xy}}{(1-\rho)\mu_1} \right). \quad (5.3)$$

gde je  $I_\nu(\cdot)$  modifikovana Beselova funkcija prve vrste  $\nu$ -og reda [55, (8.406)].

Nakagami- $m$  model je opštiji model i može se svesti na Rejljev, koji se najčešće se koristi za modelovanje fedinga i statistike signala u okruženjima gde ne postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika. Stoga, Rejljev model je pogodan za opis komunikacionih kanala u urbanim područjima, kao što su gradske oblasti sa visokim zgradama [46]. Može se dobiti kao specijalni slučaj Nakagami- $m$  modela za  $m_1 = 1$ . Funkcija gustine verovatnoće kvadrata anvelope fedinga na prvoj deonici u ovom slučaju je [151]

$$f_{\gamma_1}(\gamma_1) = \frac{1}{\mu_1} \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\mu_1}\right), \quad (5.4)$$

dok je kumulativna funkcija raspodele data sa [151]

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_1}{\mu_1}\right). \quad (5.5)$$

Združena funkcija gustine verovatnoće dve korelisane Rejljeve promenljive je [151]

$$f_{\gamma_1, \tilde{\gamma}_1}(x, y) = \frac{e^{-\frac{x+y}{(1-\rho)\mu_1}}}{(1-\rho)\mu_1^2} I_0 \left( \frac{2\sqrt{\rho xy}}{(1-\rho)\mu_1} \right). \quad (5.6)$$

Što se tiče druge deonice, kada je prenos optičkog signala pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja, funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a definisana je jednačinom (2.3.37) kao

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma_2} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \left| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right), \quad (5.7)$$

dok je kumulativna funkcija raspodele određena u poglavlju 3, preko jednačine (3.1.4), i ima oblik

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{2^{\alpha+\beta-3}\xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,6}^{5,1} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_2}{16\mu_2} \left| \begin{matrix} 1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right), \quad (5.8)$$



ili preko jednačine (3.1.5) kao

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.9)$$

## 5.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja

U ovom delu disertacije biće izvedeni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja. Najpre će se razmatrati pomenuti sistem sa AF relejem konstantnog pojačanja u prisustvu šuma, dok će u nastavku biti izvedeni izrazi za performanse asimetričnog RF/FSO u prisustvu više interferencija na releju.

### 5.1.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja u prisustvu šuma

Signal koji nosi informaciju se na predajniku najpre moduliše RF modulatorom. Nakon prenosa kroz RF kanal koji je pod uticajem Nakagami- $m$  fedinga, signal primljen na releju je dat kao

$$r_R = h_{SR}r + n_{SR}, \quad (5.1.1)$$

gde je  $r$  signal srednje snage  $P_s$  koji je poslat sa prijemnika, i  $h_{SR}$  označava amplitudu fedinga na RF deonici. Relej je pod uticajem belog Gausovog šuma, označenog kao  $n_{SR}$ , nulte srednje vrednosti i srednje snage  $\sigma_{SR}^2$ . Primljeni signal  $r_R$  pojačava se konstantnim pojačanjem  $G$ . Zatim se vrši intenzitetska modulacija podnosiocem, i kroz atmosferski kanal se šalje do prijemnika optički signal definisan kao

$$r_{opt} = P_t(1 + mGr_R), \quad (5.1.2)$$

gde je  $P_t$  optička snaga na predaji i  $m$  predstavlja indeks modulacije koji je u nastavku zanemaren usled pretpostavke  $m = 1$ . Nakon prenosa kroz atmosferski kanal, posle direktne detekcije, uklanjanja jednosmerne komponente i konverzije optičkog signala u električni

pomoću PIN fotodiode, vrši se detekcija signala odgovarajućim RF demodulatorom. Dobijeni električni signal dat je u obliku

$$r_D = P I_{RD} G \eta r_R + n_{RD} = P I_{RD} G \eta (h_{SR} r + n_{SR}) + n_{RD}, \quad (5.1.3)$$

gde je  $I_{RD}$  intenzitet optičkog signala na prijemu, i  $\eta$  je koeficijent konverzije optičkog signala u električni. Prijemni terminal je pod uticajem belog Gausovog šuma,  $n_{RD}$ , nulte srednje vrednosti i srednje snage  $\sigma_{RD}^2$ .

Trenutni SNR na prvoj deonici je definisan kao

$$\gamma_1 = \frac{h_{SR}^2 P_s}{\sigma_{SR}^2}. \quad (5.1.4)$$

Kako se feding na RF deonici modeluje se Nakagami- $m$  raspodelom, funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a data jednačinom (5.1), sa parametrom fedinga  $m_1$ , i srednje kvadratnom vrednošću signala, tj. srednjim SNR-om,  $\mu_1$ , definisanim kao

$$\mu_1 = E[\gamma_1] = \frac{E[h_{SR}^2] P_s}{\sigma_{SR}^2}. \quad (5.1.5)$$

Trenutni SNR na drugoj deonici definisan je kao

$$\gamma_2 = \frac{\eta^2 P_t^2 I_{RD}^2}{\sigma_{RD}^2}, \quad (5.1.6)$$

sa funkcijom gustine verovatnoće datom jednačinom (5.7). Na osnovu jednačine (2.2.18), (2.3.33) i (5.1.3), električni SNR,  $\mu_2$ , definisan je kao

$$\mu_2 = \frac{\eta^2 P_t^2}{\sigma_{RD}^2} E^2[I_{RD}] = \frac{\eta^2 P_t^2}{\sigma_{RD}^2} A_0^2 I_l^2 K^2. \quad (5.1.7)$$

Analiziran sistem podrazumeva AF relej konstantnog pojačanja  $G$ , koje se određuje na osnovu dugoročne statistike kanala. Pojačanje je definisano kao [118]

$$G^2 = \frac{1}{E[h_{SR}^2] P_s + \sigma_{SR}^2} = \frac{1}{\sigma_{SR}^2 C_1}, \quad (5.1.8)$$

tako da se konstanta  $C$  može odrediti na sledeći način

$$C_1 = \frac{1}{\sigma_{SR}^2 G^2} = \frac{E[h_{SR}^2] P_s}{\sigma_{SR}^2} + 1 = \mu_1 + 1. \quad (5.1.9)$$

Na osnovu jednačina (5.1.3) i (5.1.9), ukupni SNR sistema je [118]

$$\gamma_{eq}^{NL} = \frac{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 h_{SR}^2 P_s}{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\frac{\eta^2 P_t^2 I_{RD}^2 h_{SR}^2 P_s}{\sigma_{RD}^2} \frac{\sigma_{SR}^2}{\sigma_{SR}^2}}{\frac{\eta^2 P_t^2 I_{RD}^2}{\sigma_{RD}^2} + \frac{1}{\sigma_{SR}^2 G^2}} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + C_1}. \quad (5.1.10)$$

*Verovatnoća prekida sistema*

Verovatnoća prekida predstavlja verovatnoću da je ukupni SNR sistema manji od određenog praga,  $\gamma_{th}$ , tj. verovatnoća prekida predstavlja kumulativnu funkciju raspodele ukupnog SNR-a koji je definisan jednačinom (5.1.10)

$$P_{out} = F_\gamma(\gamma_{th}) = \Pr[\gamma_{eq}^{NL} < \gamma_{th}] = \int_0^\infty \Pr\left[\gamma_1 < \gamma_{th} \left(\frac{\gamma_2 + C_1}{\gamma_2}\right)\right] f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2. \quad (5.1.11)$$

Zamenom (5.2) i (5.7) u (5.1.11), i uzimajući u obzir da je  $\int_0^\infty f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 = 1$ , izraz za

verovatnoću posmatranog sistema je

$$P_{out} = 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(m_1)} \times \int_0^\infty \gamma_2^{-1} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)\right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \middle| \xi^2, \alpha, \beta \right) d\gamma_2. \quad (5.1.12)$$

Pod pretpostavkom celobrojne vrednosti parametra  $m_1$ , primenom pravila (A.25) nekompletna Gama funkcija razvija se u red na sledeći način

$$\Gamma\left(m_1, \frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)\right) = (m_1 - 1)! e^{-\frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)\right)^k. \quad (5.1.13)$$

Zamenom (5.1.13) u (5.1.12), verovatnoća prekida je

$$P_{out} = 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(m_1)} e^{-\frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{(m_1 - 1)!}{k!} \left(\frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1}\right)^k \times \int_0^\infty \gamma_2^{-1} e^{-\frac{m_1 \gamma_{th} C_1}{\mu_1 \gamma_2}} \left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)^k G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \middle| \xi^2, \alpha, \beta \right) d\gamma_2. \quad (5.1.14)$$

Primenom binomne teoreme, koja je definisana jednačinom (A.26) u dodatku, dobija se

$\left(1 + \frac{C_1}{\gamma_2}\right)^k = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \gamma_2^{-i} C_1^i$ , i primenom pravila (A.27), verovatnoća prekida je određena kao

$$P_{out} = 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{C_1^i}{k!} \left(\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right)^k} \times \int_0^\infty \gamma_2^{-i-1} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}C_1}{\mu_1\gamma_2}} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right) d\gamma_2. \quad (5.1.15)$$

Predstavljanjem eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije korišćenjem pravila (A.19), i korišćenjem pravila (A.18) za transformaciju Mejerova  $G$ -funkcije, verovatnoća prekida je data u obliku

$$P_{out} = 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{C_1^i}{k!} \left(\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right)^k} \times \int_0^\infty \gamma_2^{-i-1} G_{1,0}^{0,1} \left( -\frac{\mu_1\gamma_2}{m_1\gamma_{th}C_1} \left| \begin{matrix} 1 \\ - \end{matrix} \right. \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right) d\gamma_2. \quad (5.1.16)$$

Integral u (5.1.16) rešava se primenom pravila (A.15), uz pomoć (A.3), (A.4), (A.16), (A.17), za rešavanje integrala koji sadrži proizvod dve Mejerove  $G$ -funkcije. Nakon primene pravila (A.9) za smanjenje reda Mejerove  $G$ -funkcije, konačna verovatnoća prekida posmatranog sistema izvedena je kao [118]

$$P_{out} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right)^{k-i}} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 \gamma_{th} C_1}{16\mu_1 \mu_2} \left| \begin{matrix} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{matrix} \right. \right). \quad (5.1.17)$$

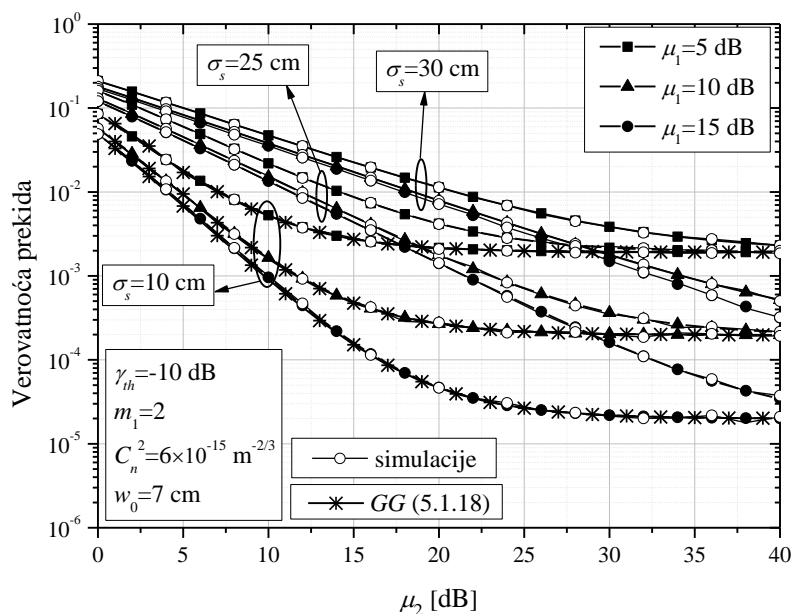
Alternativni oblik verovatnoće prekida u (5.1.17), koji sadrži Mejerovu  $G$ -funkciju višeg reda, može se naći u [179].

Kada je FSO deonica pod uticajem samo gama-gama atmosfere turbulencije, verovatnoća prekida može se naći primenom pravila (A.11), (A.12), (A.13), i

$$\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} \left(1 + 2/\xi^2\right) = 1 \text{ i } \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} \kappa^2 = \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} \left(1 + 1/\xi^2\right) = 1, \text{ kao}$$

$$P_{out}^{GG} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right)^{k-i}} \times G_{0,5}^{5,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 m_1 \gamma_{th} C_1}{16\mu_1 \mu_2} \left| \begin{matrix} - \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{matrix} \right. \right). \quad (5.1.18)$$

Za slučaj Rejljevog fedinga, zamenom  $m_1 = 1$  u (5.1.18), dobija se alternativni izraz za verovatnoću prekida koji je publikovan u [88].

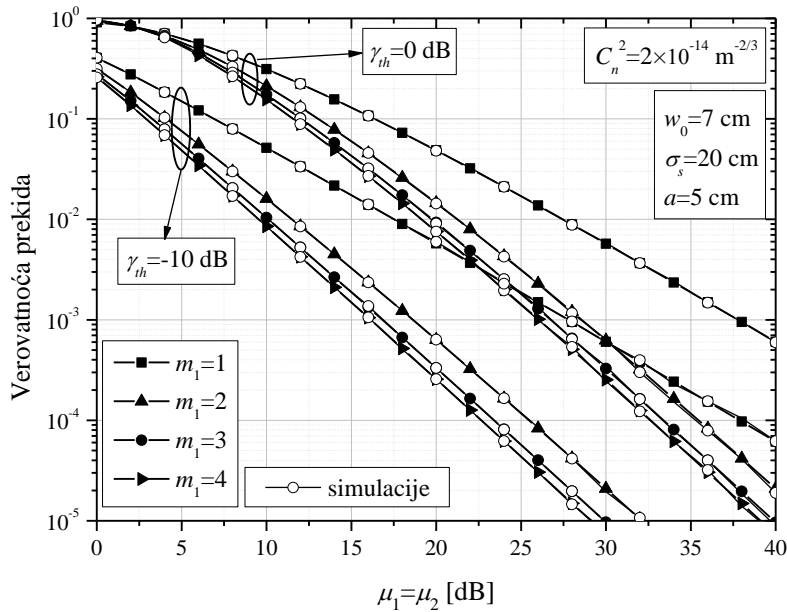


**Slika 5.1.1.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma za različite vrednosti standardne devijacije džitera

Na slici 5.1.1. prikazana je verovatnoća prekida u zavisnosti od električnog SNR-a na FSO deonici kada je relej pod uticajem šuma, za različite vrednosti standardne devijacije džitera i srednjeg SNR-a na prvoj deonici. U skladu sa očekivanjima, verovatnoća prekida je manja kada je vrednost srednjeg SNR-a  $\mu_1$  veća. Veća vrednost standardne devijacije džitera, što je ekvivalentno nepreciznom pozicioniranju lasera na predaji i detektora na prijemu, dovodi do pogoršanja performansi sistema. Za male i srednje vrednosti električnog SNR-a  $\mu_2$ , verovatnoća prekida se smanjuje, dok za veće vrednosti  $\mu_2$  verovatnoća prekida ima konstantnu vrednost. Ova neotklonjiva verovatnoća prekida se ne može smanjiti daljim povećavanjem električnog SNR-a na drugoj deonici, već samo povećanjem srednjeg SNR-a na RF deonici. Vrednost  $\mu_2$  na kojoj se javlja neotklonjiva verovatnoća prekida, smanjuje se sa smanjenjem  $\mu_1$  i/ili  $\sigma_s$ . Takođe, prikazani su rezultati za slučaj kada je FSO link pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije koji su dobijeni na osnovu jednačine (5.1.18). Krive koje su dobijene za ovakav sistem poklapaju se sa onima koje su dobijene za  $\sigma_s = 10$  cm. Time je potvrđeno da je uticaj greške pozicioniranja minimalan prilikom veoma male standardne devijacije džitera.

Slika 5.1.2. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida od srednjeg SNR-a na RF deonici i električnog SNR-a na FSO deonici za različite vrednosti praga i za različite vrednosti parametara fedinga  $m_1$ , kada je relej pod uticajem šuma. Sa povećanjem vrednosti praga, povećava se verovatnoća prekida. Može se primetiti da veće vrednosti parametra  $m_1$  dovode do poboljšanja performansi sistema, što znači da je uticaj fedinga slabiji. Lošije performanse

dobijaju se kada je  $m_1 = 1$ , što odgovara Rejljevom fedingu. Uticaj jačine fedinga na verovatnoću prekida izraženiji je kada je prag manji. Na primer, za  $\mu_1 = \mu_2 = 20$  dB, promenom parametra  $m_1$  sa 1 na 4, verovatnoća prekida se smanjuje oko 6.42 i 22.54 puta, ako je prag 0 dB i -10 dB, respektivno. Primećuje se da neotklonjiva verovatnoća prekida ne postoji na ovoj slici, jer je zavisnost verovatnoće prekida prikazana u funkciji  $\mu_1 = \mu_2$ .



**Slika 5.1.2.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma za različite dubine fedinga i za različite vrednosti praga

### Verovatnoća greške sistema

Na osnovu ranije definisanog izraza za verovatnoću greške koji je dat jednačinom (3.2.13), i korišćenjem prethodno dobijenog izraza za verovatnoću prekida, može se izvesti izraz za verovatnoću greške posmatranog sistema. Zamenom (5.1.17) u (3.2.13), dobija se

$$P_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \left\{ 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1}{\mu_1}\right)^{k-i} \gamma^{k-i} e^{-\frac{m_1\gamma}{\mu_1}} \right. \\ \left. \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 C_1 \gamma}{16\mu_1 \mu_2} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 2 \\ \xi^2, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{matrix} \right. \right) \right\} d\gamma = \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2, \quad (5.1.19)$$

gde su parametri  $p$  i  $q$  ranije definisani za različite vrste primenjenih binarnih modulacija. Prvi integral u (5.1.19) je definisan i rešen pomoću pravila (A.27) i (A.28) kao

$$\mathfrak{I}_1 = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} d\gamma = \frac{1}{2}. \quad (5.1.20)$$

Drugi integral je definisan kao

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_2 = & \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1}{\mu_1}\right)^{k-i} \int_0^\infty \gamma^{k-i+p-1} e^{-\gamma\left(\frac{m_1+q}{\mu_1}\right)} \\ & \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 C_1 \gamma}{16\mu_1 \mu_2} \left| \begin{array}{c} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{array} \right. \right) d\gamma. \end{aligned} \quad (5.1.21)$$

Na sličan način kao i kod izvođenja verovatnoće prekida, primenom pravila (A.19) za predstavljanje eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije, i pravila (A.20) za rešavanje dobijenog integrala, integral  $\mathfrak{I}_2$  se dobija kao

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_2 = & \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-p} \left(1 + \frac{\mu_1 q}{m_1}\right)^{-(k-i)} \\ & \times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 C_1}{16\mu_2 (q\mu_1 + m_1)} \left| \begin{array}{c} 1-p-k+i, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{array} \right. \right). \end{aligned} \quad (5.1.22)$$

Zamenom (5.1.20) i (5.1.22) u (5.1.19), dobija se izraz za verovatnoću greške

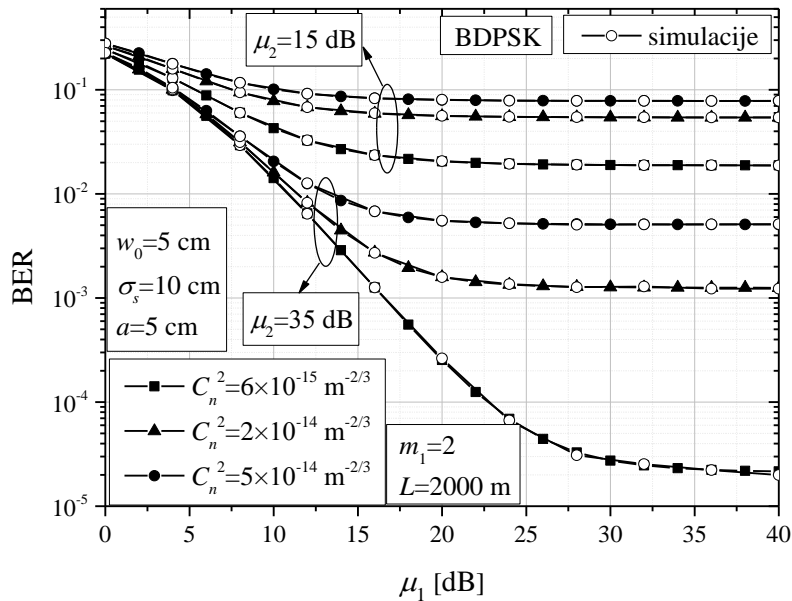
$$\begin{aligned} P_b = & \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-p} \left(1 + \frac{\mu_1 q}{m_1}\right)^{-(k-i)} \\ & \times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 C_1}{16\mu_2 (q\mu_1 + m_1)} \left| \begin{array}{c} 1-p-k+i, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{array} \right. \right). \end{aligned} \quad (5.1.23)$$

Kompleksniji oblik verovatnoće greške nego u jednačini (5.1.23) publikovan je u [179].

Kada je greška pozicioniranja toliko mala da se može zanemariti, druga deonica sistema je pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije. Verovatnoća greške ovog sistema može se naći primenom pravila (A.11), (A.12), (A.13) na prethodni izraz, pri čemu važi i da je  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1+2/\xi^2) = 1$  i  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} \kappa^2 = \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1+1/\xi^2) = 1$ , kao

$$P_b^{GG} = \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-p} \left(1 + \frac{\mu_1 q}{m_1}\right)^{-(k-i)} \times G_{1.5}^{5.1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 m_1 C_1}{16\mu_2 (q\mu_1 + m_1)} \middle| \alpha, \frac{1-p-k+i}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \right). \quad (5.1.24)$$

Zamenom  $m_1 = 1$  u (5.1.24), dobija se alternativni izraz za verovatnoću greške koji je publikovan u [20].



**Slika 5.1.3.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma u različitim uslovima atmosferske turbulencije

Slika 5.1.3. predstavlja zavisnost verovatnoće greške od srednjeg SNR-a na RF deonici, dok električni SNR na drugoj FSO deonici ima vrednost  $\mu_2 = 15$  dB i  $\mu_2 = 35$  dB. Kao što se i očekivalo, performanse sistema su bolje kada je vrednost električnog SNR-a veća. Uslovi prenosa na drugoj deonici dati su za slučaj slabe, umerene i jake atmosferske turbulencije. Primećuje se da je uticaj turbulencije na performanse sistema izraženiji kada je električni SNR veći. Takođe, neotklonjiva verovatnoća greške najpre se javlja u uslovima jake turbulencije, kao i kada je vrednost  $\mu_2$  manja.



### 5.1.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije na releju

Za razliku od prethodnog slučaja kada je relej samo pod uticajem šuma, u nastavku je analiziran RF/FSO sistem u kome je relej pod uticajem i šuma i  $N$  višestrukih kanalnih interferencija [7], [59]. Model ovog sistema prikazan je na slici 5.1.4.

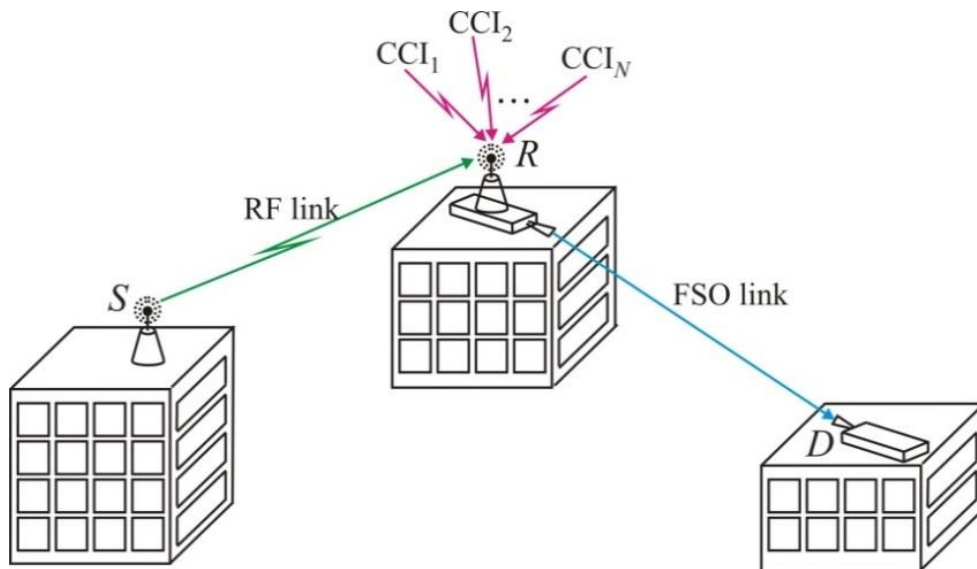
Razmatra se sistem u kome je relej pod uticajem šuma i  $N$  interferencija,  $\{r_i\}_{i=1}^{N=1}$ , svaka sa srednjom snagom  $P_i$ . Nakon prenosa kroz RF kanal koji je pod uticajem Nakagami- $m$  fedinga, primljeni signal na releju je dat u obliku

$$r_R = h_{SR}r + \sum_{i=1}^N h_i r_i + n_{SR}, \quad (5.1.25)$$

gde je  $h_i$  amplituda fedinga  $i$ -te CCI komponente. Nakon pojačanja primljenog signala i prenosa kroz atmosferski kanal, na prijemu se vrši direktna detekcija, uklanjanje jednosmerne komponente i konverzija optičkog signala u električni pomoću PIN fotodiode. Dobijeni električni signal na prijemu ima oblik

$$r_D = P_I I_{RD} G \eta \left( h_{SR}r + \sum_{i=1}^N h_i r_i + n_{SR} \right) + n_{RD}. \quad (5.1.26)$$

Statistika fedinga na prvoj i drugoj deonici je ista kao i u prethodnom slučaju. Smatra se da je feding kome je izložena kanalna interferencija modelovan identičnim i nezavisnim (i.i.d) Nakagami- $m$  raspodelama. Trenutni odnos ukupne srednje snage interferencije i šuma (INR – *Interference-to-Noise Ratio*) definisan je kao



Slika 5.1.4. Asimetrični RF/FSO sistem u prisustvu interferencije na releju

$$\gamma_I = \frac{\sum_{i=1}^N h_i^2 P_i}{\sigma_{SR}^2}, \quad (5.1.27)$$

i opisan je funkcijom gustine verovatnoće  $f_{\gamma_I}(\gamma_I)$  definisanom jednačinom (5.1), sa parametrima  $Nm_I$  i  $N\mu_I$ . Parametar  $m_I$  je parametar fedinga Nakagami- $m$  raspodele koji je isti u svim kanalima interferencije. Srednji INR jedne interferencije definisan je kao

$$\mu_I = E\left[\frac{h_i^2 P_i}{\sigma_{SR}^2}\right] = \frac{E[h_i^2] P_i}{\sigma_{SR}^2}. \quad (5.1.28)$$

U ovom slučaju, pojačanje na releju je definisano na sledeći način [161]

$$G^2 = \frac{1}{E[h_{SR}^2] P_s + \sum_{i=1}^N E[h_i^2] P_i + \sigma_{SR}^2} = \frac{1}{\sigma_{SR}^2 C_2}, \quad (5.1.29)$$

dok je konstanta  $C_2$  određena kao

$$C_2 = \frac{1}{\sigma_{SR}^2 G^2} = \frac{E[h_{SR}^2] P_s}{\sigma_{SR}^2} + \frac{\sum_{i=1}^N E[h_i^2] P_i}{\sigma_{SR}^2} + 1 = \mu_1 + N\mu_I + 1. \quad (5.1.30)$$

Na osnovu jednačina (5.1.26) i (5.1.29), ukupni odnos srednje snage signala i interferencije i šuma (SINR – *Signal-to-Interference plus Noise Ratio*) sistema definisan je kao [161]

$$\gamma_{eq} = \frac{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 h_{SR}^2 P_s}{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sum_{i=1}^N h_i^2 P_i + P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 \gamma_I + \gamma_2 + C_2}, \quad (5.1.31)$$

pri čemu su  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  i  $\gamma_I$  ranije definisani jednačinama (5.1.7), (5.1.9) i (5.1.27), respektivno.

### *Verovatnoća prekida sistema*

Verovatnoća prekida predstavlja verovatnoću da ukupni SINR sistema bude manji od određenog praga,  $\gamma_{th}$ . Za posmatrani sistem određena je kao

$$\begin{aligned} P_{out} &= F_\gamma(\gamma_{th}) = \Pr[\gamma_{eq} < \gamma_{th}] \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr\left[\gamma_1 < \gamma_I + 1 + \frac{C_2}{\gamma_2}\right] f_{\gamma_2}(\gamma_2) f_{\gamma_I}(\gamma_I) d\gamma_2 d\gamma_I. \end{aligned} \quad (5.1.32)$$

Zamenom (5.1), (5.2) i (5.7) u (5.1.32), uzimajući u obzir da je  $\int_0^\infty \int_0^\infty f_{\gamma_2}(\gamma_2) f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_2 d\gamma_1 = 1$ , nakon korišćenja pravila (A.25) i (A.26), izraz za verovatnoću

prekida posmatranog sistema je dobijen u obliku

$$P_{out} = 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(m_1 N)} \left(\frac{m_1}{\mu_1}\right)^{Nm_1} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{C_2^i}{k!} \left(\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right)^k \times \int_0^\infty \int_0^\infty \gamma_2^{-i-1} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}C_2}{\mu_1\gamma_2}} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right) \times \gamma_1^{m_1 N - 1} e^{-\gamma_1 \left( \frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} + \frac{m_1}{\mu_1} \right)} (\gamma_1 + 1)^{k-i} d\gamma_2 d\gamma_1. \quad (5.1.33)$$

Integral u (5.1.33) sastoji se od dva nezavisna integrala,  $\mathfrak{I} = \mathfrak{I}_1 \times \mathfrak{I}_2$ . Prvi integral je

$$\mathfrak{I}_1 = \int_0^\infty \gamma_2^{-i-1} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}C_2}{\mu_1\gamma_2}} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \left| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right) d\gamma_2, \quad (5.1.34)$$

koji je identičan integralu u jednačini (5.1.15), tako da se dobija

$$\mathfrak{I}_1 = \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi} \left(\frac{m_1\gamma_{th}C_2}{\mu_1}\right)^{-i} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2 m_1\gamma_{th}C_2}{16\mu_2\mu_1} \left| \begin{matrix} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{matrix} \right. \right). \quad (5.1.35)$$

Drugi integral se dobija direktnom primenom pravila (A.38)

$$\mathfrak{I}_2 = \int_0^\infty \gamma_1^{m_1 N - 1} (\gamma_1 + 1)^{k-i} e^{-\gamma_1 \left( \frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} + \frac{m_1}{\mu_1} \right)} d\gamma_1 \quad (5.1.36) \\ = \Gamma(m_1 N) U \left( m_1 N, k - i + m_1 N + 1; \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1} \right),$$

gde  $U(\cdot, \cdot; \cdot)$  predstavlja konfluentnu hipergeometrijsku funkciju druge vrste [55, (9.211.4)].

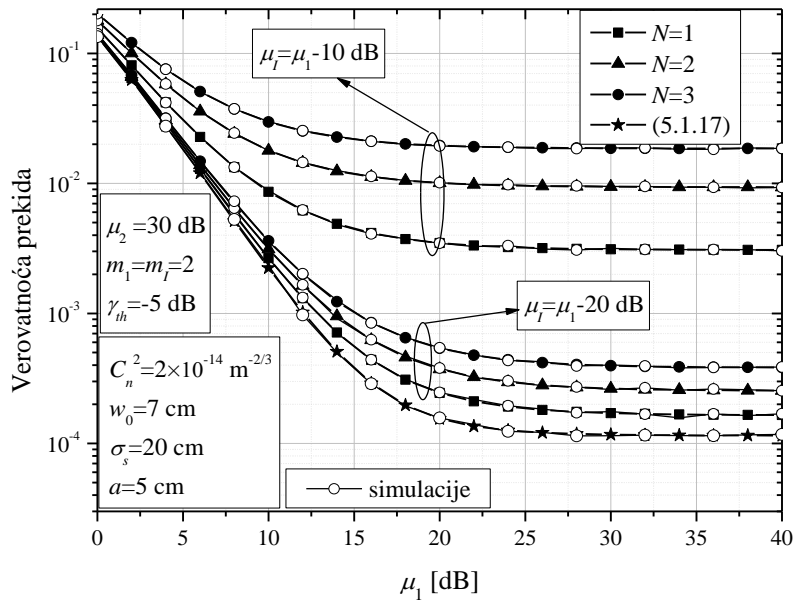
Kombinovanjem rešenja integrala  $\mathfrak{I}_1$  i  $\mathfrak{I}_2$  sa jednačinom (5.1.33), izveden je izraz za verovatnoću prekida posmatranog sistema kao

$$\begin{aligned}
P_{out} = & 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left( \frac{m_I}{\mu_I} \right)^{Nm_I} e^{-\frac{m_I \gamma_{th}}{\mu_I}} \sum_{k=0}^{m_I-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_I \gamma_{th}}{\mu_I} \right)^{k-i} \\
& \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_I \gamma_{th} C_2}{16 \mu_2 \mu_1} \middle| \frac{\xi^2 + 2}{2}, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \right) \\
& \times U \left( m_I N, k-i+m_I N+1; \frac{m_I}{\mu_I} + \frac{m_I \gamma_{th}}{\mu_I} \right).
\end{aligned} \tag{5.1.37}$$

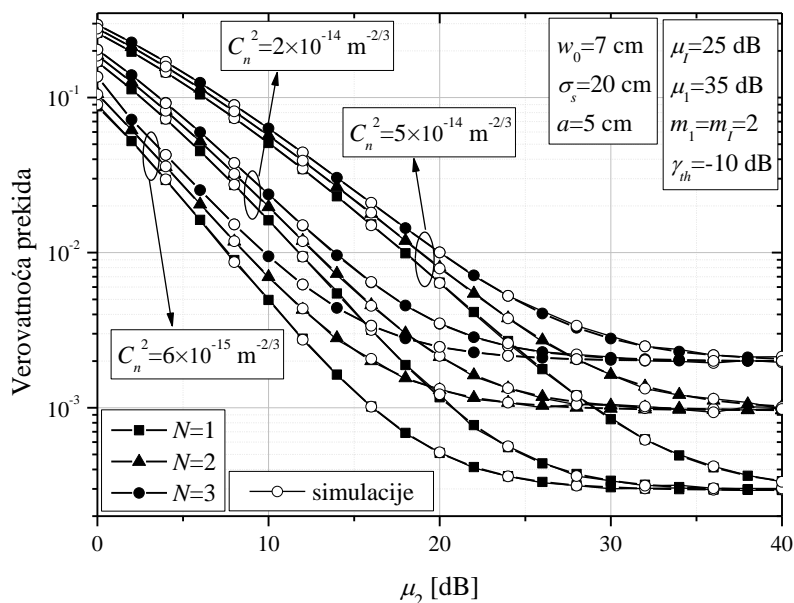
U slučaju kada je FSO deonica pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije, verovatnoće prekida može se naći kao

$$\begin{aligned}
P_{out}^{GG} = \lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} P_{out} = & 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left( \frac{m_I}{\mu_I} \right)^{Nm_I} e^{-\frac{m_I \gamma_{th}}{\mu_I}} \sum_{k=0}^{m_I-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_I \gamma_{th}}{\mu_I} \right)^{k-i} \\
& \times G_{0,5}^{5,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 m_I \gamma_{th} C_2}{16 \mu_2 \mu_1} \middle| \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \right) \\
& \times U \left( m_I N, k-i+m_I N+1; \frac{m_I}{\mu_I} + \frac{m_I \gamma_{th}}{\mu_I} \right).
\end{aligned} \tag{5.1.38}$$

U slučaju kada uticaj interferencije zanemarljivo mali, smatra se da je  $N=0$ , čime se izraz za verovatnoću prekida u (5.1.37) svodi na izraz dat jednačinom (5.1.17).



**Slika 5.1.5.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različite vrednosti srednjeg INR-a i broja interferencije



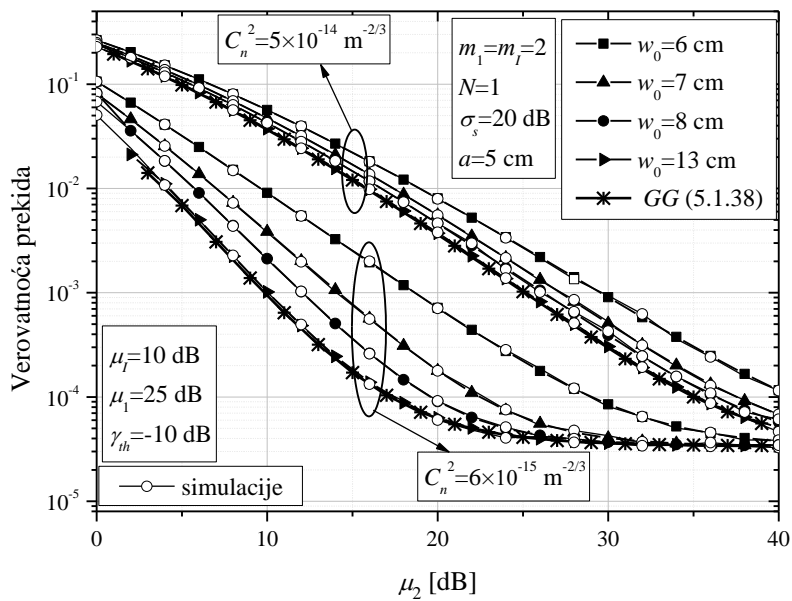
**Slika 5.1.6.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije u različitim uslovima atmosfere turbulencije

Zavisnost verovatnoće prekida od srednjeg SNR-a na RF deonici za različite vrednosti srednjeg INR-a i broj interferencija prikazan je na slici 5.1.5. Povećanje broja interferencija  $N$  dovodi do pogoršanja performansi sistema. Postoji neotklonljiva verovatnoća prekida sistema, koja zavisi od broja interferencija. Takođe, primećeno je da veći srednji INR dovodi do pogoršanja performansi sistema. Uticaj broja interferencija izraženiji je kada je srednji INR veći. Sa smanjenjem vrednosti  $\mu_I$ , broj CCI biće od manje važnosti na verovatnoću prekida. Daljem smanjenjem srednjeg INR-a, npr.  $\mu_I = \mu_I - 40$  dB, dobijene krive preklapaće se sa krivom dobijenom za sistem kada je relej samo pod uticajem šuma. Znači, smanjenje snage interferencije neće imati uticaj na performanse sistema, jer će uticaj šuma biti dominantan.

Uticaj broja interferencija na verovatnoću prekida u različitim uslovima atmosfere turbulencije prikazan je na slici 5.1.6. Kao što je i očekivano, performanse sistema su lošije pri nepovoljnijim uslovima atmosfere turbulencije, kao i sa povećanjem broja CCI. Uticaj broja interferencija na verovatnoću prekida je dominantniji u uslovima slabe, nego u uslovima umerene i jake turbulencije. Neotklonljiva verovatnoća prekida veze takođe postoji na ovoj slici, i javlja se najpre u uslovima slabe atmosfere turbulencije.

Zavisnost verovatnoće prekida od električnog SNR-a na FSO deonici za različite vrednosti poluprečnika snopa na izlazu iz predajnika u uslovima slabe i jake atmosfere turbulencije prikazan je na slici 5.1.7. Veći poluprečnik optičkog snopa na izlazu iz predajnog

sklopa, što je ekvivalentno većoj vrednosti parametra  $\xi$ , dovodi do poboljšanja performansi sistema i do smanjenja uticaja greške pozicioniranja. Primećeno je poklapanje krivih za  $w_0 = 13$  cm i za slučaj bez greške pozicioniranja, koji su dobijeni na osnovu jednačine (5.1.38). Daljim povećanjem poluprečnika snopa dobija se skoro ista vrednost verovatnoće prekida kao i za slučaj bez greške pozicioniranja. Uticaj veličine poluprečnika snopa izraženiji je u uslovima slabe turbulencije. Kada je FSO deonica pod uticajem jake turbulencije, fluktuacije intenziteta optičkog signala nastaju uglavnom baš zbog atmosfere turbulencije, pa je uticaj greške pozicioniranja od manje važnosti na performanse sistema.



**Slika 5.1.7.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različite vrednosti poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnika

### Verovatnoća greške sistema

Primenom izvedenog izraza za verovatnoću prekida, verovatnoće greške može se naći primenom jednačine (3.2.13). Zamenom (5.1.37) u (3.2.13), dobija se

$$\begin{aligned}
 P_b &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \left\{ 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left( \frac{m_l}{\mu_l} \right)^{Nm_l} \sum_{k=0}^{m_l-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_l}{\mu_l} \right)^{k-i} \right. \\
 &\quad \times \gamma^{k-i} e^{-\frac{m_l \gamma}{\mu_l}} G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_l C_l \gamma}{16 \mu_2 \mu_1} \left| \begin{array}{c} \xi^2 + 2 \\ 2 \end{array} \right. \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \right) \\
 &\quad \left. \times U \left( m_l N, k-i+m_l N+1; \frac{m_l}{\mu_l} + \frac{m_l}{\mu_l} \gamma \right) \right\} d\gamma \\
 &= \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2,
 \end{aligned} \tag{5.1.39}$$

gde su parametri  $p$  i  $q$  ranije specificirani za razne tipove binarnih modulacija. Prvi integral u (5.1.39) se rešava kao integral u jednačini (5.1.20), dok je drugi integral definisan kao

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_2 = & \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \left( \frac{m_1}{\mu_1} \right)^{Nm_1} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_1}{\mu_1} \right)^{k-i} \\ & \times \int_0^{\infty} \gamma^{k-i+p-1} e^{-\gamma \left( \frac{m_1}{\mu_1} + q \right)} U \left( m_1 N, k-i+m_1 N+1; \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_1}{\mu_1} \gamma \right) \\ & \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 C_1 \gamma}{16 \mu_2 \mu_1} \left| \begin{array}{c} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{array} \right. \right) d\gamma. \end{aligned} \quad (5.1.40)$$

Pošto integral  $\mathfrak{I}_2$  nema rešenje u zatvorenom obliku, konačan izraz za verovatnoće greške posmatranog sistema je

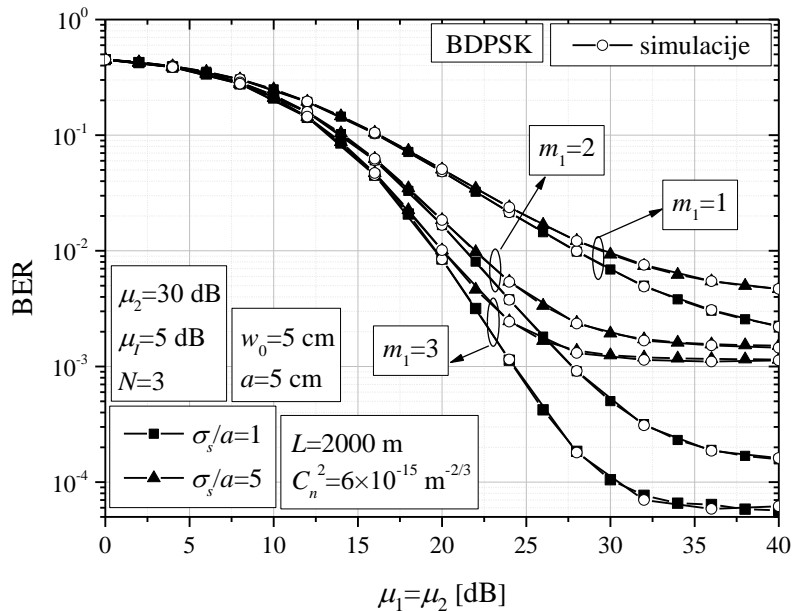
$$\begin{aligned} P_b = & \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \left( \frac{m_1}{\mu_1} \right)^{Nm_1} \sum_{k=0}^{m_1-1} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_1}{\mu_1} \right)^{k-i} \\ & \times \int_0^{\infty} \gamma^{k-i+p-1} e^{-\gamma \left( \frac{m_1}{\mu_1} + q \right)} U \left( m_1 N, k-i+m_1 N+1; \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_1}{\mu_1} \gamma \right) \\ & \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 m_1 C_1 \gamma}{16 \mu_2 \mu_1} \left| \begin{array}{c} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, i \end{array} \right. \right) d\gamma. \end{aligned} \quad (5.1.41)$$

Verovatnoća greške u prethodnoj jednačini sadrži integral koji se ne može rešiti u zatvorenom obliku, pa su rezultati dobijeni numeričkom integracijom u programu Mathematica.

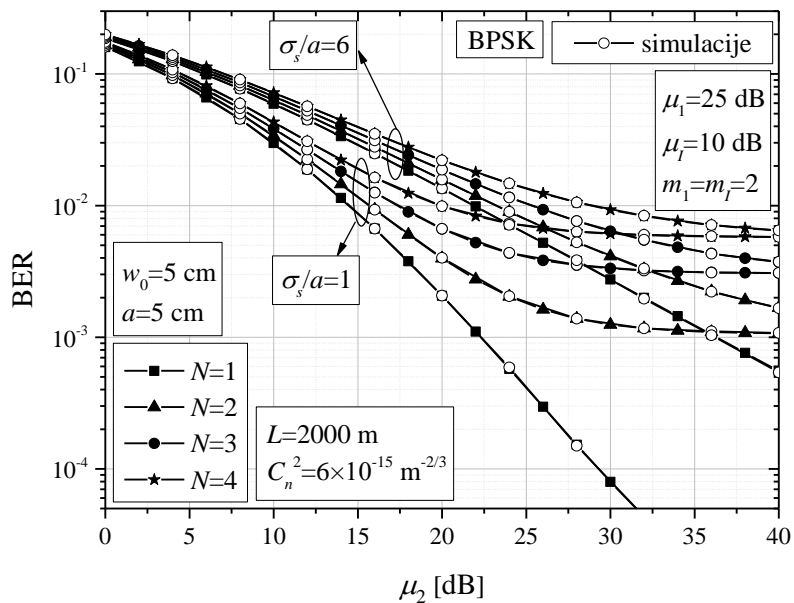
Slika 5.1.8. prikazuje zavisnost verovatnoće greške od srednjeg SNR-a na RF deonici za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera. Kako dubina fedinga na RF deonici zavisi od parametra fedinga  $m_1$ , najgore performanse se dobijaju za slučaj kada je  $m_1 = 1$ , što odgovara Rejljevom fedingu. Takođe, primećuje se da je uticaj greške pozicioniranja ne verovatnoću greške izraženiji kada je feding na RF deonici slabiji. Neotklonjiva verovatnoća greške najpre javlja se kada je vrednost  $\sigma_s/a$  veća ili kada je feding na RF deonici slabiji.

Zavisnost verovatnoće greške od električnog SNR-a na FSO deonici za različiti broj interferencija prikazan je na slici 5.1.9. za normalizovanu standardnu devijaciju džitera

$\sigma_s/a=1$  i  $\sigma_s/a=6$ . Broj interferencija ima veći uticaj na verovatnoću greške kada je  $\sigma_s/a=1$ , tj. kada je greška pozicioniranja zanemarljivo mala tako da su uslovi prenosa kroz atmosferski kanal bolji.



**Slika 5.1.8.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različite vrednosti parametra fedinga  $m_1$  i normalizovane standardne devijacije džitera



**Slika 5.1.9.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema kada je AF relej konstantnog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije za različiti broj interferencija



## 5.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja

U nastavku disertacije biće izvedeni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoće greške asimetričnih RF/FSO sistema sa relejem promenljivog pojačanja. Signal na releju pojačava se faktorom koji se određuje na osnovu kratkoročne statistike prve RF deonice, tj. pojačanje releja  $G$  određeno je na osnovu estimirane trenutne informacije o stanju kanala.

Razmatraće se RF/FSO sistem u prisustvu šuma na AF releju promenljivog pojačanja, kada je feding u RF kanalu modelovan Nakagami- $m$  raspodelom. Takođe, biće izvedeni izrazi za sistem kada je pored šuma prisutna i interferencija na releju. Oba slučaja će biti analizirana sa pretpostavkom da je pojačanje određeno na osnovu savršene procene kanala. Međutim, u praksi, u slučaju brzog fedinga na RF deonici, procena kanala iskorišćena za određivanje pojačanja nije savršena. Stoga, u poslednjem delu ovog odeljaka analiziraće se efekat neidealne procene stanja RF kanala na performanse RF/FSO sistema.

### 5.2.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma

Tokom analize asimetričnih RF/FSO sistema sa relejem promenljivog pojačanja, pojačanje  $G$  određuje se na osnovu estimirane trenutne informacije o stanju RF kanala, tj. kratkoročne statistike RF deonice, i to kao [13], [57]

$$G^2 = \frac{1}{h_{SR}^2 P_s + \sigma_{SR}^2}. \quad (5.2.1)$$

Na osnovu jednačina (5.1.3) i (5.2.1), ukupni SNR sistema se može naći kao [57]

$$\gamma_{eq}^{NL} = \frac{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 h_{SR}^2 P_s}{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\frac{\eta^2 P_t^2 I_{RD}^2 h_{SR}^2 P_s}{\sigma_{RD}^2} \frac{\sigma_{SR}^2}{\sigma_{SR}^2}}{\frac{\eta^2 P_t^2 I_{RD}^2}{\sigma_{RD}^2} + \frac{1}{\sigma_{SR}^2 G^2}} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_1 + 1}. \quad (5.2.2)$$

gde su  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  trenutne vrednosti SNR-ova, koji su ranije definisani jednačinama (5.1.4) i (5.1.6), respektivno.

### Verovatnoća prekida sistema

Verovatnoća prekida posmatranog sistema može se odrediti na osnovu (5.2.2) kao [159]

$$\begin{aligned} P_{out} = F_{\gamma}(\gamma_{th}) &= \Pr[\gamma_{eq}^{NL} < \gamma_{th}] = \int_0^{\infty} \Pr\left[\frac{\gamma_1\gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_1 + 1} < \gamma_{th}\right] f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \\ &= 1 - \int_0^{\infty} \bar{F}_{\gamma_1}^{Nak}\left(\frac{\gamma_{th}(x + \gamma_{th} + 1)}{x}\right) f_{\gamma_2}(x + \gamma_{th}) dx, \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

gde je  $\bar{F}_{\gamma_1}^{Nak}(\cdot)$  komplementarna kumulativna funkcija raspodele (CCDF - *Complementary Cumulative Distribution Function*) definisana kao  $\bar{F}_{\gamma_1}^{Nak}(\cdot) = 1 - F_{\gamma_1}^{Nak}(\cdot)$ . Kumulativna funkcija raspodele  $F_{\gamma_1}^{Nak}(\cdot)$  data je jednačinom (5.2). Zamenom (5.2) i (5.7) u (5.2.3), uzimajući u obzir pravilo (A.25), izraz za verovatnoću prekida sistema je

$$\begin{aligned} P_{out} &= 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right)^k e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}} \int_0^{\infty} x^{-k} (x + \gamma_{th})^{-1} (x + \gamma_{th} + 1)^k \\ &\quad \times e^{-\frac{m_1\gamma_{th}(1+\gamma_{th})}{\mu_1 x}} G_{1,3}^{3,0}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{(x + \gamma_{th})}{\mu_2}} \middle| \xi^2 + 1, \alpha, \beta\right) dx. \end{aligned} \quad (5.2.4)$$

Pošto se rešenje integrala u (5.2.4) ne može dobiti u zatvorenom obliku, rezultati su dobijeni numeričkom integracijom.

Verovatnoću prekida posmatranog sistema moguće je odrediti na osnovu aproksimativne formule koja se sa tačnom poklapa u oblasti velikih vrednosti srednjeg SNR-a. Ako se pretpostavi da pojačanje  $G$  zavisi samo od uslova u kanalu, tj. snaga šuma na releju je zanemarljivo mala,  $G^2 = 1/(|h_{SR}|^2 P_s)$ , ukupni SNR definiše se kao [57]

$$\gamma_{eq}^{NL} = \frac{\gamma_1\gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_1}. \quad (5.2.5)$$

Aproksimativni izraz za verovatnoću prekida posmatranog sistema može se odrediti na osnovu gornje granice ukupnog SNR-a,  $\gamma_{eq}^{NL} \leq \min(\gamma_1, \gamma_2)$  [58], na sledeći način [68], [69], [159]

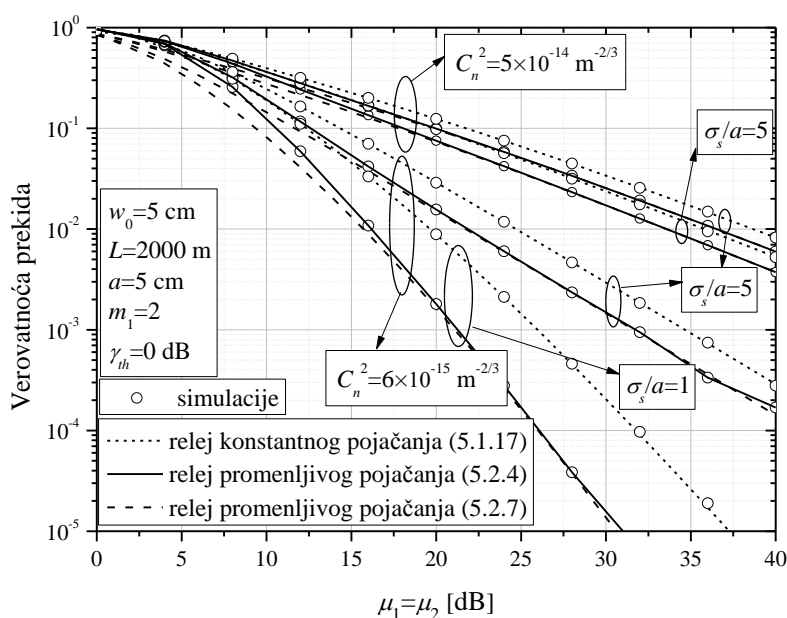
$$P_{out} = \Pr[\gamma_{eq}^{NL} < \gamma_{th}] = \Pr\left[\frac{\gamma_1\gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_1} < \gamma_{th}\right] \cong \Pr[\min(\gamma_1, \gamma_2) < \gamma_{th}]. \quad (5.2.6)$$

Aproksimativni izraz za verovatnoću prekida u prethodnoj jednačini lako se može odrediti

$$P_{out} = F_{\gamma}(\gamma_{th}) \cong F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_2}(\gamma_{th}) - F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma_{th})F_{\gamma_2}(\gamma_{th}), \quad (5.2.7)$$

gde su  $F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma_{th})$  i  $F_{\gamma_2}(\gamma_{th})$  kumulativne funkcije verovatnoće određene jednačinama (5.2) i (5.8) ili (5.9), respektivno.

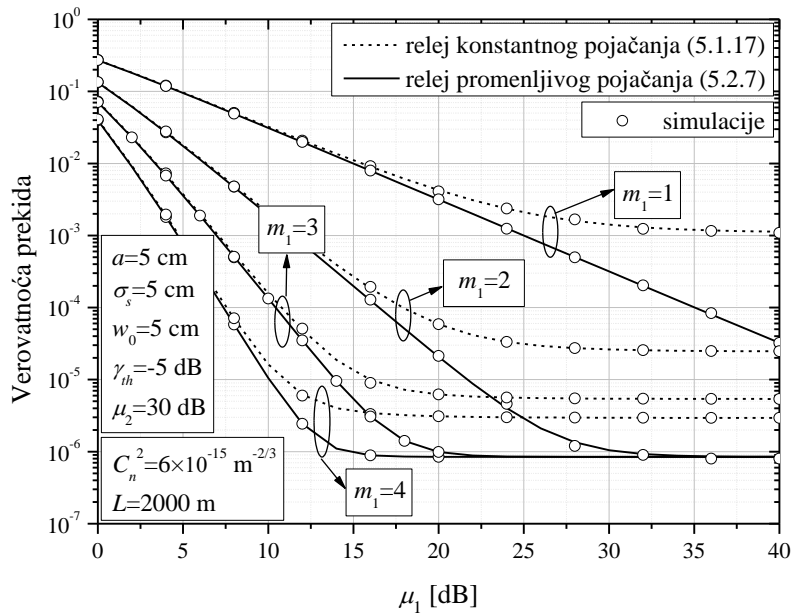
Slika 5.2.1. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema za različite vrste releja i za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima turbulencije. Rezultati su dobijeni kako za sistem sa AF relejem konstantnog pojačanja, tako i za sistem sa AF relejem promenljivog pojačanja. U slučaju promenljivog pojačanja, rezultati su dobijeni numeričkom integracijom na osnovu jednačine (5.2.4), kao i pomoću aproksimativnog izraza za verovatnoću prekida koji je dat jednačinom (5.2.7). Takođe, rezultati su potvrđeni Monte Carlo simulacijama. Može se primetiti da se rezultati dobijeni na osnovu aproksimativnih izraza poklapaju sa tačnim rezultatima u oblasti velikih vrednosti srednjih SNR-ova na obe deonice. U oblasti niskih srednjih SNR-ova, dolazi do odstupanja rezultata koji su dobijeni jednačinom (5.2.4) ili simulacijama, i rezultata dobijenih na osnovu jednačine (5.2.7). Ovo odstupanje naročito je naglašeno kada je FSO deonica pod uticajem slabe atmosfere turbulencije. Takođe, može se primetiti da sistemi sa implementiranim AF relejem promenljivog pojačanja daju bolje performanse od sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja, naročito u povoljnim uslovima prenosa na FSO deonici (slaba turbulencija i minimalni uticaj greške pozicioniranja,  $\sigma_s/a=1$ ).



**Slika 5.2.1.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema za različite vrste AF releja i normalizovane standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere turbulencije

Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema za različite vrste releja i za različite vrednosti parametra fedinga na RF deonici prikazana je na slici 5.2.2. Može se primetiti

odlično poklapanje aproksimativnog izraza za verovatnoću prekida (5.2.7) i simulacija. U slučaju obe vrste releja postoji neotklonjiva verovatnoća prekida. Kod AF releja promenljivog pojačanja, neotklonjiva verovatnoća prekida ne zavisi od vrednosti parametra fedinga na RF deonici, jer se pojačanje određuje na osnovu kratkoročnih trenutnih uslova kanala prve deonice. Sa druge strane, kod AF releja sa konstantnim pojačanjem, dugoročna statistika RF deonice određuje pojačanje na releju koje zavisi od srednje vrednosti SNR-a na RF deonici, i time od parametra fedinga. Dobitak koji se dobija implementiranjem AF releja promenljivog pojačanja u odnosu na relej konstantnog pojačanja veći je kada je feding na RF deonici dublji ( $m_1 = 1$ ). Razlika između vrednosti neotklonjive verovatnoće prekida obe vrste releja manja je kada su uslovi prenosa na prvoj RF deonici povoljniji.



**Slika 5.2.2.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema za različite vrste AF releja i različite vrednosti parametra fedinga na RF deonici

### Verovatnoća greške sistema

Verovatnoće greške određuje se na osnovu ranije prikazane jednačine (3.2.13), korišćenjem verovatnoće prekida u (5.2.4), kao

$$\begin{aligned}
 P_b = & \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \left\{ 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_1\gamma}{\mu_1} \right)^k e^{-\frac{m_1\gamma}{\mu_1}} \right. \\
 & \left. \times \int_0^\infty x^{-k} \frac{(x+\gamma+1)^k}{(x+\gamma)} e^{-\frac{m_1\gamma(1+\gamma)}{\mu_1 x}} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{(x+\gamma)}{\mu_2}} \middle| \xi^2, \alpha, \beta \right) dx \right\} d\gamma.
 \end{aligned} \tag{5.2.8}$$

Korišćenjem jednačine (3.2.13) i aproksimativnog izraza za verovatnoću prekida (5.2.7) koji je izveden na osnovu gornje granice ukupnog SNR-a, može se odrediti aproksimativni izraz za verovatnoće greške

$$\begin{aligned}
P_b &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} F_\gamma(\gamma) d\gamma \\
&\cong \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \left\{ F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) [1 - F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma)] \right\} d\gamma \\
&\cong \mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2.
\end{aligned} \tag{5.2.9}$$

gde su  $F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma)$  i  $F_{\gamma_2}(\gamma)$  definisane jednačinama (5.2) i (5.8) ili (5.9), respektivno.

Zamenom (5.2) u (5.2.9), integral  $\mathfrak{S}_1$  definisan je kao

$$\begin{aligned}
\mathfrak{S}_1 &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma) d\gamma \\
&= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} d\gamma - \frac{q^p}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma}{\mu_1}\right) d\gamma.
\end{aligned} \tag{5.2.10}$$

Prvi integral u (5.2.10) identičan je kao integral u (5.1.20), dok se drugi integral u (5.2.10) rešava pomoću pravila (A.29). Integral  $\mathfrak{S}_1$  u jednačini (5.2.10) određen je kao

$$\mathfrak{S}_1 = \frac{1}{2} - \frac{\Gamma(p+m_1)}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)p} \left(\frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{m_1} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-(p+m_1)} {}_2F_1\left(1, m_1+p, 1+p; \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-1}\right). \tag{5.2.11}$$

Zamenom (5.2) i (5.8) u (5.2.9), nakon primene pravila (A.25), integral  $\mathfrak{S}_2$  dat je u obliku

$$\begin{aligned}
\mathfrak{S}_2 &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} F_{\gamma_2}(\gamma) [1 - F_{\gamma_1}^{Nak}(\gamma)] d\gamma \\
&= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m_1}{\mu_1}\right)^k \\
&\quad \times \int_0^\infty \gamma^{k+p-1} e^{-\gamma\left(\frac{m_1}{q+\mu_1}\right)} G_{2,6}^{5,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma}{16\mu_2} \left| \begin{array}{c} 1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right) d\gamma.
\end{aligned} \tag{5.2.12}$$

Prethodni integral se rešava primenom pravila (A.19) za predstavljanje eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije, i nakon toga korišćenjem pravila (A.20)

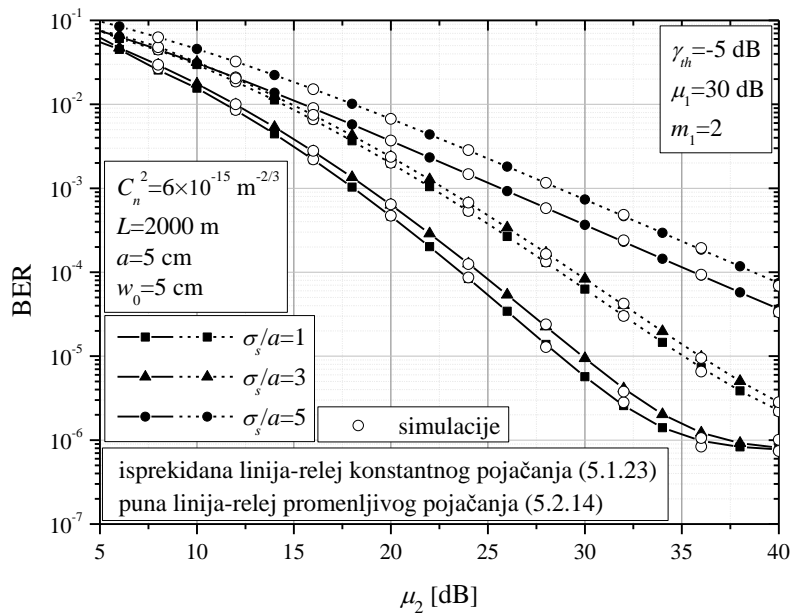
$$\mathfrak{S}_2 = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^k \left( 1 + \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^{-k-p} \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \mu_1}{16 \mu_2 (m_1 + q\mu_1)} \left| \begin{matrix} 1, 1-k-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (5.2.13)$$

Zamenom (5.2.11) i (5.2.13) u (5.2.9), izveden je aproksimativni izraz za verovatnoću greške

$$P_b \cong \frac{1}{2} - \frac{\Gamma(p+m_1)}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)p} \left( \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^{m_1} \left( 1 + \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^{-(p+m_1)} {}_2F_1 \left( 1, m_1+p, 1+p; \left( 1 + \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^{-1} \right) + \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^k \left( 1 + \frac{m_1}{q\mu_1} \right)^{-k-p} \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \mu_1}{16 \mu_2 (m_1 + q\mu_1)} \left| \begin{matrix} 1, 1-k-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (5.2.14)$$

Kompleksniji alternativni izraz za verovatnoću greške u (5.2.14) može se naći u radu [179].

Na slici 5.2.3. prikazana je zavisnost verovatnoće greške RF/FSO sistema za različite vrste releja i za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera. Sistem sa AF relejem promenljivog pojačanja ima bolje performanse od sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja.



**Slika 5.2.3.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema za različite vrste AF releja i normalizovane standardne devijacije džitera

### 5.2.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistem sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije na releju

U ovom delu disertacije analiziraće se performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije. Usvaja se ista pretpostavka da je relej pod uticajem  $N$  višestrukih CCIs,  $\{r_i\}_{i=1}^{N=1}$ , svaka sa srednjom snagom  $P_i$ . Električni signal na prijemnom delu sistema isti je kao i u jednačini (5.1.26).

Model sistema je isti kao u odeljku 5.1.2., osim što je umesto AF releja konstantnog pojačanja implementiran AF relej promenljivog pojačanja. Pojačanje releja pod uticajem šuma i interferencije definisano je kao [69], [158]

$$G^2 = \frac{1}{h_{SR}^2 P_s + \sum_{i=1}^N h_i^2 P_i + \sigma_{SR}^2}. \quad (5.2.15)$$

Na osnovu jednačina (5.1.26) i (5.2.15), ukupni SINR sistema može se naći kao

$$\gamma_{eq} = \frac{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 h_{SR}^2 P_s}{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sum_{i=1}^N h_i^2 P_i + P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{(\gamma_1 + 1)(\gamma_2 + 1) + \gamma_1}. \quad (5.2.16)$$

#### Verovatnoća prekida sistema

Na osnovu (5.2.16), verovatnoća prekida asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma i interferencije na releju može se odrediti kao

$$P_{out} = 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[ \gamma_1 > \frac{\gamma_{th} (x + \gamma_{th} + 1)(y + 1)}{x} \right] f_{\gamma_2}(x + \gamma_{th}) f_{\gamma_1}(y) dx dy. \quad (5.2.17)$$

Zamenom (5.1), (5.2) i (5.7) u (5.2.17), i korišćenjem pravila (A.25), izraz za verovatnoću posmatranog sistema je

$$\begin{aligned} P_{out} = & 1 - \frac{\xi^2 (m_1 - 1)!}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(m_1 N)} \left( \frac{m_1}{\mu_1} \right)^{m_1 N} \sum_{k=0}^{m_1-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \right)^k \\ & \times \int_0^\infty \int_0^\infty (x + \gamma_{th})^{-1} y^{m_1 N - 1} \left( \frac{(x + \gamma_{th} + 1)(y + 1)}{x} \right)^k \\ & \times e^{-\frac{m_1 \gamma_{th} (x + \gamma_{th} + 1)(y + 1)}{\mu_1 x}} e^{-\frac{m_1}{\mu_1} y} G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{(x + \gamma_{th})}{\mu_2}} \middle| \xi^2 + 1, \alpha, \beta \right) dx dy. \end{aligned} \quad (5.2.18)$$

Rešenje integrala u (5.2.18) ne može se dobiti u zatvorenom obliku, pa će rezultati biti dobijeni numeričkom integracijom. Takođe, u nastavku je predloženo aproksimativno rešenje verovatnoće prekida.

Pod pretpostavkom da je interferencija dominantna smetnja, šum na releju se može zanemariti. U tom slučaju, električni signal na prijemnom delu sistema je dat u obliku

$$r_D = P_t I_{RD} G \eta \left( h_{SR} r + \sum_{i=1}^N h_i r_i \right) + n_{RD}. \quad (5.2.19)$$

Dalje, smatra se da pojačanje  $G$  zavisi samo od uslova u kanalu na prvoj deonici, a ne od šuma i interferencije. Stoga, pojačanje definisano jednačinom (5.2.15) je u ovom slučaju određeno kao

$$G^2 = \frac{1}{h_{SR}^2 P_s}. \quad (5.2.20)$$

Na osnovu (5.2.19) i (5.2.20), ukupni SNR definisan je

$$\gamma_{eq} = \frac{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 h_{SR}^2 P_s}{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sum_{i=1}^N h_i^2 P_i + \sigma_{RD}^2} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 \gamma_I + \gamma_1} = \frac{1}{\frac{\gamma_I}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2}}. \quad (5.2.21)$$

Aproksimativni izraz za verovatnoću prekida određen na osnovu (5.2.21) kao [38],[39],[158]

$$P_{out} = \Pr[\gamma_{eq} < \gamma_{th}] = \Pr\left[\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 \gamma_I + \gamma_1} < \gamma_{th}\right] \cong \Pr\left[\min\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_I}, \gamma_2\right) < \gamma_{th}\right], \quad (5.2.22)$$

može se lako odrediti na osnovu jednačine

$$P_{out} = F_\gamma(\gamma_{th}) \cong F_{SIR}^{Nak}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_2}(\gamma_{th}) - F_{SIR}^{Nak}(\gamma_{th}) F_{\gamma_2}(\gamma_{th}), \quad (5.2.23)$$

gde je  $F_{\gamma_2}(\gamma_{th})$  kumulativna funkcija raspodele određena jednačinama (5.8) ili (5.9), dok  $F_{SIR}^{Nak}(\gamma_{th})$  predstavlja kumulativnu funkciju raspodele trenutne vrednosti odnosa snage signala i interferencije (SIR – *Signal-to-Interference Ratio*) na releju, definisanu kao [37]

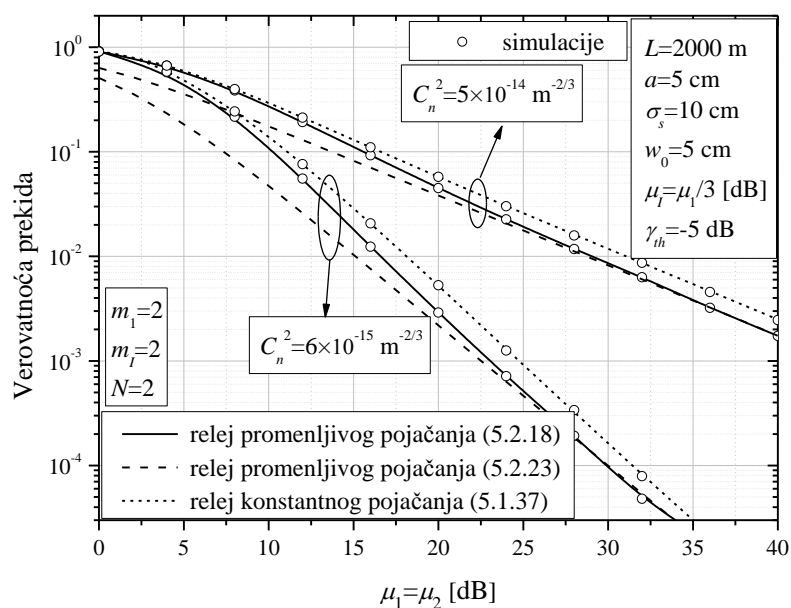
$$F_{SIR}^{Nak}(\gamma_{th}) = \frac{\Gamma(m_1 + m_I N)}{\Gamma(m_I N)} \left(\frac{m_1 \gamma_{th}}{m_I \mathcal{G}}\right)^{m_1} {}_2\tilde{F}_1\left(m_1, m_1 + m_I N; m_1 + 1; -\frac{m_1 \gamma_{th}}{m_I \mathcal{G}}\right), \quad (5.2.24)$$

gde  $\mathcal{G}$  predstavlja srednji odnos snage signala i interferencije,  $\mathcal{G} = \frac{\mu_1}{\mu_I}$ , i  ${}_2\tilde{F}_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$  je

hipergeometrijska funkcija definisana [166, (07.24.02.0001.01)].



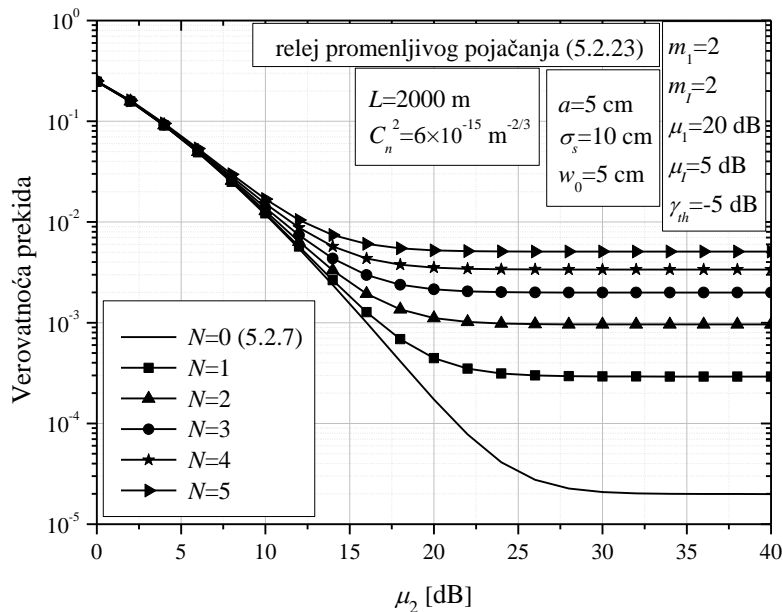
Na slici 5.2.4. prikazana je zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema za različite vrste releja od srednjeg SNR-a na RF deonici i električnog SNR-a na FSO deonici u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja određena je na osnovu jednačine (5.2.18). Takođe, prikazani su i aproksimativni rezultati dobijeni jednačinom (5.2.23), koji su izvedeni sa pretpostavkom da je šum na releju zanemarljivo mali i da je pojačanje određeno samo uslovima u RF kanalu. Može se primetiti da ova aproksimacija daje veoma precizne rezultate u opsegu velikih vrednosti SNR-ova  $\mu_1$  i  $\mu_2$ . U oblasti nižih vrednosti srednjih SNR-ova, primećuje se neslaganje krivih koji su dobijeni na osnovu jednačina (5.2.18) i (5.2.23). Pored verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja, prikazani su i rezultati za sistem sa AF relejem konstantnog pojačanja. Kao i kod sistema bez interferencije na releju, performanse sistema sa AF relejem sa promenljivog pojačanja su bolje nego odgovarajuće performanse sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja. Prikazani rezultati potvrđeni su simulacijama.



**Slika 5.2.4.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema za različite vrste releja kada je relej pod uticajem šuma i interferencije

Zavisnost verovatnoće prekida od električnog SNR-a na drugoj deonici RF/FSO sistema sa relejem promenljivog pojačanja, koji je pod uticajem šuma i interferencije, prikazana je na slici 5.2.5. Rezultati su dobijeni na osnovu aproksimativnog izraza (5.2.23), za različit broj interferencija na releju. Kao što se i očekivalo, sa porastom broja interferencija, dolazi do pogoršanja performansi sistema. Aproksimativni rezultati verovatnoće prekida sistema kada

je uticaj interferencije zanemarljivo mali, dobijeni na osnovu izraza (5.2.7), takođe su prikazani na slici 5.2.6, i u tom slučaju su dobijene najbolje performanse sistema.



**Slika 5.2.5.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja pod uticajem šuma i interferencije

### 5.2.3. Analiza efekta neidealne procene stanja RF kanala na performanse RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma

U nastavku disertacije analiziraće se performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma, uz pretpostavku neidealne procene stanja RF deonice, koja se koristi za određivanje pojačanja.

Primljeni električni signal na releju se pojačava promenljivim pojačanjem  $G$ , koje se određuje na osnovu kratkoročne statistike RF kanala. Relej prati stanje deonice između predajnika i releja, i na osnovu estimirane trenutne informacije o stanju kanala određuje pojačanje. U praksi, RF deonica je pod uticajem brzog fedinga, pa dolazi do greške prilikom estimacije kanala. To znači da estimirana informacija o stanju kanala prve deonice, koja se koristi za određivanje pojačanja, nije ista kao prava informacija o stanju kanala u trenutku transmisije signala, tako da je pojačanje određeno na osnovu nesvršene procene kanala. Nesavršena informacija o stanju kanala ukazuje da je estimacija kanala na releju „zakasnela“ u trenutku kada je relej koristi za određivanje pojačanja. Performanse relejnih RF sistema, gde je pojačanje određeno na osnovu zakasnele informacija o stanju kanala, analizirane su u radovima [55], [56], [94]. Stoga, u nastavku je izvršena analiza performansi

RF/FSO sistema sa promenljivim pojačanjem koje je određeno na osnovu zakasnele informacija o stanju kanala. Na osnovu prikazanih rezultata, može se primetiti da nesavršena estimacija ima znatan uticaj na performanse sistema.

Za ovakav RF/FSO sistem, pojačanje se određuje na osnovu estimirane trenutne informacije o stanju RF kanala, koja je u praksi zakasnela, što se može zapisati kao

$$G^2 = \frac{1}{\tilde{h}_{SR}^2 P_s}, \quad (5.2.25)$$

gde  $\tilde{h}_{SR}$  predstavlja estimiranu verziju  $h_{SR}$ . U cilju jednostavnije matematičke analize, snaga šuma na RF deonici je zanemarena prilikom određivanja pojačanja.

Na osnovu jednačina (5.1.3) i (5.2.25), ukupni SNR sistema može se naći kao [45]

$$\gamma_{eq}^{NL} = \frac{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 h_{SR}^2 P_s}{P_t^2 I_{RD}^2 G^2 \eta^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\eta^2 P_t^2 I_{RD}^2 h_{SR}^2 P_s}{\sigma_{RD}^2 \frac{\sigma_{SR}^2}{\sigma_{SR}^2}} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + \tilde{\gamma}_1}, \quad (5.2.26)$$

gde  $\tilde{\gamma}_1$  predstavlja estimiranu verziju trenutne vrednosti SNR-a na prvoj deonici,  $\gamma_1$ , koja je definisana kao

$$\tilde{\gamma}_1 = \frac{h_{SR}^2 P_s}{\sigma_{SR}^2}. \quad (5.2.27)$$

Trenutna vrednost SNR na prvoj deonici,  $\gamma_1$ , i njegova estimirana verzija,  $\tilde{\gamma}_1$ , su dve korelisane slučajne promenljive. Pošto je prva RF deonica pod uticajem Nakagami- $m$  fedinga, združena funkcija gustine verovatnoće ove dve promenljive data je jednačinom (5.3).

#### *Verovatnoća prekida sistema*

Verovatnoća prekida RF/FSO sistema može se odrediti na osnovu ukupnog SNR-a koji je dat jednačinom (5.2.26) kao

$$P_{out} = F_\gamma(\gamma_{th}) = \Pr[\gamma_{eq}^{NL} < \gamma_{th}] = \Pr\left[\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + \tilde{\gamma}_1} < \gamma_{th}\right], \quad (5.2.28)$$

što se nakon kraće matematičke manipulacije može napisati u sledećem obliku

$$\begin{aligned}
P_{out} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr\left(\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 + \tilde{\gamma}_1} < \gamma_{th}\right) f_{\gamma_1, \tilde{\gamma}_1}(\gamma_1, \tilde{\gamma}_1) d\gamma_1 d\tilde{\gamma}_1 \\
&= 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \bar{F}_{\gamma_2}\left(\frac{\gamma_{th} y}{x}\right) f_{\gamma_1, \tilde{\gamma}_1}(x + \gamma_{th}, y) dx dy,
\end{aligned} \tag{5.2.29}$$

gde je  $\bar{F}_{\gamma_2}(\cdot)$  komplementarna kumulativna funkcija raspodele definisana kao  $\bar{F}_{\gamma_2}(\cdot) = 1 - F_{\gamma_2}(\cdot)$ . Kumulativna funkcija raspodele  $F_{\gamma_2}(\cdot)$  data je jednačinom (5.8) ili (5.9). Zamenom (5.3) i (5.9) u (5.2.29), verovatnoća prekida je

$$\begin{aligned}
P_{out} &= 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{\gamma_{th}y}{\mu x}} \middle| \begin{matrix} 1, & \xi^2 + 1 \\ \xi^2, & \alpha, & \beta, & 0 \end{matrix} \right) \right\} \frac{1}{(1-\rho)\Gamma(m_1)} \\
&\quad \times \left(\frac{m_1}{\mu_1}\right)^{m_1+1} \left(\frac{(x+\gamma_{th})y}{\rho}\right)^{\frac{m_1-1}{2}} e^{-\frac{m_1(x+\gamma_{th}+y)}{(1-\rho)\mu_1}} I_{m_1-1}\left(\frac{2m_1\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1}\right) dx dy \\
&= 1 - \mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_2,
\end{aligned} \tag{5.2.30}$$

gde je  $\rho$  koeficijent korelacije između korelisanih slučajnih promenljivih  $\gamma_1$  i  $\tilde{\gamma}_1$ . Prvi integral  $\mathfrak{I}_1$  može se rešiti primenom pravila (A.31) i jednačine (5.2) kao

$$\mathfrak{I}_1 = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma_{th}}{\mu_1}\right). \tag{5.2.31}$$

Drugi integral  $\mathfrak{I}_2$  je

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_2 &= \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(m_1)(1-\rho)\rho^{\frac{m_1-1}{2}}} \left(\frac{m_1}{\mu_1}\right)^{m_1+1} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
&\quad \times \int_0^\infty \int_0^\infty (x+\gamma_{th})^{\frac{m_1-1}{2}} e^{-\frac{m_1x}{(1-\rho)\mu_1}} I_{m_1-1}\left(\frac{2m_1\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1}\right) \\
&\quad \times y^{\frac{m_1-1}{2}} e^{-\frac{m_1y}{(1-\rho)\mu_1}} G_{2,4}^{3,1}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{\gamma_{th}y}{\mu x}} \middle| \begin{matrix} 1, & \xi^2 + 1 \\ \xi^2, & \alpha, & \beta, & 0 \end{matrix} \right) dx dy,
\end{aligned} \tag{5.2.32}$$

pri čijem rešavanju se najpre koristi razvoj Beselove funkcije u red primenom pravila (A.30)

$$I_{m_1-1}\left(\frac{2m_1\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1}\right) = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \sum_{k=0}^\infty \frac{1}{(m_1)_k k!} \left(\frac{m_1\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1}\right)^{2k+m_1-1}, \tag{5.2.33}$$

nakon čega je integral  $\mathfrak{I}_2$  zapisan kao

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_2 &= \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma^2(m_1)} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{m_1^{2k+2m_1} \rho^k}{(m_1)_k k!(1-\rho)^{2k+m_1} \mu_1^{2k+2m_1}} \\ &\quad \times \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (x+\gamma_{th})^{k+m_1-1} e^{-\frac{m_1x}{(1-\rho)\mu_1}} dx \times \mathfrak{I}_{21}, \end{aligned} \quad (5.2.34)$$

gde je

$$\mathfrak{I}_{21} = \int_0^{\infty} y^{k+m_1-1} e^{-\frac{m_1y}{(1-\rho)\mu_1}} G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_{th}y}{\mu_1x}} \left| \begin{matrix} 1, & \xi^2+1 \\ \xi^2, & \alpha, & \beta, & 0 \end{matrix} \right. \right) dy. \quad (5.2.35)$$

Najpre se eksponencijalna funkcija predstavlja preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.19), pa je rešenje dobijenog integrala izvedeno pomoću pravila (A.15), uz pomoć (A.3), (A.4), (A.16), (A.17). Nakon toga, vrši se transformacija parametra Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.7) i (A.8), i smanjenje reda iste Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.9) i (A.32). Konačan oblik integrala  $\mathfrak{I}_{21}$  dobija se u zatvorenom obliku

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{21} &= \frac{2^{\alpha+\beta-3} m_1^{-(k+m_1)}}{\pi((1-\rho)\mu_1)^{-(k+m_1)}} \\ &\quad \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th} (1-\rho) \mu_1}{16\mu_2 m_1 x} \left| \begin{matrix} 1, & 1-k-m_1, & \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, & \frac{\alpha}{2}, & \frac{\alpha+1}{2}, & \frac{\beta}{2}, & \frac{\beta+1}{2}, & 0 \end{matrix} \right. \right). \end{aligned} \quad (5.2.36)$$

Zamenom (5.2.36) u (5.2.34), integral  $\mathfrak{I}_2$  se može napisati kao

$$\mathfrak{I}_2 = \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma^2(m_1)} e^{-\frac{m_1\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{m_1^{k+m_1} \rho^k}{(m_1)_k k!(1-\rho)^k \mu_1^{k+m_1}} \times \mathfrak{I}_{22}, \quad (5.2.37)$$

gde je

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{22} &= \int_0^{\infty} (x+\gamma_{th})^{k+m_1-1} e^{-\frac{m_1x}{(1-\rho)\mu_1}} \\ &\quad \times G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th} (1-\rho) \mu_1}{16\mu_2 m_1 x} \left| \begin{matrix} 1, & 1-k-m_1, & \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, & \frac{\alpha}{2}, & \frac{\alpha+1}{2}, & \frac{\beta}{2}, & \frac{\beta+1}{2}, & 0 \end{matrix} \right. \right) dx. \end{aligned} \quad (5.2.38)$$

Prvo će se izvršiti transformacija Mejerove  $G$ -funkcije u jednačini (5.2.38) primenom pravila (A.18), kao i predstavljanje eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije

primenom pravila (A.19). Nakon toga će se izvršiti primena binomne teoreme, koja je definisana jednačinom (A.26), kao  $(x + \gamma_{th})^{k+m_1-1} = \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} x^n \gamma_{th}^{k+m_1-1-n}$ . Konačno,

integral  $\mathfrak{I}_{22}$  ima oblik

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{22} = & \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \gamma_{th}^{k+m_1-1-n} \int_0^{\infty} x^n G_{0,1}^{1,0} \left( \frac{m_1 x}{(1-\rho)\mu_1} \middle| - \right) \\ & \times G_{6,3}^{2,5} \left( \frac{16\mu_2 m_1 x}{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th} (1-\rho)\mu_1} \middle| \begin{array}{l} \frac{2-\xi^2}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, \frac{1-\beta}{2}, 1 \\ 0, k+m_1, -\frac{\xi^2}{2} \end{array} \right) dx. \end{aligned} \quad (5.2.39)$$

Primenom pravila (A.20) za rešavanje integrala, i pravila (A.18) za transformaciju dobijene Mejerove  $G$ -funkcije, dobija se

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{22} = & \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \gamma_{th}^{k+m_1-1-n} \left( \frac{m_1}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{-(n+1)} \\ & \times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \middle| \begin{array}{l} 1, 1-k-m_1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right). \end{aligned} \quad (5.2.40)$$

Zamenom (5.2.40) u (5.2.37), i nakon toga (5.2.31) i (5.2.37) u (5.2.30), dobija se konačan izraz za verovatnoću prekida posmatranog sistema

$$\begin{aligned} P_{out} = & 1 - \frac{1}{\Gamma(m_1)} \Gamma \left( m_1, \frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1} \right) + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma^2(m_1)} \\ & \times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \left( \frac{m_1 \gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{k+m_1-n-1} \\ & \times e^{-\frac{m_1 \gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \middle| \begin{array}{l} 1, 1-k-m_1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right). \end{aligned} \quad (5.2.41)$$

Kada fluktuacije intenziteta optičkog signala na prijemu potiču samo od gama-gama atmosferske turbulencije, verovatnoća prekida može se naći nalaženjem granične vrednosti jednačine (5.2.41) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , primenom istih pravila kao i u ranijim analizama. Izraz za verovatnoću prekida RF/FSO sistema kada je greška pozicioniranja zanemarena je

$$\begin{aligned}
P_{out}^{GG} &= 1 - \frac{1}{\Gamma(m_1)} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1}\right) + \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma^2(m_1)} \\
&\times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \left(\frac{m_1 \gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}\right)^{k+m_1-n-1} \\
&\times e^{-\frac{m_1 \gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} G_{2,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \left| \begin{array}{c} 1, 1-k-m_1 \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right. \right).
\end{aligned} \tag{5.2.42}$$

Kada je RF deonica pod uticajem Rejljevog fedinga, verovatnoća prekida može se naći zamenom  $m_1 = 1$  u (5.2.41) kao

$$\begin{aligned}
P_{out} &= 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^k \binom{k}{n} \frac{\rho^k}{k!^2 (1-\rho)^{k-n-1} \mu_1^{k-n}} \\
&\times \gamma_{th}^{k-n} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \left| \begin{array}{c} 1, -k, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right. \right).
\end{aligned} \tag{5.2.43}$$

Dobijeni izraz za verovatnoću prekida u jednačini (5.2.43) publikovan je u radu [45].

Nalaženjem granične vrednosti jednačine (5.2.43) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , dobija se verovatnoća prekida sistema kada je RF deonica pod uticajem Rejljevog fedinga, dok je FSO kanal pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije.

- *Asimptotski rezultati*

U nastavku ovog poglavlja biće prikazani neki asimptotski rezultati za verovatnoću prekida posmatranog sistema, pri čemu je feding na RF deonici modelovan Rejljevom raspodelom.

Da bi se dobili jednostavniji izrazi za verovatnoću prekida, u jednačini (5.2.33) viši članovi beskonačne sume, koja se javlja usled razvoja Beselove funkcije u red, biće zanemareni. Ova aproksimacija važi samo pod određenim uslovima. Ako se u obzir uzme samo prvi član beskonačne sume, aproksimacija je validna kada argument Beselove funkcije u (5.2.32) teži nuli, tj. za velike vrednosti srednjeg SNR-a na prvoj deonici i/ili za veoma male vrednosti koeficijenta korelacije. Zamenom  $k = 0$  i  $m_1 = 1$  u (5.2.41), dobija se

$$P_{out}^{\infty} \approx 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2 (1-\rho)}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \middle| \begin{matrix} 1, 0, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.44)$$

Stanje kanala FSO deonice ima veliki uticaj na tačnost ove aproksimacije. Mejerova  $G$ -funkcija u (5.2.43) je dominantan član kada je njen argument veliki, tj. za male vrednosti električnog SNR-a na FSO deonici ili u uslovima jake atmosferske turbulencije. Pod ovim uslovima aproksimacija data jednačinom (5.2.44) nije tačna, i potreban je veći broj članova sume u (5.2.43) da bi se dobila zadovoljavajuća aproksimacija tačnih rezultata. Znači, ova aproksimacija važi samo za velike vrednosti srednjeg SNR-a na RF deonici i/ili male vrednosti koeficijenta korelacije, kada je električni SNR na drugoj deonici dovoljno veliki u uslovima slabe turbulencije.

Za veoma velike vrednosti srednjeg SNR-a na RF deonici,  $\mu_1$ , dolazi do pojavljivanja neotklonljive verovatnoće prekida, koji se može direktno dobiti određivanjem granične vrednosti kada  $\mu_1 \rightarrow \infty$  u jednačini (5.2.44) kao

$$P_{out1}^{floor} \approx \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2 (1-\rho)}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \middle| \begin{matrix} 1, 0, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.45)$$

Aproksimacija za veoma velike vrednosti srednjeg SNR-a na RF deonici je korisna jer se veoma lako može odrediti neotklonljiva verovatnoća prekida, pri čemu važi pod istim uslovima kao i aproksimacija data jednačinom (5.2.44).

U slučaju kada je vrednost električnog SNR-a,  $\mu_2$ , veoma velika, Mejerova  $G$ -funkcija u (5.2.43) teži nuli na osnovu pravila (A.24). Stoga, verovatnoća prekida za bilo koje vrednost  $\mu_1$  može se naći određivanjem granične vrednosti kada  $\mu_2 \rightarrow \infty$  u (5.2.43) kao

$$P_{out2}^{floor} \approx 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}}. \quad (5.2.46)$$

Može se primetiti da verovatnoća prekida za velike vrednosti električnog SNR-a na FSO deonici, koja je određena jednačinom (5.2.46), ne zavisi od koeficijenta korelacije, već samo od praga i vrednosti srednjeg SNR-a  $\mu_1$ . Ovaj jednostavni izraz može se efikasno koristiti za



izračunavanje neotklonljive verovatnoće prekida sistema, što će biti ilustrovano u nastavku disertacije.

- *Granični slučajevi za  $\rho = 0$  i  $\rho = 1$*

Kada je pojačanje na releju određeno na osnovu estimirane informacije o stanju kanala koja je totalno nezavisna od informacije o stanju kanala u trenutku slanja, tj. ove kanalne vrednosti su u potpunosti nekorelisane i važi  $\rho = 0$ , Beselova funkcija u (5.2.32) jednaka je jedinici na osnovu pravila (A.33). Stoga, na sličan način kao i kod izvođenja prethodnih aproksimacija, verovatnoća prekida može se dobiti zamenom  $\rho = 0$  u (5.2.44)

$$P_{out}^{\rho=0} = 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} \times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16 \mu_2} \middle| \begin{matrix} 1, 0, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha + 1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta + 1}{2}, 1, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.47)$$

Kada je pojačanje na releju određeno na osnovu estimirane kanalne vrednosti koja je u potpunosti korelisana sa trenutnom informacijom u trenutku slanja, tj.  $\rho = 1$ , posmatran sistem se svodi na sistem koji je prikazan u odeljku 5.2.1. Za RF/FSO sistem kada je RF deonica pod uticajem Rejljevog fedinga, tačan izraz se dobija zamenom  $m_1 = 1$  u (5.2.4). Aproksimativni izraz je određen jednačinom (5.2.7) pri čemu su kumulativne funkcije verovatnoće određene jednačinama (5.5) i (5.8) ili (5.9), respektivno. Zamenom (5.5) i (5.9) u (5.2.7), aproksimativni izraz određen je kao

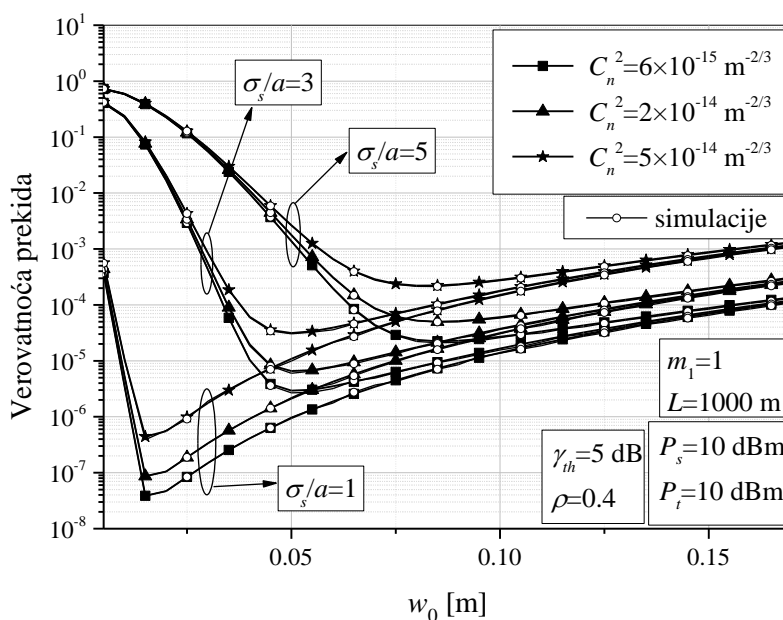
$$P_{out}^{\rho=1} \approx 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} + \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha \beta \kappa \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\mu_2}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.48)$$

Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja kanala RF deonice u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa prikazana je na slici 5.2.6. Greška pozicioniranja određena je normalizovanom standardnom devijacijom džitera, koja uzima vrednosti  $\sigma_s/a = 1, 3$  i  $5$ . Prikazani su rezultati za RF/FSO sistem kada je druga deonica pod uticajem slabe, umerene i jake atmosferske turbulencije. Na slici se može uočiti postojanje minimuma verovatnoće prekida za određenu optimalnu vrednost širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa,  $w_{0opt}$ . Performanse asimetričnih RF/FSO sistema mogu se znatno poboljšati pravilnim odabirom FSO predajnog sklopa. Na osnovu

prikazanih rezultata, zaključuje se da vrednost optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa manja od optimalne dovodi do pogoršanja performansi sistema.

**Tabela 5.1.** Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa i na prijemu

atmosferska turbulencija	slaba		umerena		jaka	
	$w_{0opt}$ [cm]	$w_L/a$	$w_{0opt}$ [cm]	$w_L/a$	$w_{0opt}$ [cm]	$w_L/a$
$\sigma_s/a=1$	1.6	3.25	1.6	3.25	1.6	3.25
$\sigma_s/a=2$	3.4	6.85	3.4	6.85	3.3	6.65
$\sigma_s/a=3$	5.1	10.26	5.1	10.26	5.0	10.06
$\sigma_s/a=4$	6.9	13.87	6.8	13.68	6.6	13.27
$\sigma_s/a=5$	8.6	17.29	8.5	17.1	8.2	16.49



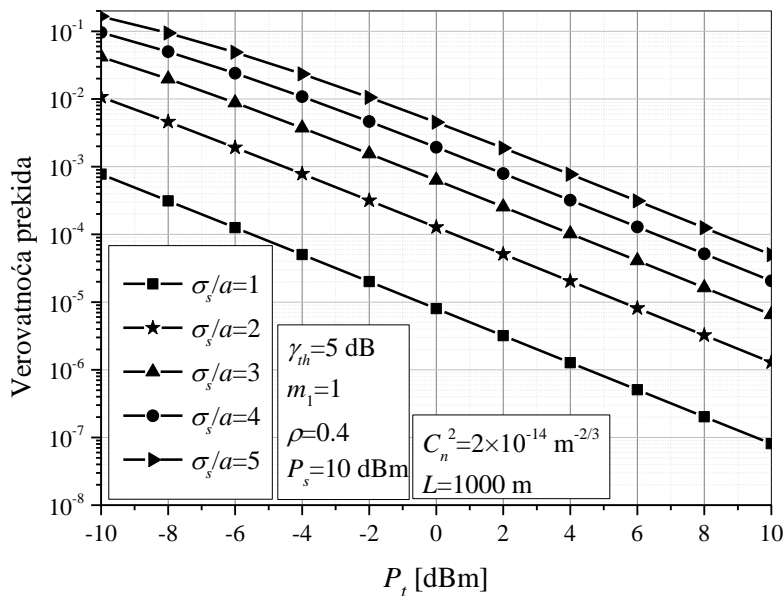
**Slika 5.2.6.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa

Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa,  $w_{0opt}$ , uzimajući u obzir različite parametre koji određuju uslove prenosa na FSO deonici, prikazane su u Tabeli 5.1. Može se zaključiti da normalizovana standardna devijacija džitera ima veoma jak uticaj na vrednost  $w_{0opt}$ . Takođe, ova optimalna vrednost ne zavisi od jačine atmosferske turbulencije kada je  $\sigma_s/a = 1$ , što odgovara sistemu sa zanemarljivo malom greškom pozicioniranja. Sa druge strane, kada je  $\sigma_s/a = 5$ , greška pozicioniranja je dosta velika i ima dominantan uticaj na performanse sistema. Širenje optičkog snopa prilikom prenosa je izraženije usled jače atmosferske turbulencije (jednačina (2.3.21)), tako da se sa pogoršanjem

uslova atmosferske turbulencije smanjuje vrednost  $w_{0opt}$ , što se može videti i na osnovu prikazanih rezultata u Tabeli 5.1.

**Tabela 5.2.** Optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa  $w_{0opt}$  [cm]

$P_t$ [dBm]	$\sigma_s/a=1$	$\sigma_s/a=2$	$\sigma_s/a=3$	$\sigma_s/a=4$	$\sigma_s/a=5$
-10	1.6	3.1	4.2	5.2	5.9
-6	1.6	3.2	4.7	5.9	7.0
-2	1.6	3.3	4.9	6.4	7.7
2	1.6	3.4	5.0	6.7	8.2
6	1.6	3.4	5.1	6.8	8.4
10	1.6	3.4	5.1	6.8	8.5

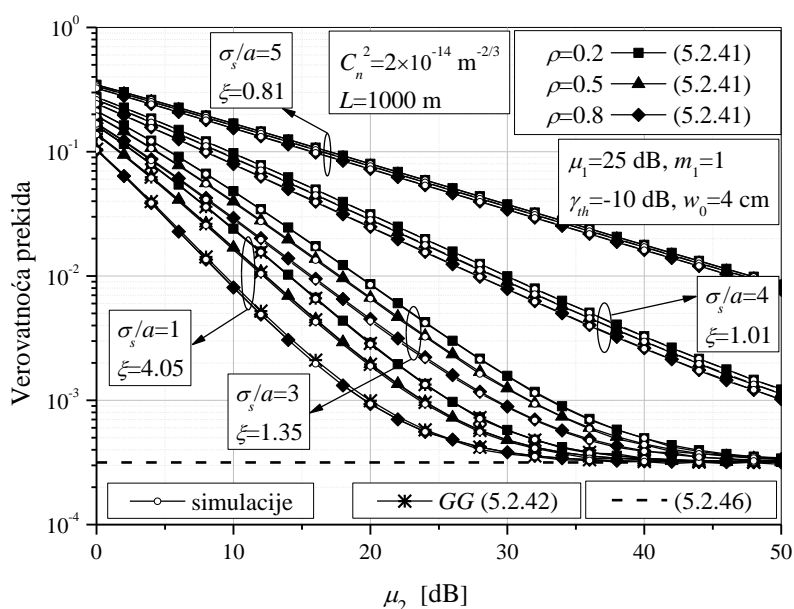


**Slika 5.2.7.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od optičke snage

Tabela 5.2. prikazuje procenjene optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa u umerenim uslovima atmosferske turbulencije, dok su ostali parametri sistema i kanala isti kao i na slici 5.2.7. Na osnovu ovih estimiranih vrednosti  $w_{0opt}$ , nacrtana je zavisnost verovatnoće prekida od optičke snage na predajnom teleskopu za različite vrednosti  $\sigma_s/a$ , koja je prikazana na slici 5.2.7. Usled veće optičke snage, performanse sistema su bolje. Takođe, primećeno je da je uticaj parametra  $\sigma_s/a$  na verovatnoću prekida sistema veoma velik. Iz Tabele 5.2. može se videti da povećanje optičke snage nema uticaj na

vrednost  $w_{0opt}$  kada je  $\sigma_s/a = 1$ . Sa povećanjem normalizovane standardne devijacije džitera, optička snaga ima značajnu ulogu prilikom određivanja optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa.

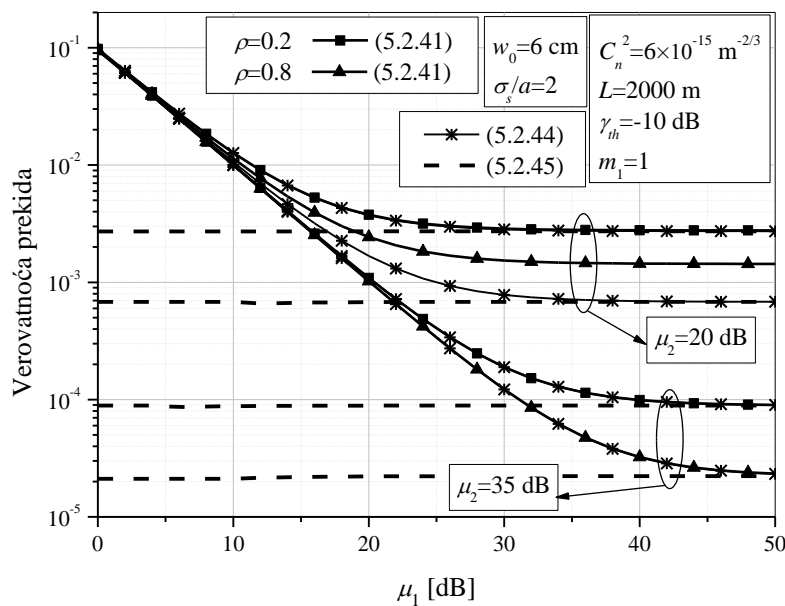
Postojanje optimalne vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa javlja se usled sledećih pojava. Širi optički snop na predaji dovodi do redukovanja greške pozicioniranja, ali se u isto vreme smanjuje primljena optička snaga. Usled užeg optičkog snopa, smanjuju se uticaji geometrijskih gubitaka, ali je greška pozicioniranja veća. Stoga, može se zaključiti da pravilan odabir FSO predajnog sklopa igra bitnu ulogu u određivanju performansi sistema. Takođe, od velike važnosti je i površina fotodetektora na prijemu, kojom se kontroliše „količina“ primljenog intenziteta svetlosti, kako korisnog signala, tako i šuma pozadinskog zračenja.



**Slika 5.2.8.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od električnog SNR-a na drugoj deonici

Na slici 5.2.8. prikazana je zavisnost verovatnoće prekida od električnog SNR-a za različite vrednosti koeficijenta korelacije i normalizovane standardne devijacije džitera. Poboljšanje performansi sistema primećeno je usled povećanja vrednosti koeficijenta korelacije, što odgovara „tačnijoj“ proceni RF deonice na osnovu koje se određuje pojačanje na releju. Uticaj korelacije na performanse sistema je izraženiji kada je vrednost parametra  $\sigma_s/a$  manja, tj. kada je greška pozicioniranja slabija i pozicioniranje FSO predajnika i prijemnika preciznije. Kada je  $\sigma_s/a = 5$ , uticaj korelacije na verovatnoću prekida je neznan. U ovom slučaju, greška pozicioniranja je veoma velika i vibracije optičkog snopa

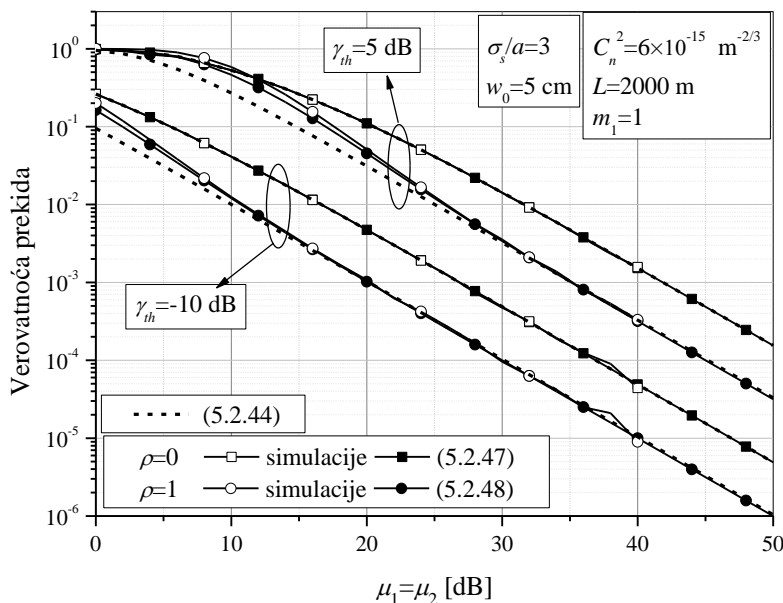
su veoma jake, pa je optički signal prilikom prenosa kroz FSO kanal degradiran u velikoj meri i korelacija nema veliki uticaj na verovatnoću prekida. Na slici 5.2.8. takođe su prikazani rezultati dobijeni na osnovu jednačine (5.2.42), koji važe za sistem kada je FSO deonica pod uticajem samo atmosferske turbulencije. Krive dobijene na osnovu ovog izraza se preklapaju sa odgovarajućim za slučaj kada je  $\sigma_s/a = 1$ . Takođe, u oblasti velikih vrednosti električnog SNR-a,  $\mu_2$ , primećeno je postojanje neotklonjive verovatnoće prekida, koja se poklapa sa aproksimacijom koja je data jednačinom (5.2.46). Ova neotklonjive verovatnoće prekida zavisi samo od srednjeg SNR-a na RF deonici, pa sve prikazane krive na slici 5.2.8. teže ka istoj vrednosti verovatnoće prekida.



**Slika 5.2.9.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od srednjeg SNR-a na prvoj deonici

Slika 5.2.9. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od srednjeg SNR-a na RF deonici, za različite vrednosti koeficijenta korelacije i električnog SNR-a na FSO deonici. Pored tačnih rezultata, prikazani su i odgovarajuće aproksimacije definisane jednačinama (5.2.44) i (5.2.45). Aproksimacija dobijena na osnovu jednačine (5.2.44) daje odlična poklapanja sa tačnim rezultatima kada je vrednost električnog SNR-a na drugoj deonici  $\mu_2 = 35$  dB. Ipak, kada je  $\mu_2 = 20$  dB, aproksimacija (5.2.44) ne daje tačne rezultate kada je koeficijent korelacije veliki ( $\rho = 0.8$ ), dok se dobijaju dosta precizni rezultati za niže vrednosti koeficijent korelacije ( $\rho = 0.2$ ). Takođe je primećena neotklonjiva verovatnoća prekida u oblasti velikih vrednosti

srednjeg SNR-a na RF deonici, koja se poklapa sa aproksimacijom koja je data jednačinom (5.2.45), kada parametri sistema zadovoljavaju uslove izvođenja.

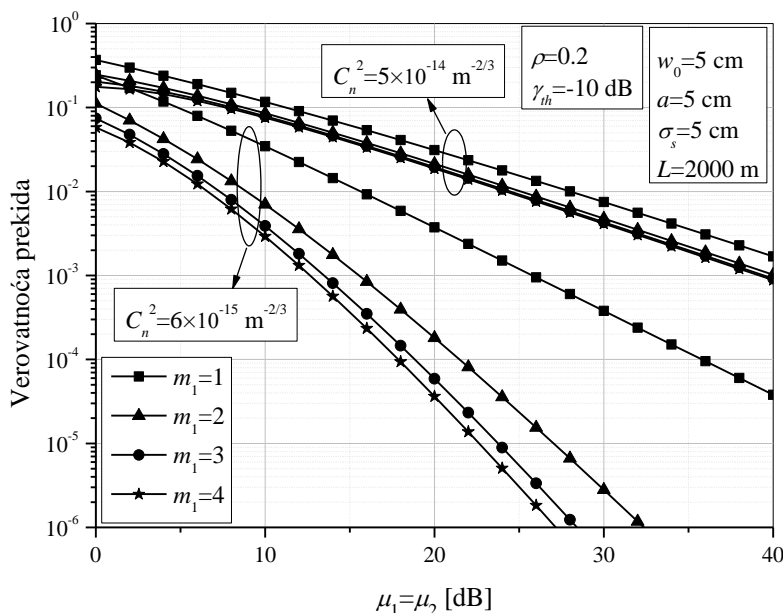


**Slika 5.2.10.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od  $\mu_1 = \mu_2$

Zavisnost verovatnoće prekida od srednjeg SNR-a na RF deonici i električnog SNR-a na FSO deonici prikazan je na slici 5.2.10. Posmatraju se dva granična slučaja ( $\rho = 0$  i  $\rho = 1$ ) i različite vrednosti praga. Rezultati za  $\rho = 0$  i  $\rho = 1$  su dobijeni na osnovu jednačina (5.2.47) i (5.2.48), respektivno, i potvrđeni su Monte Carlo simulacijama. Pošto rezultati za  $\rho = 1$ , tj. jednačina (5.2.48), predstavljaju aproksimaciju, primećeno je neslaganje ovih i simulacionih rezultata u opsegu malih vrednosti srednjih SNR-ova. Takođe, prikazani su rezultati aproksimacije (5.2.44), koja pruža zadovoljavajuće rezultate na velikim vrednostima srednjih SNR-ova. U skladu sa očekivanjima, performanse sistema su bolje kada je vrednost praga manja, i kada je koeficijent korelacije veći.

Slika 5.2.11. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice za različite dubine fedinga na RF deonici, dok je FSO deonica pod uticajem jake i slabe atmosferske turbulencije. Kada je feding plići, što odgovara većoj vrednosti parametra  $m_1$ , sistem ima bolje performanse. Kada je  $m_1=1$ , i kada je statistika fedinga na RF deonici opisana Rejljevom raspodelom, vrednost verovatnoće prekida je najveća. Takođe, na slici 5.2.11. može se videti da parametar fedinga ima veoma velik uticaj na performanse sistema kada je prenos optičkog signala pod uticajem slabe atmosferske turbulencije. Kada je stanje FSO kanala veoma nepovoljno za prenos optičkog signala, i

uticaj atmosfenske turbulencije je veoma jak, povećanje parametra Nakagami- $m$  fedinga neće bitno uticati na poboljšanje performansi sistema.



**Slika 5.2.11.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice za različite vrednosti dubine fedinga na RF deonici

### Verovatnoća greške sistema

Kao i dosadašnjoj analizi, verovatnoća prekida određuje se na osnovu ranije date jednačine (3.2.13). Zamenom (5.2.41) u (3.2.13), dobija se

$$\begin{aligned}
 P_b &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \left\{ 1 - \frac{1}{\Gamma(m_1)} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1 \gamma_{th}}{\mu_1}\right) + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma^2(m_1)} \right. \\
 &\quad \times \sum_{k=0}^\infty \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \left( \frac{m_1}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{k+m_1-n-1} \gamma_{th}^{k+m_1-n-1} e^{-\frac{m_1 \gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
 &\quad \left. \times G_{3,7}^{6,2} \left[ \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \left| \begin{array}{c} 1, 1-k-m_1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right. \right] \right\} d\gamma \\
 &= \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2 + \mathfrak{I}_3.
 \end{aligned} \tag{5.2.49}$$

Parametri  $p$  i  $q$  su ranije definisani za različite vrste binarnih modulacija. Integral  $\mathfrak{I}_1$  isti je kao i jednačina (5.1.20), dok je integral  $\mathfrak{I}_2$  rešen primenom pravila (A.29) na isti način kao i integral u (5.2.10)

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_2 &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma}{\mu_1}\right) d\gamma \\
&= \frac{\Gamma(p+m_1)}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)p} \left(\frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{m_1} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-(p+m_1)} {}_2F_1\left(1, m_1 + p, 1 + p; \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-1}\right).
\end{aligned} \tag{5.2.50}$$

Integral  $\mathfrak{I}_3$  definisan je kao

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_3 &= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma^2(m_1)} \sum_{k=0}^\infty \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \\
&\quad \times \left(\frac{m_1}{(1-\rho)\mu_1}\right)^{k+m_1-n-1} \int_0^\infty \gamma^{p+k+m_1-n-2} e^{-\gamma\left(\frac{m_1}{(1-\rho)\mu_1}\right)} \\
&\quad \times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma}{16\mu_2} \left| \begin{array}{c} 1, 1-k-m_1, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right. \right) d\gamma.
\end{aligned} \tag{5.2.51}$$

Primenom pravila (A.19) za predstavljanje eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije, i pravila (A.20) za rešavanje dobijenog integrala, integral  $\mathfrak{I}_3$  je dobijen u obliku

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_3 &= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma^2(m_1)} \sum_{k=0}^\infty \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \\
&\quad \times \left(1 + \frac{m_1}{q(1-\rho)\mu_1}\right)^{-p} \left(1 + \frac{q(1-\rho)\mu_1}{m_1}\right)^{-(k+m_1-n-1)} \\
&\quad \times G_{4,7}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu_2 q \left(1 + \frac{m_1}{q(1-\rho)\mu_1}\right)} \left| \begin{array}{c} 1, 1-k-m_1, 2-p-k-m_1+n, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{array} \right. \right).
\end{aligned} \tag{5.2.52}$$

Zamenom (5.1.20), (5.2.50) i (5.2.52) u (5.2.49), dobija se konačan izraz za verovatnoću greške



$$\begin{aligned}
P_b &= \frac{1}{2} - \frac{\Gamma(p+m_1)}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)p} \left(\frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{m_1} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-(p+m_1)} {}_2F_1\left(1, m_1+p, 1+p; \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-1}\right) \\
&+ \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma^2(m_1)\Gamma(p)} \\
&\times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \\
&\times \left(1 + \frac{m_1}{q(1-\rho)\mu_1}\right)^{-p} \left(1 + \frac{q(1-\rho)\mu_1}{m_1}\right)^{-(k+m_1-n-1)} \\
&\times G_{4,7}^{6,3} \left[ \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu_2 q \left(1 + \frac{m_1}{q(1-\rho)\mu_1}\right)} \middle| \begin{matrix} 1, & 1-k-m_1, & 2-p-k-m_1+n, & \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, & \frac{\alpha}{2}, & \frac{\alpha+1}{2}, & \frac{\beta}{2}, & \frac{\beta+1}{2}, & 1+n, & 0 \end{matrix} \right]. \quad (5.2.53)
\end{aligned}$$

Nalaženjem granične vrednosti jednačine (5.2.53) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , verovatnoća greške sistema kada su fluktuacije intenziteta optičkog signala posledica jedino atmosferske turbulencije, može se naći primenom istih pravila kao i do sada

$$\begin{aligned}
P_b^{GG} &= \frac{1}{2} - \frac{\Gamma(p+m_1)}{2\Gamma(p)\Gamma(m_1)p} \left(\frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{m_1} \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-(p+m_1)} \\
&\times {}_2F_1\left(1, m_1+p, 1+p; \left(1 + \frac{m_1}{q\mu_1}\right)^{-1}\right) \\
&+ \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma^2(m_1)\Gamma(p)} \\
&\times \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{k+m_1-1} \binom{k+m_1-1}{n} \frac{\rho^k (1-\rho)^{m_1}}{(m_1)_k k!} \\
&\times \left(1 + \frac{m_1}{q(1-\rho)\mu_1}\right)^{-p} \left(1 + \frac{q(1-\rho)\mu_1}{m_1}\right)^{-(k+m_1-n-1)} \\
&\times G_{3,6}^{5,3} \left[ \frac{\alpha^2 \beta^2}{16\mu_2 q \left(1 + \frac{m_1}{q(1-\rho)\mu_1}\right)} \middle| \begin{matrix} 1, & 1-k-m_1, & 2-p-k-m_1+n, \\ \frac{\alpha}{2}, & \frac{\alpha+1}{2}, & \frac{\beta}{2}, & \frac{\beta+1}{2}, & 1+n, & 0 \end{matrix} \right]. \quad (5.2.54)
\end{aligned}$$

Zamenom  $m_1 = 1$  u (5.2.53) i primenom pravila (A.34), verovatnoća greške za sistem kada je RF deonica pod uticajem Rejljevog fedinga, dobijena je kao

$$\begin{aligned}
P_b &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p} \\
&+ \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^k \binom{k}{n} \frac{\rho^k (1-\rho) (q(1-\rho)\mu_1)^p}{k!^2 (1+q(1-\rho)\mu_1)^{k-n+p}} \\
&\times G_{4,7}^{6,3} \left[ \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu_2 q \left( 1 + \frac{1}{q(1-\rho)\mu_1} \right)} \middle| \begin{matrix} 1, -k, 1-p-k+n, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+n, 0 \end{matrix} \right].
\end{aligned} \tag{5.2.55}$$

Dobijen izraz za verovatnoću greške u jednačini (5.2.55) predstavlja rezultat koji je objavljen je u radu [45].

Nalaženjem granične vrednosti jednačine (5.2.55) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , dobija se verovatnoća greške sistema kada je RF deonica pod uticajem Rejljevog fedinga, dok je FSO kanal pod uticajem samo atmosferske turbulencije.

- *Asimptotski rezultati*

Asimptotski rezultati za verovatnoću greške sistema, sa pretpostavkom da je fedinga na RF deonici modelovan Rejljevom raspodelom, prikazani su u nastavku disertacije.

Pošto rezultati za verovatnoću greške posmatranog sistema na pružaju jasan uvid u performanse sistema, izvedeni rezultati mogu biti uprošćeni zanemarivanjem članova beskonačne sume višeg reda. Ova aproksimacija važi pod istim uslovima kao i izraz za verovatnoću prekida koji je dat jednačinom (5.2.44). Zamenom  $k = 0$  u (5.2.55), dobija se

$$\begin{aligned}
P_b^\infty &\approx \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p} + \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 (1-\rho)}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1 (1-\rho)} \right)^{-p} \\
&\times G_{4,7}^{6,3} \left[ \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16\mu_2 q \left( 1 + \frac{1}{q(1-\rho)\mu_1} \right)} \middle| \begin{matrix} 1, 0, 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1, 0 \end{matrix} \right].
\end{aligned} \tag{5.2.56}$$

Za velike vrednosti srednje vrednosti SNR-a na RF deonici, tj. kada  $\mu_1$  teži beskonačnosti, neotklonjiva verovatnoća greške može se dobiti iz jednačine (5.2.56) kao

$$P_{b1}^{floor} \approx \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 (1-\rho)}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \times G_{4,7}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2}{16 \mu_2 q} \middle| \begin{matrix} 1, 0, 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.57)$$

Kada električni SNR na FSO deonici teži beskonačnosti, Mejerova  $G$ -funkcija u jednačini (5.2.55) teži nuli. Stoga, neotklonjiva verovatnoća greške za velike vrednost  $\mu_2$  može se naći kao

$$P_{b2}^{floor} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p}. \quad (5.2.58)$$

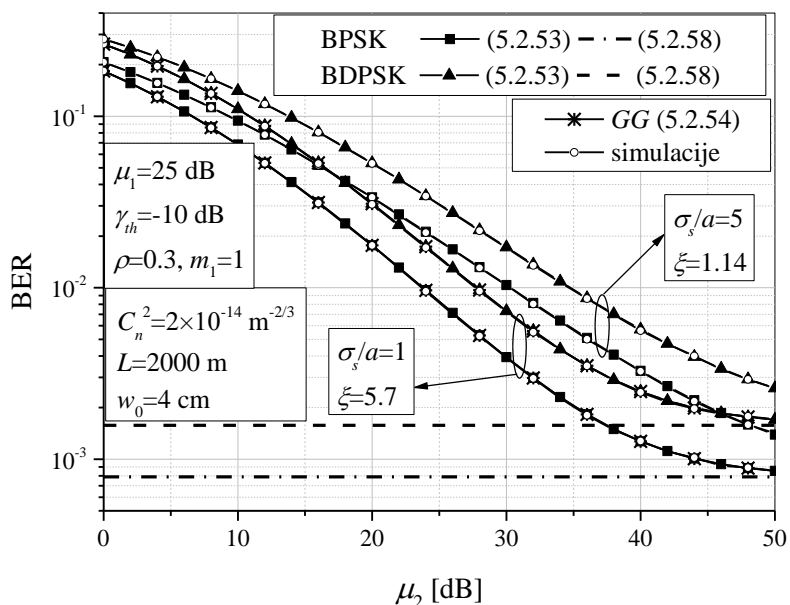
- *Granični slučajevi za  $\rho = 0$  i  $\rho = 1$*

Kada je pojačanje na releju određeno na osnovu procenjene trenutne informacije o stanju RF kanala koja se u potpunosti razlikuje od trenutne informacije u trenutku slanja signala ( $\rho = 0$ ), verovatnoća prekida se dobija zamenom  $\rho = 0$  i  $k = 0$  u (5.2.55), kao

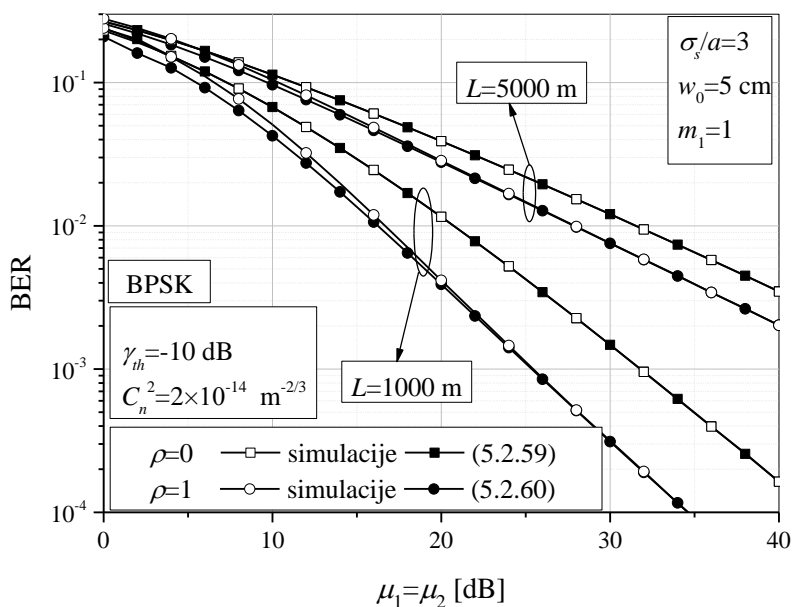
$$P_b^{\rho=0} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\mu_1 q} \right)^{-p} + \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p} \times G_{4,7}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \mu_1}{16 \mu_2 (1+q\mu_1)} \middle| \begin{matrix} 1, 0, 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.59)$$

Kada je pojačanje na releju određeno na osnovu procenjene trenutne informacije o stanju RF kanala koja je u totalnoj korelaciji sa trenutnom informacijom u trenutku slanja ( $\rho = 1$ ), verovatnoća greške može se dobiti zamenom (5.2.48) u (3.2.13). Na sličan način kao i u prethodnom izvođenju, verovatnoća greške ovakvog sistema je

$$P_b^{\rho=1} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\mu_1 q} \right)^{-p} + \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p} \times G_{3,6}^{5,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \mu_1}{16 \mu_2 (1+q\mu_1)} \middle| \begin{matrix} 1, 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right). \quad (5.2.60)$$



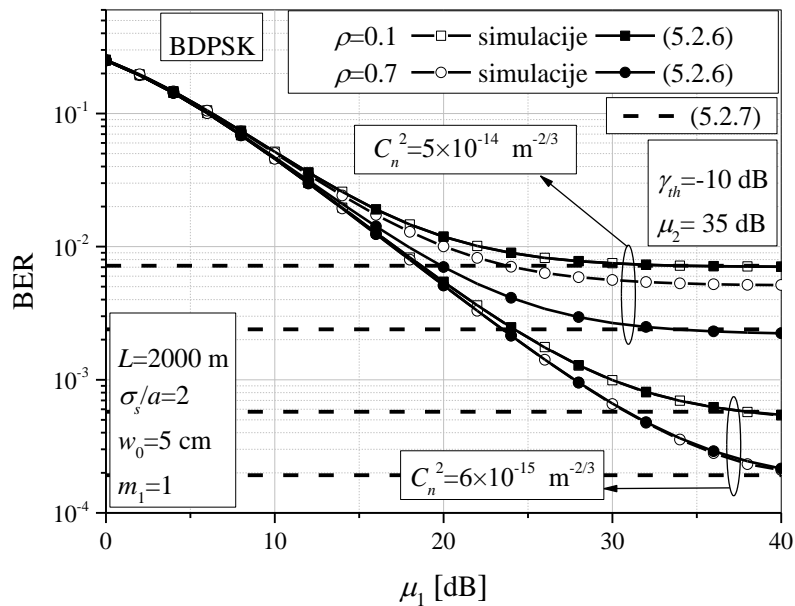
**Slika 5.2.12.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnici od električnog SNR-a na FSO deonici



**Slika 5.2.13.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice i dva granična slučaja

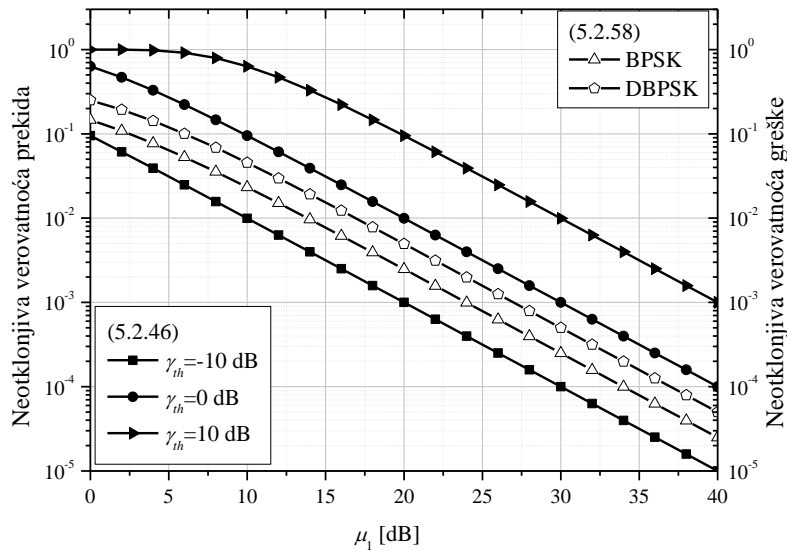
Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od električnog SNR-a na drugoj deonici prikazana je na slici 5.2.12. Posmatraju se sistemi koji koriste BPSK i BDPSK modulacije. Greška pozicioniranja određena je normalizovanom standardnom devijacijom džitera, koja uzima vrednost  $\sigma_s/a=1$  i  $\sigma_s/a=5$ . Takođe, prikazani su rezultati dobijeni pomoću jednačine (5.2.54), koji se poklapaju sa rezultatima kada je  $\sigma_s/a=1$ . Neotklonjiva verovatnoće greške takođe je prikazana na slici 5.2.12, koja se poklapa sa aproksimacijom koja je definisana jednačinom (5.2.58).

Slika 5.2.13. prikazuje zavisnost verovatnoće greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od  $\mu_1 = \mu_2$ . Posmatraju se dva granična slučaja ( $\rho = 0$  i  $\rho = 1$ ), dok je dužina FSO deonice 1 km ili 5 km. Rezultati za slučaj  $\rho = 1$  dobijeni su na osnovu aproksimativnog izraza (5.2.60), čime se može primetiti neslaganje odgovarajućih krivih i simulacija na nižim vrednostima srednjih SNR-ova. Kao što je i očekivano, manje dužine FSO deonice između releja i prijemnika daju bolje performanse sistema. Takođe, uticaj korelacije je izraženiji pri kraćoj dužini FSO deonice.



**Slika 5.2.14.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od srednjeg SNR-a na RF deonici

Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa neidealnom procenom stanja RF deonice u zavisnosti od srednjeg SNR-a na RF deonici prikazana je na slici 5.2.14, dok koeficijent korelacije uzima vrednosti 0.1 i 0.7. Optički signal se prenosi kroz atmosferski kanal koji je pod uticajem slabe i jake atmosferske turbulencije. Uticaj korelacije u većoj meri utiče na verovatnoću greške kada su uslovi prenosa na drugoj FSO deonici povoljni, tj. tokom slabe atmosferske turbulencije. Prikazani su i rezultati dobijeni aproksimacijom koja je data u jednačini (5.2.56). U uslovima jake atmosferske turbulencije primećuje se odstupanje rezultata dobijenih na osnovu aproksimacije od krivih koji su dobijeni na osnovu tačnog izraza datog jednačinom (5.2.54). Neotklonjiva verovatnoća greške takođe postoji, koja se poklapa sa aproksimacijom koja je data jednačinom (5.2.57), pod uslovom da su ispunjeni uslovi izvođenja aproksimacije (slaba atmosferska turbulencija i/ili veoma male vrednosti koeficijenta korelacije).



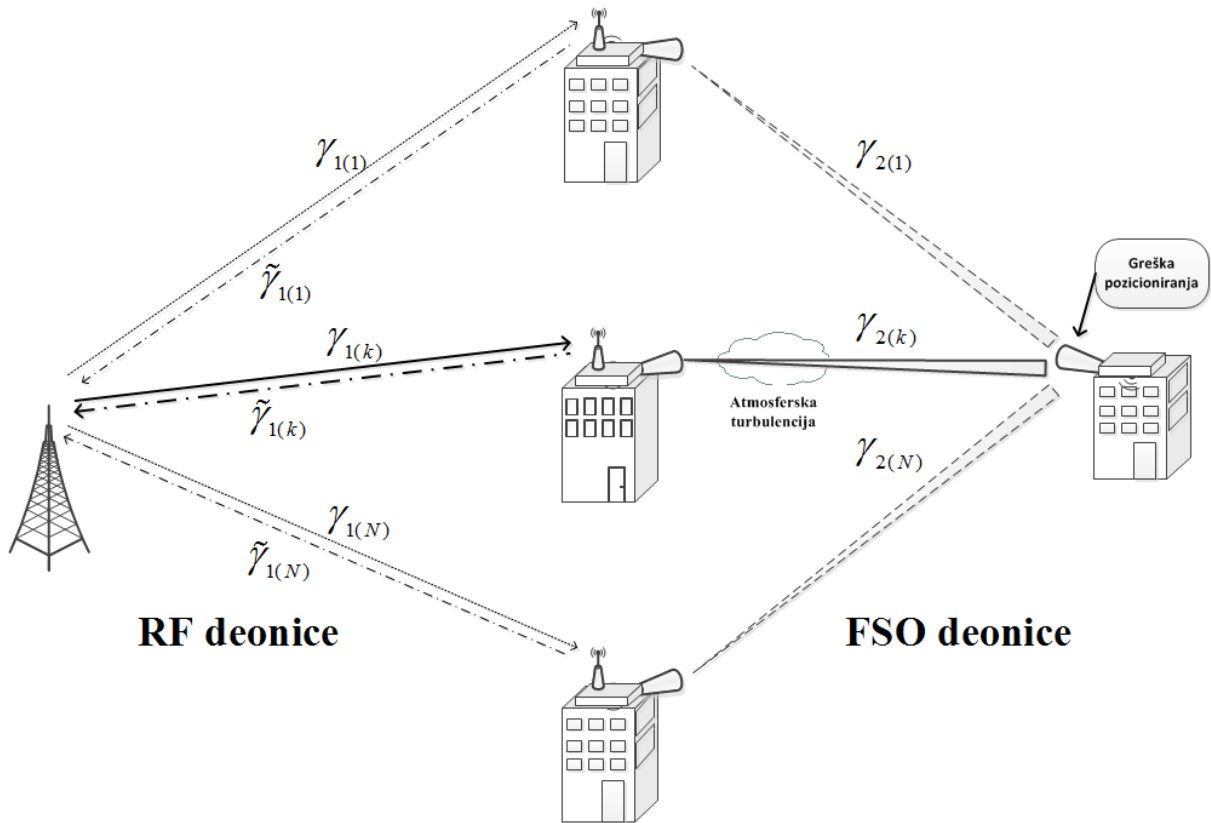
**Slika 5.2.15.** Neotklonjive granice verovatnoće prekida i verovatnoće greške

Slika 5.2.15. prikazuje zavisnost neotklonjive verovatnoće prekida i verovatnoće greške koje su dobijene na osnovu izraza (5.2.46) i (5.2.58), respektivno. Sa daljim povećanjem električnog SNR-a, i poboljšanjem uslova prenosa na FSO deonici, performanse sistema ne mogu biti bolje od odgovarajućih neotklonjivih verovatnoća. Na osnovu izraza (5.2.46) i (5.2.58), kao i rezultata na slici 5.2.14, može se zaključiti da neotklonjiva verovatnoća prekida zavisi od srednjeg SNR-a na RF deonici i praga  $\gamma_{th}$ , dok neotklonjiva verovatnoća greške zavisi od srednjeg SNR-a na RF deonici i vrste modulacije koja se koristi.

## 6. Asimetrični RF/FSO sistemi sa više releja

Kao jedan od načina poboljšanja performansi sistema, pored relejne tehnologije, može se izvršiti i primena diverzitetna tehnika kombinovanja signala. Obezbeđivanjem više nezavisnih linkova za prenos signala od predajnika do prijemnika korišćenjem više paralelno ili serijski povezanih releja moguće je primeniti neku od diverzitetna tehnika kombinovanja signala čime se dobijaju bolje performanse sistema [33], [34], [143]. Pored selekcije najboljeg releja (*best relay selection*), pri čemu je aktivni relej izabran na osnovu trenutne informacije o stanju kanala obe deonice [96], [97], u literaturi su intenzivno analizirani i sistemi koji koriste parcijalnu selekciju releja [43], [49], [86], [96], [97], [157], [160], [162]. Parcijalna selekcija releja predložena je u [86], pri čemu je aktivni relej izabran na osnovu trenutne informacije o stanju kanala samo jedne deonice. Na ovaj način izbegava se dodatno kašnjenje sistema, kao i gubitak snage. Analiza primene parcijalne selekcije releja kod RF/FSO sistema autor je objavio u radu [117] i u poglavlju knjige [115].

U nastavku disertacije razmatra se upotreba više paralelno povezanih AF releja kod asimetričnih RF/FSO sistema. Fading na prvim RF deonicama modelovan je Rejljevom raspodelom, dok su FSO linkovi pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Signal se šalje od predajnika do prijemnika pomoću  $N$  releja. Predajnik prati stanje kanala RF deonica na osnovu povratne informacije o stanju kanala koju dobija od releja. Na osnovu ovih estimiranih trenutnih informacija o stanju kanala, bira se relej sa najboljom procenom kanala preko koga se vrši prenos optičkim linkom kroz atmosferski kanal do predajnika. U praksi, izabrani relej sa najboljom procenom kanala možda neće biti u mogućnosti da izvrši prenos, pa se bira najbolji među preostalim relejima itd. Drugi rečima, prenos se vrši preko  $k$ -tog najgoreg (tj.  $(N-k)$ -tog najboljeg) releja [162].



**Slika 6.1.** Asimetrični RF/FSO sistem sa više releja i parcijalnom selekcijom releja

Usled brze promene fedinga na RF deonici, kao i kašnjenja povratne informacije od releja do prijemnika na osnovu koje se vrši odabir aktivnog releja, estimirana trenutna informacija o stanju kanala nije ista kao i ona u trenutku slanja signala (smatra se da je zakasnela). Stoga, ova estimirana informacija je u vremenskoj korelaciji sa pravom trenutnom informacijom o stanju kanala RF deonice.

Na osnovu estimirane trenutne informacije o stanju kanala RF deonice, predajnik bira relej kome šalje signal koji nosi informaciju. Na  $k$ -tom izabranom releju primljeni električni signal je dat u obliku

$$r_{R(k)} = h_{SR(k)}r + n_{SR}, \quad (6.1)$$

gde je  $h_{SR(k)}$  amplituda fedinga na RF deonici između predajnika i  $k$ -tog releja sa jediničnom srednje kvadratnom vrednošću  $E[h_{SR(k)}^2] = 1$ ,  $r$  je poslat RF signal sa srednjom snagom  $P_s$ , i  $n_{SR}$  je beli Gausov šum, nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{SR}^2$ . Signal na releju,  $r_{R(k)}$ , pojačava se odgovarajućim pojačanjem  $G$ , nakon čega moduliše intenzitet optičkog izvora. Pošto se koristi intenzitetska modulacija podnosiocem, dodaje se jednosmerna komponenta



da bi se obezbedio uslov nenegativnosti. Nakon intenzitetske modulacije podnosiocem, teleskop određuje veličinu i pravac optičkog snopa, koji je definisan kao

$$r_{opt} = P_t (1 + Gmr_{R(k)}). \quad (6.2)$$

Indeks modulacije je u nastavku zanemaren pod pretpostavkom da je  $m = 1$ . Optički signal se šalje kroz atmosferski kanal, nakon čega se „skuplja“ pomoću prijemnog teleskopa. Posle direktne detekcije, uklanjanja jednosmerne komponente i konverzije optičkog signala u električni pomoću PIN fotodiode, signal na prijemu je

$$r_{D(k)} = I_{R(k)D} \eta P G r_{R(k)} + n_{RD} = I_{R(k)D} \eta P G h_{SR(k)} r + I_{R(k)D} \eta P G n_{SR} + n_{RD}, \quad (6.3)$$

gde je  $I_{R(k)D}$  intenzitet optičkog signala koji se šalje sa  $k$ -tog releja, i  $n_{RD}$  je beli Gausov šum nulte srednje vrednosti i varijanse  $\sigma_{RD}^2$ .

Trenutni SNR na prvoj deonici je dat u obliku

$$\gamma_{1(k)} = \frac{h_{SR(k)}^2 P_s}{\sigma_{SR}^2} = h_{SR(k)}^2 \mu_1, \quad (6.4)$$

dok je srednja vrednost SNR na RF deonici definisana kao

$$\mu_1 = E[\gamma_{1(k)}] = \frac{P_s}{\sigma_{SR}^2}. \quad (6.5)$$

Trenutni SNR na FSO deonici je

$$\gamma_{2(k)} = \frac{\eta^2 P_t^2 I_{R(k)D}^2}{\sigma_{RD}^2}, \quad (6.6)$$

sa funkcijom gustine verovatnoće definisanom jednačinom (5.7), i električnim SNR-om definisanim kao

$$\mu_2 = \frac{\eta^2 P_t^2 E^2[I_{R(k)D}]}{\sigma_{RD}^2} = \frac{\eta^2 P_t^2}{\sigma_{RD}^2} A_0^2 I_t^2 K^2. \quad (6.7)$$

Pošto se feding na RF deonicama modeluje Rejljevom raspodelom, funkcija gustine verovatnoće i kumulativna funkcija raspodele trenutnih SNR-ova,  $\tilde{\gamma}_{1(l)}$ , za  $l = 1, \dots, N$ , koji su dobijeni na osnovu estimiranih trenutnih informacija o stanju RF kanala, date su [151]

$$f_{\tilde{\gamma}_{1(l)}}(y) = \frac{1}{\mu_1} e^{-\frac{y}{\mu_1}}, \quad F_{\tilde{\gamma}_{1(l)}}(y) = 1 - e^{-\frac{y}{\mu_1}}. \quad (6.8)$$

Najbolji izabrani relej možda nije u mogućnosti da izvrši dalji prenos. Stoga, izabrani relej je  $k$ -ti najgori (tj.  $(N-k)$ -ti najbolji). Estimirane trenutne informacije o stanju kanala se razlikuju od odgovarajućih informacija u trenutku slanja, tako da su ove vrednosti vremenski korelisane slučajne promenljive. Stoga, statistika kanala prve deonice preko koga se vrši prenos biće drugačija.

Na osnovu procenjenih trenutnih informacija o stanju kanala, trenutni SNR-ovi,  $\tilde{\gamma}_{1(l)}$ , poređani su u rastućem nizu kao  $\tilde{\gamma}_{1(1)} \leq \dots \leq \tilde{\gamma}_{1(k)} \leq \dots \leq \tilde{\gamma}_{1(N)}$ . Trenutne vrednosti SNR-ova  $\tilde{\gamma}_{1(l)}$  i  $\gamma_{1(l)}$  su dve korelisane eksponencijalne slučajne promenljive, sa združenom funkcijom gustine verovatnoće [152, (9.296)]

$$f_{\gamma_{1(l)}, \tilde{\gamma}_{1(l)}}(x, y) = \frac{1}{(1-\rho)\mu_1^2} e^{-\frac{x+y}{(1-\rho)\mu_1}} I_0\left(\frac{2\sqrt{\rho xy}}{(1-\rho)\mu_1}\right), \quad (6.9)$$

Funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a  $\tilde{\gamma}_{1(k)}$  je data kao [110, (8-14)]

$$f_{\tilde{\gamma}_{1(k)}} = \frac{N!}{(k-1)!(N-k)!} f_{\tilde{\gamma}_{1(l)}}(y) \left(F_{\tilde{\gamma}_{1(l)}}(y)\right)^{k-1} \left(1 - F_{\tilde{\gamma}_{1(l)}}(y)\right)^{N-k}. \quad (6.10)$$

Funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a prve deonice između predajnika i  $k$ -tog releja može se naći na osnovu izraza

$$f_{\gamma_{1(k)}}(x) = \int_0^{\infty} f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x|y) f_{\tilde{\gamma}_{1(k)}}(y) dy, \quad (6.11)$$

gde je uslovna funkcija gustine verovatnoće  $f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x|y)$  određena kao

$$f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x|y) = \frac{f_{\gamma_{1(l)}, \tilde{\gamma}_{1(l)}}(x, y)}{f_{\tilde{\gamma}_{1(l)}}(y)}. \quad (6.12)$$

Nakon par koraka matematičkih manipulacija, dobija se funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a,  $\gamma_{1(k)}$ , u obliku [163, (9)]

$$f_{\gamma_{1(k)}}(x) = k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} e^{-\frac{(N-k+n+1)x}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}}. \quad (6.13)$$

Kumulativna funkcija raspodele trenutnog SNR-a,  $\gamma_{1(k)}$  lako se može naći kao

$$F_{\gamma_{1(k)}}(x) = 1 - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)x}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}}. \quad (6.14)$$

U disertaciji analiziraće se dve vrste RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom releja:

- RF/FSO sistem sa više AF releja konstantnog pojačanja;
- RF/FSO sistem sa više AF releja promenljivog pojačanja.

U oba slučaja odabir releja izvršen je na osnovu zakasnele informacije o stanju kanala. Pod pretpostavkom brze promene fadinga na RF deonicama, kod releja promenljivog pojačanja smatra se da je i pojačanje određeno na osnovu zakasnele informacije. Drugim rečima, trenutna informacija o stanju RF kanala koja se koristi za odabir releja, koristi se i za određivanje pojačanja na releju. Biće izvedeni izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške. Na osnovu dobijenih rezultata biće upoređene performanse obe vrste asimetričnih RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom releja.

## 6.1. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejima konstantnog pojačanja i parcijalnom selekcijom releja

Signal na izabranom releju  $r_{R(k)}$  pojačava se konstantnim pojačanjem  $G$  koje se određuje na osnovu dugoročne statistike kanala, pri čemu je definisano kao [157]

$$G^2 = \frac{1}{\mathbb{E}[h_{SR(k)}^2] P_s + \sigma_{SR}^2} = \frac{1}{\sigma_{SR}^2} \frac{1}{\mathbb{E}[\gamma_{1(k)}] + 1} = \frac{1}{\sigma_{SR}^2 C}, \quad (6.1.1)$$

pri čemu je konstanta  $C$  određena na osnovu (6.13) kao [158, (6)]

$$C = \mathbb{E}[\gamma_{1(k)}] + 1 = 1 + k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n ((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}{(N-k+n+1)^2}. \quad (6.1.2)$$

Na osnovu (6.3) i (6.1.1), ukupni SNR na destinaciji može se naći kao

$$\gamma_{eq} = \frac{I_{R(k)D}^2 \eta^2 P_t^2 G^2 h_{SR(k)}^2 P_s}{I_{R(k)D}^2 \eta^2 P_t^2 G^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\gamma_{1(k)} \gamma_{2(k)}}{\gamma_{2(k)} + C}. \quad (6.1.3)$$

gde su trenutni SNR-ovi  $\gamma_{1(k)}$  i  $\gamma_{2(k)}$  definisani jednačinama (6.4) i (6.6), respektivno.

### Verovatnoća prekida sistema

Za RF/FSO sistem sa parcijalnom selekcijom releja i AF relejima konstantnog pojačanja, verovatnoća prekida predstavlja verovatnoću da je ukupni SNR na destinaciji, definisan jednačinom (6.1.3), manji od određenog praga,  $\gamma_{th}$ , i može se odrediti kao

$$P_{out} = F_{\gamma}(\gamma_{th}) = \Pr\left(\frac{\gamma_{2(k)}\gamma_{1(k)}}{\gamma_{2(k)} + C} < \gamma_{th} \mid \gamma_{2(k)}\right). \quad (6.1.4)$$

Posle par koraka matematičkih manipulacija, verovatnoća prekida je data u obliku

$$P_{out} = \int_0^{\infty} \Pr\left(\gamma_{1(k)} < \gamma_{th} + \frac{\gamma_{th}C}{\gamma_{2(k)}}\right) f_{\gamma_{2(k)}}(\gamma_{2(k)}) d\gamma_{2(k)} = \int_0^{\infty} F_{\gamma_{1(k)}}\left(\gamma_{th} + \frac{\gamma_{th}C}{x}\right) f_{\gamma_{2(k)}}(x) dx, \quad (6.1.5)$$

gde su funkcija gustine verovatnoće trenutnog SNR-a  $\gamma_{2(k)}$  i kumulativna funkcija raspodele trenutnog SNR-a  $\gamma_{1(k)}$  date jednačinama (5.7) i (6.14), respektivno. Zamenom (5.7) i (6.14) u (6.1.5), dobija se

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^{\infty} x^{-1} G_{1,3}^{3,0}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{x}{\mu_2}} \mid \xi^2, \alpha, \beta\right) \\ &\times \left\{ 1 - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}\left(1+\frac{C}{x}\right)} \right\} dx \\ &= 1 - \frac{\xi^2}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}} \times \mathfrak{I}, \end{aligned} \quad (6.1.6)$$

pri čemu je integral  $\mathfrak{I}$  definisan kao

$$\mathfrak{I} = \int_0^{\infty} x^{-1} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}C}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1 x}} G_{1,3}^{3,0}\left(\alpha\beta\kappa\sqrt{\frac{x}{\mu_2}} \mid \xi^2, \alpha, \beta\right) dx. \quad (6.1.7)$$

Eksponencijalna funkcija predstavlja se preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.19), nakon čega se dobijena Mejerova  $G$ -funkcija transformiše pomoću identiteta (A.18) kao

$$\begin{aligned} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}C}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1 x}} &= G_{0,1}^{1,0}\left(\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}C}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1 x} \mid -\right) \\ &= G_{1,0}^{0,1}\left(\frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1 x}{(N-k+n+1)\gamma_{th}C} \mid 1\right). \end{aligned} \quad (6.1.8)$$

Zamenom (6.1.8) u (6.1.7), integral  $\mathfrak{I}$  dat je u obliku

$$\mathfrak{I} = \int_0^{\infty} x^{-1} G_{1,0}^{0,1} \left( \frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1 x}{(N-k+n+1)\gamma_{th} C} \middle| 1 \right) G_{1,3}^{3,0} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{x}{\mu_2}} \middle| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right) dx. \quad (6.1.9)$$

Rešenje integrala dobija se direktnom primenom pravila (A.15), uz pomoć (A.3), (A.4), (A.16) i (A.17). Nakon permutacije parametara primenom identiteta (A.7) i (A.8), i smanjenjem reda dobijene Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.9), integral  $\mathfrak{I}$  rešen je u zatvorenom obliku kao

$$\mathfrak{I} = \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi} G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (N-k+n+1) \gamma_{th} C}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \middle| \begin{matrix} \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right). \quad (6.1.10)$$

Zamenom (6.1.10) u (6.1.6), dobija se konačan izraz za verovatnoću prekida sistema kao

$$P_{out} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (N-k+n+1) \gamma_{th} C}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \middle| \begin{matrix} \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right). \quad (6.1.11)$$

Izraz za verovatnoću prekida u jednačini (6.1.11) objavljen je u poglavlju knjige [115].

Kada je greška pozicioniranja veoma mala i može biti zanemarena, FSO deonica je pod uticajem samo gama-gama atmosfere turbulencije. Verovatnoće prekida može se odrediti nalaženjem granične vrednosti izraza (6.1.11) kada  $\xi \rightarrow \infty$  uz pomoć pravila (A.11), (A.12), (A.13), kao i  $\lim_{\xi^2 \rightarrow \infty} (1+2/\xi^2) = 1$  i  $\lim_{\xi \rightarrow \infty} \kappa^2 = \lim_{\xi \rightarrow \infty} (1+1/\xi^2) = 1$ , pri čemu se dobija

$$P_{out}^{GG} = \lim_{\xi \rightarrow \infty} P_{out} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}} \times G_{0,5}^{5,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 (N-k+n+1) \gamma_{th} C}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \middle| \begin{matrix} - \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right). \quad (6.1.12)$$

Dobijen izraz u jednačini (6.1.12) za verovatnoću prekida RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom releja kada je FSO deonica pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije publikovan je u radu [117].

Pod pretpostavkom da je estimirana vrednost trenutne informacije o stanju RF kanala koja se koristi za odabir releja u potpunoj korelaciji sa odgovarajućom trenutnom informacijom u trenutku slanja signala, smatra se da je parcijalna selekcija releja izvršena na osnovu savršene procene kanala. U ovom slučaju, verovatnoća prekida određuje se zamenom  $\rho = 1$  u (6.1.11) i ima oblik

$$P_{out}^{\rho=1} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma_{th}}{\mu_1}} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (N-k+n+1) \gamma_{th} C_{\rho=1}}{16 \mu_2 \mu_1} \middle| \frac{\xi^2 + 2}{2}, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right), \quad (6.1.13)$$

pri čemu je konstanta  $C_{\rho=1}$  određena zamenom  $\rho = 1$  u (6.1.2)

$$C_{\rho=1} = 1 + k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \mu_1}{(N-k+n+1)^2}. \quad (6.1.14)$$

Kada je parcijalna selekcija releja zasnovana na trenutnoj informaciji o stanju RF kanala koja je u potpunosti nekorelisana sa odgovarajućom trenutnom informacijom o stanju kanala u trenutku slanja signala, verovatnoća prekida određuje se zamenom  $\rho = 0$  u (6.1.11) kao

$$P_{out}^{\rho=0} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th} C_{\rho=0}}{16 \mu_2 \mu_1} \middle| \frac{\xi^2 + 2}{2}, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right), \quad (6.1.15)$$

gde je konstanta  $C_{\rho=0}$  dobijena zamenom  $\rho = 0$  u (6.1.2)

$$C_{\rho=0} = 1 + k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \mu_1}{(N-k+n+1)}. \quad (6.1.16)$$

U slučaju idealne parcijalne selekcije releja, kada je izabrani relej sa najbolje procenjenim stanjem kanala dostupan za dalje prenos, verovatnoća prekida određuje se zamenom  $k = N$  u (6.1.11) kao

$$P_{out}^{k=N} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} N \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} \frac{(-1)^n}{(n+1)} e^{-\frac{(n+1)\gamma_{th}}{((1-\rho)n+1)\mu_1}} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (n+1) \gamma_{th} C_{k=N}}{16 \mu_2 ((1-\rho)n+1) \mu_1} \left| \begin{array}{c} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right), \quad (6.1.17)$$

pri čemu je konstanta  $C_{k=N}$  određena zamenom  $k = N$  u (6.1.2) kao

$$C_{k=N} = 1 + N \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} \frac{(-1)^n ((1-\rho)n+1) \mu_1}{(n+1)^2}. \quad (6.1.18)$$

Kada se posmatra sistem sa jednim relejem, ne primenjuje se tehnika selekcije releja. Verovatnoća prekida dobija se zamenom  $N = k = 1$  u (6.1.11) kao [24]

$$P_{out}^{N=1} = 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} \times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th} C_{N=1}}{16 \mu_2 \mu_1} \left| \begin{array}{c} \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right), \quad (6.1.19)$$

gde je konstanta  $C$  određena zamenom  $N = k = 1$  u (6.1.2), i ranije je definisana jednačinom (5.1.9), kao

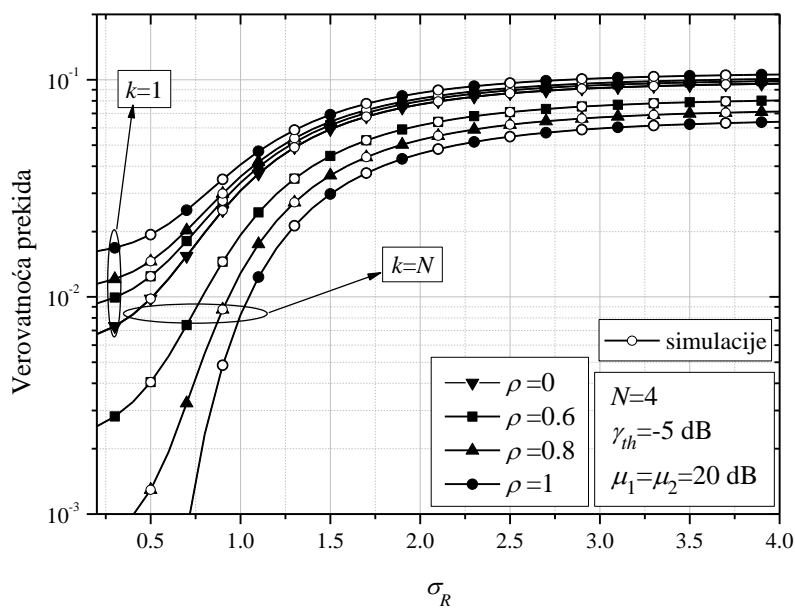
$$C_{N=1} = 1 + \mu_1. \quad (6.1.20)$$

U prethodnom poglavlju analizirani su asimetrični sistemi sa jednim relejem, dok je feding na RF deonici modelovan Nakagami- $m$  raspodelom. Izraz za verovatnoću prekida u (6.1.19) već je izveden i dat jednačinom (5.1.17) pod uslovom  $m_1 = 1$ .

Najpre će se ispitati uticaj atmosferske turbulencije na performanse RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom releja i AF relejima konstantnog pojačanja. Rezultati prikazani na slikama 6.1.1. i 6.1.2., kao i u Tabeli 6.1., dobijeni su na osnovu jednačine (6.1.12), koja predstavlja izraz za verovatnoću prekida sistema kada je greška pozicioniranja zanemarena i FSO deonica je pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije. Jačina atmosferske turbulencije određena je Rojtovom standardnom devijacijom.

Na slici 6.1.1. prikazana je zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom, pod pretpostavkom da je najbolji relej dostupan za dalji prenos

( $k = N$ ), kao i za slučaj kada je jedino dostupan relej sa najgore procenjenim stanjem kanala ( $k = 1$ ). Kao što se i očekivalo, performanse sistema su bolje kada se bira najbolji relej. U tom slučaju, veća vrednost koeficijenta korelacije dovodi do smanjenja verovatnoće prekida i time do poboljšanja performansi sistema. Kada je  $\rho = 1$ , postoji potpuna korelacija između trenutne informacije o stanju RF kanala koja se koristi za odabir releja i trenutne informacije u trenutku slanja, tako da se dobijaju najbolje performanse sistema. Sa druge strane, ako je prenos izvršen preko releja sa najgorom procenom kanala, veća vrednost koeficijenta korelacije dovodi do pogoršanja performansi sistema. U tom slučaju zakasnela trenutna informacije koja se koristi za selekciju releja je manje pogodna. Kada je  $\rho = 1$ , zakasnela i prava trenutna informacija su identične, što znači da je najgore procenjen relej najverovatnije najgori. Kada je  $\rho = 0$ , zakasnela i prava trenutna informacija su u potpunosti nekorelisane, pa je veoma verovatno da izabrani relej nije najgori, što se reflektuje u poboljšanju performansi sistema.



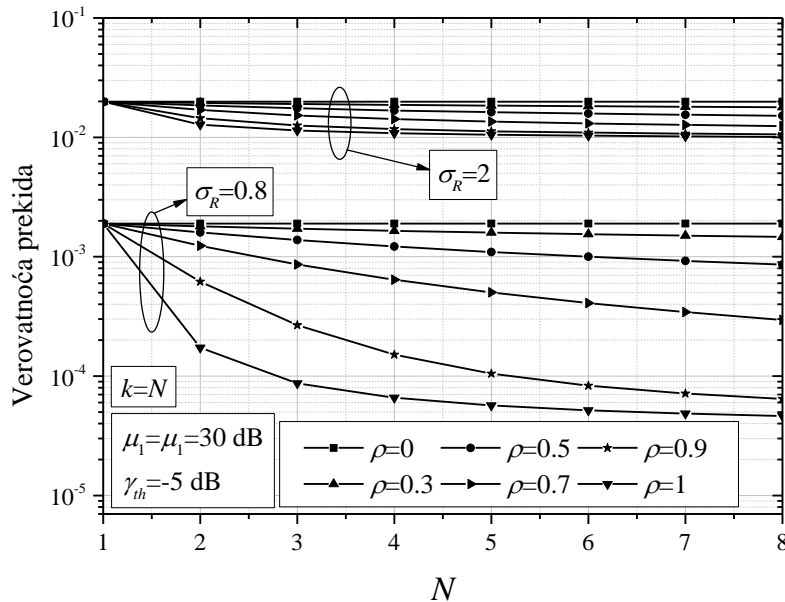
**Slika 6.1.1.** Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja od Rojtove standardne devijacije

Pod pretpostavkom da je  $\rho = 0$ , zakasnela trenutna informacija koja se koristi za odabir releja je u potpunosti nezavisna i različita od prave informacija u trenutku slanja, pa odabir releja nema nikakav uticaj na performanse sistema. Stoga, dolazi do preklapanja krivih na slici 6.1.1. za  $k = N$  i  $k = 1$  u slučaju  $\rho = 0$ .

Sa slike 6.1.1. se takođe može primetiti da je uticaj korelacije izraženiji kada je atmosferska turbulencija slaba ( $\sigma_R < 2$ ). Kada je prenos optičkog signala kroz FSO link pod uticajem slabe atmosferske turbulencije, neće biti ozbiljnijih degradacija signala na drugoj



deonici. U tom slučaju, uslovi na RF deonici biće od velike važnosti, pa će odabir releja i stepen korelacije imati glavni uticaj na verovatnoću prekida. Sa druge strane, kada je druga deonica pod uticajem jake atmosferske turbulencije ( $\sigma_R > 2$ ), optički signal će biti degradiran u velikoj meri prilikom prenosa kroz FSO kanal, pa je uticaj korelacije od manjeg značaja na performanse sistema.



**Slika 6.1.2.** Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja od broja releja za različite vrednosti Rojtove standardne devijacije

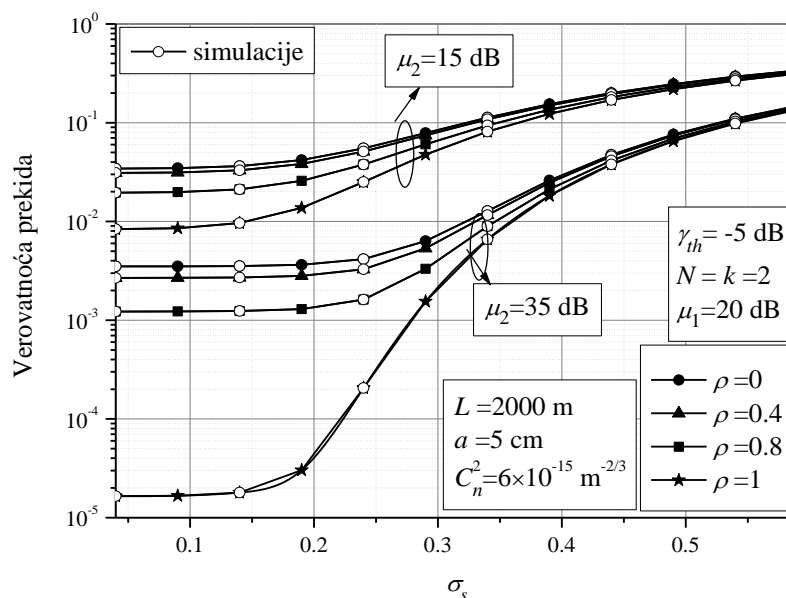
Zavisnost verovatnoće prekida od broja releja za različite vrednosti koeficijenta korelacije prikazana je na slici 6.1.2. Optički signal prilikom prenosa kroz atmosferski kanal je pod uticajem slabe ( $\sigma_R = 0.8$ ) i umerene ( $\sigma_R = 2$ ) atmosferske turbulencije. Broj raspoloživih releja ima veći uticaj na verovatnoću prekida kada je vrednost koeficijenta korelacije veća. Kao što je već objašnjeno, kada je  $\rho = 0$ , zakasnela trenutna informacija koja se koristi za odabir releja totalno je nezavisna od odgovarajuće informacije u trenutku slanja, pa neće biti od važnosti koji relej je izbran, a time ni koliko njih je raspoloživo za dalji prenos. Na slici 6.1.2. može se videti da je uticaj broja releja na verovatnoću prekida od veće važnosti kada su uslovi na FSO deonici povoljniji za prenos.

Slični zaključci mogu se dobiti i na osnovu rezultata koji su prikazani u Tabeli 6.1., koja prikazuje vrednosti verovatnoće prekida za različit broj releja kada je koeficijent korelacije  $\rho = 0$ ,  $\rho = 0.5$  i  $\rho = 1$ , dok su ostali parametri  $\gamma_{th} = -10$  dB,  $\mu_1 = \mu_2 = 20$  dB i  $k = N$ . Kada je  $N = 1$ , neće biti selekcije releja, pa vrednost verovatnoće prekida ostaje nepromenjena. Kao što je već objašnjeno, vrednost verovatnoće prekida je jednaka i kada je  $\rho = 0$ . U slučaju

$\rho = 1$  i  $\sigma_R = 0.8$ , verovatnoća prekida poboljšana je 75.3 % implementiranjem dva releja u odnosu na sistem sa jednim relejem, dok je poboljšana samo 10.87 % kada se broj releja poveća sa 4 na 5. Uzimajući u obzir cenu i kompleksnost implementacije sistema sa parcijalnom selekcijom i većim brojem releja, može se zaključiti da je najefikasnije koristiti sisteme sa dva releja. Kada je  $N=2$  i  $\sigma_R=0.8$ , performanse sistema kada je  $\rho=0.5$  poboljšavaju se za 69.48 % ako se koeficijent korelacije poveća na  $\rho=1$ , dok je poboljšanje od 24.47 % primećeno u uslovima  $N=2$  i  $\sigma_R=2$ . Kada je prenos optičkog signala kroz atmosferski kanal na drugoj deonici pod uticajem povoljnih uslova, uticaj korelacije na performanse sistema je dominantan.

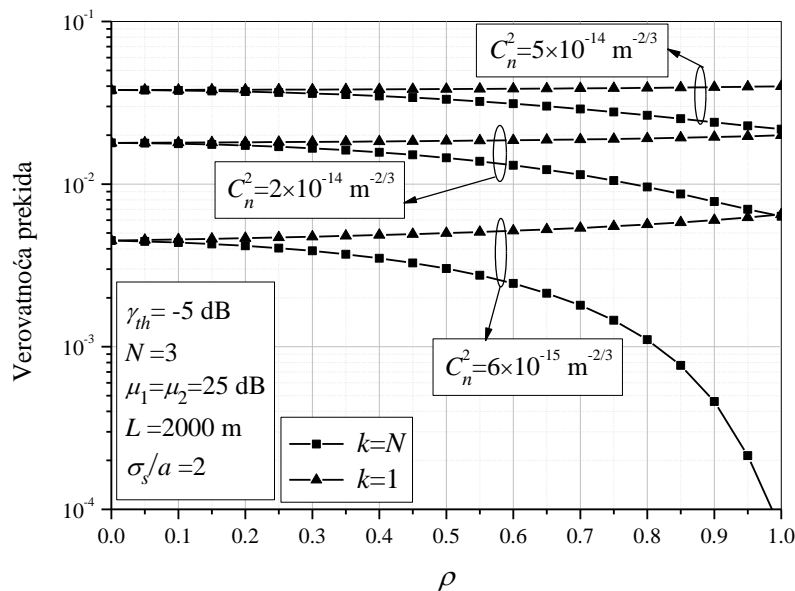
**Tabela 6.1.** Verovatnoća prekida asimetričnog RF/FSO za različit broj releja  $N$

$N$	$\sigma_R=0.8$			$\sigma_R=2$		
	$\rho=0$	$\rho=0.5$	$\rho=1$	$\rho=0$	$\rho=0.5$	$\rho=1$
1	0.01653	0.01653	0.01653	0.07375	0.07375	0.07375
2	0.01653	0.01435	0.00438	0.07375	0.06952	0.05251
3	0.01653	0.01274	0.00281	0.07375	0.06647	0.04761
4	0.01653	0.01156	0.00230	0.07375	0.06426	0.04550
5	0.01653	0.01066	0.00205	0.07375	0.06257	0.04432

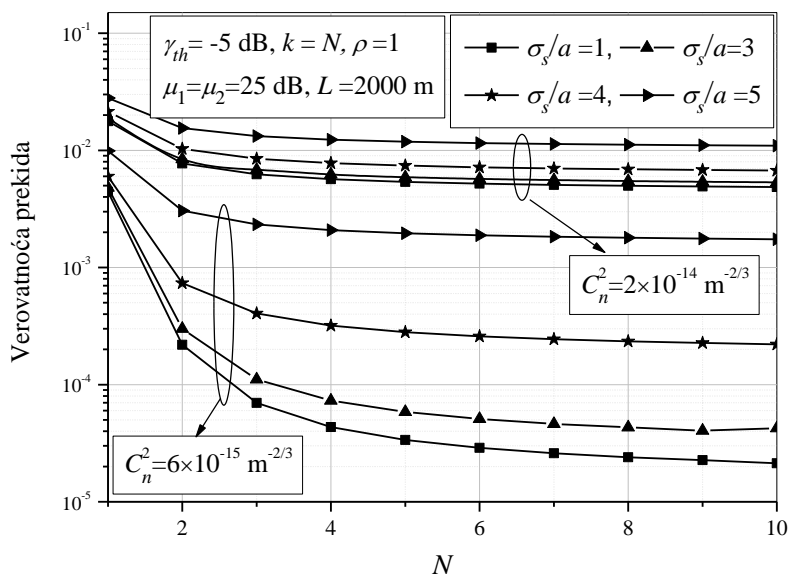


**Slika 6.1.3.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti koeficijenta korelacije i električnog SNR-a na FSO deonici

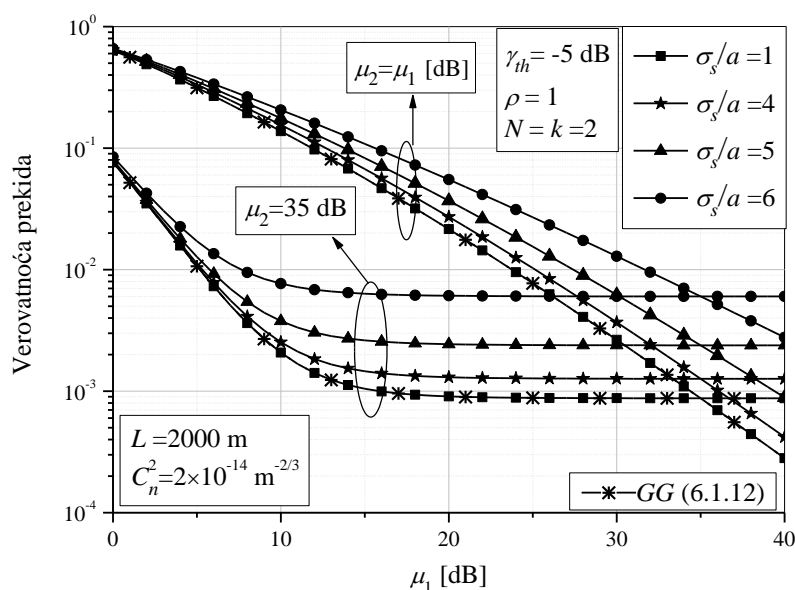
U nastavku, u obzir će biti uzeta i greška pozicioniranja. Na slici 6.1.3. prikazana je zavisnost verovatnoće greške, koja je određena na osnovu jednačine (6.1.11), od standardne devijacije džitera, za različite vrednosti koeficijenta korelacije i električnog SNR-a na FSO deonici. Veća vrednost standardne devijacije džitera odgovara izraženijom nepodešenošću FSO predajnika i prijemnika, čime je uticaj greške pozicioniranja veći, što se odražava u pogoršanju performansi sistema. Smanjenje parametra  $\sigma_s$ , dovodi do smanjenja vrednosti verovatnoće prekida, koja teži nekoj konstantnoj vrednosti. Ova konstantna vrednost predstavlja verovatnoću prekida za sistem kada je FSO deonica samo pod uticajem gama-gama atmosfere turbulencije. Pošto greška pozicioniranja dovodi do gubitka i rasipanja optičke snage, njen uticaj na performanse sistema je izraženiji kada je električni SNR veći. Uticaj parametra  $\sigma_s$ , tj. greške pozicioniranja, dominantniji je kada je vrednost koeficijenta korelacije veća. Kada je  $\rho = 1$ , selekcija releja bazirana je na savršenoj proceni kanala. Manja vrednosti  $\rho$ , dovodi do smanjenog uticaja stanja FSO kanala na performanse sistema. Analogno tome, veće vrednosti parametra  $\sigma_s$  dovode do izraženije greške pozicioniranja, i time do manjeg uticaja parametra  $\rho$  na vrednost verovatnoće prekida. Sa poboljšanjem uslova na FSO deonici (smanjenje parametra  $\sigma_s$ ), karakteristike RF kanala imaju ključnu ulogu prilikom određivanja performanse RF/FSO sistema.



**Slika 6.1.4.** Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja od koeficijenta korelacije u različitim uslovima atmosfere turbulencije



**Slika 6.1.5.** Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja od broja releja za različite vrednosti standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere turbulencije

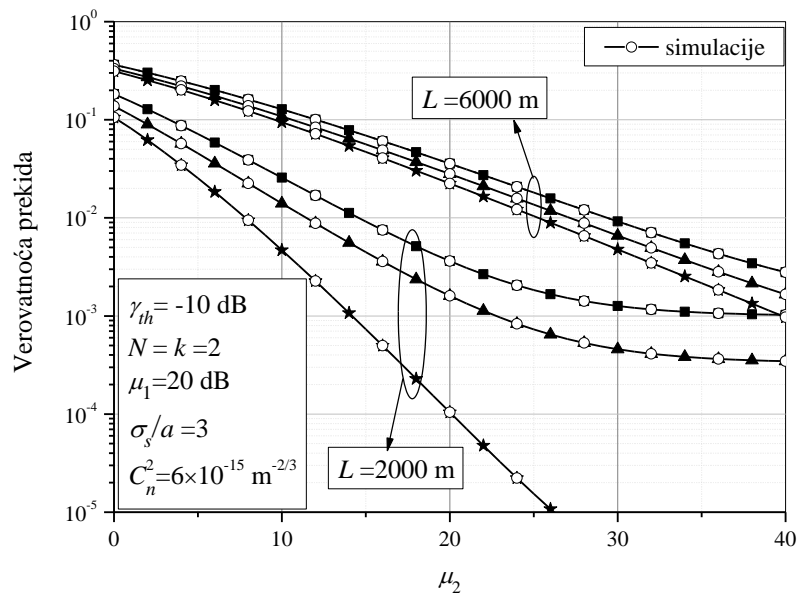


**Slika 6.1.6.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti standardne devijacije džitera

Na slici 6.1.4. data je zavisnost verovatnoće greške od koeficijenta korelacije, dok je FSO deonica pod uticajem slabe, umerene i jake atmosfere turbulencije. Prikazani su rezultati za slučaj kada je najbolji relej dostupan za prenos ( $k = N$ ), kao i kada su svi sem najgoreg nedostupni ( $k = 1$ ). Kao što je već objašnjeno, u slučaju selekcije najboljeg releja, performanse sistema se poboljšavaju sa povećanjem vrednosti koeficijenta korelacije, dok je obrnut efekat postignut u slučaju  $k = 1$ . Uticaj korelacije je dominantniji kada je atmosfere

turbulencija slabija. Kao što je ranije zaključeno, uticaj stanja RF deonica na performanse sistema je bitniji kada je FSO deonica pod uticajem povoljnijih uslova za prenos.

Zavisnost verovatnoće prekida od broja releja za različite vrednosti standardne devijacije džitera u različitim uslovima atmosfere prikazan je na slici 6.1.5. Uticaj broja raspoloživih releja je dominantniji kada je FSO deonica pod uticajem slabe atmosfere turbulencije, kao i kada su vrednosti parametra  $\sigma_s/a$  manje. Stoga, implementacija više releja kod RF/FSO sistema je korisna kada je prenos optičkog signala izvršen u povoljnim uslovima. Takođe, može se primetiti da je uticaj greške pozicioniranja na performanse sistema od manje važnosti kada je atmosferski kanal pod uticajem jače atmosfere turbulencije.



**Slika 6.1.7.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti koeficijenta korelacije i dužine FSO deonice

Slika 6.1.6. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida od srednjeg SNR-a na RF linku za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera. Rezultati su dobijeni za slučaj kada je vrednost električnog SNR-a na FSO linku  $\mu_2 = 35$  dB, i kada je ista kao vrednosti srednjeg SNR-a na RF linku, tj.  $\mu_2 = \mu_1$ . Usled jakih vibracija optičkog snopa i lošeg pozicioniranja FSO predajnika i prijemnika, greška pozicioniranja je izraženija i vrednost normalizovane standardne devijacije džitera je veća. Kada je vrednost  $\sigma_s/a$  manja, greška pozicioniranja je minimalna. Ovo je potvrđeno sledećim rezultatima na slici 6.1.6. Rezultati dobijeni na osnovu jednačine (6.1.12), koja predstavlja izraz za verovatnoću prekida kada je

greška pozicioniranja zanemarena i FSO deonica je samo pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije, poklapaju se sa krivama koje su dobijene za slučaj  $\sigma_s/a=1$ .

Zavisnost verovatnoće prekida od električnog SNR-a na FSO deonici za različite vrednosti koeficijenta korelacije i dužine FSO deonice prikazan je na slici 6.1.7. Najbolje performanse sistema postignute su za slučaj kada je  $\rho=1$ , što odgovara sistemu kada parcijalna selekcija releja zasnovana na savršenoj proceni kanala. Najgore performanse sistema dobijene su kada je  $\rho=0$ , tj. kada je trenutna informacija o stanju prve deonice koja se koristi za odabir releja u potpunosti nekorelisana sa odgovarajućom trenutnom informacijom u trenutku slanja signala. Performanse sistema su bolje kada je FSO deonica kraća. Takođe, uticaj korelacije na performanse sistema je izraženiji kada je FSO deonica kraća, tj. uslovi prenosa optičkog signala su povoljniji.

#### *Verovatnoća greške sistema*

Na osnovu izvedenog izraza za verovatnoću prekida posmatranog sistema u jednačini (6.1.11), moguće je odrediti verovatnoću greške na osnovu ranije prikazane jednačine (3.2.13) na sledeći način

$$\begin{aligned}
 P_b &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-q\gamma} \left\{ 1 - \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \right. \\
 &\quad \times k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\frac{(N-k+n+1)\gamma}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1}} \\
 &\quad \times G_{1,6}^{6,0} \left[ \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (N-k+n+1) \gamma C}{16 \mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1) \mu_1} \left| \begin{array}{c} \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{array} \right. \right\} d\gamma \\
 &= \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2.
 \end{aligned} \tag{6.1.21}$$

Integral  $\mathfrak{I}_1$ , koji je identičan integralu u (5.1.20), definisan je i rešen pomoću pravila (A.28)

$$\mathfrak{I}_1 = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-q\gamma} d\gamma = \frac{1}{2}. \tag{6.1.22}$$

Predstavljanjem eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.19), integral  $\mathfrak{I}_2$  dat je u obliku

$$\begin{aligned}
\mathfrak{S}_2 &= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \\
&\times \int_0^\infty \gamma^{p-1} G_{0,1}^{1,0} \left( \gamma \left( q + \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \right) \middle| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right) \\
&\times G_{1,6}^{6,0} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (N-k+n+1) \gamma C}{16 \mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1) \mu_1} \middle| \begin{matrix} \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right) d\gamma.
\end{aligned} \tag{6.1.23}$$

nakon čega je rešen pomoću pravila (A.20)

$$\begin{aligned}
\mathfrak{S}_2 &= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \\
&\times \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)q\mu_1} \right)^{-p} \\
&\times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 C}{16 \mu_2 \left( 1 + \frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)q\mu_1}{(N-k+n+1)} \right)} \middle| \begin{matrix} 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right).
\end{aligned} \tag{6.1.24}$$

Zamenom (6.1.22) i (6.1.24) u (6.1.21), dobija se konačan izraz za verovatnoću greške posmatranog sistema

$$\begin{aligned}
P_b &= \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \\
&\times \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)q\mu_1} \right)^{-p} \\
&\times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 C}{16 \mu_2 \left( 1 + \frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)q\mu_1}{(N-k+n+1)} \right)} \middle| \begin{matrix} 1-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right).
\end{aligned} \tag{6.1.25}$$

Primenom istih pravila kao i do sada, nalaženjem granične vrednosti izraza (6.1.25) kada  $\xi \rightarrow \infty$ , dobija se izraz za verovatnoću greške kada je FSO deonica pod uticajem samo gama-gama atmosfarske turbulencije kao

$$\begin{aligned}
P_b^{GG} = \lim_{\xi \rightarrow \infty} P_b &= \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \\
&\times \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)q\mu_1} \right)^{-p} \\
&\times G_{1,5}^{5,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 C}{16\mu_2 \left( 1 + \frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)q\mu_1}{(N-k+n+1)} \right)} \middle| \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right)^{1-p}.
\end{aligned} \tag{6.1.26}$$

Izveden izraz za verovatnoću greške koji je dat jednačinom (6.1.26) štampan je u radu [117].

Kada je parcijalna selekcija releja izvršena na osnovu savršene procene kanala, nakon zamene  $\rho = 1$  u (6.1.25) dobija se

$$\begin{aligned}
P_b^{\rho=1} &= \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \\
&\times k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{q\mu_1} \right)^{-p} \\
&\times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 C_{\rho=1}}{16\mu_2 \left( 1 + \frac{q\mu_1}{(N-k+n+1)} \right)} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right)^{1-p, \frac{\xi^2+2}{2}}.
\end{aligned} \tag{6.1.27}$$

Pod pretpostavkom da je odabir releja izvršen na osnovu informacije o stanju kanala prve deonice koja je totalno nezavisna od one u trenutku slanja signala, verovatnoća greške se dobija zamenom  $\rho = 0$  u (6.1.25)

$$\begin{aligned}
P_b^{\rho=0} &= \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} \\
&\times k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p} \\
&\times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 C_{\rho=0}}{16\mu_2 (1+q\mu_1)} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right)^{1-p, \frac{\xi^2+2}{2}}.
\end{aligned} \tag{6.1.28}$$

Za idealnu parcijalnu selekciju releja, kada je najbolji izabrani relej u mogućnosti da prosledi signal kroz FSO kanal, zamenom  $k = N$  u (6.1.25) dobija se

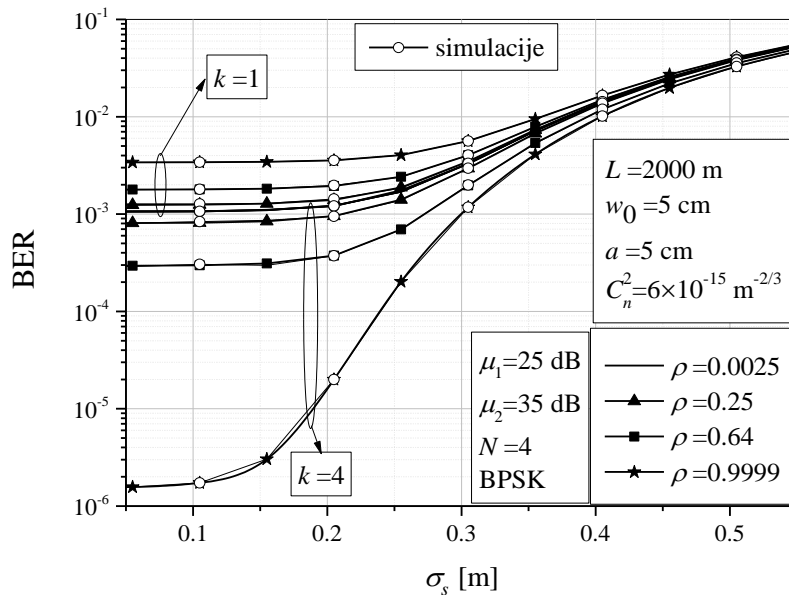


$$P_b^{k=N} = \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} N \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} \frac{(-1)^n}{(n+1)} \left( 1 + \frac{(n+1)}{((1-\rho)n+1)q\mu_1} \right)^{-p} \times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 C_{k=N}}{16\mu_2 \left( 1 + \frac{((1-\rho)n+1)q\mu_1}{(n+1)} \right)} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right) \quad (6.1.29)$$

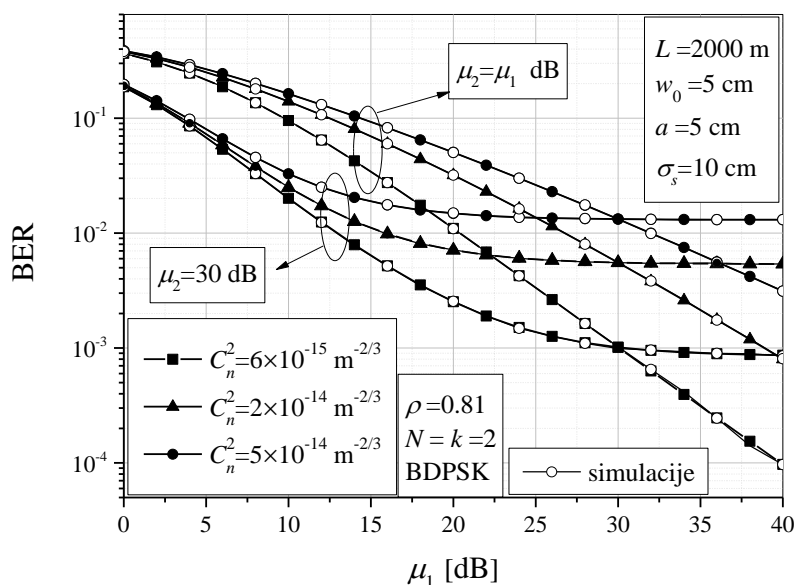
Za sistem sa jednim relejem, verovatnoća greške dobija se zamenom  $N = k = 1$  u (6.1.25) kao [24]

$$P_b^{N=1} = \frac{1}{2} - \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \left( 1 + \frac{1}{q\mu_1} \right)^{-p} \times G_{2,6}^{6,1} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 C_{N=1}}{16\mu_2 (1+q\mu_1)} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \right), \quad (6.1.30)$$

što predstavlja rezultat već prikazan u prethodnom poglavlju u jednačini (5.1.23) pod uslovom  $m_1 = 1$ .



**Slika 6.1.8.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja u zavisnosti od standardne devijacije džitera za različite vrednosti koeficijenta korelacije



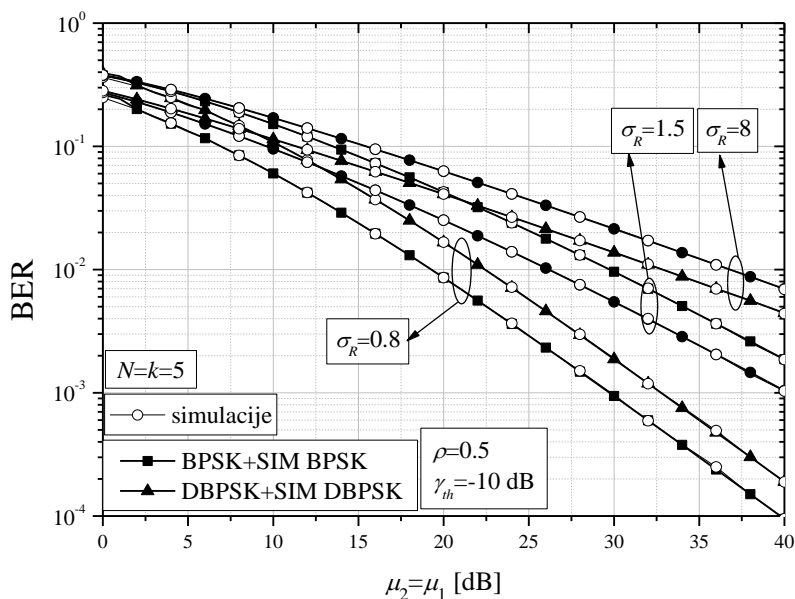
**Slika 6.1.9.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja za različite vrednosti električnog SNR-a na FSO deonici u različitim uslovima turbulencije

Na slici 6.1.8. prikazana je zavisnost verovatnoće greške sistema od standardne devijacije džitera za različite vrednosti koeficijenta korelacije. Posmatra se sistem kada je najbolji relej u mogućnosti da prosledi signal kroz FSO link, kao i sistem kada su svi releji, sem najgoreg, nedostupni. Povećanje koeficijenta korelacije dovodi do poboljšanja performansi sistema kada je  $k = N = 4$ , dok se obrnuti efekat dobija kada je  $k = 1$ . Može se primetiti da greška pozicioniranja ima ključnu ulogu u određivanju verovatnoće greške kada je koeficijent korelacije veći. Takođe, uticaj korelacije na verovatnoću greške je veoma veliki kada je vrednost standardne devijacije džitera manja, što odgovara slabijem uticaju greške pozicioniranja. Kada  $\sigma_s$  ima veliku vrednost ( $\sigma_s > 0.45$ ), korelacija ima neznatan uticaj na performanse sistema.

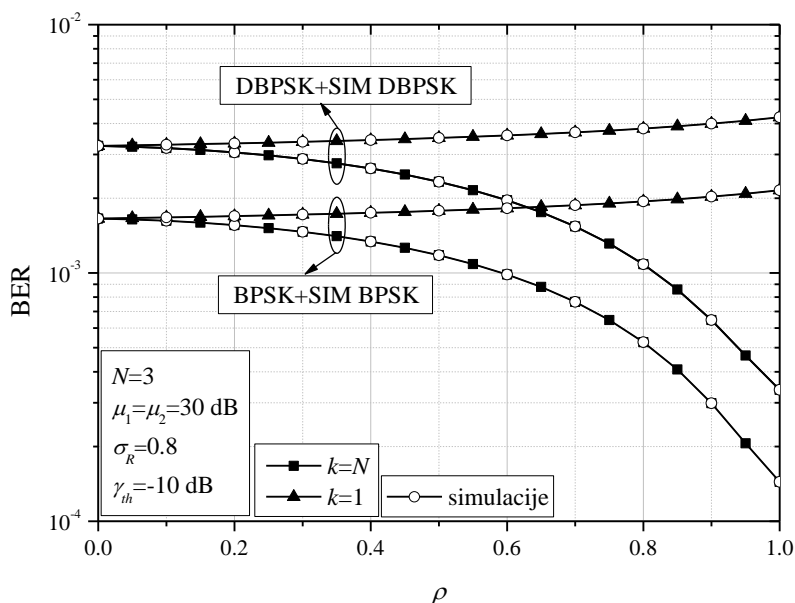
Slika 6.1.9. prikazuje zavisnost verovatnoće greške od srednjeg SNR-a na RF deonici za različite vrednosti električnog SNR-a na FSO deonici u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Kada je električni SNR na drugoj deonici konstantan, dolazi do neotklonjive verovatnoće greške, čije se smanjenje neće postići daljim povećanjem snage signala na prvoj deonici. Neotklonjiva verovatnoće greške najpre se javlja kada je FSO deonica pod uticajem jake atmosfere turbulencije.

Slika 6.1.10. prikazuje zavisnost verovatnoće greške sistema od  $\mu_1 = \mu_2$  u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Posmatra se sistem koji koristi dve modulacione šeme: BPSK na predaji i SIM-BPSK na releju, i DBPSK na predaji i SIM-DBPSK na releju. Smatra se da je uticaj greške pozicioniranja zanemaren. Kao što je i očekivano sistem sa BPSK daje

bolje performanse. Takođe, kada je FSO deonica pod uticajem slabe atmosfere turbulencije, verovatnoća greške RF/FSO sistema ima najmanju vrednost.



**Slika 6.1.10.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja u različitim uslovima atmosfere turbulencije



**Slika 6.1.11.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima konstantnog pojačanja u zavisnosti od koeficijenta korelacije

Zavisnost verovatnoće greške od koeficijenta korelacije RF/FSO sistema prikazana je na slici 6.1.11. Posmatraju se dve vrste modulacionih šema: BPSK na predaji i SIM-BPSK na releju, i DBPSK na predaji i SIM-DBPSK na releju, dok je uticaj greške pozicioniranja zanemaren. Prikazani su rezultati za slučaj kada je najbolji relej u mogućnosti da izvrši dalji prenos, kao i kada je samo najgori relej dostupan. Sa povećanjem koeficijenta korelacije,

odabir releja ima veći uticaj na verovatnoću greške. Kada je  $\rho \rightarrow 0$ , procenjena informacija o stanju RF kanala na osnovu koje se vrši odabir releja je nekorelisana i totalno nezavisna od odgovarajuće informacije u trenutku slanja, pa odabir releja nema uticaj na vrednost verovatnoće greške. To je potvrđeno preklapanjem krivih za  $k = 1$  i  $k = N$  u oblasti  $\rho < 0.1$ .

## 6.2. Performanse asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejima promenljivog pojačanja i parcijalnom selekcijom releja

U ovom delu disertacije biće analizirani RF/FSO sistemi sa parcijalnom selekcijom releja i AF relejima promenljivog pojačanja. Analiza će biti izvršena pod pretpostavkom da je pojačanje određeno na osnovu zakasnele informacije o stanju kanala, obzirom da je RF deonica pod uticajem brzog fedinga. To znači da se trenutna informacija o stanju RF kanala koja se koristi za odabir releja, koristi i za određivanje pojačanja na releju.

Signal na izabranom releju  $r_{R(k)}$  pojačava se promenljivim pojačanjem  $G$  koje se određuje na osnovu kratkoročne statistike kanala. Pojačanje na releju definisano je kao [157]

$$G^2 = \frac{1}{\tilde{h}_{SR(k)}^2 P_s}. \quad (6.2.1)$$

Kao i kod RF/FSO sistema sa jednim relejem koji su analizirani u prethodnom odeljku, snaga šuma na RF deonici zanemarena je prilikom određivanja pojačanja u cilju jednostavnije matematičke analize. Na osnovu (6.2.1) i (6.3), ukupni SNR na destinaciji može se naći kao

$$\gamma_{eq} = \frac{I_{R(k)D}^2 \eta^2 P_t^2 G^2 h_{SR(k)}^2 P_s}{I_{R(k)D}^2 \eta^2 P_t^2 G^2 \sigma_{SR}^2 + \sigma_{RD}^2} = \frac{\gamma_{1(k)} \gamma_{2(k)}}{\gamma_{2(k)} + \frac{\tilde{h}_{SR(k)}^2 P_s}{\sigma_{SR}^2}} = \frac{\gamma_{1(k)} \gamma_{2(k)}}{\gamma_{2(k)} + \tilde{\gamma}_{1(k)}}, \quad (6.2.2)$$

gde su trenutni SNR-ovi  $\gamma_{1(k)}$  i  $\gamma_{2(k)}$  definisani jednačinama (6.4) i (6.6), respektivno, i  $\tilde{\gamma}_{1(k)} = \tilde{h}_{SR(k)}^2 P_s / \sigma_{SR}^2$  predstavlja estimiranu verziju  $\gamma_{1(k)}$ . Što se tiče prve deonice, trenutni SNR-ovi  $\gamma_{1(k)}$  i  $\tilde{\gamma}_{1(k)}$  su dve korelisane slučajne promenljive. Pošto je feding na RF linku opisan Rejljevom raspodelom, združena funkcija gustine verovatnoće se može naći kao [156]

$$f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x, y) = \frac{f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x, y)}{f_{\tilde{\gamma}_{1(k)}}(y)} f_{\tilde{\gamma}_{1(k)}}(y), \quad (6.2.3)$$

gde su  $f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x, y)$ ,  $f_{\tilde{\gamma}_{1(k)}}(y)$  i  $f_{\tilde{\gamma}_{1(k)}}(y)$  funkcije gustine verovatnoće prethodno definisane jednačinama (6.9), (6.8) i (6.10), respektivno. Nakon zamene (6.9), (6.8) i (6.10) u (6.2.3), dobija se združena funkcije gustine verovatnoće kao

$$f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x, y) = k \binom{N}{k} \frac{1}{(1-\rho)\mu_1^2} e^{-\frac{x}{(1-\rho)\mu_1}} I_0 \left( \frac{2\sqrt{\rho xy}}{(1-\rho)\mu_1} \right) \times \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} (-1)^n e^{-\frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)y}{(1-\rho)\mu_1}}. \quad (6.2.4)$$

### Verovatnoća prekida sistema

Verovatnoća prekida posmatranog sistema može se odrediti na osnovu definicije ukupnog SNR-a na destinaciji, koji je data jednačinom (6.2.2), kao

$$P_{out} = F_\gamma(\gamma_{th}) = \Pr \left( \frac{\gamma_{1(k)}\gamma_{2(k)}}{\gamma_{2(k)} + \tilde{\gamma}_{1(k)}} < \gamma_{th} \mid \gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)} \right). \quad (6.2.5)$$

Nakon par jednostavnih matematičkih koraka, verovatnoća prekida data je u obliku

$$P_{out} = 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left( \gamma_{2(k)} > \frac{\gamma_{th} y}{x} \right) f_{\gamma_{1(k)}, \tilde{\gamma}_{1(k)}}(x + \gamma_{th}, y) dx dy \quad (6.2.6)$$

$$= 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \bar{F}_{\gamma_2} \left( \frac{\gamma_{th} y}{x} \right) f_{\gamma_1, \tilde{\gamma}_1}(x + \gamma_{th}, y) dx dy.$$

Zamenom izraza za komplementarnu kumulativnu funkciju raspodele, koji je definisana kao  $\bar{F}_{\gamma_2}(\cdot) = 1 - F_{\gamma_2}(\cdot)$ , pri čemu je kumulativna funkcija raspodele data jednačinom (5.9), i združene funkcije gustine verovatnoće date jednačinom (6.2.4), u jednačinu (6.2.6), dobija se verovatnoća prekida

$$P_{out} = 1 - k \binom{N}{k} \frac{1}{(1-\rho)\mu_1^2} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} (-1)^n \times \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ 1 - \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_{th} y}{\mu_2 x}} \mid \begin{matrix} 1, & \xi^2 + 1 \\ \xi^2, & \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right) \right\} \times e^{-\frac{x+\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} e^{-\frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)y}{(1-\rho)\mu_1}} I_0 \left( \frac{2\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1} \right) dx dy \quad (6.2.7)$$

$$= 1 - \mathfrak{I}_1 + \mathfrak{I}_2.$$

Integral  $\mathfrak{I}_1$  definisan je i rešen pomoću pravila (A.35), (A.36) i (A.37), kao

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_1 &= k \binom{N}{k} \frac{1}{(1-\rho)\mu_1^2} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} (-1)^n e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
&\times \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{x}{(1-\rho)\mu_1}} e^{-\frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)y}{(1-\rho)\mu_1}} I_0 \left( \frac{2\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1} \right) dx dy \quad (6.2.8) \\
&= k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\gamma_{th} \left( \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \right)},
\end{aligned}$$

dok je integral  $\mathfrak{I}_2$  definisan kao

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_2 &= \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \frac{1}{(1-\rho)\mu_1^2} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} (-1)^n e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
&\times \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{x}{(1-\rho)\mu_1}} e^{-\frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)y}{(1-\rho)\mu_1}} I_0 \left( \frac{2\sqrt{\rho(x+\gamma_{th})y}}{(1-\rho)\mu_1} \right) \\
&\times G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_{th}y}{\mu_2x}} \middle| \begin{matrix} 1, & \xi^2+1 \\ \xi^2, & \alpha, & \beta, & 0 \end{matrix} \right) dx dy. \quad (6.2.9)
\end{aligned}$$

Nakon razvoja Beselove funkcije u red primenom pravila (A.30), integral  $\mathfrak{I}_2$  je zapisan kao

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_2 &= \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \frac{1}{(1-\rho)\mu_1^2} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l}{l!^2 (1-\rho)^{2l} \mu_1^{2l}} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
&\times \int_0^\infty (x+\gamma_{th})^l e^{-\frac{x}{(1-\rho)\mu_1}} dx \times \mathfrak{I}_{21}, \quad (6.2.10)
\end{aligned}$$

pri čemu je

$$\mathfrak{I}_{21} = \int_0^\infty y^l e^{-\frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)y}{(1-\rho)\mu_1}} G_{2,4}^{3,1} \left( \alpha\beta\kappa \sqrt{\frac{\gamma_{th}y}{\mu_2x}} \middle| \begin{matrix} 1, & \xi^2+1 \\ \xi^2, & \alpha, & \beta, & 0 \end{matrix} \right) dy. \quad (6.2.11)$$

Eksponencijalna funkcija se predstavlja preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.19), nakon čega se integral  $\mathfrak{I}_{21}$  rešava primenom pravila (A.15), uz pomoć (A.3), (A.4), (A.16) i (A.17). Dobija se

$$\begin{aligned}
\mathfrak{I}_{21} &= \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi} \left( \frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{-(l+1)} \\
&\times G_{5,8}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}(1-\rho)\mu_1}{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)x} \middle| \begin{matrix} \frac{1}{2}, & 1, & -l, & \frac{\xi^2+1}{2}, & \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, & \frac{\xi^2+1}{2}, & \frac{\alpha}{2}, & \frac{\alpha+1}{2}, & \frac{\beta}{2}, & \frac{\beta+1}{2}, & 0, & \frac{1}{2} \end{matrix} \right). \quad (6.2.12)
\end{aligned}$$

Nakon permutacije parametara Mejerove  $G$ -funkcije u (6.2.12) primenom pravila (A.7) i (A.8), moguće je smanjiti njen red primenom identiteta (A.9) i (A.32). Zatim se vrši transformacija dobijene Mejerove  $G$ -funkcije primenom jednačina (A.18), nakon čega je rešenje integrala izvedeno  $\mathfrak{I}_{21}$  kao

$$\mathfrak{I}_{21} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi} \left( \frac{((N-k+n)(1-\rho)+1)}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{-(l+1)} \times G_{6,3}^{2,5} \left( \frac{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)x}{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}(1-\rho)\mu_1} \middle| \begin{array}{c} \frac{2-\xi^2}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, \frac{1-\beta}{2}, 1 \\ 0, 1+l, -\frac{\xi^2}{2} \end{array} \right). \quad (6.2.13)$$

Zamenom (6.2.13) u (6.2.10), integral  $\mathfrak{I}_2$  je dat u obliku

$$\mathfrak{I}_2 = \frac{2^{\alpha+\beta-3}\xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l}{l!^2 (1-\rho)^l \mu_1^{l+1}} \times e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1} ((N-k+n)(1-\rho)+1)^{-(l+1)}} \times \mathfrak{I}_{22}, \quad (6.2.14)$$

gde je

$$\mathfrak{I}_{22} = \int_0^{\infty} (x + \gamma_{th})^l e^{-\frac{x}{(1-\rho)\mu_1}} \times G_{6,3}^{2,5} \left( \frac{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)x}{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}(1-\rho)\mu_1} \middle| \begin{array}{c} \frac{2-\xi^2}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, \frac{1-\beta}{2}, 1 \\ 0, 1+l, -\frac{\xi^2}{2} \end{array} \right) dx. \quad (6.2.15)$$

Najpre je izvršeno predstavljanje eksponencijalne funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom (A.19), nakon čega je primenjena binomna teorema definisana identitetom (A.26).

Integral  $\mathfrak{I}_{22}$  dobijen je u obliku

$$\mathfrak{I}_{22} = \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \gamma_{th}^{l-d} \int_0^{\infty} x^d G_{0,1}^{1,0} \left( \frac{x}{(1-\rho)\mu_1} \middle| \begin{array}{c} - \\ 0 \end{array} \right) \times G_{6,3}^{2,5} \left( \frac{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)x}{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}(1-\rho)\mu_1} \middle| \begin{array}{c} \frac{2-\xi^2}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, \frac{1-\beta}{2}, 1 \\ 0, 1+l, -\frac{\xi^2}{2} \end{array} \right) dx, \quad (6.2.16)$$

i rešava pomoću pravila (A.20)

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_{22} &= \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \gamma_{th}^{l-d} (1-\rho)^{d+1} \mu_1^{d+1} \\ &\times G_{7,3}^{2,6} \left( \frac{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)}{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}} \middle| \frac{2-\xi^2}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, \frac{1-\beta}{2}, -d, 1 \right) \end{aligned} \quad (6.2.17)$$

Nakon transformacije dobijene Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.18), i zatim zamenom (6.2.17) u (6.2.14), integral  $\mathfrak{I}_2$  je dobijen kao

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_2 &= \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{l!^2} \\ &\times \frac{\rho^l (1-\rho)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \left( \frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{l-d} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\ &\times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}}{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \right). \end{aligned} \quad (6.2.18)$$

Zamenom (6.2.8) i (6.2.18) u (6.2.7), dobija se konačan izraz za verovatnoću prekida

$$\begin{aligned} P_{out} &= 1 - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\gamma_{th} \left( \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \right)} \\ &+ \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{l!^2} \\ &\times \frac{\rho^l (1-\rho)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \left( \frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{l-d} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\ &\times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2\beta^2\kappa^2\gamma_{th}}{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \right). \end{aligned} \quad (6.2.19)$$

Nalaženjem granične vrednosti jednačine (6.2.19) kada  $\xi^2 \rightarrow \infty$ , verovatnoća prekida RF/FSO sistema kada fluktuacije intenziteta optičkog signala potiču samo od gama-gama atmosfere turbulencije, je



$$\begin{aligned}
P_{out}^{GG} &= 1 - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\gamma_{th} \left( \frac{(N-k+n+1)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)\mu_1} \right)} \\
&+ \frac{2^{\alpha+\beta-2}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{l!} \\
&\times \frac{\rho^l (1-\rho)}{((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \left( \frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{l-d} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
&\times G_{2,6}^{5,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \gamma_{th}}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \right).
\end{aligned} \tag{6.2.20}$$

U slučaju sistema sa samo jednim relejem, izraz za verovatnoću prekida dobija se zamenom  $N = k = 1$  u (6.2.19) kao

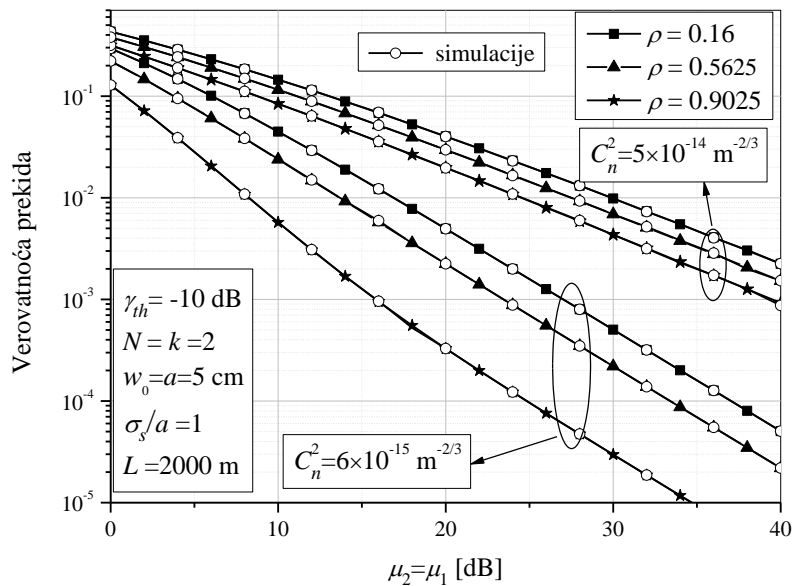
$$\begin{aligned}
P_{out} &= 1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\mu_1}} + \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \frac{\rho^l \gamma_{th}^{l-d}}{l!^2 (1-\rho)^{l-d-1} \mu_1^{l-d}} e^{-\frac{\gamma_{th}}{(1-\rho)\mu_1}} \\
&\times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma_{th}}{16\mu_2} \middle| \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \right).
\end{aligned} \tag{6.2.21}$$

što predstavlja dobijen rezultat dat u jednačini (5.2.43), koji je štampan u radu [45].

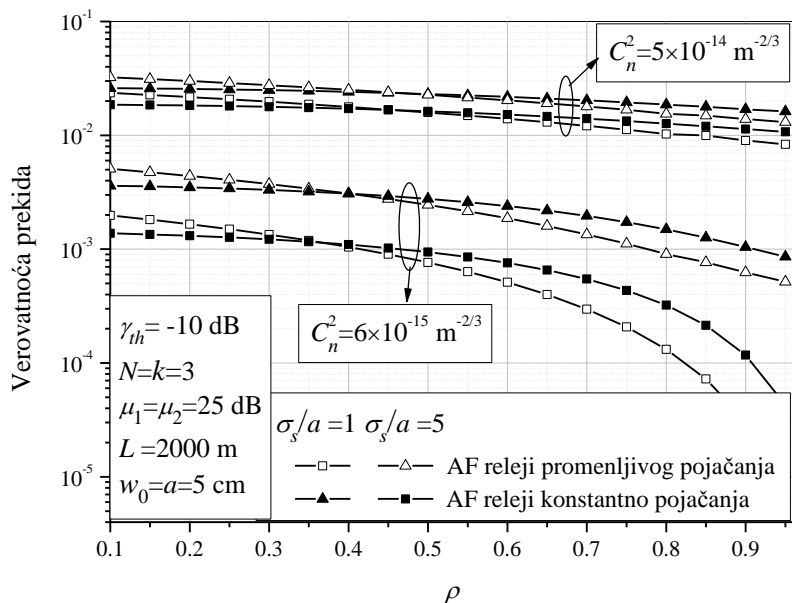
Slika 6.2.1. prikazuje zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema, kada se zakasnela trenutna informacija o stanju RF kanala koristi i za selekciju releja, i za određivanja pojačanja, od srednjeg SNR-a na RF deonici i električnog SNR-a na FSO deonici. U obzir su uzete različite vrednosti koeficijenta korelacije, dok je FSO deonica pod uticajem slabe ili jake atmosferske turbulencije. Uticaj korelacije je izraženiji kada je prenos optičkog signala pod uticajem povoljnih uslova (slabe atmosferske turbulencije).

Zavisnost verovatnoće prekida RF/FSO sistema od koeficijenta korelacije prikazana je na slici 6.2.2. Posmatra se sistem sa AF relejima konstantnog i promenljivog pojačanja. FSO deonica je pod uticajem slabe ili jake atmosferske turbulencije, dok je vrednost normalizovane standardne devijacije džitera  $\sigma_s/a = 1$  ili  $\sigma_s/a = 5$ . Može se primetiti da je uticaj korelacije izraženiji u povoljnim uslovima atmosferske turbulencije, kao i kada je greška pozicioniranja slabija. Greška pozicioniranja ima manji uticaj na verovatnoću prekida kada je atmosferska turbulencija jaka. Interesantno je primetiti da se primenom AF releja promenljivog pojačanja postižu bolje performanse od istog sistema sa AF relejima konstantnog pojačanja kada je koeficijent korelacije veći, tj. kada je zakasnela informacija

„sličnija“ odgovarajućoj informaciji u trenutku prenosa. Sa druge strane, kada je koeficijent korelacije manji, RF/FSO sistem sa AF relejima konstantnog pojačanja ima manju vrednost verovatnoće prekida u odnosu na sistem sa AF relejima promenljivog pojačanja. Ovo se dešava jer estimirana trenutna informacija o stanju RF kanala utiče na selekciju releja u oba slučaja, dok ima uticaj na pojačanje samo kod sistema sa AF relejima promenljivog pojačanja.



**Slika 6.2.1.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima promenljivog pojačanja u različitim uslovima atmosfere turbulencije



**Slika 6.2.2.** Verovatnoća prekida RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima različitih pojačanja

*Verovatnoća greške sistema*

Kao i u prethodnim analizama, verovatnoća greške se određuje na osnovu izvedenog izraza za verovatnoću prekida. Zamenom (6.2.19) u (3.2.13), verovatnoće greške je

$$\begin{aligned}
 P_b &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty e^{-q\gamma} \gamma^{p-1} \left\{ 1 - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} e^{-\gamma \left( \frac{(N-k+n+1)}{\mu_1((N-k+n)(1-\rho)+1)} \right)} \right. \\
 &+ \frac{2^{\alpha+\beta-3} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^\infty \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l (1-\rho)^{d-l+1} \mu_1^{d-l} \gamma^{l-d}}{l!^2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} e^{-\frac{\gamma}{(1-\rho)\mu_1}} \\
 &\times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma}{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \begin{matrix} 1, -l, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \end{matrix} \right) \Bigg\} d\gamma \\
 &= \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2 + \mathfrak{I}_3.
 \end{aligned} \tag{6.2.22}$$

Integral  $\mathfrak{I}_1$  je ranije određen jednačinom (6.1.22), dok je integral  $\mathfrak{I}_2$  rešen primenom pravila (A.28) kao

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{I}_2 &= \frac{q^p}{2\Gamma(p)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{(N-k+n+1)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-q\gamma} e^{-\gamma \left( \frac{(N-k+n+1)}{\mu_1((N-k+n)(1-\rho)+1)} \right)} d\gamma \\
 &= k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{2(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{q\mu_1((N-k+n)(1-\rho)+1)} \right)^{-p}.
 \end{aligned} \tag{6.2.23}$$

Integral  $\mathfrak{I}_3$  definisan je kao

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{I}_3 &= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(p)} k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^\infty \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l (1-\rho)^{d-l+1} \mu_1^{d-l}}{l!^2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \\
 &\times \int_0^\infty \gamma^{l-d+p-1} e^{-\gamma \left( q + \frac{1}{(1-\rho)\mu_1} \right)} \\
 &\times G_{3,7}^{6,2} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \gamma}{16\mu_2((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \begin{matrix} 1, -l, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \end{matrix} \right) d\gamma
 \end{aligned} \tag{6.2.24}$$

Nakon predstavljanja eksponencijalne funkcije u preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila (A.19), integral  $\mathfrak{I}_3$  rešen je primenom pravila (A.20) kao

$$\begin{aligned}
\mathfrak{J}_3 &= \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} k \binom{N}{k} \\
&\times \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l (1-\rho)^{p+1} \mu_1^p (q(1-\rho)\mu_1+1)^{-(l-d+p)}}{l! ((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \\
&\times G_{4,7}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \left( q + \frac{1}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{-1}}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \begin{matrix} 1, -l, 1-l+d-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \end{matrix} \right).
\end{aligned} \tag{6.2.25}$$

Zamenom (6.1.22), (6.2.23) i (6.2.25) u (6.2.22), dobija se konačan izraz za verovatnoću greške posmatranog sistema

$$\begin{aligned}
P_b &= \frac{1}{2} - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{2(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{q\mu_1 ((N-k+n)(1-\rho)+1)} \right)^{-p} \\
&+ \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} k \binom{N}{k} \\
&\times \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l (1-\rho)^{p+1} \mu_1^p (q(1-\rho)\mu_1+1)^{-(l-d+p)}}{l! ((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \\
&\times G_{4,7}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 \left( q + \frac{1}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{-1}}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \begin{matrix} 1, -l, 1-l+d-p, \frac{\xi^2+2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \end{matrix} \right).
\end{aligned} \tag{6.2.26}$$

Kao i do sada, nalaženjem granične vrednosti izraza (6.2.26) kada  $\xi \rightarrow \infty$ , dobija se verovatnoća greške kada je FSO deonica pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije

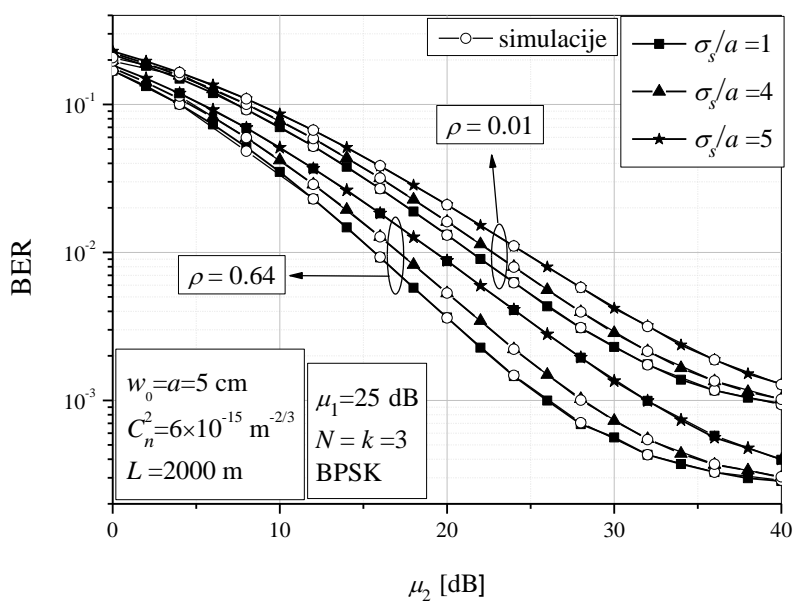
$$\begin{aligned}
P_b^{GG} &= \frac{1}{2} - k \binom{N}{k} \sum_{n=0}^{k-1} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n}{2(N-k+n+1)} \left( 1 + \frac{(N-k+n+1)}{q\mu_1 ((N-k+n)(1-\rho)+1)} \right)^{-p} \\
&+ \frac{2^{\alpha+\beta-3} q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} k \binom{N}{k} \\
&\times \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \binom{k-1}{n} \frac{(-1)^n \rho^l (1-\rho)^{p+1} \mu_1^p (q(1-\rho)\mu_1+1)^{-(l-d+p)}}{l! ((N-k+n)(1-\rho)+1)^{l+1}} \\
&\times G_{3,6}^{5,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \left( q + \frac{1}{(1-\rho)\mu_1} \right)^{-1}}{16\mu_2 ((N-k+n)(1-\rho)+1)} \middle| \begin{matrix} 1, -l, 1-l+d-p \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \end{matrix} \right).
\end{aligned} \tag{6.2.27}$$

Verovatnoća greške sistema sa jednim relejem dobija se zamenu  $N = k = 1$  u (6.2.26) kao

$$P_b^{N=1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\mu_1 q} \right)^{-p} + \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2 q^p}{\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) \Gamma(p)} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{d=0}^l \binom{l}{d} \frac{\rho^l (1-\rho)^{p+1} \mu_1^p}{l!^2 (q(1-\rho)\mu_1 + 1)^{l-d+p}} \times G_{4,7}^{6,3} \left( \frac{\alpha^2 \beta^2 \kappa^2 (1-\rho) \mu_1}{16 \mu_2 (q(1-\rho)\mu_1 + 1)} \left| \begin{array}{c} 1, -l, 1-l+d-p, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 1+d, 0 \end{array} \right. \right). \quad (6.2.28)$$

što predstavlja dobijeni rezultat u jednačini (5.2.55), koji je objavljen u radu [45].

Slika 6.2.3. prikazuje zavisnost verovatnoće greške RF/FSO sistema sa AF relejima promenljivog pojačanja za različite vrednosti koeficijenta korelacije. Veličina greške pozicioniranja određena je na osnovu normalizovane standardne devijacije džitera. Sistem ima najbolje performanse kada je  $\sigma_s/a=1$ , što odgovara slučaju kada je greška pozicioniranja zanemarljivo mala i može se smatrati da je optički signal pod uticajem samo atmosferske turbulencije. To je potvrđeno i poklapanjem odgovarajućih krivih i onih koje su dobijene na osnovu jednačine (6.2.27). Takođe, povećavanjem koeficijenta korelacije dobijaju se bolje performanse sistema. Može se zaključiti da je uticaj greške pozicioniranja jači kada je korelacija veća.



**Slika 6.2.3.** Verovatnoća greške RF/FSO sistema sa PRS i AF relejima promenljivog pojačanja za različite vrednosti normalizovane standardne devijacije džitera

## 7. Zaključak

Intenzivni i neprekidni razvoj savremenih komunikacionih tehnologija posledica je sve većeg broja novih korisnika, kao i razvoja sve zahtevnijih multimedijalnih servisa. Povećana potreba za širim propusnim opsegom uslovlila je da se buduće generacije telekomunikacionih sistema ne mogu oslanjati samo na jednu tehnologiju za povezivanje krajnjih korisnika, kao što je bio slučaj u prošlosti. Optičke bežične komunikacije nude prednosti koje su svojstvene sistemima sa optičkim vlaknima, a sa druge strane koriste prednosti bežičnih tehnologija. Pošto ih karakterišu osobine kao što su velike brzine prenosa, nelicencirani i širok propusni opseg i jednostavna i jeftina implementacija, optičke bežične komunikacije predstavljaju jedno od adekvatnih rešenja za problem „poslednje milje“, pri čemu se koriste za povezivanje krajnjih korisnika na glavnu mrežu sa optičkim vlaknima.

Upotreba FSO sistema ograničena je usled postojanja atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Iz tog razloga u ovoj disertaciji ispitani su i analizirani efekti koji utiču na prenos optičkog bežičnog signala, u cilju određivanja optimalnih parametara sistema kojima se postižu zadovoljavajuće performanse. Fluktuacije optičkog signala na prijemu, koje se javljaju kao posledica atmosferske turbulencije, modelovane su opšte prihvaćenom gama-gama raspodelom. Za opisivanje efekta greške pozicioniranja usvojen je model koji je izveden pod pretpostavkom da je rezultujući radijalni pomeraj modelovan Rejljevom raspodelom. Na početku disertacije ukratko su date karakteristike FSO sistema, njegove osobine, prednosti i primena. Opisane su vrste detekcije signala na prijemu i vrste primenjenih modulacionih tehnika. Dat je i prikaz kombinovanog modela koji opisuje statistiku fluktuacija intenziteta usled istovremenog efekta atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja.

Performanse FSO sistema sa PIN fotodiodom opisane su trećem poglavlju. Najpre je razmatrana verovatnoća prekida, a zatim i verovatnoća greške FSO sistema, uz pretpostavku da su fluktuacije intenziteta optičkog signala posledica gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Svi dobijeni rezultati uprošćeni su na slučaj kada je FSO prenos signala pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije. Izvedeni su analitički izrazi za verovatnoću prekida FSO sistema. Dobijeni rezultati kada je greška pozicioniranja zanemarljivo mala objavljeni su zborniku međunarodne konferencije [128]. U nastavku je data analiza verovatnoće greške FSO sistema. Najpre su izvedeni rezultati za FSO sistem sa IM/DD i OOK modulacijom. Alternativni oblik dobijenog izraza publikovan je [123]. Prikazan je uticaj uslova atmosferskog kanala kroz koji se prostire optički signal na verovatnoću prekida i na verovatnoću greške. Ispitan je uticaj standardne devijacije džitera na performanse sistema. Manja vrednost standardne devijacije džitera predstavlja minimalne vibracije optičkog snopa, a time bolju usklađenost FSO predajnika i prijemnika, što dovodi do boljih performansi sistema. Kada je džiter veoma slab, može se smatrati da je greška pozicioniranja veoma mala, pa je FSO kanal pod uticajem samo gama-gama atmosferske turbulencije. U skladu sa očekivanjima, performanse sistema su bolje usled prenosa optičkog signala kroz FSO kanal koji je pod uticajem slabe atmosferske turbulencije. Takođe, na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je uticaj greške pozicioniranja dominantan u uslovima slabe atmosferske turbulencije. Sa druge strane, kada je prenos optičkog signala kroz slobodan prostor degradiran jakim atmosferskom turbulencijom, greška pozicioniranja ima manji uticaj na performanse sistema. Ispitan je i uticaj dužine FSO deonice na performanse sistema. Sa većom razdaljinom između predajnika i prijemnika, dolazi do pogoršanja performansi sistema.

U nastavku disertacije prikazana je analiza verovatnoće greške FSO sistema gde se koristi intenzitetska modulacija podnosiocem u kombinaciji sa različitim vrstama modulacija u električnom domenu. Nakon analize verovatnoće greške FSO sistema sa SIM i nekom od poznatih binarnih modulacija [128], prikazana je analiza verovatnoće greške po bitu FSO sistema koji primenjuje SIM-QAM. Izvedeni su novi, tačni izrazi za verovatnoću greške po bitu, pri čemu je u obzir uzeta i kvadraturna i pravougaona konstelacija tačaka. Na osnovu dobijenih izraza za verovatnoću greške, izvedeni su i odgovarajući aproksimativni izrazi koji se precizno poklapaju sa tačnim rezultatima kada postoje povoljni uslovi prenosa kroz FSO kanal, i kada se koristi niži nivo SIM-QAM modulacije. Dobijeni rezultati u ovom delu disertacije objavljeni su u [44]. Greška pozicioniranja ima veći uticaj na performanse sistema kada je vrednost električnog SNR-a veća, tj. kada je veća vrednost predajne optičke snage.

Takođe, greška pozicioniranja je izraženija sa povećanjem standardne devijacije džitera, usled veće neusaglašenosti predajnika i prijemnika, što se reflektuje u pogoršanju performansi sistema. Manja vrednost indeksa prelamanja, što odgovara manjoj vrednosti Rojtove varijanse, a time i slabijoj atmosferskoj turbulenciji i povoljnijim uslovima za prenos optičkog signala, dovodi do poboljšanja performansi sistema. Pored greške pozicioniranja i atmosferske turbulencije, na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je dužina FSO linka takođe bitan faktor koji utiče na verovatnoću greške sistema, i to pre svega u povoljnim uslovima atmosferske turbulencije. Kada FSO koristi SIM sa višim nivoom QAM modulacije, dolazi do pogoršanja performansi sistema, ali u isto vreme veća količina informacija može biti preneti.

Analizirani su i FSO sistemi sa SIM-MPSK i SIM-MDPSK. Najpre su izvedeni izrazi za verovatnoću greške po simbolu bez uticaja hardverskih nesavršenosti u električnom delu prijemnika. U nastavku su prikazani izvedeni rezultati za verovatnoću greške po simbolu FSO sistema sa amplitudskim disbalansom grana, kao i za FSO sistem pod uticajem faznog šuma nesavršenog nosioca. Na osnovu dobijenih rezultata ispitan je uticaj neidealne procene faze na verovatnoću greške po simbolu posmatranog sistema. Uticaj faznog šuma određen je standardnom devijacijom faznog šuma ekstraktora kod SIM-MPSK, i standardnom devijacijom faznog šuma lokalnog oscilatora kod SIM-MDPSK. Što je vrednost standardne devijacije faznog šuma veća, uticaj fazne greške je veći i dolazi do pogoršanja performansi sistema. U oblasti velikih vrednosti električnog SNR-a može se primetiti postojanje neotklonljive verovatnoće greške, pa se daljim povećanjem vrednosti električnog SNR-a, tj. optičke snage lasera, ne mogu poboljšati performanse sistema. Na osnovu prikazanih rezultata, zaključuje se da je uticaj uslova FSO prenosa i jačine atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja dominantan faktor prilikom određivanja performansi sistema kada je fazni šum manji i PSK prijemnik savršeniji. Kada je atmosferski kanal pod uticajem veoma loših uslova prenosa, uticaj faznog šuma na verovatnoću greške sistema je minimalan. Takođe, uticaj modulacionog formata PSK ili DPSK na performanse sistema je veći kada je fazni šum slabiji. Na osnovu prikazanog, uticaj atmosferske turbulencije na performanse FSO sistema je zanemarljivo mali kod FSO sistema koji koriste veći modulacioni format SIM-MPSK i SIM-MDPSK.

Analiza ergodičnog kapacitet i kapaciteta prekida FSO sistema data je u nastavku trećeg poglavlja. Pored gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja, u obzir je uzeta i verovatnoća kratkotrajne blokade snopa,  $p_s$ , usled slučajnih prepreka, koje mogu dovesti do prekida veze. Performanse FSO sistema su najbolje kada sa sigurnošću možemo tvrditi da ne



dolazi do blokade signala ( $p_s \rightarrow 0$ ). Kada je  $p_s = 1$ , optički snop biće sigurno blokiran nekom vrstom prepreke prilikom prenosa kroz slobodan prostor, što dovodi do prekida FSO veze. Za veoma velike vrednosti verovatnoće blokade, uticaj greške pozicioniranja i atmosfere turbulencije je od manjeg značaja na performanse sistema. Na osnovu izvedenih analitičkih rezultata za ergodični kapacitet i kapacitet prekida, izvršena je optimizacije FSO linka, tj. određene su optimalne vrednosti poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa kojom se postiže maksimalna vrednost ergodičnog kapaciteta, tj. minimalna vrednost kapaciteta prekida. Stoga, prilikom projektovanja FSO linka, performanse sistema mogu biti znatno poboljšane pravilnim izborom sklopa predajnika, koji će biti u blizini optimalnog poluprečnika snopa. Sa širim snopom, uticaj greške pozicioniranja je manji, ali dolazi do rasipanja i smanjenja optičke snage na prijemu. Ako je širina optičkog snopa na prijemu manja, dolazi do uštede u optičkoj snazi usled manjih gubitaka zbog divergencije snopa, i tada greška pozicioniranja ima dominantnu ulogu u degradaciji performansi sistema. Na osnovu estimiranih optimalnih vrednosti širine optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa, zaključuje se da vrednosti kojima se postiže minimum verovatnoće prekida i maksimum ergodičnog kapaciteta nisu iste, ali obe zavise od standardne devijacije džitera, tj. veličine greške pozicioniranja. Atmosferska turbulencija ima uticaj samo na optimizaciju verovatnoće prekida.

U četvrtom poglavlju izvedeni su izrazi za verovatnoću greške FSO sistema sa APD fotodiodom, koji koristi IM/DD sa OOK, SIM-BPSK, kao SIM-BDPSK. Na osnovu dobijenih izraza, izvršena je optimizacija FSO linka minimizacijom verovatnoće greške i nalaženjem optimalnih vrednosti pojačanja fotodiode. Minimumi verovatnoće greške FSO sistema sa APD fotodiodom u velikoj meri zavise od temperature prijemnika i bitske brzine, dok je slabija zavisnost primećena u odnosu na atmosfersku turbulencija i dužinu FSO deonice. Jačina greške pozicioniranja i optička snaga nemaju nikakav uticaj na optimizaciju FSO linka sa APD prijemnikom. Pored opštih rezultata za verovatnoću greške FSO sistema sa SIM-BPSK, izvedeni su i rezultati za FSO sistem u prisustvu termičkog šuma, kao i za sistem u prisustvu šot šuma. Na osnovu prikazanih rezultata zaključuje se da je u slučaju malog pojačanja APD fotodiode termički šum dominantan, pa se APD fotodiode ponaša kao PIN, dok je za velike vrednosti APD pojačanja šot šum od većeg značaja na određivanje performansi sistema. Na osnovu dobijenih rezultata izvršena je optimizacija FSO linka nalaženjem optimalnih vrednosti poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa, kao i optimalnih vrednosti dužine FSO linka. Optimalne vrednosti optičkog snopa na izlazu iz predajnika najviše zavise od vrednosti standardne devijacije džitera. Kada je

vrednosti standardne devijacije džitera relativno velika, optička snaga i atmosferska turbulencija imaju bitan uticaj na selekciju FSO sklopa predajnika i prijemnika, koje će obezbediti najbolje performanse sistema. Rezultati u ovom delu disertacije objavljeni su u [120], [121], [125].

Analiza asimetričnih RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog i promenljivog pojačanja prikazana je u petom poglavlju. Izvedeni su izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške, kad je fading u RF delu sistema modelovan Nakagami- $m$  raspodelom, dok je FSO kanal pod uticajem gama-gama atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja. Pored sistema u prisustvu šuma, posmatrani su i sistemi u kojima su istovremeno prisutni i šum i veći broj interferencija na releju. Sa povećanjem broja interferencija, performanse sistema se degradiraju. Takođe, uticaj broja interferencija izraženiji je kada je srednji odnos srednje snage interferencije i šuma veći, kao i tokom povoljnih uslova prenosa na FSO deonici (slaba atmosferska turbulencija i manja vrednost standardne devijacije džitera). Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da je uticaj interferencije na performanse RF/FSO sistema manji kada je druga FSO deonica pod uticajem jake atmosferske turbulencije i izražene greške pozicioniranja. Takođe, upoređene su performanse RF/FSO sistema sa AF relejem konstantnog i sa AF relejem promenljivog pojačanja. Sistemi sa AF relejem promenljivog pojačanja daju bolje performanse od sistema sa AF relejem konstantnog pojačanja, naročito kada se prenos optičkog signala vrši kroz približno idealnu sredinu (slaba turbulencija i minimalni uticaj greške pozicioniranja). Kada je FSO deonica pod uticajem izrazito loših uslova, dobitak u performansama sistema koji se dobija implementiranjem AF releja promenljivog pojačanja u odnosu na AF relej konstantnog pojačanje je minimalan. Deo prikazanih rezultata u ovom delu disertacije dati su u [118]. Na kraju petog poglavlja predstavljena je analiza efekta neidealne procene stanja RF kanala (koja se koristi za određivanje pojačanja) na performanse RF/FSO sistema sa AF relejem promenljivog pojačanja u prisustvu šuma. Na osnovu dobijenih analitičkih rezultata, izvedeni su jednostavniji izrazi za performanse sistema na velikim vrednostima srednjih SNR-ova, koji su znatno matematički jednostavniji i pogodniji za primenu. U ovom slučaju, izvršena je optimizacija FSO deonice u cilju određivanja minimuma verovatnoće prekida RF/FSO sistema za optimalnu vrednost poluprečnika optičkog snopa na izlazu iz predajnog teleskopa. Ova optimalna vrednost optičkog snopa pre svega zavisi od jačine greške pozicioniranja. Što je veća vrednost normalizovane standardne devijacije džitera, veći je i uticaj atmosferske turbulencije i optičke snage na određivanje optimalne vrednosti poluprečnika snopa. Ispitan je i uticaj korelacije između trenutne informacije o stanju RF kanala koja se koristi za

određivanje pojačanja i odgovarajuće informacije u trenutku slanja. Uticaj korelacije je izraženiji kada su uslovi prenosa optičkog signala povoljni. Izvedeni izrazi uprošćeni su za slučaj kada je RF deonica pod uticajem Rejlijevog fedinga, i publikovani su u časopisu [45]. Na kraju ovog poglavlja može se doneti opšti zaključak da stanje prve RF deonice (broj i snaga interferencija, srednja vrednost SNR-a, dubina Nakagami- $m$  fedinga, vrednost koeficijenta korelacije) nema presudni uticaj na određivanje performansi asimetričnih RF/FSO sistema kada je druga FSO deonica pod uticajem nepovoljnih uslova prenosa (jaka atmosferska turbulencija, velika greška pozicioniranja, preveliko rastojanje između releja i prijemnika). Sa druge strane, ako se prenos optičkog signala vrši kroz povoljnu sredinu, pomenuti faktori koji utiču na kvalitet prenosa kroz RF deonicu mogu znatno degradirati performanse RF/FSO sistema.

Primena diverziteti tehnika kombinovanja signala kod RF/FSO sistema data je u šestom poglavlju. Predstavljena je analiza asimetričnih RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom releja. Odabir releja se vrši na osnovu zakasnele trenutne informacije o stanju kanala koja je u vremenskoj korelaciji se odgovarajućom informacijom o stanju RF kanala u trenutku slanja signala. Izvedeni su novi izrazi za verovatnoću prekida i verovatnoću greške RF/FSO sistema sa AF relejima konstantnog pojačanja, i sa AF relejima promenljivog pojačanja koje se određuje na osnovu iste trenutne informacije koja se koristi za selekciju aktivnog releja. Deo prikazanih rezultata je objavljen u [117], kao i u poglavlju knjige [115]. U skladu sa očekivanjima, povećanje koeficijenta korelacije dovodi do poboljšanja performansi sistema, kako kod sistema sa AF relejima konstantnog pojačanja, tako i kod sistema sa AF relejima promenljivog pojačanja. Veličina koeficijenta korelacije je od suštinske važnosti pri određivanju performansi sistema kada su uslovi prenosa na FSO deonici povoljni. Kada je FSO link degradiran jakim atmosferskom turbulencijom i izrazitim pomeranjem FSO predajnika i prijemnika, vrednost koeficijenta korelacije neće u velikoj meri uticati na verovatnoću prekida i verovatnoću greške. Sa druge strane, ako je informacija o stanju RF kanala u potpunosti nezavisna (nekorelisana) od informacije u trenutku slanja, stepen atmosferske turbulencije i greške pozicioniranja neće biti od velike važnosti na performanse sistema. Takođe, na osnovu prikazanih rezultata zaključeno je da je najefikasnije izvršiti implementaciju dva releja, ali samo kad je prenos optičkog signala izvršen kroz sredinu koja je pod uticajem slabe atmosferske turbulencije i minimalne greške pozicioniranja, kao i kad je koeficijent korelacije veliki, tj. trenutne informacije o stanju RF kanala su približno iste. Na kraju poglavlja upoređene su performanse RF/FSO sistema sa parcijalnom selekcijom i AF relejima konstantnog i promenljivog pojačanja. Primenom AF releja promenljivog pojačanja

ostvaruju se bolje performanse nego primenom AF releja konstantnog pojačanja kada je koeficijent korelacije veći. U tom slučaju zakasnela trenutna informacija koja se koristi za odabir releja se veoma malo razlikuje od odgovarajuće informacije u trenutku prenosa. Kada je koeficijent korelacije manji, implementacija AF releja konstantnog pojačanja obezbeđuje bolje performanse sistema nego pri korišćenju AF releja promenljivog pojačanja. Razlog tome je što zakasnela informacija o stanju RF kanala utiče na selekciju releja u oba slučaja, dok ima uticaj na pojačanje samo kod sistema sa AF relejima promenljivog pojačanja.

## Dodatak A

U ovom Dodatku prikazana su pravila i identiteti koji su se koristili pri matematičkim izvođenjima predstavljenim u doktorskoj disertaciji.

Modifikovana Beselova funkcija druge vrste  $\nu$ -tog reda se može izraziti preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila [166, (03.04.26.0009.01)]

$$K_\nu(\sqrt{z}) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left( \frac{z}{4} \middle| \begin{matrix} - \\ \nu/2, -\nu/2 \end{matrix} \right). \quad (\text{A.1})$$

Pravilo za rešavanje integrala koji sadrži Mejerovu  $G$ -funkciju dato je [166, (07.34.21.0085.01)]

$$\int_a^\infty \tau^{\alpha-1} (\tau-a)^{\beta-1} G_{p,q}^{m,n} \left( \omega \tau^{l/k} \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right) d\tau = \frac{k^\mu l^{-\beta} \Gamma(\beta)}{(2\pi)^{c^*(k-1)} a^{1-\alpha-\beta}} \times G_{kp+l, kq+l}^{km+l, kn} \left( \frac{\omega^k a^l}{k^{k(q-p)}} \middle| \begin{matrix} \frac{a_1}{k}, \dots, \frac{a_1+k-1}{k}, \dots, \frac{a_p}{k}, \dots, \frac{a_p+k-1}{k}, \frac{1-\alpha}{l}, \dots, \frac{l-\alpha}{l} \\ \frac{1-\alpha-\beta}{l}, \dots, \frac{l-\alpha-\beta}{l}, \frac{b_1}{k}, \dots, \frac{b_1+k-1}{k}, \dots, \frac{b_q}{k}, \dots, \frac{b_q+k-1}{k} \end{matrix} \right), \quad (\text{A.2})$$

gde je parametar  $c^*$  definisan kao [166, (07.34.21.0016.01)]

$$c^* = m + n - \frac{p+q}{2}, \quad (\text{A.3})$$

i parametar  $\mu$  kao [166, (07.34.21.0018.01)]

$$\mu = \sum_{j=1}^q b_j - \sum_{j=1}^p a_j + \frac{p-q}{2} + 1. \quad (\text{A.4})$$

Pravilo za transformaciju Mejerove  $G$ -funkcije dato je kao [166, (07.34.16.0001.01)]

$$G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} \alpha + a_1, \dots, \alpha + a_n, \alpha + a_{n+1}, \dots, \alpha + a_p \\ \alpha + b_1, \dots, \alpha + b_m, \alpha + b_{m+1}, \dots, \alpha + b_q \end{matrix} \right. \right) = z^\alpha G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.5})$$

Za rešavanja integrala koji sadrži Mejerovu  $G$ -funkciju koristi se i pravilo [166, (07.34.21.0084.01)]

$$\int_0^a \tau^{\alpha-1} (a-\tau)^{\beta-1} G_{p,q}^{m,n} \left( \omega \tau^{l/k} \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) d\tau = \frac{k^\mu l^{-\beta} \Gamma(\beta)}{(2\pi)^{c^*(k-1)} a^{1-\alpha-\beta}} \times G_{kp+l, kq+l}^{km, kn+l} \left( \frac{\omega^k a^l}{k^{k(q-p)}} \left| \begin{matrix} \frac{1-\alpha}{l}, \dots, \frac{l-\alpha}{l}, \frac{a_1}{k}, \dots, \frac{a_1+k-1}{k}, \dots, \frac{a_p}{k}, \dots, \frac{a_p+k-1}{k} \\ \frac{b_1}{k}, \dots, \frac{b_1+k-1}{k}, \dots, \frac{b_q}{k}, \dots, \frac{b_q+k-1}{k}, \frac{1-\alpha-\beta}{l}, \dots, \frac{l-\alpha-\beta}{l} \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.6})$$

Permutacija parametara Mejerove  $G$ -funkcije može se izvršiti na osnovu pravila [166, (07.34.04.0003.01)]

$$G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_k, \dots, a_j, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_j, \dots, a_k, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right), \quad (\text{A.7})$$

kao i [166, (07.34.04.0004.01)]

$$G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_k, \dots, b_j, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_j, \dots, b_k, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.8})$$

Smanjenje reda Mejerove  $G$ -funkcije može se izvršiti primenom [166, (07.34.03.0002.01)]

$$G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_{m-1}, a_p, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p-1, q-1}^{m-1, n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_{p-1} \\ b_1, \dots, b_{m-1}, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.9})$$

Integral koje sadrži Mejerovu  $G$ -funkciju se takođe može rešiti primenom pravila [3, (26)]

$$\int_0^y x^{\alpha-1} G_{p,q}^{m,n} \left( \omega x \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) dx = G_{p+1, q+1}^{m, n+1} \left( \omega y \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, 1-\alpha, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, -\alpha, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.10})$$

Nalaženje granične vrednosti Mejerove  $G$ -funkcije kada neki od njenih parametra teži beskonačnosti može se odrediti na osnovu [166, (07.34.25.0007.01)]

$$\lim_{b_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{\Gamma(b_1)} G_{p,q}^{m,n} \left( b_1 z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p, q-1}^{m-1, n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_2, \dots, b_{m-1}, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right), \quad (\text{A.11})$$

i pomoću [166, (07.34.25.0006.01)]

$$\lim_{a_p \rightarrow \infty} \Gamma(a_p) G_{p,q}^{m,n} \left( \frac{z}{a_p} \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p-1,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_{p-1} \\ b_1, \dots, b_{m-1}, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.12})$$

Transformacija Gama funkcije vrši se na osnovu pravila [166, (06.05.16.0002.01)]

$$\Gamma(z+1) = z\Gamma(z). \quad (\text{A.13})$$

Komplementarna funkcija greške može se izraziti preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila [166, (06.27.26.0006.01)]

$$\operatorname{erfc}(\sqrt{z}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left( z \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.14})$$

Integral koji sadrži proizvod dve Mejerove  $G$ -funkcije može se rešiti primenom pravila [166, (07.34.21.0013.01)]

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \tau^{\alpha-1} G_{u,v}^{s,t} \left( \sigma \tau \left| \begin{matrix} c_1, \dots, c_t, c_{t+1}, \dots, c_u \\ d_1, \dots, d_s, d_{s+1}, \dots, d_v \end{matrix} \right. \right) G_{p,q}^{m,n} \left( \omega \tau^{l/k} \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) d\tau = \\ = \frac{k^\mu l^{(v-u)\alpha + \rho - 1}}{(2\pi)^{b^*(l-1) + c^*(k-1)}} \sigma^{-\alpha} G_{kp+lv, kq+lu}^{km+lt, kn+ls} \left( \frac{\omega^k k^{k(p-q)}}{\sigma^l l^{l(u-v)}} \left| \begin{matrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{matrix} \right. \right) \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

gde je  $\chi_1 = \frac{a_1}{k}, \dots, \frac{a_1+k-1}{k}, \dots, \frac{a_n}{k}, \dots, \frac{a_n+k-1}{k}, \frac{1-\alpha-d_1}{l}, \dots, \frac{l-\alpha-d_1}{l}, \dots, \frac{1-\alpha-d_v}{l}, \dots, \frac{l-\alpha-d_v}{l}, \frac{a_{n+1}}{k}, \dots, \frac{a_{n+1}+k-1}{k}, \dots, \frac{a_p}{k}, \dots, \frac{a_p+k-1}{k},$  i  $\chi_2 = \frac{b_1}{k}, \dots, \frac{b_1+k-1}{k}, \dots, \frac{b_m}{k}, \dots, \frac{b_m+k-1}{k}, \frac{1-\alpha-c_1}{l}, \dots, \frac{l-\alpha-c_1}{l}, \dots, \frac{1-\alpha-c_u}{l}, \dots, \frac{l-\alpha-c_u}{l}, \frac{b_{m+1}}{k}, \dots, \frac{b_{m+1}+k-1}{k}, \dots, \frac{b_q}{k}, \dots, \frac{b_q+k-1}{k}$ . Parametri  $c^*$  i  $\mu$  su definisani jednačinama (A.3) i (A.4), respektivno,

dok su parametri  $b^*$  i  $\rho$  određeni primenom pravila [166, (07.34.21.0015.01)]

$$b^* = s + t - \frac{u+v}{2}, \quad (\text{A.16})$$

i primenom pravila [166, (07.34.21.0017.01)]

$$\rho = \sum_{j=1}^v d_j - \sum_{j=1}^u c_j + \frac{u-v}{2} + 1. \quad (\text{A.17})$$

Transformacija argumenta Mejerove  $G$ -funkcije može se izvršiti na osnovu identiteta [166, (07.34.16.0002.01)]

$$G_{p,q}^{m,n} \left( \frac{1}{z} \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{q,p}^{n,m} \left( z \left| \begin{matrix} 1-b_1, \dots, 1-b_m, 1-b_{m+1}, \dots, 1-b_q \\ 1-a_1, \dots, 1-a_n, 1-a_{n+1}, \dots, 1-a_p \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.18})$$

Eksponecijalna funkcija predstavlja se preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila [166, (01.03.26.0004.01)]

$$e^z = G_{0,1}^{1,0} \left( -z \left| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.19})$$

Integral koji sadrži proizvod dve Mejerove  $G$ -funkcije rešava se pomoću [166, (07.34.21.0011.01)]

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \tau^{\alpha-1} G_{u,v}^{s,t} \left( \tau w \left| \begin{matrix} c_1, \dots, c_t, c_{t+1}, \dots, c_u \\ d_1, \dots, d_s, d_{s+1}, \dots, d_v \end{matrix} \right. \right) G_{p,q}^{m,n} \left( \tau z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) d\tau \\ &= w^{-\alpha} G_{v+p, u+q}^{m+t, n+s} \left( \frac{z}{w} \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, 1-\alpha-d_1, \dots, 1-\alpha-d_v, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, 1-\alpha-c_1, \dots, 1-\alpha-c_u, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right). \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

Proizvod eksponencijalne i konfluentne hipergeometrijske funkcije može se izraziti preko Mejerove  $G$ -funkcije primenom pravila [166, (07.20.26.0015.01)]

$$e^{-z} {}_1F_1(a; b; z) = \frac{\Gamma(b)}{\Gamma(b-a)} G_{1,2}^{1,1} \left( z \left| \begin{matrix} a-b+1 \\ 0, 1-b \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.21})$$

Prilikom izvođenja kapaciteta FSO sistema u disertaciji korišćeno je i pravilo za rešavanje sledećeg integrala [166, (14.03.21.0003.01)]

$$\int_{-d}^d \delta(t-a) f(t) dt = f(a) \quad /; \quad -\infty \leq -d < a < d \leq \infty. \quad (\text{A.22})$$

Takođe, korišćeno je i pravilo za predstavljanje logaritamske funkcije preko Mejerove  $G$ -funkcije [166, (01.05.26.0002.01)]

$$\log_a(z+1) = \frac{1}{\ln(a)} G_{2,2}^{1,2} \left( z \left| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.23})$$

U cilju nalaženja aproksimativnih izraza za verovatnoću prekida asimetričnih RF/FSO sistema u petom poglavlju disertacije, korišćeno je i pravilo [166, (07.34.06.0001.01)]



$$G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{array}{c} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{array} \right. \right) = \sum_{k=1}^m \frac{\prod_{j=1, j \neq k}^m \Gamma(b_j - b_k) \prod_{j=1}^n \Gamma(1 - a_j + b_k)}{\prod_{j=n+1}^p \Gamma(a_j - b_k) \prod_{j=m+1}^q \Gamma(1 - b_j + b_k)} z^{b_k} \quad (\text{A.24})$$

$$\times \left[ 1 + \frac{\prod_{j=1}^p (1 - a_j + b_k)}{\prod_{j=1}^q (1 - b_j + b_k)} (-1)^{-m-n+p} z + \frac{\prod_{j=1}^p ((1 - a_j + b_k)(2 - a_j + b_k))}{\prod_{j=1}^q ((1 - b_j + b_k)(2 - b_j + b_k))} z^2 + \dots \right].$$

Pod pretpostavkom celobrojnih vrednosti parametra  $n$ , nekompletna Gama funkcija razvija se u red primenom pravila [166, (06.06.06.0005.01)]

$$\Gamma(n, z) = (n-1)! e^{-z} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{z^k}{k!}; n \in \mathbf{N}^+. \quad (\text{A.25})$$

Binomna teorema definisana je kao [55, (1.111)]

$$(a+x)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}. \quad (\text{A.26})$$

Faktorijel broja  $n$  se predstavlja preko Gama funkcije na osnovu pravila [166, (06.01.27.0001.01)]

$$n! = \Gamma(n+1). \quad (\text{A.27})$$

Tokom izvođenja u disertaciji korišćeno je i pravilo za rešavanje integrala [55, (3.351.3)]

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-\mu x} dx = n! \mu^{-n-1}, \quad (\text{A.28})$$

kao i pravilo [55, (6.455.1)]

$$\int_0^{\infty} x^{\mu-1} e^{-\beta x} \Gamma(\nu, \alpha x) dx = \frac{\alpha^\nu \Gamma(\mu+\nu)}{\mu(\alpha+\beta)^{\mu+\nu}} {}_2F_1 \left( 1, \mu+\nu; \mu+1; \frac{\beta}{\alpha+\beta} \right). \quad (\text{A.29})$$

Razvoj Beselove funkcije u red vrši se primenom pravila [166, (03.02.06.0037.01)]

$$I_\nu(z) = \frac{1}{\Gamma(\nu+1)} \left( \frac{z}{2} \right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^{2k}}{4^k (\nu+1)_k k!}. \quad (\text{A.30})$$

Tokom izvođenja koristi se pravilo [110, (6-10)]

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy = f(x). \quad (\text{A.31})$$

Smanjenje reda Mejerove  $G$ -funkcije vrši se primenom [166, (07.34.03.0001.01)]

$$G_{p,q}^{m,n} \left( z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_{q-1}, a_1 \end{matrix} \right. \right) = G_{p-1,q-1}^{m,n-1} \left( z \left| \begin{matrix} a_2, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_{q-1} \end{matrix} \right. \right). \quad (\text{A.32})$$

Koristi se i identitet [166, (03.02.03.0013.01)]

$$I_0(0) = 1, \quad (\text{A.33})$$

kao i pravilo [166, (07.23.03.0080.01)]

$${}_2F_1(a, b; b; z) = (1-z)^{-a}. \quad (\text{A.34})$$

Sledeći integral je određen kao [55, (6.614.3)]

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha x} I_{2\nu} \left( 2\sqrt{\beta x} \right) dx = \frac{e^{\frac{\beta}{2\alpha}}}{\sqrt{\alpha\beta}} \frac{\Gamma(\nu+1)}{\Gamma(2\nu+1)} M_{-\frac{1}{2}, \nu} \left( \frac{\beta}{\alpha} \right), \quad (\text{A.35})$$

dok je specijalni slučaj Vitekerova (*Whittaker*) funkcije definisan kao [166, (07.44.03.0007.01)]

$$M_{\nu,0}(z) = \sqrt{z} e^{z/2} L_{-\nu-1/2}(-z), \quad (\text{A.36})$$

i važi da je [166, (07.02.03.0002.01)]

$$L_0(z) = 1. \quad (\text{A.37})$$

U cilju rešavanja integrala u disertaciji korišćena je i definicija konfluentne hipergeometrijske funkcije druge vrste [55, (9.211.4)]

$$\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{\infty} e^{-zt} t^{\alpha-1} (1+t)^{\gamma-\alpha-1} dt = U(\alpha, \gamma; z). \quad (\text{A.38})$$

## Literatura

- [1] Abou-Rjeily, C. and Haddad, S., “Inter-relay cooperation: A new paradigm for enhanced relay-assisted FSO communications”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 6, pp. 1970–1982, June 2014.
- [2] Abou-Rjeily, C., “All-active and selective FSO relaying: do we need inter-relay cooperation?”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 1899–1906, May 2014.
- [3] Adamchik, V. S. and Marichev, O. I., “The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type function and its realization in reduce system”, *the International symposium on Symbolic and Algebraic Computation (ISSAC’90), Proceedings of papers*, Tokyo, Japan, pp. 212–224, 1990.
- [4] Agrawal, G. P., *Fiber-Optic Communications Systems*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [5] Ahdi, F. and Subramaniam, S., “Optimal placement of FSO relays for network disaster recovery”, *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC 2013), Proceedings of papers*, Budapest, pp. 3921–3926, June 9–13, 2013.
- [6] Al-Habash, M. A., Andrews, L. C. and Phillips, R. L., “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, August 2001.
- [7] Alouini, M.-S. and Goldsmith, A. J., “Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 4, pp. 1047–1066, July 1999.
- [8] Andrews, L. C. and Philips, R. L., *Laser Beam Propagation Through Random Media*, 2nd ed., SPIE press, Bellingham, WA, USA, 2005.
- [9] Andrews, L. C., Philips, R. L. and Hopen, C. Y., *Laser Beam Scintillation with Applications*, 2nd ed., SPIE press, Bellingham, Washington, USA, 2001.
- [10] Anees, S. and Bhatnagar, M. R., “Performance analysis of amplify-and-forward dual-hop mixed RF/FSO systems”, *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Proceedings of papers*, Vancouver, BC, pp. 1–5, September 14–17, 2014.

- [11] Anees, S. and Bhatnagar, M. R., "Performance of an amplify-and-forward dual-hop asymmetric RF-FSO communication system", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. 124–135, February 2015.
- [12] Anguita, J., Djordjevic, I., Neifeld, M. and Vasic, B., "Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels", *Journal of Optical Networking*, vol. 4, no. 9, pp. 586–601, September 2005.
- [13] Annamalai, A., Palat, R. C. and Matyjas, J. "Estimating ergodic capacity of cooperative analog relaying under different adaptive source transmission techniques," *2010 IEEE Sarnoff Symposium, Proceedings of papers*, pp. 1–5, Princeton, NJ, April 12–14, 2010.
- [14] Ansari, I. S., "On the performance of free-space optical systems over generalized atmospheric turbulence channels with pointing", *PhD Disseration*, King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Kingdom of Saudi Arabia, 2015.
- [15] Ansari, I. S., Al-Ahmadi, S. F., Yilmaz, F., Alouini, M.–S. and Yanikomeroglu, H., "A new formula for the BER of binary modulations with dual-branch selection over generalized-K composite fading channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 10, pp. 2654–2658, October 2011.
- [16] Ansari, I. S., Alouini, M.–S. and Cheng, J., "Ergodic capacity analysis of free-space optical links with nonzero boresight pointing errors", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 8, pp. 4248–4264, August 2015.
- [17] Ansari, I. S., Alouini, M.–S. and Cheng, J., "On the capacity of FSO links under log-normal turbulence", *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2014), Proceedings of papers*, Vancouver, BC, pp. 1–6, September 14–17, 2014.
- [18] Ansari, I. S., Alouini, M.–S. and Yilmaz, F., "On the performance of hybrid RF and RF/FSO fixed gain dual-hop transmission systems", *2013 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), Proceedings of papers*, Fira, pp. 1–6, April 27–30, 2013.
- [19] Ansari, I. S., Yilmaz, F. and Alouini, M.–S., "Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems", 2013, technical report. Available: <http://arxiv.org/abs/1302.4225>.
- [20] Ansari, I. S., Yilmaz, F. and Alouini, M.–S., "On the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems", *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring' 2013), Proceedings of papers*, Dresden, Germany, June 2013.
- [21] Ansari, I. S., Yilmaz, F. and Alouini, M.–S., "On the performance of mixed RF/FSO variable gain dual-hop transmission systems with pointing errors", *2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall' 2013), Proceedings of papers*, Las Vegas, NV, pp. 1–5, September 2–5, 2013.
- [22] Ansari, I. S., Yilmaz, F. and Alouini, M.–S., "On the performance of hybrid RF and RF/FSO dual-hop transmission systems", *2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW 2013), Proceedings of papers*, Newcastle Upon Tyne, UK, pp. 45–49, October 21–21, 2013.
- [23] Ansari, I. S., Yilmaz, F. and Alouini, M.–S., "A unified performance analysis of free-space optical links over Gamma-Gamma turbulence channels with pointing errors", submitted for publication at *IEEE Transactions on Communications*, Technical Repot, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10754/305353>.

- [24] Ansari, I. S., Yilmaz, F. and Alouini, M.-S., "Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 351–354, June 2013.
- [25] Arnon, S., "Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems", *Optics Letters*, vol. 28, no. 2, pp. 129–131, January 2003.
- [26] Arnon, S., Barry, J., Karagiannidis, G., Schober, R. and Uysal, M., (Eds.) *Advanced optical wireless communication systems*, Cambridge University Press, New York, USA, 2012.
- [27] Bayaki, E., "Performance analysis and design of multiple-input multiple-output and multi-hop free-space optical communication systems", *PhD Disseration*, The University of British Columbia, Vancouver, 2011.
- [28] Bhatnagar, M. R., "Average BER analysis of relay selection based decode-and-forward cooperative communication over Gamma-Gamma fading FSO links", *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), Proceedings of papers*, Budapest, pp. 3142–3147, June 9–13, 2013.
- [29] Carruthers, J. B. and Kahn, J. M., "Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 538–546, April 1996.
- [30] Chan, V. W. S., "Free-space optical communications", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4750–4762, December 2006.
- [31] Chatzidiamantis, N. D., Lioumpas, A. S., Karagiannidis, G. K. and Arnon, S., "Adaptive subcarrier PSK intensity modulation in free space optical systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 5, pp. 1368–1377, May 2011.
- [32] Chatzidiamantis, N. D., Lioumpas, A. S., Karagiannidis, G. K. and Arnon, S., "Optical wireless communications with adaptive subcarrier PSK intensity modulation", *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), Proceedings of papers*, Miami, FL, pp. 1–6, Decembar 6–10, 2010.
- [33] Chatzidiamantis, N. D., Michalopoulos D. S., Kriezis E. E., Karagiannidis G. K. and Schober R., "Relay selection protocols for relay assisted free-space optical systems", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 92–103, January 2013.
- [34] Chatzidiamantis, N. D., Michalopoulos, D. S., Kriezis, E. E., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., "Relay selection in relay-assisted free space optical systems", *2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), Proceedings of papers*, Houston, TX, USA, pp. 1–6, Decembar 5–8, 2011.
- [35] Cho, K. and Yoon, D., "On the general BER expression of one and two-dimensional amplitude modulations", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 7, pp. 1074–1080, July 2002.
- [36] Ciaramella, E., Arimoto, Y., Contestabile, G., Presi, M., D'Errico, A., Guarino, V. and Matsumoto, M., "1.28 terabit/s (32x40 Gbit/s) wdm transmission system for free space optical communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 9, pp. 1639–1645, December 2009.
- [37] Cvetkovic A. M., "Performanse kooperativnih relejnih sistema u prisustvu fedinga i interferencije", *PhD Disseration*, Niš, 2013.

- [38] Cvetkovic, A. M., Anastasov, J. A., Djordjevic, G. T. and Milic, D., “Dual-hop transmissions corrupted by interferences over asymmetric fading channels”, *International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting (TELSIKS 2011), Proceedings of papers*, vol. 2, pp. 471–474, Niš, Serbia, October 5–8, 2011.
- [39] Cvetkovic, A. M., Petkovic, M. I. and Anastasov, J. A., “Performance analysis of RF/FSO system with interference at the relay”, *XLIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2014), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 15–18, Niš, Serbia, June 25–27, 2014.
- [40] Cvijetic, N., Qian, D. and Wang, T., “10 Gb/s free-space optical transmission using OFDM”, *2008. Conference on Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2008), Proceedings of papers*, San Diego, CA, pp. 1–3, February 24–28, 2008.
- [41] Cvijetic, N., Wilson, S. G. and Brandt-Pearce, M., “Performance bounds for free-space optical MIMO systems with APD receivers in atmospheric turbulence”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 3–12, April 2008.
- [42] Cvijetic, N., Wilson, S. G. and Brandt-Pearce, M., “Receiver optimization in turbulent free-space optical MIMO channels with APDs and Q-ary PPM”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 103–105, January 2007.
- [43] Da Costa, D. B. and Aïssa, S., “End-to-end performance of dual-hop semi-blind relaying systems with partial relay selection”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 8, pp. 4306–4315, August 2009.
- [44] Djordjevic, G. T. and Petkovic, M. I., “Average BER performance of FSO SIM-QAM systems in the presence of atmospheric turbulence and pointing errors”, accepted for publication at *Journal of Modern Optics*, Acceptance Letter from September 04, 2015, DOI: 10.1080/09500340.2015.1093662.
- [45] Djordjevic, G. T., Petkovic, M. I., Cvetkovic, A. M. and Karagiannidis, G. K., “Mixed RF/FSO relaying with outdated channel state information”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1935–1948, September 2015.
- [46] Drajić, D., *Uvod u statističku teoriju telekomunikacija*, Akademska misao, Beograd, 2003.
- [47] Farid, A. A. and Hranilovic, S., “Outage capacity for MISO intensity modulated free-space optical links with misalignment”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 10, pp. 780–789, October 2011.
- [48] Farid, A. A. and Hranilovic, S., “Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, July 2007.
- [49] Ferdinand, N. S., Rajatheva, N. and Latva-aho, M., “Effects of feedback delay in partial relay selection over Nakagami-fading channels”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 4, pp. 1620–1634, May 2012.
- [50] Gappmair, W., “Further results on the capacity of free-space optical channels in turbulent atmosphere”, *IET Communications*, vol. 5, no. 9, pp. 1262–1267, June 2011.

- [51] Gappmair, W., Hranilovic, S. and Leitgeb, E., “OOK performance for terrestrial FSO links in turbulent atmosphere with pointing errors modeled by Hoyt distributions”, *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 875–877, August 2011.
- [52] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. O. and Leitgeb, E., “Free-space optical communication using subcarrier modulation in Gamma-Gamma atmospheric turbulence”, *2007. 9th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON '07.), Proceedings of papers*, Rome, vol. 3, pp. 156–160, July 2007.
- [53] Ghassemlooy, Z., Popoola, W. O. and Rajbhandari, S., *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2013.
- [54] Gradshteyn, I. S. and Ryzhik, I. M., *Table of Integrals, Series, and Products*, 6th edition, Academic Press, New York, NY, USA, 2000.
- [55] Hadzi-Velkov, Z., Michalopoulos, D. S., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., “Dual-hop amplify-and-forward transmission with imperfect channel estimates at the relay”, *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), Proceedings of papers*, Ottawa, ON, pp. 4110–4115, June 10–15, 2012.
- [56] Hadzi-Velkov, Z., Michalopoulos, D. S., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., “On the effect of outdated channel estimation in variable gain relaying: Error performance and PAPR”, *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1084–1097, March 2013.
- [57] Hasna, M. O. and Alouini, M.–S., “End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh fading channels”, *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 2, no. 6, pp. 1126–1131, November 2003.
- [58] Hasna, M. O. and Alouini, M.–S., “Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays”, *IEEE Transactions of Communications*, vol. 52, no. 1, pp. 130–135, January 2004.
- [59] Hasna, M., Alouini, M.–S., Bastami, A. and Ebbini, E. S., “Performance analysis of cellular mobile systems with successive co-channel interference cancellation”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 1, pp. 29–40, January 2003.
- [60] Hassan, M. Z., Hossain, M. J. and Cheng, J., “Exact BER analysis of subcarrier QAM and PSK intensity modulations in strong turbulence”, *2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Proceedings of papers*, Honolulu, HI, pp. 478–483, February 3–6, 2014.
- [61] Hassan, M. Z., Hossain, M. J. and Cheng, J., “Performance of adaptive subcarrier QAM intensity modulation in Gamma-Gamma turbulence”, *2013 IEEE International Conference on Communication (ICC 2013), Proceedings of papers*, Budapest, pp. 3137–3141, June 9–13, 2013.
- [62] Hassan, M. Z., Song, X. and Cheng, J., “Subcarrier intensity modulated wireless optical communications with rectangular QAM”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, no. 6, pp. 522–532, June 2012.
- [63] Hassan, M., “On the performance of non-adaptive and adaptive optical wireless communications in atmospheric turbulence”, *PhD Disseration*, The University of British Columbia, Okanagan, 2013.

- [64] Henniger, H. and Wilfert, O., “An introduction to free-space optical communications”, *Radioengineering*, vol. 19, no. 2, pp. 203–212, June 2010.
- [65] Hranilovic, S., *Wireless Optical Communication Systems*, Springer, Berlin, Germany, 2005.
- [66] Hui, R., Zhu, B., Huang, R., Allen, C. T., Demarest, K. R. and Richards, D., “Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 417–424, March 2002.
- [67] Isaac Kim, “10 G FSO systems position technology for the future”, *Lightwaveonline*, pp. 19–21, July 2009.
- [68] Ikki, S. and Ahmed, M. H., “Performance analysis of dual-hop relaying communications over generalized Gamma fading channels”, *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM' 2007), Proceedings of papers*, Washington, DC, pp. 3888–3893, November 26–30, 2007.
- [69] Ikki, S. S. and Aïssa, S., “Performance evaluation and optimization of dual-communication over Nakagami-m fading channels in the presence of co-channel interferences”, *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 8, pp. 1149–1152, August 2012.
- [70] Ishimaru, A., *The Beam Wave Case and Remote Sensing*, (Topics in Applied Physics: Laser Beam Propagation in the Atmosphere), Springer-Verlag, New York, 1978
- [71] Jiayi, Z., Linglong, D., Yu Z. and Zhaocheng, W., “Unified performance analysis of mixed radio frequency/free-space optical dual-hop transmission systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 11, pp. 2286–2293, June 2015.
- [72] Karagiannidis, G. K., Tsiftsis, T. A. and Sandalidis, H. G., “Outage probability of relayed free space optical communication systems”, *Electronics Letters*, vol. 42, no. 17, pp. 994–995, August 2006.
- [73] Karimi, M. and Nasiri-Kenari, M., “Outage analysis of relay-assisted free-space optical communications”, *IET Communications*, vol. 4, no. 12, pp. 1423–1432, August 2010.
- [74] Karp, S., Gagliardi, R., Moran, S. E. and Stotts, L. B., *Optical Channels: Fibers, Clouds, Water and the Atmosphere*, Plenum press, New York, 1988.
- [75] Kazaura, K., Omae, K., Suzuki, T., Matsumoto, M., Mutafungwa, E., Murakami, T., Takahashi, K., Matsumoto, H., Wakamori, K. and Arimoto, Y., “Performance evaluation of next generation free-space optical communication system”, *IEICE Transaction on Electronics*, vol. 90, no. 2, pp. 381–388, February 2007.
- [76] Kedar, D. and Arnon, S., “Urban optical wireless communication networks: the main challenges and possible solutions”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 5, pp. S2–S7, May 2004.
- [77] Keiser, G., *Optical Fiber Communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2000.
- [78] Khalighi, M. A. and Uysal, M., “Survey on free space optical communication: A communication theory perspective”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, Fourthquarter 2014.
- [79] Kiasaleh, K., “Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 9, pp. 1455–1461, September 2005.



- [80] Kolka, Z., Wilfert, O., Biolek, D. and Biolková, V., “Availability Model of Free-Space Optical Data Link”, *International Journal of Microwave and Optical Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 612–616, August 2006.
- [81] Kolmogorov, A., Ed., *Turbulence. Classic Papers on Statistical Theory*, Wiley-Interscience, New York, 1961.
- [82] Kostic, I., “Average SEP for M-ary CPSK with noisy phase reference in Nakagami fading and Gaussian noise”, *European Transaction on Telecommunications*, vol. 18, no. 2, pp. 109–113, March 2007.
- [83] Kostic, I., “Composite phase PDF in Gamma shadowed Nakagami fading channel”, *Wireless Personal Communications*, vol. 41, no. 4, pp. 465–469, 2007.
- [84] Kostic, I., “Uporedna analiza M-DPSK i M-DCPSK u prisustvu faznog šuma i fedinga”, *16rd Telecommunications Forum (TELFOR 2008), Proceedings of papers*, Belgrade, Serbia, 2008.
- [85] Kostic, I., “Uticaj hardverskih nesavršenosti na MCPSK i MDPSK sisteme”, *13rd Telecommunications Forum (TELFOR 2005), Proceedings of papers*, Belgrade, Serbia, SPS–1, 2005.
- [86] Krikidis, I., Thompson, J., Mclaughlin, S. and Goertz, N., “Amplify-and-forward with partial relay selection”, *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 4, pp. 235–237, April 2008.
- [87] Lee, E. J. and Chan, V. W. S., “Part 1: optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 9, pp. 1896–1906, November 2004.
- [88] Lee, E., Park J., Han, D. and Yoon, G., “Performance analysis of the asymmetric dual-hop relay transmission with mixed RF/FSO links”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 21, pp. 1642–1644, November 2011.
- [89] Lee, I. E., Ghassemlooy, Z., Ng, W. P. and Uysal, M., “Performance analysis of free space optical links over turbulence and misalignment induced fading channels”, *2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Proceedings of papers*, Poznan, pp. 1–6, July 18–20, 2012.
- [90] Li, J., Liu, J. Q. and Taylor, D. P., “Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 8, pp. 1598–1606, August 2007.
- [91] Lu, Q., Liu, Q. and Mitchell, G. S., “Performance analysis for optical wireless communication systems using subcarrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel”, *2004 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2004), Proceedings of papers*, vol. 3, pp. 1872–1875, November 29–Decembar 3, 2004.
- [92] Luong, D. A., Thang, T. C. and Pham, A. T., “Effect of avalanche photodiode and thermal noises on the performance of binary phase-shift keying subcarrier-intensity modulation/free-space optical systems over turbulence channels”, *IET Communications*, vol. 7, no. 8, pp. 738–744, May 2013.
- [93] Marinčić, A., *Osnovi optoelektronskih telekomunikacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1986.

- [94] Michalopoulos, D. S., Hadzi-Velkov, Z., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., “PAPR of variable-gain and fixed-gain amplify and forward relaying”, *2013 9th International ITG Conference on Systems, Communication and Coding (SCC), Proceedings of papers*, Munich, Germany, pp. 1–5, Januar 21–24, 2013.
- [95] Michalopoulos, D. S., Lioumpas, A. S., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., “Selective cooperative relaying over time-varying channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 8, pp. 2402–2412, August 2010.
- [96] Michalopoulos, D. S., Suraweera, H. A., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., “Amplify-and-forward relay selection with outdated channel state information”, *2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), Proceedings of papers*, Miami, FL, pp. 1–6, December 6–10, 2010.
- [97] Michalopoulos, D. S., Suraweera, H. A., Karagiannidis, G. K. and Schober, R., “Amplify-and-forward relay selection with outdated channel estimates”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 5, pp. 1278–1290, May 2012.
- [98] Mostaani, Z. and Uysal, M., “Relay selection in FSO systems with all-optical relaying over Gamma-Gamma turbulence channels”, *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Proceedings of papers*, Trabzon, Turkey, pp. 710–713, April 23–25, 2014.
- [99] Nakagami, M., “The  $\mu$ -distribution—A general formula of intensity distribution of rapid fading”, *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, Hoffman W. C., Ed. Pergamon, Oxford, U. K. pp. 3–36, 1960.
- [100] Nistazakis, H. E., Assimakopoulos, V. D. and Tombras, G. S., “Performance estimation of free space optical links over negative exponential atmospheric turbulence channels”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 122, no. 24, pp. 2191–2194, December 2011.
- [101] Nistazakis, H. E., Karagianni, E. A., Tsigopoulos, A. D., Fafalios, M. E. and Tombras, G. S., “Average capacity of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 8, pp. 974–979, April 2009.
- [102] Nistazakis, H. E., Marinos, D., Hantias, M., Aidinis, C., Tsilis, M., Tombras, G. S., Tsigopoulos, A. D. and Fafalios, M. E., “Estimation of capacity bounds of free space optical channels under strong turbulence conditions”, *2010 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), Proceedings of papers*, Vilnius, Lithuania, pp. 1–3, June 14–16, 2010.
- [103] Nistazakis, H. E., Tombras, G. S., Tsigopoulos, A. D., Karagianni, E. A. and Fafalios, M. E., “Average and outage capacity estimation of optical wireless communication systems over weak turbulence channels”, *2nd Mosharaka International Conference on Communications, Propagation, and Electronics (MIC-CPE 2009), Proceedings of papers*, Amman, Jordan, vol. 2, no. 1, 2009.
- [104] Nistazakis, H. E., Tombras, G. S., Tsigopoulos, A. D., Karagianni, E. A. and Fafalios, M. E., “Capacity estimation of optical wireless communication systems over moderate to strong turbulence channels”, *Journal of Communications and Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 384–389, August 2009.

- [105] Nistazakis, H. E., Tsiftsis, T. A. and Tombras, G. S., "Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels", *IET Communications*, vol. 3, no. 8, pp. 1402–1409, August 2009.
- [106] Nistazakis, H. E., Tsigopoulos, A. D., Haniyas, M. P., Psychogios, C. D., Marinos, D., Aidinis, C. and Tombras, G. S., "Estimation of outage capacity for free space optical links over I-K and K turbulent channels", *Radioengineering*, vol. 20, no. 2, pp. 493–498, June 2011.
- [107] Niu, M., "Coherent optical wireless communications over atmospheric turbulence channels", *PhD Dissertaton*, The University of British Columbia, Okanagan, 2012.
- [108] Niu, M., Cheng, J. and Holzman, J. F., "Error rate performance comparison of coherent and subcarrier intensity modulated optical wireless communications", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 554–564, June 2013.
- [109] Papoulis, A., *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1991.
- [110] Peppas, K. P. and Datsikas, C. K. "Average symbol error probability of general-order rectangular quadrature amplitude modulation of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 2, no. 2, pp. 102–110, February 2010.
- [111] Petkovic, M. I. and Djordjevic, G. T., "Effects of pointing errors on average capacity of FSO links over Gamma-Gamma turbulence channel", *11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS 2013), Proceedings of papers*, pp. 481–484, Niš, Serbia, October 16–19, 2013.
- [112] Petkovic, M. I. and Djordjevic, G. T., "Outage Performance of SSC receiver in FSO system with Gamma-Gamma atmospheric turbulence", *XII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Proceedings of papers*, Niš, Serbia, November 12–14, 2014.
- [113] Petkovic, M. I. and Djordjevic, G. T., "SEP analysis of FSO system employing SIM-MPSK with noisy phase reference", *2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communication (IWOW 2015), Proceedings of papers*, Istanbul, Turkey, September 7–8, 2015.
- [114] Petkovic, M. I., Anastasov, J. A., Djordjevic, G. T. and Ivanis, P., "Impact of correlation on outage performance of FSO system with switch-and-stay diversity receiver", *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC 2015), Proceedings of papers*, London, UK, June 8–12, 2015.
- [115] Petkovic, M. I., Cvetkovic, A. M. and Djordjevic, G. T., "Mixed RF/FSO relaying systems", in *Optical Wireless Communications – An Emerging Technology*, Springer, New York, 2015.
- [116] Petkovic, M. I., Cvetkovic, A. M., Djordjevic, G. T., "Verovatnoća prekida hibridnih sistema pri prenosu radio-frekvencijskih i optičkih signala u slobodnom prostoru", 58. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2014, Zbornik radova na CD-u, Vrnjačka Banja, Srbija, Jun 02-05, 2014.

- [117] Petkovic, M. I., Cvetkovic, A. M., Djordjevic, G. T. and Karagiannidis, G. K., “Partial relay selection with outdated channel state estimation in mixed RF/FSO systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 13, pp. 2860–2867, July 2015.
- [118] Petkovic, M. I., Cvetkovic, A. M., Djordjevic, G. T. and Karagiannidis, G. K., “Outage performance of the mixed RF/FSO relaying channel in the presence of interference”, submitted to *Wireless Personal Communications*, February 2015.
- [119] Petkovic, M. I., Djordjevic, G. T. and Denic, D., “BER performance of subcarrier QAM intensity modulated FSO communication system”, *XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Proceedings of papers*, pp. 92–95, Niš, Serbia, November 14–16, 2012
- [120] Petkovic, M. I., Djordjevic, G. T. and Milic, D. N. “BER performance of IM/DD FSO system with OOK using APD receiver”, *Radioengineering*, vol. 23, no. 1, pp. 480–487, April 2014.
- [121] Petkovic, M. I., Djordjevic, G. T. and Milic, D. N., “Average BER performance of SIM-DPSK FSO system with APD receiver”, accepted to publication *Scientific Journal FACTA UNIVERSITATIS*, Acceptance Letter from August 25, 2015.
- [122] Petkovic, M. I., Djordjevic, G. T. and Milic, D. N., “BER analysis of IM/DD FSO system with APD receiver over Gamma-Gamma turbulence”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 61–72, February 2014.
- [123] Petkovic, M. I., Djordjevic, G. T. and Vasic, B. V., “BER performance of IM/DD FSO system with OOK over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel with pointing errors”, *11th International Conference on Applied Electromagnetics–PIEC 2013, Proceedings of papers*, Niš, Serbia, September 01–04, 2013.
- [124] Petkovic, M. I., Djordjevic, G. T., Milic, D. N. and Vasic, B. V., “Performance of APD receiver over IM/DD FSO System”, *57. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatičku i nuklearnu tehniku ETRAN 2013, Zbornik radova na CD-u*, Zlatibor, Srbija, Jun 03-06, 2013.
- [125] Petkovic, M. I., Milic D. N. and Djordjevic, G. T., “Optimization of SIM-BPSK FSO link with APD receiver influenced by Gamma-Gamma atmospheric turbulence and pointing errors”, accepted after minor revisions, *IET Communications*.
- [126] Petkovic, M. I., Zdravkovic, N. M. and Djordjevic, G. T., “Error performance of uncoded and convolutional coded SC receiver over FSO channel with pointing errors”, *21st Telecommunication Forum (TELFOR 2013), Proceedings of papers*, pp. 283–286, Belgrade, Serbia, November 26–28, 2013.
- [127] Petkovic, M. I., Zdravkovic, N. M. and Djordjevic, G. T., “Outage performance of switch-and-examine combining receiver over FSO Gamma-Gamma atmospheric turbulence with pointing errors”, *22st Telecommunication Forum (TELFOR 2014), Proceedings of papers*, pp. 383–386, Belgrade, Serbia, November 25–27, 2014.
- [128] Petkovic, M. I., Zdravkovic, N. M., Stefanovic, C. M. and Djordjevic, G. T., “Performance analysis of SIM-FSO system over Gamma-Gamma atmospheric channel”, *XLIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2014), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 19–22, Niš, Serbia, June 25–27, 2014.
- [129] Petkovic, M. I., Zdravkovic, N. M., Vasic, B. V. and Djordjevic, G. T., “BER performance of IM/DD FSO system with PIN photodiode receiver over Gamma-

- Gamma atmospheric turbulence channel”, *XLVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2013), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 99–102, Ohrid, Republic of Macedonia, June 26–29, 2013.
- [130] Popoola, W. O. and Ghassemlooy, Z., “BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 8, pp. 967–973, April 2009.
- [131] Popoola, W. O., “Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems”, *PhD Dissertation*, University of Northumbria, Newcastle, 2009.
- [132] Popoola, W. O., Ghassemlooy Z. and Ahmadi, V., “Performance of sub-carrier modulated Free-Space Optical communication link in negative exponential atmospheric turbulence environment”, *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 342–355, 2008.
- [133] Popoola, W. O., Ghassemlooy, Z. and Leitgeb, E., “BER and outage probability of DPSK subcarrier intensity modulated free space optics in fully developed speckle“, *Journal of Communications*, vol. 4, no. 8, pp. 546–554, September 2009.
- [134] Popoola, W. O., Ghassemlooy, Z. and Leitgeb, E., “BER performance of DPSK subcarrier modulated free space optics in fully developed speckle“, *2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CNSDSP 2008), Proceedings of papers*, Graz, pp. 273–277, July 25–25, 2008.
- [135] Popoola, W. O., Ghassemlooy, Z. and Leitgeb, E., “Free-space optical communication in atmospheric turbulence using DPSK subcarrier modulation“, *Ninth International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA '07), Proceedings of papers*, 2007.
- [136] Popoola, W. O., Ghassemlooy, Z., Allen, J. I. H., Leitgeb, E. and Gao, S., “Free-space optical communication employing subcarrier modulation and spatial diversity in atmospheric turbulence channel”, *IET Optoelectronics*, vol. 2, no. 1, pp. 16–23, February 2008.
- [137] Prabu, K. and Kumar, D. S., “BER analysis of DPSK–SIM over MIMO free space optical links with misalignment”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 18, pp. 5176–5180, September 2014.
- [138] Prabu, K. and Kumar, D. S., “Outage analysis of relay-assisted BPSK-SIM based FSO systems over strong atmospheric turbulence with pointing errors”, *International Journal of Computer and Communication Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 317–320, September 2014.
- [139] Prabu, K., Bharati, P. P. and Kumar, D. S., “Performance analysis of DPSK-SIM based FSO system over strong atmospheric turbulence channel”, *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON), Proceedings of papers*, Mumbai, pp. 1–4, December 13–15, 2013.
- [140] Prabu, K., Bose, S. and Kumar, D. S., “BPSK based subcarrier intensity modulated free space optical system in combined strong atmospheric turbulence”, *Optics Communications*, vol. 305, pp. 185–189, September 2013.
- [141] Proakis, J., *Digital Communications*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1989.

- [142] Puri, P., Garg, P., Aggarwal, M. and Sharma, P. K., “Outage analysis of two-way relay assisted FSO systems over weak turbulence region”, *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON), Proceedings of papers*, Mumbai, pp. 1–5, December 13–15, 2013.
- [143] Safari, M. and Uysal, M., “Relay-assisted free-space optical communication”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5441–5449, December 2008.
- [144] Samimi, H. and Azmi, P., “Subcarrier intensity modulated free-space optical communications in K-distributed turbulence channels”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 2, no. 8, pp. 625–632, August 2010.
- [145] Samimi, H. and Uysal, M., “End-to-end performance of mixed RF/FSO transmission systems”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 11, pp. 1139–1144, November 2013.
- [146] Sandalidis, H. G. and Tsiftsis, T. A., “Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence”, *Electronics Letters*, vol. 44, no. 1, pp. 46–47, January 2008.
- [147] Sandalidis, H. G., “Optimization models for misalignment fading mitigation in optical wireless links”, *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 395–397, May 2008.
- [148] Sandalidis, H. G., Tsiftsis T., A. and Karagiannidis, G. K., “Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 20, pp. 4440–4445, October 2009.
- [149] Sandalidis, H. G., Tsiftsis, T. A., Karagiannidis, G. K. and Uysal, M., “BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors”, *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 44–46, January 2008.
- [150] Saquib, N., Sakib, M. S. R., Saha, A. and Hussain, M. “Free space optical connectivity for last mile solution in Bangladesh”, *2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC’10), Proceedings of papers*, Shanghai, China, vol. 2, pp. 484–487, June 2010.
- [151] Simon, M. K. and Alouini, M.–S., *Digital communication over fading channels*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc, New York, 2004.
- [152] Song, X., “Subcarrier optical wireless communications in atmospheric turbulence”, *PhD Dissertion*, The University of British Columbia, Okanagan, 2014.
- [153] Song, X., Niu, M. and Cheng, J., “Error rate subcarrier intensity modulations for wireless optical communications”, *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 4, pp. 540–543, April 2012.
- [154] Song, X., Yang, F. and Cheng, J., “Subcarrier BPSK modulated FSO communications with pointing errors”, *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2013), Proceedings of papers*, Shanghai, pp. 4261–4265, April 7–10, 2013.
- [155] Song, X., Yang, F., Cheng, J. and Alouini, M.–S., “Subcarrier MPSK/MDPSK modulated optical wireless communications in lognormal turbulence”, *2015 IEEE*

*Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2015), Proceedings of papers*, New Orleans, LA, pp. 41–45, March 9–12, 2015.

- [156] Soysa, M., “Performance of dual hop relay systems with imperfect CSI”, *Master Thesis*, University of Alberta, 2011.
- [157] Soysa, M., Suraweera, H. A., Tellambura, C. and Garg, H. K., “Partial and opportunistic relay selection with outdated channel estimates”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 3, pp. 840–850, March 2012.
- [158] Suraweera, H. A., Garg, H. K. and Nallanathan, A., “Performance analysis of two hop amplify-and-forward systems with interference at the relay”, *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 8, pp. 692–694, August 2010.
- [159] Suraweera, H. A., Louie, R. H., Li, Y., Karagiannidis, G. K. and Vucetic, B., “Two hop amplify-and-forward transmission in mixed Rayleigh and Rician fading channels”, *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 227–229, April 2009.
- [160] Suraweera, H. A., Michalopoulos, D. S. and Karagiannidis, G. K., “Semi-blind amplify-and-forward with partial relay selection”, *Electronics Letters*, vol. 45, no. 6, pp. 317–318, March 2009.
- [161] Suraweera, H. A., Michalopoulos, D. S., Schober, R., Karagiannidis, G. K. and Nallanathan, A., “Fixed gain amplify-and-forward relaying with co-channel interference”, *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Proceedings of papers*, Kyoto, pp. 1–6, June 5–9, 2011.
- [162] Suraweera, H. A., Soysa, M., Tellambura C. and Garg, H. K., “Performance analysis of partial relay selection with feedback delay”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 531–534, June 2010.
- [163] Tan, C. and Tjhung, T. T., “On Fourier Series Expansion of the phase density function”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 31, no. 5, pp. 736–738, May 1983.
- [164] The Lightpointe Wireless. [Online]. Available: <http://www.lightpointe.com>
- [165] The Wolfarm Functions Site, 2008. [Online] Available: <http://functions.wolfarm.com>
- [166] Trung, H. D., Ngo, D. V., Pham, H. T., Hoang, D. V. and Nguyen, L. N. “Performance of FSO systems employing SC-QAM over atmospheric turbulence channels and pointing errors”, *2013 IEEE RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies, Research, Innovation, and Vision for the Future (RIVF 2013), Proceedings of papers*, Hanoi, pp. 31–36, November 10–13, 2013.
- [167] Trung, H. D., Tuan, D. T. and Pham, A. T. “Pointing error effects on performance of free-space optical communication systems using SC-QAM signals over atmospheric turbulence channels”, *AËU—International Journal of Electronics and Communications*, vol. 68, no. 9, pp. 869–876, September 2014.
- [168] Tsiftsis, T. A., Sandalidis, H. G., Karagiannidis, G. K. and Uysal, M., “Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 2, pp. 951–957, February 2009.
- [169] Tsiftsis, T. A., Sandalidis, H. G., Karagiannidis, G. K. and Uysal, M., “FSO links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels”, *IEEE International Conference on Communications 2008 (ICC '08), Proceedings of papers*, Beijing, pp. 5379–5384, May 19–23, 2008.

- [170] Viterbi, A. J, *Principles of coherent communications*, McGraw’Hill, New Zork, 1966.
- [171] Vu, T., Dang, N. T., Thang, T. C. and Pham, A. T., “Bit error rate analysis of rectangular QAM/FSO systems using an APD receiver over atmospheric turbulence channels”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 5, pp. 437–446, May 2013.
- [172] Wang, J. Y., Wang, J. B., Chen, M., Tang, Y. and Zhang, Y., “Outage analysis for relay-aided free-space optical communications over turbulence channels with nonzero boresight pointing errors”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 4, Article#:7901815, August 2014.
- [173] Wang, J.–B., Sheng, M., Song, X., Jiao, Y. and Chen, M., “Comments on ‘BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors’”, *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 22–23, January 2012.
- [174] Wang, P., Zhang, L., Guo, L., Huang, F, Shang, T., Wang, R. and Yang Y., “Average BER of subcarrier intensity modulated free space optical systems over the exponentiated Weibull fading channels”, *Optics Express*, vol. 22, no. 17, pp. 20828–20841, August 2014.
- [175] Wilfert, O., Kolka, Z. and Biolková, V., “Model of beam interruptions for free space optical systems”, *the 5th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications (AIC’05), Proceedings of papers*, Malta, pp. 171–174, September 15–17, 2005.
- [176] Yang, F., Cheng, J. and Tsiftsis, T. A., “Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 2, pp. 713–725, February 2014.
- [177] Yang, L., Gao, X. and Alouini, M.–S., “Performance analysis of relay-assisted all-optical FSO networks over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 23, pp. 4613–4620, December 2014.
- [178] You, R. and Kahn, J. M., “Average power reduction techniques for multiple-subcarrier intensity-modulated optical signals”, *IEEE Transaction on Communications*, vol. 49, no. 12, pp. 2164–2171, December 2001.
- [179] Zedini, E., Ansari, I. S. and Alouini, M.–S., “Performance analysis of mixed Nakagami-m and Gamma–Gamma dual-hop FSO transmission systems”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 1, Article#:7900120, February 2015.
- [180] Zedini, E., Ansari, I. S. and Alouini, M.–S., “Unified performance analysis of mixed line of sight RF-FSO fixed gain dual-hop transmission systems”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’ 2015), Proceedings of papers*, New Orleans, LA, March 2015.





## Biografija autora doktorske disertacije

Milica I. Petković je rođena 01.08.1986. godine u Knjaževcu, gde je završila Osnovnu školu “Timočki partizani” i Knjaževačku gimnaziju. Za postignute uspehe tokom školovanja dobitnik je diploma “Vuk Karadžić”.

Elektronski fakultet u Nišu, smer Telekomunikacije - modul Digitalne telekomunikacije, upisala je školske 2005/06. godine. Diplomirala je 04.10.2010. godine sa prosečnom ocenom u toku studija 9,22 (devet i 22/100). Diplomski rad pod naslovom “Performanse selekcionog diverziti prijemnika u kanalu sa Rice-ovim fadingom” iz predmeta Teorija telekomunikacija odbranila je na Katedri za telekomunikacije sa ocenom 10 (deset). U periodu od 2006/07. do 2009/10. godine bila je stipendista grada Knjaževca i Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Milica Petković je dobitnik Nagrada za izuzetne postignute rezultate tokom druge, treće i četvrte godine studija.

Školske 2010/11. godine upisala je doktorske studije na Elektronskom fakultetu u Nišu, smer Telekomunikacije. Položila je ispite predviđene Nastavnim planom i programom doktorskih studija sa prosečnom ocenom 10.00 (deset i 00/100). Kao stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije bila je angažovana na projektu “Napredne tehnike efikasnog korišćenja spektra u bežičnim sistemima”, (evid. broj TR-32028) u periodu od 2011 – 2014. godine. Od 2015. godine angažovanje na istom projektu nastavila je kao stručni saradnik za naučno-istraživački rad na Elektronskom Fakultetu u Nišu, na Katedri za telekomunikacije.

Tokom doktorskih studija, napisala je dvadeset tri naučno-istraživačka rada, kao i poglavlje u knjizi „*Optical Wireless Communications - An Emerging Technology*“. Četiri rada su štampana u međunarodnim časopisima sa SCI liste, jedan u časopisu od međunarodnog značaja, jedan u nacionalnom časopisu, osamnaest radova je publikovano u zbornicima naučnih konferencija od međunarodnog i nacionalnog značaja. Dobitnik je Nagrade za najboljeg mladog istraživača iz oblasti Telekomunikacija na konferenciji ETRAN 2013.



## Prilog 1.

# Curriculum Vitae

### Osnovni podaci

Ime i prezime	<b>Milica I. Petković</b>
Zvanje	<b>Stručni saradnik za naučno-istraživački rad</b>
Naziv institucije u kojoj radi	<b>Elektronski Fakultet, Univerzitet u Nišu</b>
Naučno polje	<b>Tehničko-tehnološke nauke</b>
Naučna oblast	<b>Elektrotehnika i računarstvo</b>
Uža naučna oblast	<b>Telekomunikacije</b>

### Obrazovanje

<i>Godina</i>	<i>Nivo</i>	<i>Institucija</i>	<i>Oblast</i>
2010.	<b>Diplomirani inženjer elektrotehnike</b> <i>Performanse selekcionog diverziti prijemnika u kanalu sa Rice-ovim fadingom, ocena 10.00 (deset)</i> Mentor: prof. dr Goran T. Đorđević Prosečna ocena u toku studija 9.22 (девет и 22/100)	Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu	Telekomunikacije

**Stipendije u toku studija**

Stipendija Republike Srbije tokom osnovnih studija  
Stipendija grada Knjaževca tokom osnovnih studija  
Stipendija Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj tokom doktorskih studija

**Diplome i priznanja u toku školovanja**

Nosilac diplome "Vuk Karadžić", osnovna i srednja škola  
Pohvalnica za izuzetne postignute rezultate tokom druge, treće i četvrte godine osnovnih studija  
Nagrada za najboljeg mladog istraživača, oblast Telekomunikacije, konferencija ETRAN 2013

### Radno iskustvo

<i>Period</i>	<i>Institucija</i>
Od 2015.	Katedra za telekomunikacije, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
2010-2014.	Katedra za telekomunikacije, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu Stipendista Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije

**Recenzent** sledećih časopisa: *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, *IEEE Photonics Journal*



---

## Prilog 1.

### Učešće na projektima

---

<i>Period</i>	<i>Projekat</i>
2010-2015.	<i>Napredne tehnike efikasnog korišćenja spektra u bežičnim sistemima (broj TR-32028), projekat finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije</i>

---



## Spisak objavljenih radova

### a) Poglavlja u knjigama

- a1. **Milica I. Petković**, Aleksandra M. Cvetković, Goran T. Đorđević, “Mixed RF/FSO relaying systems”, poglavlje u knjizi *Optical Wireless Communications - An Emerging Technology*, Eds. Murat Uysal, Carlo Capsoni, Zabih Ghassemlooy, Anthony Boucouvalas, Eszter G. Udvary, Springer International Publishing AG, Cham, 2015.

### b) Naučni radovi u međunarodnim časopisima sa impakt faktorom:

- b1. **Milica I. Petković**, Aleksandra M. Cvetković, Goran T. Đorđević, George K. Karagiannidis, “Partial relay selection with outdated channel state estimation in mixed RF/FSO systems”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 13, pp. 2860–2867, ISSN 0733-8724, doi: 10.1109/JLT.2015.2416972, July 2015. (M21, IF 2014=2.965)  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7070663&isnumber=7115988>
- b2. Goran T. Đorđević, **Milica I. Petković**, Aleksandra M. Cvetković, George K. Karagiannidis, “Mixed RF/FSO relaying with outdated channel state information”, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1935–1948, ISSN 0733-8716, doi: 10.1109/JSAC.2015.2433055, September 2015. (M21, IF 2013=4.138)  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7106563&queryText=Mixed+RF%2FFSO+relaying+with+outdated+channel+state+information&newsearch=true&searchField=Search\\_All](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7106563&queryText=Mixed+RF%2FFSO+relaying+with+outdated+channel+state+information&newsearch=true&searchField=Search_All)
- b3. Goran T. Đorđević, **Milica I. Petković**, “Average BER performance of FSO SIM-QAM systems in the presence of atmospheric turbulence and pointing errors”, prihvaćen za štampu *Journal of Modern Optics*, dokaz o prihvatanju rada od 04. 09. 2015, DOI: 10.1080/09500340.2015.1093662. (M23, IF 2013=1.166)
- b4. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, Dejan N. Milić, “BER performance of IM/DD FSO system with OOK using APD receiver”, *Radioengineering*, vol. 23, no. 1, pp. 480–487, ISSN 1210-2512 (Print), ISSN 1805-9600 (Online), April 2014. (M23, IF 2014=0.653)  
[http://www.radioeng.cz/fulltexts/2014/14\\_01\\_0480\\_0487.pdf](http://www.radioeng.cz/fulltexts/2014/14_01_0480_0487.pdf)



---

## Prilog 2.

- b5. **Milica I. Petković**, Mihajlo Stefanović, Aleksandra Cvetković, Dragana Krstić, Ivan Mitić, Časlav Stefanović, “Outage probability analysis of system with dual selection combining over correlated Weibull fading channel in the presence of  $\alpha$ - $\mu$  co-channel interference”, *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, Wydawnictwo SIGMA – NOT Sp. Zo.o., Warsaw, Poland, R. 89 NR 8/2013, pp. 126–129, ISSN 0033-2097, August 2013. (M23, IF 2011=0.224) <http://www.red.pe.org.pl/articles/2013/8/23.pdf>
- b6. **Milica I. Petković**, Dejan N. Milić, Goran T. Đorđević, “Optimization of SIM-BPSK FSO link with APD receiver influenced by Gamma-Gamma atmospheric turbulence and pointing errors”, *IET Communications*, drugi krug recenzije (minor revision), 2015. (M23, IF 2014= 0.742)
- c) Radovi u časopisima međunarodnog značaja verifikovani posebnom odlukom (M24):**
- c1. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, Dejan N. Milić, “Average BER Performance of SIM-DPSK FSO System with APD Receiver ”, *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, dokaz o prihvatanju rada od 25.08.2015.
- d) Naučni radovi u nacionalnim časopisima (M51):**
- d1. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, Dejan N. Milić, Bata V. Vasić, „BER analysis of IM/DD FSO system with APD receiver over Gamma-Gamma turbulence“, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 61-72, UDC: 621.394.624:551.515, DOI: 10.2298/SJEE131208006P, February 2014. [http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol\\_11-1/06-Petkovic-Djordjevic-Milic-Vasic.pdf](http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_11-1/06-Petkovic-Djordjevic-Milic-Vasic.pdf)
- e) Radovi saopštene na međunarodnim naučnim skupovima i štampani u odgovarajućim zbornicima radova (M33):**
- e1. **Milica I. Petković**, Jelena Anastasov, Goran T. Đorđević, Predrag Ivanis, “Impact of correlation on outage performance of FSO system with switch-and-stay diversity receiver”, *IEEE International Conference on Communications 2015 (ICC 2015), Proceedings of Papers*, pp. 2756–2761, London, UK, June 2015.
- e2. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, “SEP analysis of FSO system employing SIM-MPSK with noisy phase reference”, *2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communication (IWOW 2015)*, dokaz o prihvatanju rada od 13.08.2015.
- e3. **Milica I. Petković**, Nemanja M. Zdravković, Goran T. Đorđević, “Outage performance of switch-and-examine combining receiver over FSO Gamma-Gamma atmospheric turbulence with pointing errors”, *22st Telecommunication Forum (TELFOR 2014), Proceedings of papers*, pp. 383–386, Belgrade, Serbia, November 25–27, 2014. Published by TELECOMMUNICATIONS SOCIETY–TS, Belgrade; ETF–School of Electrical Engineering, University of Belgrade; IEEE Serbia and Montenegro COM Chapter, ISBN: 978-1-4799-6190-0, IEEE Catalog Number: CFP1498P-CDR <http://www.telfor.rs>
- e4. **Milica Petković**, Goran Đorđević, “Outage Performance of SSC receiver in FSO system with Gamma-Gamma atmospheric turbulence”, *XII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Proceedings of papers*, Niš, Serbia, November 12–14, 2014.



---

## Prilog 2.

- e5. **Milica I. Petković**, Nemanja M. Zdravković, Časlav M. Stefanović, Goran T. Đorđević, “Performance analysis of SIM-FSO system over Gamma-Gamma atmospheric channel”, *XLIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2014), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 19–22, Niš, Serbia, June 25–27, 2014.  
Published by Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, ISBN: 978-86-6125-108-5  
<http://www.icestconf.org/>
- e6. Aleksandra M. Cvetković, **Milica I. Petković**, Jelena A. Anastasov, “Performance Analysis of RF/FSO System with Interference at the Relay”, *XLIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2014), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 15–18, Niš, Serbia, June 25–27, 2014.  
Published by Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, ISBN: 978-86-6125-108-5  
<http://www.icestconf.org/>
- e7. **Milica I. Petković**, Nemanja M. Zdravković, Goran T. Đorđević, “Error performance of uncoded and convolutional coded SC receiver over FSO channel with pointing errors”, *21st Telecommunication Forum (TELFOR 2013), Proceedings of papers*, pp. 283–286, Belgrade, Serbia, November 26–28, 2013.  
Published by TELECOMMUNICATIONS SOCIETY – TS, Belgrade; ETF – School of Electrical Engineering, University of Belgrade; IEEE Serbia and Montenegro COM Chapter, ISBN: 978-1-4799-1419-7, IEEE Catalog Number: CFP1398P-CDR  
<http://www.telfor.rs>
- e8. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, “Effects of pointing errors on average capacity of FSO links over Gamma-Gamma turbulence channel”, *11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS 2013), Proceedings of papers*, pp. 481–484, Niš, Serbia, October 16–19, 2013.  
Published by Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, ISBN: 978-1-4799-0900-1, IEEE Catalog Number: CFP13488-CDR  
<http://www.telsiks.org.rs/>
- e9. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, Bata V. Vasić, “BER performance of IM/DD FSO system with OOK over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel with pointing errors”, *11th International Conference on Applied Electromagnetics – IIEC 2013, Proceedings of papers*, Niš, Serbia, September 01-04, 2013.  
Published by Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, ISBN: 978-86-6125-090-3  
<http://pes2013.elfak.ni.ac.rs/>
- e10. **Milica I. Petković**, Nemanja M. Zdravković, Bata V. Vasić, Goran T. Đorđević, “BER performance of IM/DD FSO system with PIN photodiode receiver over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel”, *XLVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2013), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 99-102, Ohrid, Republic of Macedonia, June 26-29, 2013.  
Published by Faculty of Technical Sciences – Bitola, ISBN: 978-9989-786-90-7  
<http://www.icestconf.org/>
- e11. **Milica Petković**, Goran Đorđević, Dragan Denić, “BER performance of subcarrier QAM intensity modulated FSO communication system”, *XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, Proceedings of papers*, pp. 92-95, Niš, Serbia, November 14-16, 2012.  
Published by Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, ISBN: 978-86-6125-072-9



---

## Prilog 2.

- e12. **Milica Petković**, Bojana Nikolić, Bata Vasić, Goran Đorđević, “BEP performance of DE-QPSK and DE-OQPSK over composite fading channels in the presence of imperfect signal extraction”, *XLVII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2012), Proceedings of papers*, vol. 1, pp. 105-108, Veliko Tarnovo, Bulgaria, June 28-30, 2012.  
Published by Faculty of Telecommunications, Technical University of Sofia, ISBN: 978-619-167-002-4  
<http://www.icestconf.org/>
- e13. **Milica I. Petković**, Aleksandar T. Miljković, Bata V. Vasić, Goran T. Đorđević, “Transformation of MPSK SC diversity system in Weibull fading”, *XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2011), Proceedings of papers*, vol. 3, pp. 693-696, Niš, Serbia, June 29-July 1, 2011.  
Published by Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, ISBN: 978-86-6125-033-0  
<http://www.icestconf.org/>
- f) Radovi saopšteni na nacionalnim naučnim skupovima i štampani u odgovarajućim zbornicima radova (M63):**
- f1. **Milica I. Petković**, Bata V. Vasić, Milan S. Marković, Goran T. Đorđević, “Exact bit error rate of QAM over Nakagami fading channel”, *19. Telecommunication Forum (TELFOR 2011), Zbornik radova*, str. 533-536, Beograd, Srbija, 22-24 Novembar, 2011.  
Društvo za telekomunikacije – DT, Beograd, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, IEEE Serbia&Montenegro COM CHAPTER, ISBN: 978-1-4577-1498-6, IEEE Catalog Number: CFP1198P-CDR  
<http://www.telfor.rs>
- f2. **Milica Petković**, Bata Vasić, Zorica Nikolić, “Exact bit error probability expression for QAM over gamma shadowed Nakagami-m fading channel”, *56. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2012, Zbornik radova na CD-u*, Zlatibor, Srbija, 11-14 Jun, 2012.  
Društvo za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ISBN: 978-86-80509-67-9  
<http://etran.etf.rs/>
- f3. **Milica I. Petković**, Goran T. Đorđević, Dejan N. Milić, Bata V. Vasić, “Performance of APD receiver over IM/DD FSO System”, *57. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2013, Zbornik radova na CD-u*, Zlatibor, Srbija, 03-06 Jun, 2013.  
Društvo za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ISBN: 978-86-80509-68-6  
<http://etran.etf.rs/>
- f4. **Milica I. Petković**, Aleksandra M. Cvetković, Goran T. Đorđević, “Verovatnoća prekida hibridnih sistema pri prenosu radio-frekvencijskih i optičkih signala u slobodnom prostoru”, *58. konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2014, Zbornik radova na CD-u*, Vrnjačka Banja, Srbija, 02-05 Jun, 2014.  
Društvo za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ISBN: 978-86-80509-70-9



---

## Prilog 2.

Izjava 1.

### IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

**Analiza i načini poboljšanja performansi bežičnih optičkih  
telekomunikacionih sistema u uslovima atmosferske turbulencije**

koja je odbranjena na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivala na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredila autorska prava, niti zloupotrebila intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 26.08.2015.

Autor disertacije:      dipl. inž. Milica I. Petković

Potpis autora disertacije:

---





---

**Prilog 2.**

Izjava 2.

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG  
OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE**

Ime i prezime autora: **Milica I. Petković**

Naslov rada: **Analiza i načini poboljšanja performansi bežičnih optičkih  
telekomunikacionih sistema u uslovima atmosferske turbulencije**

Mentor: **prof. dr Goran T. Đorđević**

Izjavljujem da je štampana verzija moje doktorske disertacije istovetna elektronskoj verziji, koju sam predala za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu.**

U Nišu, 26.08.2015.

Potpis autora disertacije:

---



---

**Prilog 2.**

Izjava 3.

## **IZJAVA O KORIŠĆENJU**

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da, u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

### **Analiza i načini poboljšanja performansi bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema u uslovima atmosferske turbulencije**

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Nišu, 26.08.2015.

Autor disertacije: dipl. inž. Milica I. Petković

Potpis autora disertacije:

---