

UNIVERZITET SINGIDUNUM  
BEOGRAD

DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

**Optimizacija performansi hibridnih *Radio Frequency/Free  
Space Optics* komunikacionih sistema u različitim  
propagacionim uslovima**

MENTOR:

Prof. dr Marko Tanasković

STUDENT:

Đorđe Šarčević, 466021/2019

Beograd, 2026. godine

---

## REZIME

Razvoj bežičnih komunikacija ubraja se među najznačajnije tehnološke prekretnice savremenog doba. Bežični uređaji i sistemi postali su sastavni deo svakodnevnog života znatno brže nego što se moglo predvideti pre tri decenije i očekuje se da će zadržati ključnu ulogu u društvu i u narednom periodu. Kako zahtevi za bežičnim sistemima sa visokim brzinama prenosa kontinuirano rastu, potražnja za RF spektrom premašuje raspoložive resurse, što nameće potrebu za razmatranjem alternativnih i održivih rešenja zasnovanih na višim frekvencijskim opsezima elektromagnetnog spektra. Optičke bežične komunikacije (OWC) podrazumevaju prenos informacija kroz nevođeni propagacioni medijum uz upotrebu optičkih nosilaca, odnosno signala iz vidljivog, infracrvenog (IR) i ultraljubičastog (UV) dela spektra. FSO sistemi omogućavaju prenos podataka velikim brzinama između dve fiksne tačke na udaljenostima koje mogu dostići nekoliko kilometara.

Eksplozivni porast multimedijalnih aplikacija dovodi do generisanja ogromnih količina mobilnog saobraćaja, čime se dodatno povećava potreba za bežičnim komunikacijama velikih brzina. Očekuje se da će nadolazeće 5G i 6G tehnologije omogućiti razvoj novih servisa sa izuzetno velikim kapacitetom, masovnom povezanošću uređaja, ultra-niskom latencijom, unapređenom bezbednošću, veoma niskom potrošnjom energije i visokim kvalitetom korisničkog iskustva (QoE). Podrška ovako velikim količinama podataka predstavlja značajan izazov za buduće komunikacione mreže.

U odnosu na radio-frekventne (RF) sisteme, FSO veze raspolažu izuzetno velikim optičkim propusnim opsegom, što im omogućava ostvarivanje znatno viših brzina prenosa podataka. Zahvaljujući tim karakteristikama, FSO sistemi su veoma pogodni za širok spektar primena, uključujući proširenje metropolitanskih mreža (MAN), međusobno povezivanje lokalnih mreža (LAN-to-LAN), realizaciju rezervnih optičkih veza, bežični backhaul u mobilnim mrežama, uspostavljanje komunikacija u postkatastrofalnim uslovima, prenos HDTV sadržaja i medicinskih slika i video-zapisa, bežični video-nadzor i sisteme monitoringa, kao i kvantnu distribuciju kriptografskih ključeva.

Hibridni RF/optički i optički/optički bežični sistemi predstavljaju efikasan pristup za prevazilaženje ograničenja pojedinačnih tehnologija, uz istovremeno iskorišćavanje njihovih prednosti. RF/optički hibridni sistemi objedinjuju radio-frekventne i optičke tehnologije, dok optički/optički hibridi integrišu dve ili više tehnologija optičkih bežičnih komunikacija (OWC). Njihova zajednička primena može značajno unaprediti mrežne performanse, naročito u pogledu propusnog opsega, pouzdanosti i energetske efikasnosti, pri čemu se posebna pažnja posvećuje hibridnom RF/FSO pristupu kao naročito značajnom sa aspekta pouzdanosti veze u promenljivim propagacionim uslovima.

U ovom radu optimizacija performansi hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema ostvaruje se kroz analitičku evaluaciju i izbor odgovarajućih statističkih modela i sistemskih parametara u različitim propagacionim uslovima.

### ***Ključne reči:***

Free space optics (FSO), atmosferske turbulencije, Gamma-Gamma raspodela, Rician raspodela, Nakagami-m raspodela, hibridni RF/FSO sistem, CBPSK modulacija, srednja verovatnoća greške po bitu (ABER).

---

## ABSTRACT

The development of wireless communications is regarded as one of the most significant technological milestones of the modern era. Wireless devices and systems have become an integral part of everyday life much faster than could have been anticipated three decades ago, and they are expected to retain a key role in society in the years to come. As the requirements for high-data-rate wireless systems continue to grow, the demand for RF spectrum exceeds the available resources, which necessitates the consideration of alternative and sustainable solutions based on higher frequency bands of the electromagnetic spectrum. Optical wireless communications (OWC) involve the transmission of information through an unguided propagation medium using optical carriers, i.e., signals from the visible, infrared (IR), and ultraviolet (UV) regions of the spectrum. Free-space optical (FSO) systems enable high-speed data transmission between two fixed points over distances that can reach several kilometers.

The exponential growth of multimedia applications leads to the generation of enormous volumes of mobile traffic, thereby further increasing the demand for high-speed wireless communications. It is expected that the upcoming 5G and 6G technologies will enable the development of new services with extremely high capacity, massive device connectivity, ultra-low latency, enhanced security, very low energy consumption, and a high quality of user experience (QoE). Supporting such large volumes of data represents a significant challenge for future communication networks.

Compared to radio-frequency (RF) systems, FSO links possess an exceptionally large optical bandwidth, allowing them to achieve significantly higher data transmission rates. Thanks to these characteristics, FSO systems are highly suitable for a wide range of applications, including the expansion of metropolitan area networks (MAN), interconnection of local area networks (LAN-to-LAN), implementation of backup optical links, wireless backhaul in mobile networks, establishment of communications in post-disaster scenarios, transmission of HDTV content and medical images and videos, wireless video surveillance and monitoring systems, as well as quantum distribution of cryptographic keys.

Hybrid RF/optical and optical/optical wireless systems represent an efficient approach to overcoming the limitations of individual technologies while simultaneously exploiting their advantages. RF/optical hybrid systems integrate radio-frequency and optical technologies, whereas optical/optical hybrids combine two or more optical wireless communication (OWC) technologies. Their joint deployment can significantly enhance network performance, particularly in terms of throughput, reliability, and energy efficiency, with particular emphasis on the hybrid RF/FSO approach as a key enabler of link reliability under varying propagation conditions.

In this dissertation, the optimization of hybrid RF/FSO communication system performance is achieved through analytical evaluation and the selection of appropriate statistical models and system parameters under different propagation conditions.

### ***Keywords:***

Free space optics (FSO), atmospheric turbulence, Gamma-Gamma distribution, Rician Distribution, Nakagami-m distribution, hybrid RF/FSO system, CBPSK modulation, average bit error rate (ABER).

---

---

## SPISAK SLIKA

- Slika 2.1.1.** Elektromagnetni spektar
- Slika 2.8.1.** Scenariji primene hibridnih RF/optičkih mreža u vozilnim sistemima
- Slika 2.9.1.** Primer spoljašnjih hibridnih RF/FSO mreža i njihova primena
- Slika 2.10.1.** Osnovna povezanost hibridnog RF/optičkog sistema u podvodnim komunikacijama
- Slika 2.11.1.** Primeri povezivanja hibridnih RF/optičkih sistema u e-zdravstvu
- Slika 2.13.1.** Scenariji primene za RF/FSO backhaul povezivanje
- Slika 2.18.1.** Ilustracija Rejljevog i Mijevog tipa rasejanja. Rejljevo je rasejanje u svim pravcima, dok Mijevo rasejanje teži da bude u direktnom smeru
- Slika 2.19.1.** Šematski prikaz mešovite serijske konfiguracije sa dva skoka (RF/FSO). RF signali na relejnom čvoru se konvertuju u optičke signale i prosleđuju ka odredištu na FSO linku
- Slika 2.19.2.** Šematski prikaz hibridne RF/FSO konfiguracije. Podaci se mogu prenositi preko RF ili FSO veze, ili preko oba
- Slika 3.1.1.** Gamma-gamma raspodela pod uslovima slabe, umerene i jake turbulencije
- Slika 3.2.1.** Rician raspodela u funkciji od parametra  $K$
- Slika 3.3.1.** Nakagami-m raspodela za  $m=0.5$
- Slika 3.3.2.** Nakagami-m raspodela za  $m=1$ ,  $m=2$  i  $m=3$
- Slika 4.1.1.** Model sistema
- Slika 4.4.1.** Poređenje CDF-a (odnosno verovatnoće prekida), dobijenih korišćenjem tačnog  $\gamma_e$  i aproksimativnog  $\gamma_a$ .  $\delta = 1$ , prikazani su rezultati za slabu i jaku turbulenciju
- Slika 4.4.2.** Poređenje CDF-a (odnosno verovatnoće prekida), dobijenih korišćenjem tačnog  $\gamma_e$  i aproksimativnog  $\gamma_a$ .  $\delta = 6.7$ , prikazani su rezultati za slabu i jaku turbulenciju
- Slika 5.7.1.** Određivanje ABER-a u zavisnosti od  $K$  faktora za FSO sistem
- Slika 5.7.2.** Određivanje ABER-a u zavisnosti od  $K$  faktora za One-Hop hibridni RF/FSO sistem
- Slika 5.7.3.** Zavisnost ABER-a pri korišćenju hibridnih RF/FSO sistema sa Rician-Gamma raspodelom i Nakagami-m fadingom, i Gamma-Gamma raspodelom i Nakagami-m fadingom, u zavisnosti od greške usmeravanja
- Slika 5.7.4.** Analiza ABER-a korišćenjem Gamma-Gamma/Nakagami-m i Gamma-Rician/Nakagami-m modela za hibridne One-Hop FSO/RF sisteme
- Slika 5.7.5.** Analiza ABER-a korišćenjem Gamma-Gamma/Nakagami-m i Gamma-Rician/Nakagami-m modela za hibridne Multi-Hop sisteme
-

- 
- Slika 5.7.6.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema korišćenjem Gamma-Rician/Nakagami-m modela, sa strukturom od  $M=2$  i  $N=3$ , u zavisnosti od parametra  $K$
- Slika 5.7.7.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema korišćenjem Gamma-Rician/Nakagami-m modela, sa strukturom od  $M=2$  i  $N=3$ , u zavisnosti od intenziteta turbulencije
- Slika 5.7.8.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema koristeći Gamma-Rician/Nakagami-m model sa promenljivom strukturom prostiranja po više putanja i fiksnom strukturom hop-ova
- Slika 5.7.9.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema koristeći Gamma-Rician/Nakagami-m model sa promenljivom strukturom hop-ova i fiksnom strukturom prostiranja po više putanja
- Slika 6.5.1.** ABER Zero-Boresight Double Rician matematičkog modela za različite efekte atmosferske turbulencije
- Slika 6.5.2.** ABER Zero-Boresight Double Rician matematičkog modela za različite vrednosti odnosa normalizovanog prečnika prijemnog otvora i Friedovog parametra
- Slika 6.5.3.** ABER u uslovima umerene turbulencije kao funkcija broja modova u simetričnom pristupu
- Slika 6.5.4.** ABER u uslovima umerene turbulencije kao funkcija broja modova u asimetričnom pristupu
- Slika 7.4.1.** ABER za hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom u uslovima jake turbulencije u zavisnosti od parametra  $K$  za CBPSK primenjenu modulacionu tehniku
- Slika 7.4.2.** ABER za FSO sistem u uslovima jake turbulencije u zavisnosti od parametra  $K$  za primenjenu CBPSK modulacionu tehniku
- Slika 7.4.3.** ABER za hibridni One-Hop RF/FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za vrednosti  $K=2$ ,  $K=2$  i  $m=2$  pri primeni CBPSK tehnike modulacije
- Slika 7.4.4.** ABER za FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za  $K=2$  i primenjenu CBPSK modulacionu tehniku
- Slika 7.4.5.** ABER za hibridne One-Hop RF/FSO i FSO sisteme kao funkcija greške pokazivanja
- Slika 7.4.6.** ABER za hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom u uslovima slabe turbulencije za različite vrednosti parametra  $m$  za korišćenu CBPSK modulacionu tehniku
-

---

## SPISAK TABELA

- Tabela 2.1.1.** Poređenje različitih OWC tehnologija
- Tabela 2.1.2.** Ključne prednosti i ograničenja različitih RF tehnologija
- Tabela 2.10.1.** Osnovne razlike između tri UWC tehnologije
- Tabela 2.18.1.** Poređenje RF i FSO tehnologija
- Tabela 3.1.1.** Vrednosti parametara pod uticajem turbulencije
- Tabela 4.4.1.** Procenat degradacije performansi usled efekta propagacije šuma u poređenju sa aproksimativnim rezultatima dobijenim korišćenjem  $\gamma_a$
- Tabela 6.1.1.** Klasifikacija Zernikeovih polinoma po modovima
- Tabela 6.5.1.** Vrednosti parametara korišćenih za numeričke proračune
- Tabela 7.3.1.** Vrednosti parametara  $x$  i  $y$  u zavisnosti od primenjenih formata modulacije

---

## SKRAČENICE

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| AF    | Amplify-and-Forward                        |
| APD   | Avalanche Photodiode                       |
| ARQ   | Automatic Repeat reQuest                   |
| ASE   | Amplified Spontaneous Emission             |
| AWGN  | Additive White Gaussian Noise              |
| BER   | Bit Error Rate                             |
| FSO   | Free Space Optics                          |
| IM/DD | Intensity Modulation/Direct Detection      |
| IR    | Infrared                                   |
| LD    | Laser diode                                |
| MIMO  | Multiple-Input Multiple-Output             |
| MISO  | Multiple-Input Single-Output               |
| OE    | Optical-to-Electrical                      |
| OFDM  | Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| OOK   | On-Off Keying                              |
| OPPM  | Overlapping Pulse Position Modulation      |
| OSM   | Optical Spatial Modulation                 |
| OSTBC | Orthogonal Space-Time Block Code           |
| OWC   | Optical wireless communication             |
| PAM   | Pulse Amplitude Modulation                 |
| PAPR  | Peak-to-Average Power Ratio                |
| PD    | Photodiode                                 |
| PHY   | Physical layer                             |
| PPM   | Pulse Position Modulation                  |
| PSK   | Phase Shift Keying                         |
| QAM   | Quadrature Amplitude Modulation            |
| VCSEL | Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser     |
| VLC   | Visible Light Communication                |

---

# SADRŽAJ

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>UVOD .....</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>1. Dizajn sveprisutnih i pouzdanih komunikacionih mreža nove generacije .....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1. Prednosti i primene FSO tehnologije .....                                        | 5         |
| 1.2. Geometrijski gubici i gubici usled naporavanja .....                             | 6         |
| 1.3. Atmosferski gubici .....                                                         | 7         |
| 1.4. Feding izazvan atmosferskom turbulencijom .....                                  | 8         |
| 1.5. Pozadinsko zračenje .....                                                        | 10        |
| 1.6. FSO prijemnik i predajnik .....                                                  | 11        |
| 1.7. Modulacione tehnike .....                                                        | 13        |
| 1.8. Kodovanje kanala .....                                                           | 15        |
| 1.9. Prostorni diverzitet .....                                                       | 16        |
| 1.10. MIMO FSO sistemi .....                                                          | 18        |
| 1.11. Adaptivna transformacija .....                                                  | 18        |
| 1.12. Relejni prenos i hibridni RF/FSO sistemi .....                                  | 19        |
| 1.13. Koherentni FSO sistemi .....                                                    | 20        |
| <b>2. Optičke bežične hibridne mreže: trendovi, mogućnosti i izazovi istraživanja</b> | <b>21</b> |
| 2.1. Pregled sistema. Razmatrane mreže za optičke bežične hibridne sisteme .....      | 23        |
| 2.2. Način funkcionisanja hibridnih sistema .....                                     | 27        |
| 2.3. RF/Optičke bežične hibridne mreže, unutrašnji hibridni sistemi .....             | 29        |
| 2.4. Hibridni sistemi sa WiFi-jem zasnovanim na RF-u i malim ćelijama .....           | 30        |
| 2.5. Hibridni sistemi sa makroćelijama .....                                          | 30        |
| 2.6. Izbor mreže u zatvorenim RF/optičkim bežičnim hibridnim sistemima .....          | 31        |
| 2.7. Mogućnosti za hibridne optičke/RF sisteme u zatvorenom prostoru .....            | 32        |
| 2.8. RF/optički bežični hibridni sistemi u vozilima .....                             | 33        |
| 2.9. RF/optički bežični hibrid u slobodnom prostoru .....                             | 35        |
| 2.10. RF/optičke i akustično/optičke hibridne mreže pod vodom .....                   | 37        |
| 2.11. RF/optički bežični hibrid u e-zdravstvu .....                                   | 39        |
| 2.12. RF/optički bežični hibrid u lokalizaciji, pozicioniranju i navigaciji .....     | 40        |
| 2.13. RF/optički sistemi za povezivanje preko mreže za prenos podataka .....          | 41        |
| 2.14. Optičke/Optičke bežične hibridne mreže .....                                    | 43        |

|                                                                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.15. Izazovi i otvorena istraživačka pitanja .....                                                                                                      | 43        |
| 2.16. Poređenje FSO i RF komunikacije .....                                                                                                              | 48        |
| 2.17. Sistemski otisak i geometrijski gubitak .....                                                                                                      | 49        |
| 2.18. Efekti prostiranja kanala .....                                                                                                                    | 50        |
| 2.19. Hibridni RF/FSO sistem, rad i mehanizmi prekida .....                                                                                              | 53        |
| 2.20. Komercijalno dostupna RF/FSO rešenja .....                                                                                                         | 55        |
| 2.21. RF/FSO za svemirske komunikacije .....                                                                                                             | 57        |
| <b>3. Analiza i optimizacija performansi FSO kanala primenom statističkih modela atmosferske turbulencije .....</b>                                      | <b>62</b> |
| 3.1. Gamma-Gamma raspodela kao osnov za analizu i optimizaciju FSO performansi .....                                                                     | 63        |
| 3.2. Rician raspodela za analizu performansi FSO sistema sa dominantnom LOS komponentom .....                                                            | 65        |
| 3.3. Nakagami-m raspodela za analizu i optimizaciju performansi RF i FSO kanala.....                                                                     | 67        |
| <b>4. Statistička analiza propagacije šuma u mešovitim RF/FSO dual-hop AF sistemima .....</b>                                                            | <b>69</b> |
| 4.1. Model sistema i statistika fedinga .....                                                                                                            | 70        |
| 4.2. Tačna statistička analiza $\gamma_e$ .....                                                                                                          | 73        |
| 4.3. Primena $F_{\gamma_e}$ za procenu performansi .....                                                                                                 | 74        |
| 4.4. Numerički rezultati statistike fedinga .....                                                                                                        | 75        |
| <b>5. Evaluacija performansi hibridnih RF/FSO sistema korišćenjem Nakagami-m i Gamma-Rician modela za One-Hop i Multi-Hop scenarije .....</b>            | <b>78</b> |
| 5.1. Model sistema i kanala. Modelovanje RF fedinga .....                                                                                                | 80        |
| 5.2. Modelovanje RF fedinga .....                                                                                                                        | 81        |
| 5.3. Statističke karakteristike RF/FSO sistema zasnovane na selektivnom kombinovanju .....                                                               | 82        |
| 5.4. ABER za One-Hop transmisione sisteme .....                                                                                                          | 82        |
| 5.5. ABER za Multi-Hop transmisione sisteme .....                                                                                                        | 83        |
| 5.6. ABER za Multi-Hop hibridni RF/FSO sistem .....                                                                                                      | 83        |
| 5.7. Numerički rezultati sistema .....                                                                                                                   | 84        |
| <b>6. Novi zatvoreni izraz za ABER u FSO sistemima zasnovan na modelu Zero-Boresight Double Rician i analiza performansi sa adaptivnom optikom .....</b> | <b>92</b> |
| 6.1. Model sistema, atmosferski model kanala .....                                                                                                       | 93        |
| 6.2. Određivanje PDF-a kao funkcije SNR-a sa OOK modulacijom .....                                                                                       | 95        |
| 6.3. Određivanje indeksa fluktuacije .....                                                                                                               | 96        |

---

|                                                                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4. Određivanje ABER-a kao funkcije SNR-a sa OOK modulacijom .....                                                                                          | 97         |
| 6.5. Numerički rezultati predloženog sistema .....                                                                                                           | 97         |
| <b>7. Hibridna RF/FSO komunikaciona veza u uslovima Nakagami-m fadinga i<br/>atmosferske turbulencije modelovane inverznom hi-kvadrat gama raspodelom ..</b> | <b>102</b> |
| 7.1. Model sistema hibridnog RF/FSO sistemima .....                                                                                                          | 103        |
| 7.2. Statističke karakteristike hibridnog RF/FSO sistema sa One-Hop sistemom                                                                                 | 104        |
| 7.3. Dobijanje izraza za ABER hibridnog RF/FSO sistema sa One-Hop<br>sistemom .....                                                                          | 105        |
| 7.4. Numerički rezultati predloženog sistema .....                                                                                                           | 106        |
| <b>8. Zaključak .....</b>                                                                                                                                    | <b>111</b> |
| <b>9. Literatura .....</b>                                                                                                                                   | <b>114</b> |

## UVOD

Optičke bežične komunikacije (OWC) predstavljaju izuzetno perspektivno rešenje u odnosu na tradicionalne radio-frekventne (RF) sisteme. Istraživanja su pokazala da OWC tehnologije mogu da podrže veliki saobraćaj koji generiše masovna povezanost u Internetu stvari (IoT) i predstojeći 5G/6G komunikacioni sistemi. S obzirom na to da se karakteristike OWC i RF tehnologija međusobno dopunjuju, njihova kombinovana primena smatra se obećavajućim pristupom za podršku 5G i budućim generacijama mreža.

Hibridni RF/optički i optički/optički bežični sistemi zasnivaju se na kombinovanju komplementarnih tehnologija, čime se omogućava efikasno prevazilaženje njihovih pojedinačnih ograničenja i istovremeno iskorišćavanje njihovih prednosti. Hibridni RF/optički sistem integriše RF i optičke tehnologije, dok optički/optički hibrid kombinuje dve ili više OWC tehnologija. Zajednička implementacija ovih sistema omogućava optimizaciju performansi i značajno poboljšanje mreže u pogledu protoka podataka, pouzdanosti i energetske efikasnosti, posebno u promenljivim propagacionim uslovima. U ovom radu fokus je stavljen na hibridne RF/FSO komunikacione sisteme kao posebno značajne sa aspekta pouzdanosti veze u promenljivim propagacionim uslovima.

Intenzivan razvoj multimedijalnih aplikacija rezultuje značajnim povećanjem mobilnog saobraćaja, što nameće potrebu za bežičnim komunikacionim sistemima visokih brzina prenosa. Predstojeće 5G i 6G tehnologije trebalo bi da omoguće nove servise sa ultra-visokim kapacitetom, masovnom povezanosti uređaja, ultra-niskom latencijom, poboljšanom bezbednošću, izuzetno niskom potrošnjom energije i visokim kvalitetom korisničkog iskustva (QoE). Zbog toga, rast korišćenja mobilnih podataka zahteva efikasna i optimizovana tehnička rešenja kako bi se obezbedio garantovan kvalitet usluge (QoS).

Zahvaljujući napretku tehnologije dioda koje emituju svetlost (LED), OWC je postao perspektivno rešenje. OWC tehnologija može da iskoristi veoma širok optički spektar i obezbedi visokokvalitetne karakteristike komunikacije, uključujući odsustvo elektromagnetnih smetnji, visok nivo bezbednosti i veliku energetska efikasnost. Demonstrirani su protoci podataka od 100 Gbps pri standardnom osvetljenju u zatvorenom prostoru. Neke OWC tehnologije, poput komunikacije vidljivom svetlošću (VLC) i Light Fidelity (LiFi), koriste postojeću rasvetnu infrastrukturu za bežični prenos podataka. Pored toga, OWC tehnologije u potpunosti podržavaju energetska efikasnu komunikaciju. Pošto većini OWC tehnologija nije potrebna složena infrastruktura, moguće je pratiti "zelenu agendu" i smanjiti troškove implementacije. Takođe, budući da svetlost ne prolazi kroz zidove, OWC sistemi obezbeđuju bolju bezbednost podataka.

U OWC sistemima kao propagacioni medijum koriste se vidljiva svetlost (VL), infracrveno (IR) i ultraljubičasto (UV) zračenje, na osnovu kojih je razvijen veliki broj bežičnih komunikacionih tehnologija. Među najperspektivnijim OWC tehnologijama izdvajaju se VLC, LiFi, komunikacija optičkom kamerom (OCC) i komunikacija kroz slobodan prostor (FSO), koje se razlikuju po arhitekturi, protokolima i scenarijima primene. Iako ove tehnologije imaju značajnu ulogu u savremenim OWC sistemima, u ovom radu akcenat je stavljen na FSO veze kao ključnu komponentu hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema.

Prvo poglavlje daje savremen pregled FSO komunikacionih sistema, uz prikaz modela FSO kanala i struktura predajnika i prijemnika. Takođe se razmatraju informaciono-teorijske granice FSO kanala i istraživanja na algoritamskom nivou sistema koja teže njihovom dostizanju. Obradene teme uključuju napredak u modulaciji, kanalnom kodovanju, tehnikama prostornog i kooperativnog diverziteta, adaptivnom prenosu i hibridnim RF/FSO sistemima, sa ciljem unapređenja i optimizacije performansi sistema.

Drugo poglavlje razmatra aktuelne trendove, mogućnosti, izazove i pravce istraživanja u oblasti optičkih bežičnih hibridnih mreža.

Treće poglavlje fokusira se na statističko modelovanje atmosferske turbulencije kao ključni faktor u analizi i predviđanju performansi signala. Tri raspodele Gamma-Gamma, Rician i Nakagami- $m$  imaju ključnu ulogu u razumevanju i analitičkoj optimizaciji performansi FSO i hibridnih RF/FSO sistema u različitim propagacionim uslovima. Gamma-Gamma raspodela omogućava analizu efekata fluktuacija, Rician raspodela se primenjuje u scenarijima sa dominantnom linijom vida, dok se Nakagami- $m$  raspodela koristi za modelovanje situacija sa višestrukim rasipanjem signala.

Četvrto poglavlje analizira takozvani efekat propagacije šuma u mešovitom RF/FSO sistemu sa pojačanim i prosleđenim (AF) prenosom, koji se primenjuje za prenos podataka u bežičnim senzorskim mrežama. Ovaj efekat može biti posebno značajan kada čvorovi senzora rade na baterijsko napajanje i imaju ograničenu izlaznu snagu. Predstaviće se tačan izraz za kumulativnu funkciju raspodele (CDF) odnosa signal-šum (SNR) u krajnjoj tački višesmernog mešovitog RF/FSO AF relejnog sistema.

U petom poglavlju predstavljen je sveobuhvatan model za proračun performansi hibridnih RF/FSO sistema. Gamma-Rician model korišćen je za statističku karakterizaciju turbulencije u FSO kanalu, dok je Nakagami- $m$  model fedinga primenjen za modelovanje RF propagacije. Izvedeni su izrazi u zatvorenoj formi za funkciju kumulativne raspodele (CDF) posmatranog odnosa signal-šum (SNR) na prijemu, kao i izraz u zatvorenom obliku za prosečnu stopu greške po bitu (ABER) pri korišćenju koherentne binarne fazne modulacije (CBPSK). Analizirana su dva načina prenosa u relejnim hibridnim RF/FSO sistemima. Na osnovu dobijenih izraza, izvršiće se proračun ABER performansi ovih sistema u funkciji različitih parametara.

U šestom poglavlju dat je analitički okvir za modelovanje atmosferske turbulencije u optičkim komunikacionim FSO sistemima korišćenjem Zero-Boresight Double Rician modela fedinga. Izveden je izraz u zatvorenom obliku za prosečnu stopu greške po bitu (ABER) u uslovima modulacije intenziteta sa direktnom detekcijom.

Sedmo poglavlje predlaže novi statistički pristup za procenu performansi hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema. RF kanal je opisan Nakagami- $m$  raspodelom, dok je FSO kanal modelovan primenom hi-kvadrat-inverzne gama raspodele, kojom se obuhvataju uticaji atmosferskih turbulencija i grešaka u usmeravanju. Izvedeni su novi analitički izrazi za prosečnu stopu greške po bitu (ABER), za hibridni RF/FSO sistem, kao i za odgovarajući FSO sistem, pri primeni koherentne binarne fazno-pomerene modulacije (CBPSK). Sprovedena je uporedna analiza za različite vrednosti parametara kanala i nivoa turbulencije.

Cilj ovog rada je optimizacija performansi hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema kroz analitički zasnovan izbor odgovarajućih statističkih modela i sistemskih parametara u različitim propagacionim uslovima.

## 1. Dizajn sveprisutnih i pouzdanih komunikacionih mreža nove generacije

Optičke bežične komunikacije (OWC) odnose se na prenos signala u nevođenim propagacionim medijima korišćenjem optičkih nosilaca, odnosno vidljivog, infracrvenog (IR) i ultraljubičastog (UV) spektra. U radu su opisane spoljašnje terestričke OWC veze koje rade u bliskom infracrvenom opsegu, a koje se u literaturi najčešće označavaju kao optičke komunikacije kroz slobodan prostor (FSO). FSO sistemi koriste se za komunikaciju velikih brzina između dve fiksne tačke na rastojanjima do nekoliko kilometara.

U poređenju sa radio-frekventnim (RF) sistemima, FSO linkovi raspolažu izuzetno širokim optičkim propusnim opsegom, što omogućava znatno veće brzine prenosa podataka. Zbog toga su atraktivni za široku lepezu primena, uključujući proširenje metro-mreža (MAN), povezivanje lokalnih mreža (LAN-to-LAN), rezervne optičke linkove, bežični backhaul za mobilne mreže, obnavljanje komunikacija nakon katastrofa, prenos HDTV i medicinskih slika/video zapisa, bežični video-nadzor i monitoring, kao i kvantnu distribuciju ključeva.

Uprkos značajnim prednostima FSO tehnologije i brojnim mogućnostima primene, njena široka upotreba ograničena je relativno slabom pouzdanošću veze, posebno na većim rastojanjima, usled fedinga izazvanog atmosferskom turbulencijom i osetljivosti na vremenske uslove. Tokom poslednjih pet godina primećen je snažan porast interesovanja za FSO istraživanja radi prevazilaženja ovih ključnih tehničkih izazova.

Nekoliko inovativnih koncepata fizičkog sloja, prvobitno razvijenih u RF sistemima kao što su MIMO komunikacija (multiple-input multiple-output), kooperativni diverzitet i adaptivni prenos, nedavno je istraživano u kontekstu projektovanja FSO sistema nove generacije.

Širenje bežičnih komunikacija predstavlja jedan od najznačajnijih fenomena u istoriji tehnologije. Bežični uređaji i tehnologije postali su sveprisutni mnogo brže nego što je iko mogao da zamisli pre trideset godina, a nastaviće da budu ključni element savremenog društva u doglednoj budućnosti. Danas se termin „bežično” gotovo sinonimno koristi za radio-frekventne (RF) tehnologije, kao rezultat široke primene i upotrebe bežičnih RF uređaja i sistema. Međutim, RF opseg elektromagnetnog spektra je suštinski ograničen po kapacitetu i skup, budući da su većina njegovih podopsega ekskluzivno licencirani. Sa sve većom popularnošću bežičnih komunikacija koje zahtevaju veliki protok podataka, potražnja za RF spektrom prevazilazi ponudu i došlo je vreme da se ozbiljno razmotre druge održive opcije za bežične komunikacije koje koriste više delove elektromagnetnog spektra.

Optička bežična komunikacija (OWC) odnosi se na prenos u neusmerenim propagacionim medijima korišćenjem optičkih nosilaca, odnosno vidljivog, infracrvenog (IR) i ultraljubičastog (UV) opsega. Signalizacija putem vatri na uzvišenjima, dima, brodskih zastava i semaforiskog telegrafa može se smatrati istorijskim oblicima OWC. Sunčeva svetlost je takođe korišćena za prenos signala na velike udaljenosti još od najranijih vremena. Najranija upotreba sunčeve svetlosti u komunikacione svrhe pripisuje se starim Grcima i Rimljanima, koji su koristili svoje ispolirane štitove za slanje signala reflektovanjem sunčeve svetlosti tokom bitaka. Godine 1810. Karl Fridrih Gauss izumeo je heliofon, koji je podrazumevao par ogledala za usmeravanje kontrolisanog snopa sunčeve svetlosti ka udaljenoj stanici. Iako je originalni heliofon bio namenjen geodetskim merenjima, intenzivno se koristio u vojne svrhe tokom

kasnog 19. i ranog 20. veka. Godine 1880. Aleksandar Grejam Bel izumeo je fotofon, poznat kao prvi bežični telefonski sistem na svetu. Radio je na principu vibracija koje je ljudski glas izazivao na ogledalu predajnika. Te vibracije su se reflektovale i projektovale sunčevom svetlošću, a zatim ponovo pretvarale u glas na prijemniku. Bel je fotofon nazivao „najvećim izumom koji je ikada napravio, većim od telefona”, ali se nikada nije komercijalno pojavio. Ipak, vojno interesovanje za fotofon je nastavilo da postoji. Na primer, 1935. godine nemačka vojska razvila je fotofon u kojem je volframova vlaknasta lampa sa IR filterom za prenos korišćena kao izvor svetlosti. Takođe, američke i nemačke vojne laboratorije nastavile su razvoj visokopritiskih lučnih lampi za optičku komunikaciju sve do 1950-ih [1].

U savremenom smislu, OWC koristi lasere ili svetleće diode (LED) kao predajnike. Godine 1962, MIT Lincoln laboratorije izgradile su eksperimentalnu OWC vezu koristeći svetleću GaAs diodu i uspešno prenele TV signal na udaljenost od 30 milja. Nakon pronalaska lasera, OWC je zamišljena kao glavna oblast primene lasera i sprovedeni su brojni eksperimenti. Samo nekoliko meseci nakon prve javne objave o funkcionalnom laseru u julu 1960, naučnici iz Bell laboratorija uspeali su da prenesu signale na udaljenost od 25 milja koristeći rubinski laser [2]. Međutim, rezultati su generalno bili razočaravajući zbog velike divergencije laserskih snopova i nemogućnosti da se prevaziđu atmosferski uticaji. Sa razvojem optičkih vlakana sa malim gubicima tokom 1970-ih, ona su postala očigledan izbor za optički prenos na velike udaljenosti, čime je fokus preusmeren sa OWC sistema.

Tokom decenija, interesovanje za OWC ostalo je uglavnom ograničeno na prikrivene vojne primene i svemirske primene, uključujući veze između satelita i veze u dubokom svemiru. Masovna zastupljenost OWC tehnologija na tržištu do sada je bila ograničena, izuzev IrDA standarda, koji je postao veoma uspešno bežično rešenje za prenos na kratkim rastojanjima. Sa rastućim brojem kompanija koje poslednjih godina nude terestričke OWC veze i pojavom proizvoda zasnovanih na vidljivoj svetlosti (VLC), tržište je počelo da pokazuje potencijal za budući razvoj. Razvoj novih i efikasnih bežičnih tehnologija za različite prenosne veze ključan je za izgradnju budućih heterogenih komunikacionih mreža koje treba da podrže širok spektar usluga sa različitim obrascima saobraćaja i da ispune sve veće zahteve za većim brzinama prenosa podataka.

Različite varijante OWC tehnologija mogu se potencijalno primeniti u širokom spektru komunikacionih aplikacija, od optičkih interkonekcija unutar integrisanih kola, preko spoljašnjih veza između zgrada, pa sve do satelitskih komunikacija. Na osnovu prenosnog rastojanja, OWC se može proučavati u pet kategorija:

- 1) Ultrakratkog dometa, npr. komunikacije čip-na-čip u naslaganim ili gusto pakovanim višečipovskim modulima;
- 2) Kratkog dometa, npr. WBAN i WPAN aplikacije, komunikacije pod vodom;
- 3) Srednjeg dometa, npr. unutrašnje IR i VLC veze za WLAN sisteme, komunikacije između vozila i između vozila i infrastrukture;
- 4) Dugog dometa, veze između zgrada;
- 5) Ultradugog dometa, veze između satelita, veze u dubokom svemiru [3].

## 1.1. Prednosti i primene FSO tehnologije

FSO sistemi se koriste za komunikaciju visokih brzina između dve fiksne tačke na rastojanjima do nekoliko kilometara. U poređenju sa RF sistemima, FSO veza ima veoma veliki optički opseg, što omogućava znatno veće brzine prenosa. Terestrički OWC proizvodi sa brzinama prenosa od 10 Gbps već su dostupni na tržištu, a brzine savremenih eksperimentalnih OWC sistema takmiče se sa optičkim vlaknima. FSO sistemi koriste veoma uske laserske zrake. Ovo prostorno ograničenje obezbeđuje visok faktor ponovne upotrebe, inherentnu sigurnost i otpornost na elektromagnetne smetnje. Pored toga, frekvencije koje koristi FSO tehnologija nalaze se iznad 300 GHz, a taj opseg je globalno nelicenciran. Stoga FSO sistemi ne zahtevaju naknade za licence. Takođe se lako instaliraju i mogu se ponovo premestiti bez troškova postavljanja optičkih vlakana [3], [4], [5].

FSO sistemi su u početku privukli pažnju kao efikasno rešenje za problem „poslednje milje“, kako bi se premostio jaz između krajnjeg korisnika i već postojeće optičke infrastrukture. Telekom operateri već su značajno ulagali u proširenje kapaciteta svojih optičkih mreža. Da bi se taj postojeći kapacitet u potpunosti iskoristio i time ostvario prihod, ovo proširenje u okosnici mreže mora biti praćeno odgovarajućim rastom na njenoj ivici, gde krajnji korisnici pristupaju sistemu.

Povezivanje poslovnih objekata i kampusa: Današnje kompanije i kampusi škola/univerziteta suočavaju se sa heterogenim mrežnim saobraćajem (npr. glas, podaci, faks, multimedija) koji opterećuje tipične veze. FSO sistemi mogu povezivati više zgrada u korporativnim i kampus mrežama, obezbeđujući ultra-visoke brzine bez troškova posvećenih optičkih veza.

Video-nadzor i monitoring: Kamere za nadzor široko se koriste u komercijalnim, policijskim, bezbednosnim i vojnim aplikacijama. Bežični video je zgodan za instalaciju, ali konvencionalne bežične tehnologije ne mogu da obezbede protok potreban za video-strimove. FSO tehnologija predstavlja moćnu alternativu za prenos video-zapisa visokog kvaliteta.

Backhaul za mobilne mreže: Žične veze kao što su T1/E1 iznajmljene linije i mikrotalasne veze obično se koriste između baznih stanica i mobilnog komutacionog centra u mobilnim sistemima. Porast broja servisa koji zahtevaju veliku propusnost sada zahteva uvođenje tehnologija poput FSO koje omogućavaju mnogo veći protok.

Redundantna veza i oporavak nakon katastrofa: Prirodne katastrofe, teroristički napadi i hitne situacije zahtevaju fleksibilne i inovativne odgovore. Privremene FSO veze mogu se instalirati u roku od nekoliko sati u situacijama u kojima je lokalna infrastruktura oštećena ili nepouzdana. Tragičan primer efikasnosti FSO sistema kao rezervne veze uočen je nakon terorističkih napada 11. septembra u Njujorku, kada su FSO veze brzo instalirane kako bi se pomoglo finansijskim korporacijama koje su ostale bez zemljišnih veza.

Bezbednost: Današnji kriptosistemi obezbeđuju samo računarsku bezbednost u okviru ograničenja konvencionalne računarske snage, a razvoj kvantnih računara mogao bi učiniti elektronski novac bezvrednim. Kvantna kriptografija, zasnovana na temeljnim zakonima fizike, nudi radikalno drugačije rešenje za enkripciju i obećava безусловnu bezbednost. Sistemi kvantne kriptografije se obično koriste zajedno sa optičkom infrastrukturom. FSO veze predstavljaju svestranu alternativu kada je postavljanje optičkih vlakana skupo i/ili neizvodljivo.

Emisije i emitovanje: Kod prenosa uživo, kao što su sportski događaji, ceremonije ili televizijski prenosi iz udaljenih područja i ratnih zona, signali sa kamera moraju biti poslani vozilu za emitovanje koje je povezano sa centralom putem satelitske uplink veze. Neophodan visokokvalitetni prenos između kamera i vozila može se ostvariti FSO vezom. FSO linkovi mogu zadovoljiti i najzahtevnije potrebe protoka u savremenim HDTV aplikacijama.

Trenutno postoji nekoliko kompanija koje rade na projektovanju i proizvodnji FSO sistema kao rešenja za spoljašnji bežični prenos, među kojima su Canon (Japan), Cassidian (Nemačka), fSONA (Kanada), GeoDesy (Mađarska), Laser ITC (Rusija), LightPointe Communications (SAD), MRV (SAD), Northern Hi-Tec (UK), Novasol (SAD), Omnitek (Turska), Plaintree Systems (Kanada) i Wireless Excellence (UK).

Optička snaga emitovana sa predajnika podložna je različitim uticajima pre nego što stigne do prijemnika. Oni obuhvataju sistemske gubitke, geometrijske gubitke, gubitke usled neporavnanja, atmosferske gubitke, feding izazvan atmosferskom turbulencijom i ambijentalni šum. Sistemski gubici u velikoj meri zavise od konstrukcionih specifikacija i obično ih definišu proizvođači.

## **1.2. Geometrijski gubici i gubici usled neporavnanja**

Geometrijski gubici nastaju usled divergencije snopa tokom propagacije kroz atmosferu. Oni se mogu izračunati na osnovu ugla divergencije, rastojanja veze i prečnika prijemne sočivne aperture. Pri izračunavanju geometrijskih gubitaka važan faktor je model propagacije optičkog talasa. Za horizontalne FSO transmisije, dobro aproksimiranje predstavlja Gaussian snop [3]. Kada Gaussian snop ima relativno veliku divergenciju, njegova statistička svojstva postaju slična slučaju tačkastog izvora. U takvim situacijama mogu se efikasno primeniti aproksimacije ravanskog ili sfernog talasa.

Stepen divergencije snopa takođe utiče na poravnanje predajnik–prijemnik i praćenje snopa na prijemnom kraju. Neporavnanje se u praksi najčešće javlja usled lutanja snopa, pomeranja objekata ili grešaka u sistemu za praćenje. Lutanje snopa rezultat je nehomogenosti velikih atmosferskih turbulencija, koje izazivaju nasumična skretanja optičkog snopa, pa se tako snop udaljava od svoje prvobitne putanje. Ovaj fenomen posebno je izražen kod veza na velikim rastojanjima. Sa druge strane, pomeranje objekata posledica je različitih faktora, uključujući termičku ekspanziju, dejstvo vetra, manje zemljotrese i vibracije. Zbog uske širine emitovanog snopa i obično malog prijemnog vidnog polja (FOV), pomeranje objekata može efikasno izazvati prekid komunikacije [7]-[13].

Kada se na prijemnoj strani ne koristi mehanizam za praćenje, što je tipično za osnovne FSO veze sa dometom od nekoliko stotina metara, gubitak usled neporavnanja može se smanjiti povećanjem divergencije snopa na predajniku. Dalje je predloženo korišćenje prostorno delimično koherentnih Gaussian snopova kako bi se ublažile greške usmeravanja izazvane neporavnanjem. Radijus predajnog snopa se može optimizovati kako bi se maksimizirao prosečan kapacitet veze i minimizirala verovatnoća prekida, čime se direktno unapređuju performanse FSO sistema. Predloženo je korišćenje promenljivih talasnih dužina pomoću kvantnih kaskadnih lasera kako bi se ublažio efekat pomeranja objekata.

Za velike udaljenosti (tj. više od jednog kilometra), budući da treba koristiti užu snop kako bi se izbegli veliki geometrijski gubici, postaje neophodno koristiti automatsko usmeravanje i praćenje na prijemniku kako bi se uklonili ili smanjili efekti grešaka usmeravanja. Statističko modelovanje grešaka usmeravanja i njihovog uticaja na performanse sistema proučavano je u dostupnoj literaturi. Pod pretpostavkom da statistika pomeranja objekata sledi nezavisnu Gaussian raspodelu za elevaciju i horizontalne pravce, radijalni ugao greške usmeravanja modeluje se pomoću Relej distribucije.

### 1.3. Atmosferski gubici

Fizika i svojstva prenosa kroz atmosferu veoma su slični u vidljivom i blisko-infracrvenom (near-IR) delu spektra. Stoga se vidljivost može koristiti za karakterizaciju čestica koje apsorbuju ili raspršuju svetlost i za near-IR zračenja. Čestice koje utiču na vidljivost uključuju kišu, sneg, maglu, ali i zagađenje, prašinu, aerosole, dim itd. One delimično apsorbuju energiju laserske svetlosti, izazivajući prigušenje optičke snage. U blisko-IR spektru apsorpcija se pretežno dešava zbog vodenih čestica [14]. One izazivaju rasejanje svetlosti, što znači odstupanje upadnog svetla od njegove početne putanje, izazivajući prostorno, uglovno i vremensko širenje.

Za kišu i sneg, veličina čestica je mnogo veća od talasne dužine, pa je FSO prenos relativno neometan. U slučajevima kada se FSO sistemi postavljaju u urbanim sredinama na rastojanjima manjim od 1 km, tipične vrednosti prigušenja zbog kiše iznose oko 3 dB/km. Samo kod veoma obilnih padavina prigušenje može postati problem kod veza koje prelaze tipično gradsko rastojanje. Za sneg, prigušenje može biti ozbiljnije nego kod kiše zbog znatno većih kapljica. U stvari, uticaj slabog snega na snop svetlosti približno je između slabih kiša i umerene magle.

Kada je prečnik čestica približno jednake veličine kao talasna dužina, koeficijent rasejanja postaje veoma visok. Zbog toga su najštetniji uslovi za prenos magla i izmaglice, jer se sastoje od sitnih čestica sa radijusima bliskim blisko-IR talasnim dužinama. Čak i umeren uslov magle može znatno prigušiti IR signale na kraćim rastojanjima. Eksperimentalna ispitivanja su dala gubitak prenosa od oko 90% na rastojanju od 50 m u umerenoj magli. Modelovanje kanala za FSO komunikaciju kroz maglu proučavano je [15]. Eksperimentalna merenja u [16] pokazala su da je atmosfersko prigušenje gotovo nezavisno od talasne dužine između 785 i 1550 nm za maglu, ali zavisi od talasne dužine u uslovima izmaglice.

Čestice izmaglice imaju veličinu između 0,01 i 1  $\mu\text{m}$ , dok kapljice magle imaju radijus između 1 i 20  $\mu\text{m}$ , pa snop svetlosti trpi manje prigušenje u uslovima izmaglice. Takođe, različite veličine rasejanja dovode do zavisnosti prigušenja od talasne dužine u uslovima izmaglice i guste magle. Zanimljivo je da na RF bežične tehnologije koje koriste frekvencije iznad približno 10 GHz negativno utiču kiša, dok magla ima mali uticaj. Ovo motiviše dizajn hibridnih RF/FSO sistema.

Razumevanje i kvantifikacija atmosferskih gubitaka predstavlja ključni korak u optimizaciji performansi FSO i hibridnih RF/FSO sistema, jer omogućava izbor odgovarajućih sistemskih parametara i adaptivnih mehanizama prenosa.

Važan faktor u modelovanju FSO kanala je koherentna širina opsega kanala, definisana kao obrnuta vrednost rasejanja kašnjenja kanala [73]. Dok u čistim vremenskim uslovima FSO kanal ima zanemarljivo rasejanje, magla, umereni oblaci i kiša mogu izazvati vremensko širenje optičkog pulsa. Ovo dovodi do međusimbolne interferencije (ISI) i pogoršava performanse sistema. Međutim, s obzirom na tipične brzine prenosa FSO veza, raspršenje kašnjenja kanala zbog rasejanja snopa izazvanog maglom ili kišom praktično je zanemarljivo. To je prikazano u [17], gde su numeričke simulacije zasnovane na Monte Carlo metodi korišćene za kvantifikaciju RMS rasejanja kanala. Posebno, RMS rasejanja zbog kiše u realnim uslovima manje je od 10 pikosekundi za vezu od 1 km. Takođe, u umerenoj i gustoj magli, rasejanje je ograničeno na 50 pikosekundi [75]. Kanal se može efikasno smatrati frekventno ne selektivnim, bez uvođenja ISI.

#### 1.4. Fading izazvan atmosferskom turbulencijom

U uslovima čiste atmosfere, atmosferski gubici povezani sa vidljivošću su zanemarljivi, ali se javlja drugi nepovoljan efekat poznat kao fluktuacija ili fading. Nehomogenosti u temperaturi i pritisku atmosfere, uzrokovane solarnim zagrevanjem i vetrom, dovode do promena indeksa prelamanja vazduha duž putanje prenosa. Nastala atmosferska turbulencija izaziva nasumične fluktuacije kako amplitude, tako i faze primljenog signala, tj. fading kanala. To rezultira značajnim pogoršanjem performansi sistema, posebno kod veza na velikim udaljenostima od nekoliko kilometara.

Atmosferska turbulencija se uglavnom karakteriše sa tri parametra: unutrašnjom i spoljašnjom skalom turbulencije, označenim kao  $l_0$  i  $L_0$ , i parametrom indeksa prelamanja  $C_n^2$ , često nazivanim jačina turbulencije. Prema teoriji Kolmogorova,  $L_0$  predstavlja najveću veličinu ćelije pre nego što energija bude ubačena u oblast, dok  $l_0$  odgovara najmanjoj ćeliji pre nego što se energija pretvori u toplotu. Distribucija energije ćelija turbulencije može se opisati prostornim spektralnim raspodelama fluktuacija indeksa prelamanja. Kolmogorovljev i Tarasaccijev model su dva spektra koja se obično razmatraju.

Za režime od umerene do jake turbulencije koristi se modifikovani spektar uzimajući u obzir dva prostorna filtera koja uklanjaju doprinos turbulencije ćelija veličine između koherentnog radijusa i diska rasejanja. Obično se spoljašnja skala aproksimira kao  $L_0 \rightarrow \infty$ , jer u praksi ima zanemarljiv uticaj na turbulenciju [77]. S druge strane, unutrašnja skala  $l_0$  ima značajan uticaj na turbulenciju, posebno veće vrednosti  $l_0$  rezultuju većom varijansom intenziteta u režimu jake turbulencije.

Strukturni parametar prelamanja  $C_n^2$  zavisi od visine i veći je na nižim visinama zbog značajnijeg prenosa toplote između vazduha i površine. Takođe zavisi i od rastojanja veze. Međutim, u zemaljskim FSO sistemima obično se pretpostavlja uslovi homogene turbulencije i pretpostavlja se da  $C_n^2$  ne zavisi od rastojanja. Tipične vrednosti  $C_n^2$  variraju od  $10^{-17}$  do  $10^{-13}$  m. Njihove varijacije mogu biti izuzetno značajne tokom dana na datoj lokaciji i mogu dostići četiri reda veličine. S druge strane, noću postaje gotovo konstantan, a njegova zavisnost od visine opada u poređenju sa dnevom. Blizu površine,  $C_n^2$  dostiže svoj maksimum sredinom dana, dok su minimalne vrednosti pri izlasku i zalasku sunca.

Važno pitanje je kako meteorološki uslovi utiču na strukturni parametar prelamanja. Izvršena merenja pokazuju da fluktuacije zavise od aerosola, posebno kada je njihov ukupan presek relativno velik.

Da bi se kvantifikovale fluktuacije izazvane atmosferskom turbulencijom, u literaturi se često koristi SI, definisan kao:

$$\sigma_I^2 = \frac{E\{I^2\}}{E\{I\}^2} - 1, \quad (1.4.1)$$

gde je  $I$  intenzitet primljenog optičkog talasa, a  $E\{\cdot\}$  označava očekivanu vrednost.

Dok SI pruža karakterizaciju jačine turbulencije na osnovu prvog i drugog momenta intenziteta, potpuna statistička karakterizacija je dodatno istražena u literaturi i predloženo je nekoliko statističkih modela kanala za raspodelu fedinga izazvanog turbulencijom u FSO sistemima.

Izbor odgovarajućeg statističkog modela fedinga ima direktan uticaj na optimizaciju performansi FSO i hibridnih RF/FSO sistema, jer omogućava precizniju analitičku evaluaciju i prilagođavanje sistema konkretnim uslovima propagacije.

Najšire prihvaćen model u uslovima slabe turbulencije je log-normal model. Ovaj model je izveden na osnovu Rytov-ove aproksimacije prvog reda. On se primenjuje za FSO sisteme postavljene na relativno kratkim udaljenostima u urbanim sredinama.

Međutim, eksperimentalni podaci za duže putanje prenosa pokazali su da log-normal model nije adekvatan za režime umerenih do jakih turbulencija.

Negativna eksponencijalna raspodela je granična raspodela intenziteta u režimu saturacije i koristi se za razmatranje uslova jake turbulencije. Rayleigh raspodela korišćena je za modelovanje graničnih slučajeva jake atmosferske turbulencije. K-raspodela je prvobitno predložena kao model za režim jake turbulencije [18].

Funkcija gustine verovatnoće (PDF) primljenog intenziteta  $I$  prema ovom modelu data je kao:

$$p(I) = \frac{2\alpha}{\Gamma(\alpha)} (\alpha I)^{\frac{\alpha-1}{2}} K_{\alpha-1}(2\sqrt{\alpha I}), \quad I > 0, \alpha > 0 \quad (1.4.2)$$

gde je  $K_m(\cdot)$  modifikovana Besselova funkcija drugog tipa i reda  $m$ , a parametar  $\alpha$  određuje indeks fluktuacija (SI) prema relaciji:

$$\sigma_I^2 = 1 + \frac{2}{\alpha}. \quad (1.4.3)$$

Uloženi su značajni naponi da se uspostavi univerzalni model koji bi bio primenljiv za bilo koji tip turbulencije. Ti naponi se uglavnom oslanjaju na korišćenje dvostruko stohastičke teorije verovatniće, u kojoj se pretpostavlja da velike i male turbulencije izazivaju refraktivne i difrakcione efekte na svetlosni snop.

Još jedan stohastički model je Gamma-Gamma raspodela [18], koja je stekla široko prihvatanje u aktuelnoj literaturi. U Gamma-Gamma modelu, primljeni intenzitet  $I$  se smatra proizvodom dve nezavisne Gamma slučajne promenljive  $X$  i  $Y$ , koje predstavljaju fluktuacije izazvane velikim, odnosno malim turbulencijama. Funkcija gustine verovatnoće (PDF) intenziteta  $I$  je:

$$p(I) = \frac{2(ab)^{(a+b)/2}}{\Gamma(a)\Gamma(b)} I^{(a+b)/2-1} K_{a-b}(2\sqrt{abI}), I > 0, \quad (1.4.4)$$

gde parametri  $a$  i  $b$  predstavljaju efektivne brojeve velikih i malih turbulencija, a  $\Gamma(\cdot)$  je Gamma funkcija.

Takođe, indeks fluktuacija (SI) prema ovom modelu dat je kao:

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab}. \quad (1.4.5)$$

Double Weibull-ova raspodela je još jedan dvostruko stohastički model za kanale atmosferske turbulencije, koji je pokazao veću preciznost u poređenju sa Gamma-Gamma modelom, posebno u slučajevima umerenih i jakih turbulencija [19]. M-raspodela je još jedan savremeni model koji uključuje većinu prethodno predloženih statističkih modela, npr. K i Gamma-Gamma, kao specijalne slučajeve [20]. Jedan od najnovijih pokušaja modelovanja atmosferske turbulencije zasnovan na dvostruko stokastičkoj teoriji je prikazan u [21], koji predlaže Double Generalized Gamma (Double GG) model, koji je blago precizniji od Double Weibull. Superiornost Double GG u odnosu na Gamma-Gamma je posebno vidljiva kod jake turbulencije kada se uzima u obzir model sfernog talasa, kao i u režimu umerene turbulencije kada se razmatra model ravnog talasa.

Pored modelovanja fluktuacija intenziteta, važna tačka je i vremenska karakterizacija turbulencije. Kako se u FSO sistemima radi o vrlo visokim brzinama prenosa reda veličine nekoliko desetina Mbps do nekoliko Gbps, koeficijent fadginga kanala ostaje konstantan tokom hiljada pa čak i miliona uzastopnih bitova. Stoga se za FSO linkove primenjuje kvazi-statički model feding kanala.

## 1.5. Pozadinsko zračenje

Pozadinsko zračenje, takođe nazvano pozadinski šum ili ambijentalni šum, može degradirati performanse FSO sistema. Pored korisnog signala, sočivo prijemnika takođe prikuplja određeno neželjeno pozadinsko zračenje koje može uključivati direktnu sunčevu svetlost, reflektovanu sunčevu svetlost ili rasejanu sunčevu svetlost od hidrometeorih ili drugih objekata. Njihov efekat može se smanjiti korišćenjem uskog spektralnog propusnog filtera i prostornog filtriranja pre foto-detekcije. Ove tehnike predstavljaju osnovne mehanizme za optimizaciju odnosa signal-šum i ukupnih performansi FSO sistema u prisustvu ambijentalnog zračenja.

Neznatan pozadinski šum može pasti unutar prostorne i frekventne zone detektora, što može ograničiti performanse sistema izazivajući promenljiv offset u konvertovanom električnom signalu. To dovodi do smanjenog odnosa signal-šum (SNR) i efektivne osetljivosti prijemnika. U nekim slučajevima, pozadinsko zračenje može čak izazvati prekide veze zbog saturacije prijemnika. Zbog toga pravilno dimenzionisanje optičkog prijemnika i izbor parametara detekcije imaju ključnu ulogu u optimizaciji performansi sistema.

U slučaju difrakciono-limitiranog prijemnika, nivo pozadinskog šuma koji se prima je nezavisan od veličine otvora prijemnika. U praksi, FSO prijemnik koristi sočivo i foto-detektor

određene veličine, te ima polje vidljivosti (FOV) mnogo veće od difrakcionog limita. Kod prijemnika sa fiksnim FOV, snaga pozadinskog šuma proporcionalna je površini otvora prijemnika. Eksperimentalna merenja pokazuju da dok je primljena optička snaga signala obično reda veličine desetina do stotina  $\mu\text{W}$ , snaga pozadinskog zračenja je u rasponu od nekoliko  $\mu\text{W}$  za rasejanu sunčevu svetlost kroz oblake ili maglu, oko stotina  $\mu\text{W}$  za reflektovanu svetlost, i do oko 10 mW za direktnu sunčevu svetlost [3].

Pozadinski šum se može statistički modelovati Poasonovim slučajnim procesom. Kada je nivo pozadinskog zračenja relativno visok, prosečan broj odgovarajućih primljenih fotona dovoljno je velik da se Poasonova raspodela može aproksimirati Gaussovom raspodelom. Doprinosi interakcije signala sa pozadinskim zračenjima zbog nelinearne karakteristike foto-detektora praktično se mogu zanemariti, i može se koristiti Gaussov model nezavisan od signala.

## 1.6. FSO prijemnik i predajnik

U FSO komunikacionom sistemu, izvor generiše informacione talasne oblike koji se zatim modeluju na optički nosač. Generisano optičko polje se emituje kroz atmosferu ka udaljenoj destinaciji. Na prijemniku, polje se optički prikuplja, a foto-detektor pretvara optičko polje u električnu struju. Prijemnik obrađuje detektovanu električnu struju kako bi rekonstruisao originalno prenetu informaciju.

Trenutni FSO sistemi obično rade u bliskom infracrvenom (near-IR) spektru, tj. u opsegu talasnih dužina od 750 do 1600 nm. Iako se atmosfera (u jasnim uslovima) smatra visoko prozirnou u ovom opsegu talasnih dužina, određene talasne dužine mogu doživeti značajno prigušenje zbog prisustva različitih molekula u atmosferi. Za neka specijalna talasna prozorska područja, locirana oko četiri specifične talasne dužine od 850, 1060, 1250 i 1550 nm, prigušenje je manje od 0,2 dB/km. Zanimljivo je da talasne dužine 850 i 1550 nm korespondiraju standardnim talasnim prozorima optičkih komunikacionih sistema. Zbog toga većina komercijalno dostupnih FSO sistema radi u ovim prozorima kako bi koristila odgovarajuće standardne komponente. Druge talasne dužine, kao što su 10  $\mu\text{m}$  i UV talasne dužine, razmatrane su za FSO sisteme. Talasna dužina od 10  $\mu\text{m}$  poznata je po boljim karakteristikama prenosa kroz maglu. UV prenosi su, s druge strane, otporniji na greške u usmeravanju i blokadu snopa, i imaju manju osetljivost na sunčevu svetlost i druge pozadinske smetnje.

Predajnik se sastoji od optičkog izvora, modulatora, optičkog pojačavača (ako je potrebno) i optike za formiranje snopa. Pre modulacije se opcionalno može koristiti i kanalno kodovanje. Podaci iz izvora informacija se prvo kodiraju, a zatim modulišu. Modulirani laserski snop potom prolazi kroz optički pojačavač kako bi se povećala optička jačina. Svetlosni snop se prikuplja i ponovo fokusira pomoću optike za formiranje snopa pre samog emitovanja.

Tipičan optički izvor u FSO sistemima je poluprovodnički laserski diodni izvor (LD), iako neki proizvođači koriste LED diode velike snage sa kolimatorima snopa. Optički izvor treba da obezbedi relativno visoku optičku snagu preko širokog temperaturnog opsega, da ima dug srednji interval između kvarova (MTBF), a komponente treba da budu kompaktne i sa niskom potrošnjom energije. Zbog toga se uglavnom koriste VCSEL laseri za rad oko 850 nm, dok se Fabri-Pero (FP) i DFB laseri koriste za rad na 1550 nm.

Važan faktor kod laserskih predajnika je bezbednost. Primarna briga je potencijalna izloženost oka laserskom snopu. Razvijeni su standardi koji ograničavaju emitovanu optičku snagu, zasnovani na parametrima kao što su talasna dužina lasera i prosečna i maksimalna snaga prenosa. Samo određene talasne dužine u bliskom IR opsegu mogu prodrati do mrežnjače sa dovoljnim intenzitetom da izazovu oštećenje. Druge talasne dužine se apsorbiraju u prednjem delu oka pre nego što energija stigne do mrežnjače. Koeficijent apsorpcije u prednjem delu oka je znatno veći za duže talasne dužine ( $>1400$  nm), zbog čega je dozvoljena snaga prenosa za lasere na 1550 nm veća, što ih čini pogodnim za prenos na veće udaljenosti.

FSO sistemi se mogu široko klasifikovati u dve kategorije na osnovu tipa detekcije: nekoherentni i koherentni.

U koherentnim sistemima mogu se koristiti amplitudna, frekvencijska ili fazna modulacija. Na strani prijemnika, primljeno polje se optički meša sa lokalno generisanim optičkim poljem pre foto-detekcije.

U nekoherentnim sistemima, intenzitet emitovanog svetla se koristi za prenos informacija. Na strani prijemnika, foto-detektor direktno detektuje promene u intenzitetu svetla bez potrebe za lokalnim oscilatorom. Ovi sistemi su poznati i kao IM/DD sistemi (intensity-modulation direct-detection). Iako koherentni sistemi nude bolje performanse u smislu odbacivanja pozadinskog šuma, ublažavanja fluktuacija izazvanih turbulencijom i veće osetljivosti prijemnika, IM/DD sistemi se obično koriste u zemaljskim FSO linkovima zbog jednostavnosti i nižih troškova.

Prednji deo prijemnika u IM/DD FSO sistemima sastoji se od optičkih filtera i sočiva, koji prikupljaju i fokusiraju primljeni snop na fotodiodu (PD). Izlazni tok PD-a se zatim pretvara u napon pomoću trans-impedansnog kola, obično niskosumnog Op-Amp-a sa otpornikom opterećenja. Vrednost otpornika se određuje na osnovu brzine prenosa, dinamičkog opsega konvertovanog električnog signala, generisanog termalnog šuma prijemnika i impedansnog prilagođavanja sa ostalim delovima prijemnika. Tipična vrednost iznosi nekoliko stotina  $k\Omega$  u primeni u dubokom svemiru, dok je za visoko-brze zemaljske FSO linkove oko 50–100  $\Omega$ . Izlaz trans-impedansnog kola se zatim prolazi kroz low-pass filter kako bi se ograničili nivoi termalnog i pozadinskog šuma.

Što se tiče PD-a, u komercijalnim FSO sistemima uglavnom se koriste poluprovodnički uređaji, jer imaju dobru kvantnu efikasnost za uobičajene talasne dužine. Materijal spoja može biti Si, InGaAs ili Ge, koji su primarno osetljivi na uobičajene talasne dužine i imaju izuzetno kratak tranzitni vremenski interval, što omogućava visok pojas i brze detektore. Si PD-ovi imaju maksimalnu osetljivost oko 850 nm, dok su InGaAs PD-ovi pogodni za rad na dužim talasnim dužinama oko 1550 nm.

Čvrsti PD može biti P-i-N (PIN) dioda ili avalanche fotodioda (APD). PIN diode se obično koriste u FSO sistemima koji rade na udaljenostima do nekoliko kilometara. Glavni nedostatak PIN PD-ova je što performanse prijemnika postaju vrlo ograničene termalnim šumom. Za dugolinijske veze uglavnom se koriste APD-ovi, koji obezbeđuju pojačanje struje zahvaljujući procesu sudarne jonizacije. Nedostatak APD-ova je šum na njihovom izlazu, koji modeluje nasumični fenomen generisanja sekundarnih foto-elektrona. Zbog toga se pojačanje APD-a obično optimizuje u odnosu na primljenu snagu signala kako bi se maksimizirao prijemni SNR. Prednost APD-a dolazi uz cenu povećane složenosti implementacije. Konkretno,

potrebna je relativno visoka voltaža za obrnuto polarizovanje APD-a, što zahteva upotrebu specijalnih elektronskih kola. Ovo takođe rezultuje povećanjem potrošnje energije prijemnika.

Upotreba optičkih pred-pojačivača je takođe predložena u dugolinijskim FSO linkovima radi poboljšanja performansi. Na talasnoj dužini od 1550 nm, Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) je dobar izbor. Semiconductor optical amplifiers (SOA) se takođe mogu koristiti za različite talasne dužine (uključujući 1550 nm). Međutim, pored problema povezanih sa povezivanjem sa prijemnom optikom, posebno pri korišćenju multimodalnog vlakna, optički pojačavač uvodi šum od pojačane spontanne emisije (ASE), koja se obično modeluje kao aditivni beli Gaussov šum (AWGN), što može degradirati performanse prijemnika. Konkretno, u prijemnicima sa direktnom detekcijom, optički pred-pojačivač može degradirati SNR za najmanje 3 dB. Kada su performanse prijemnika ograničene elektronskim šumom, optička pred-pojačavanja mogu biti veoma korisna. Upotreba EDFA ili SOA kada je pojačanje zasićeno ulaznim signalom takođe je predložena za smanjenje efekta fluktuacija u režimu slabe turbulencije [3].

Pravilna primena optičkih pred-pojačivača predstavlja kompromis između povećanja osetljivosti i degradacije SNR-a, te zahteva pažljivu optimizaciju u zavisnosti od uslova propagacije.

Izvori šuma na prijemniku se sastoje od tamne struje fotodetektora (PD), šuma predajnika, termalnog šuma i šumova foto-struje (koji nastaju usled ulaznog signala i/ili pozadinskog zračenja). Tamna struja PD-a se za većinu praktičnih slučajeva može zanemariti. Šum predajnika potiče od nestabilnosti intenziteta lasera i rezultujućih fluktuacija foto-struje na prijemniku, što se modeluje korišćenjem tzv. relativnog šuma intenziteta lasera (RIN). Međutim, RIN obično ima zanemariv uticaj na performanse prijemnika.

Ako se nivo pozadinskog osvetljenja može zanemariti, dva glavna izvora šuma koja utiču na prijemnik su termalni i šum foto-struje. Prijemnik zasnovan na PIN fotodetektoru obično je ograničen termalnim šumom, dok su prijemnici zasnovani na APD-u uglavnom ograničeni šumom foto-struje, osim za relativno male vrednosti otpornika opterećenja, kada termalni šum takođe utiče na performance.

Termalni šum potiče iz elektronskih kola prijemnika, pre svega iz otpornika opterećenja. Šum foto-struje, takođe poznat kao kvantni šum, nastaje zbog nasumičnih fluktuacija struje kroz PD i modeluje se Poasonovim procesom. U slučaju korišćenja PIN PD-a, ako je srednji broj apsorbovanih fotona dovoljno velik, šum foto-struje se može približno modelovati Gaussovim procesom. U većini FSO aplikacija, primljeni fotonski tok je dovoljno visok da ovo aproksimiranje bude validno.

## 1.7. Modulacione tehnike

Najčešće korišćena modulaciona tehnika zbog jednostavne implementacije jeste on-off keying (OOK), što predstavlja binarnu modulaciju sa dva nivoa. Kod OOK signalizacije, podaci se prenose putem prisustva („on“) ili odsustva („off“) svetlosnog impulsa u svakom simboličkom intervalu.

Na prijemnoj strani, za optimalnu detekciju signala potrebno je poznavati trenutni koeficijent feding kanala radi dinamičkog podešavanja praga detekcije. Informacija o stanju

kanala (CSI) može se u praksi dovoljno precizno proceniti korišćenjem malog broja pilot simbola. Alternativna rešenja uključuju ML sekvencijalnu detekciju koja se zasniva na poznavanju zajedničke vremenske statistike fadinga.

Pored potrebe za dinamičkim podešavanjem praga, OOK modulacija ima relativno slabu energetska i spektralnu efikasnost. Ovo su dva bitna kriterijuma pri izboru modulacione tehnike. Izbor modulacione tehnike u FSO sistemima stoga se može posmatrati kao optimizacioni problem, u kojem se postiže kompromis između energetske i spektralne efikasnosti u zavisnosti od uslova propagacije i zahteva sistema. Energetska efikasnost odnosi se na maksimalnu ostvarivu brzinu prenosa pri zadatom BER-u (ili minimalni BER pri zadatoj brzini prenosa) za datu transmitovanu energiju, nezavisno od zauzimanja širine opsega. Ova definicija ne uzima u obzir neophodno povećanje brzine rada elektronike, što može predstavljati dodatnu implementacionu složenost. Spektralna (propusna) efikasnost odnosi se na brzinu prenosa informacija u okviru zadate širine opsega, bez obzira na utrošenu energiju za prenos.

Predloženo je nekoliko drugih IM šema kako bi se prevazišle određene mane. Kao rešenje za energetska efikasnost, PPM predstavlja veoma snažnu tehniku. Za klasični optički kanal sa ograničenjima vršne i prosečne snage, slotirana binarna modulacija može skoro dostići kapacitet kanala. PPM pod takvim ograničenjima, može postići skoro optimalan kapacitet kanala. Prilikom hard detekcije signala na prijemnoj strani, PPM ima prednost jer za razliku od OOK ne zahteva dinamičko podešavanje praga za optimalnu detekciju [3]. PPM je naročito predložen za komunikaciju u dubokom svemiru (u kombinaciji sa brojanjem fotona), gde je energetska efikasnost ključni faktor.

U poređenju sa PPM, multipulsni PPM (MPPM) donosi dodatne prednosti u vidu smanjenog odnosa vršne i prosečne snage (PAPR) i veće spektralne efikasnosti ali uz povećanu složenost demodulacije. Iako je u optičkom opsegu dostupna veoma velika širina opsega, spektralna efikasnost i dalje predstavlja važan dizajnerski parametar, jer je direktno povezana sa potrebnom brzinom elektronskih kola u FSO sistemu. Kada je ograničena vršna snaga predajnika, MPPM nadmašuje PPM. Suprotno tome, kada je ograničena prosečna snaga predajnika, PPM ima bolje performanse od MPPM [22].

Ovakva zavisnost performansi od ograničenja sistema dodatno naglašava potrebu za optimizacijom izbora modulacione šeme u skladu sa raspoloživom snagom i zahtevima propusnosti.

Dve druge dobro poznate modulacione šeme su modulacija širine impulsa (PWM) i digitalna modulacija intervala impulsa (DPIM). U poređenju sa PPM, PWM zahteva manju vršnu snagu predajnika, ima bolju spektralnu efikasnost i veću otpornost na ISI, posebno za veliki broj slotova po simbolu ( $Q$ ). Ipak, ove prednosti su praćene povećanjem prosečne snage potrebne za PWM, koja raste sa  $Q$ . Kod DPIM-a, za svaki simbol se šalje jedan impuls praćen određenim brojem praznih slotova, u zavisnosti od ulaznih bitova. Dodatni zaštitni slot se takođe obično dodaje da bi se izbeglo slanje uzastopnih „uključenih“ impulsa.

PPM i PWM se obično nazivaju sinhronim modulacionim šemama zato što mapiraju ulazne bitove na simbol fiksno trajanja. Obe šeme zahtevaju sinhronizaciju na nivou slotu i simbola. Nasuprot tome, DPIM je asinhrona modulaciona šema sa promenljivom dužinom simbola i ne zahteva sinhronizaciju simbola. Pored toga, DPIM je spektralno efikasniji od PPM i PWM, jer ne mora da čeka kraj perioda fiksno trajanja simbola pre slanja narednog simbola. Glavni potencijalni problem kod DPIM-a je mogućnost propagacije grešaka pri demodulaciji signala

na prijemu. Ukoliko se „isključeni“ (off) slot pogrešno detektuje kao „uključen“ (on), svi naredni simboli u okviru biće pogrešno dekodirani.

Druge modulacione tehnike zasnovane na izmenama PPM-a ili PWM-a takođe su predložene u literaturi. Koristeći istu ideju kao kod MPPM, kod preklapajućeg PPM-a (OPPM) višestruki impulsi su ograničeni da zauzimaju susedne slotove. Kod diferencijalnog PPM-a (DPPM), prazni slotovi koji prate impuls u PPM simbolu se uklanjaju, čime se poboljšava spektralna efikasnost sistema. Na ovaj način svaki DPPM simbol se završava impulsom, što se može iskoristiti za sinhronizaciju simbola na prijemu. U digitalnoj modulaciji intervala i širine impulsa (DPIWM), binarna sekvenca se kodira u širine impulsa naizmenične amplitude.

U takozvanoj modulaciji intenziteta sa podnosičem (SIM), podaci se prvo modulišu na RF signal, koji se zatim koristi za promenu intenziteta optičkog izvora. Kada se kombinuje sa ortogonalnim višefrekvencijskim multipleksiranjem (OFDM), nudi prednosti visokog kapaciteta i ekonomične implementacije u poređenju sa koherentnom modulacijom. Glavni razlog za korišćenje SIM-a jeste usklađivanje sa optičkim vlaknima koja koriste modulaciju sa podnosičem zajedno sa multipleksiranjem po talasnim dužinama. Glavni nedostatak SIM-a je niska efikasnost korišćenja optičke snage zbog DC komponente koja mora biti dodata višekanalnom električnom signalu pre modulacije optičkog intenziteta. Zbog toga se primena SIM-a razmatra u kontekstu optimizacije ukupnog kapaciteta sistema uz prihvatljiv gubitak energetske efikasnosti.

Tehnika direktne detekcije zasnovana na polarizacionoj modulaciji bazirana je na izdvajanju Stouksovih parametara emitovanog svetla. Ovakva modulaciona tehnika nije ograničena nelinearnim odzivom modulatora intenziteta, što je slučaj sa IM šemama. Polarizaciona modulacija takođe ima prednost visoke otpornosti na fazni šum lasera. Pored toga, ona je otpornija na smetnje izazvane atmosferskom turbulencijom, jer se stanja polarizacije bolje očuvaju tokom propagacije nego amplituda i faza optičkog signala. Ovo može biti posebno korisno za FSO sisteme velikog dometa.

Višeslojni modulacioni sistemi mogu se koristiti u FSO sistemima da bi se postigla veća spektralna efikasnost u poređenju sa binarnim modulacijama. I ovde se poboljšana spektralna efikasnost dobija na račun povećane složenosti sistema. Jedan primer je PAM, čija je najjednostavnija šema OOK. Kod Q-arne PAM modulacije, trenutni intenzitet laserskog izvora moduliše se na Q nivoa i shodno tome zahteva laser sa promenljivim intenzitetom emisije, što može biti skupo. Glavna prednost PAM-a je njegova veća spektralna efikasnost u odnosu na binarne modulacije kao što je PPM [3].

## 1.8. Kodovanje kanala

Fluktuacije intenziteta primljenog signala usled slabljenja kanala izazvanog atmosferskom turbulencijom mogu dovesti do značajnog pogoršanja performansi sistema. Zapravo, atmosferski optički kanal ima veoma dugu memoriju, pa fading može izazvati nenormalno veliki broj grešaka koje utiču na hiljade uzastopno primljenih bitova kanala. Ublažavanje smetnji u FSO kanalima bio je predmet intenzivnog istraživanja tokom poslednje decenije. Jedno moguće rešenje je kanalno kodovanje, koje je posebno korisno u uslovima slabe turbulencije. Takođe je efikasno u režimima umerenih i jakih turbulencija, pod uslovom da se

uticaj turbulencije prethodno može značajno smanjiti, na primer primenom drugih tehnika za ublažavanje smetnji kao što su diverziteti tehnike ili adaptivna optika. Kombinovanjem kanalnog kodovanja sa drugim tehnikama za ublažavanje smetnji moguće je optimizovati performanse FSO sistema u smislu smanjenja BER-a uz prihvatljivu složenost sistema.

Raniji radovi o kodiranim FSO sistemima razmatrali su upotrebu konvolucionih kodova za atmosferski optički komunikacioni kanal koristeći OOK ili druge binarne modulacione šeme. Razmatrana je i upotreba LDPC (low-density parity check) kodova za optičku komunikaciju preko kanala sa atmosferskom turbulencijom. Ovi kodovi, koje je uveo Galager početkom 1960-ih, konstruisani su korišćenjem retkih matrica parne provere. Kada se na prijemniku koristi prosenčavanje otvorom, iskorišćenje vremenskog diverziteta putem kanalnog kodovanja postaje otežano, pa čak i praktično neizvodljivo. Razlog je taj što, pod pretpostavkom da su vremenske varijacije kanala uglavnom rezultat poprečnog vetra (u odnosu na optičku osu), upotreba relativno velikog prečnika otvora dovodi do velikog vremena koherentnosti kanala.

Iskorišćavanje recipročnosti FSO kanala može eliminisati potrebu za interleaving-om i količinom redundanse koja se uvodi kanalnim kodovanjem. Zahvaljujući recipročnosti kanala, u sistemu sa dvosmernim prenosom (full-duplex) moguće je proceniti CSI na predajniku. Zbog čega je moguće koristiti skup enkodera i dekodera i da se odgovarajući par odabere na osnovu procenjenog trenutnog CSI-ja.

Rateless kodovi, poznati i kao fountain kodovi, takođe su istraživani u kontekstu FSO sistema. Rateless kodovanje podrazumeva promenu kodnog protoka u zavisnosti od uslova na kanalu, bez korišćenja interleaving-a za iskorišćavanje vremenskog diverziteta kanala. Raptor kodovi su prvobitno namenjeni za brisajuće kanale (erasure channels), pokazali su se veoma efikasnim i na binarnim simetričnim kanalima.

Da bi se omogućila efikasna korekcija grešaka u slučaju ne-binarnih modulacija, potrebno je koristiti ne-binarne kodove ili prilagoditi binarne kodove ovim modulacijama. Upotreba ne-binarnih kodova zahteva znatnu računarsku složenost dekodiranja, koja može biti prevelika za praktičnu primenu u FSO sistemima visokog protoka.

## 1.9. Prostorni diverzitet

Prostorni diverzitet može se realizovati korišćenjem više apertura na prijemniku, više snopova na predajniku ili kombinacijom ova dva pristupa. Za razliku od klasične konfiguracije sa jednim snopom i jednom aperturom, koju nazivamo SISO (Single-Input Single-Output), ove konfiguracije se obično označavaju kao SIMO (Single-Input Multiple-Output), MISO (Multiple-Input Single-Output) i MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

Jednostavno rešenje za smanjenje efekta fedinga jeste upotreba relativno velikog sočiva na prijemnoj strani kako bi se izvršilo prosečno vrednovanje intenziteta fluktuacija. Ova tehnika, koja se uobičajeno naziva usrednjavanje aperturom, može se posmatrati kao „prirodni“ diverzitet prijemnika. Efikasna je kada je prečnik prijemne aperture veći od korelacionog rastojanja fedinga  $\sqrt{\lambda L}$ , gde  $\lambda$  i  $L$  označavaju talasnu dužinu i dužinu veze, respektivno.

Usrednjavanje aperturom je primenjeno u praktičnim sistemima, pri čemu je pokazano da može obezbediti značajno smanjenje fluktuacija, naročito u slučajevima umerenih do jakih turbulencija. Na primer, za OOK modulaciju, Gamma–Gamma modele fedinga pod umerenim

uslovima turbulencije sa Rytovom varijansom 2.56 i ciljnom BER vrednošću od  $10^{-5}$ , dobitak u SNR-u u odnosu na tačkasti prijemnik iznosi približno 30 dB, 47 dB i 60 dB za prečnike prijemnih apertura od 20 mm, 50 mm i 200 mm, respektivno [23].

Umanjenje smetnji usled prostiranja pomoću usrednjavanja aperturom obično se kvantifikuje kao  $A = \sigma_I^2(D) / \sigma_I^2(0)$ , gde  $\sigma_I^2(D)$  i  $\sigma_I^2(0)$  predstavljaju indekse za prijemno sočivo prečnika  $D$  i za tačkasti prijemnik (prečnika  $D \approx 0$ ). Poboljšanje performansi usrednjavanjem aperturom najizraženije je za modele propagacije ravnog talasa i Gausovog snopa, kao i u slučaju primene složenijih modulacionih šema.

Eksperimentalni rezultati pokazuju da se fluktuacije na primljenom signalu mogu dobro opisati log-normalnom raspodelom. Gamma–Gamma i log-normal modeli praktično postaju ekvivalentni za približno  $D > 6\rho_0$ , gde  $\rho_0$  predstavlja radijus prostorne koherentnosti.

Efikasno smanjenje fedinga može se postići i korišćenjem više apertura na prijemnoj strani. Umesto jedne velike aperture, moguće je upotrebiti više manjih. Na taj način, svaka od njih ostvaruje određeni nivo usrednjavanja aperturom, manji nego u slučaju jedne velike aperture, ali se dodatno dobija i prostorni diverzitet spajanjem signala sa više apertura. Ako je feding na različitim aperturama nekorelisan, tada podešavanje sa više apertura daje bolje performanse od jedne velike aperture, pod uslovom da je ukupna efektivna površina ista u oba slučaja. Za prijemnik ograničen pozadinskim šumom, za OOK modulaciju, Gamma–Gamma modelom kanala sa Rytovom varijansom 2.56 i ciljnu vrednost  $BER = 10^{-5}$ , ostvaruje se oko 1 dB dobitka u SNR-u pri upotrebi četiri aperture prečnika 50 mm (svaka), u poređenju sa upotrebom jedne aperture prečnika 100 mm. Upotreba više apertura je povoljnija u režimu jakih turbulencija. Na primer, za Rytovu varijansu od 19.18, postiže se oko 7 dB povećanja SNR-a upotrebom četiri aperture umesto jedne velike [23].

Ovi rezultati jasno ukazuju da izbor broja i dimenzija prijemnih apertura predstavlja optimizacioni problem, u kojem se postiže kompromis između smanjenja fedinga, nivoa šuma i implementacione složenosti sistema.

Korišćenje prevelikog sočiva zahteva i PD (fotodiodu) sa velikom aktivnom površinom, kako bi se registrovali primljeni fotoni u žižnoj ravni sočiva. Ovo nameće ozbiljna ograničenja na protok podataka sistema, jer takva fotodioda ima relativno veliku parazitnu kapacitivnost.

Za SIMO sisteme se na prijemniku obično koristi kombinovanje sa jednakim pojačanjem (EGC), koje obezbeđuje performanse bliske optimalnom kombinovanju sa maksimalnim odnosom (MRC), uz nižu složenost implementacije.

Pored diverzitetских tehnika, efekti turbulencije mogu smanjiti i primenom adaptivne optike. Ovom tehnikom se izobličenje talasnog fronta izazvano atmosferskom turbulencijom umanjuje pomoću senzora talasnog fronta i adaptivnih (deformabilnih) ogledala – tehnike koja se često koristi u optičkoj astronomiji, a razmatra se i za optičke komunikacije u dubokom svemiru. Ipak, ova tehnika ne deluje privlačno za komercijalne FSO sisteme zbog velike složenosti i cene implementacije. Njena efikasnost u kompenzaciji efekata turbulencije praktično je ograničena na relativno kratke razdaljine veze [3].

## 1.10. MIMO FSO sistemi

U RF komunikaciji, MIMO sistemi su vrlo popularni jer efikasno koriste prostiranje po više putanja da povećaju brzinu prenosa podataka i smanje efekat fadginga na kvalitet prenosa signala. U FSO komunikaciji, MIMO sistemi se uglavnom predlažu da bi smanjili efekat turbulencijom izazvanog fadginga korišćenjem kodovanja ponavljanjem (RC) na predajniku, pri čemu se razmatraju OOK ili PPM modulacije. Takođe, razmatrano je i višesimbolno detektovanje u slučaju odsustva CSI na prijemu, za slučaj RC na predajniku [3].

Osnovna razlika između ST kodova za RF i IM/DD zasnovane FSO komunikacije je u tome što FSO sistemi koriste nenegativne (unipolarne) realne signale, umesto kompleksnih signala. ST šeme optimizovane za RF sisteme obezbeđuju pun diverzitet u FSO sistemima, ali nisu optimizovane u pogledu kodnog dobitka.

Glavni doprinos ortogonalnih šema, koje obično obezbeđuju pun diverzitet, je njihova niska složenost i optimalna detekcija. Većina ortogonalnih ST blok kodova (OSTBC) predloženih za RF sisteme može se modifikovati da bi se prilagodila IM/DD FSO sistemima.

Neortogonalne šeme se generalno dizajniraju da optimizuju diverzitet i kodni dobitak, ali njihova optimalna detekcija zahteva relativno visoku računarsku složenost. U šemi prostornog multipleksiranja (SMux), signali koji nose informaciju se jednostavno multipleksuju na predajniku. Na ovaj način se može postići maksimalna stopa prenosa podataka, ali uz smanjen dobitak diverziteta. Izbor odgovarajuće MIMO šeme u FSO sistemima predstavlja optimizacioni kompromis između povećanja brzine prenosa, dobitka diverziteta i složenosti detekcije. Još jedna neortogonalna ST šema je takozvana optička prostorna modulacija (OSM), gde se u datom korišćenju kanala emituje samo jedan „uključen“ slot od više predajnih snopova, kako bi se izbegla međukanalna interferencija.

Tehnike diverziteta su najefikasnije kada postoji nekorelisan feding na osnovnim podkanalima. Performanse sistema prostornog diverziteta mogu biti narušene zbog korelacije fedinga. Nije uvek praktično moguće obezbediti potrebnu razdaljinu između otvora (apertura) na prijemu i između laserskih snopova na predajniku da bi se osigurao nekorelisan feding.

U uslovima slabe turbulencije, potrebna bočna razdaljina između otvora  $l_c$  jednaka je korelacionoj dužini  $\sqrt{\lambda L}$ . U relativno jakom režimu turbulencije, prostorna korelacija se javlja prvenstveno zbog fluktuacija velikih razmera, gde je potreban veći razmak između otvora.

## 1.11. Adaptivna transformacija

Atmosferska turbulencija izaziva vrlo sporo varirajuće slabljenje u FSO sistemima. Vreme koherencije kanala iznosi oko 0,1–10 ms, što znači da slabljenje ostaje konstantno tokom miliona uzastopnih bitova pri tipičnim brzinama prenosa. Zbog toga adaptivni prenos predstavlja obećavajuće rešenje za FSO sisteme. Povratne informacije potrebne za adaptivni prenos relativno je lako implementirati u FSO sistemima. U hibridnim RF/FSO sistemima, RF veza može se koristiti kao povratni kanal kako bi se omogućilo poznavanje CSI na predajniku [3].

Na taj način, adaptivni prenos omogućava optimizaciju performansi FSO i hibridnih RF/FSO sistema kroz dinamičko prilagođavanje sistemskih parametara trenutnim uslovima kanala.

Adaptivni prenos je detaljno istraživao u kontekstu bežičnih RF mreža i podrazumeva promenu sistemskih parametara, kao što su snaga prenosa, tip modulacije, kodni tip ili kombinacija ovih parametara, u skladu sa trenutnim uslovima kanala.

## 1.12. Relejni prenos i hibridni RF/FSO sistemi

Relejni prenos je uveden u kontekstu RF bežične komunikacije kao alternativni način ostvarivanja prednosti prostornog diverziteta. Glavna ideja relejnog prenosa zasniva se na posmatranju da se u RF bežičnom kanalu signal koji emituje čvor izvora može „presresti“ od strane drugih čvorova, koji se definišu kao partneri ili releji. Prenos preko više hopova je alternativna šema prenosa uz pomoć releja, koja koristi releje u serijskoj konfiguraciji. Takve šeme se tipično koriste za proširenje pokrivenosti signala za predajnike sa ograničenom snagom i ne pružaju poboljšanje performansi u odnosu na efekte fedinga u RF bežičnim okruženjima, odnosno ne povećavaju red diverziteta.

Performanse FSO veza mogu biti ozbiljno pogođene zbog više faktora, kao što su jaka turbulencija na dugim linkovima izloženim snažnim vetrovima ili toplim i suvim klimama, gustoj magli, i tokom obilnih snežnih padavina, greške u poravnanju i usmeravanju kod mobilnih linkova itd. Ovi faktori mogu izazvati česte prekide veze, pa je stoga važna potreba za povećanjem pouzdanosti ovih linkova.

Jedno efikasno rešenje je korišćenje RF linka paralelno sa FSO linkom, kako bi služio kao rezervna veza u slučaju prekida FSO linka. Iako je odgovarajući protok podataka u RF kanalu obično manji od glavnog FSO linka, on može obezbediti povezanost kada FSO kanal postane neoperativan. Takav RF link je manje podložan atmosfernoj turbulenciji i greškama u usmeravanju, a takođe je znatno manje pogođen maglom. Naime, magla i kiša drastično utiču na FSO, odnosno RF linkove, ali se retko javljaju istovremeno. Dakle, u pogledu ovih meteoroloških pojava, dva linka mogu funkcionisati na komplementaran način. Ova komplementarnost RF i FSO linkova predstavlja osnovu za optimizaciju pouzdanosti i dostupnosti hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema u promenljivim propagacionim uslovima. S obzirom na LOS (line-of-sight) propagaciju signala, odgovarajući feding kanal dobro se opisuje Rice-ovim modelom. Za hibridne RF/FSO dugolinijske veze, RF link može se koristiti i za akviziciju i usmeravanje talasa, kao i za potrebe kontrole veze u HARQ scenarijima zbog veće pouzdanosti.

Komercijalno dostupni hibridni RF/FSO proizvodi koriste RF link samo kao rezervni kanal. Druga jednostavna šema sastoji se u slanju istih podataka preko oba kanala i vršenju detekcije signala za svaki okvir na prijemniku preko „pouzdanijeg“ kanala. Međutim, ovi pristupi, koji se mogu smatrati „hard-switching“ između dva kanala, nisu optimalni u smislu iskorišćavanja dostupnih resursa. Zbog toga se u savremenim hibridnim RF/FSO sistemima razmatraju naprednije strategije optimizacije prenosa koje omogućavaju efikasnije iskorišćavanje oba kanala.

Optimalno signaliziranje i rutiranje na hibridnom RF/FSO linku nije jednostavan zadatak. U uslovima srednje atmosferske vidljivosti, podaci se mogu jednostavno podeliti između dva kanala i dekodirati zasebno na prijemniku. Konstantnim nadzorom oba kanala, prenos se može postepeno prebacivati na jedan ili drugi link kao posledica pogoršanja stanja

kanala. Takvi adaptivni mehanizmi raspodele saobraćaja između RF i FSO linkova omogućavaju optimizaciju performansi sistema u smislu propusnosti, pouzdanosti i kontinuiteta prenosa.

### 1.13. Koherentni FSO sistemi

Za razliku od IM/DD sistema, u koherentnim OWC sistemima informacije se kodiraju u amplitudi i fazi optičkog nosioca. Prijemni snop na prijemniku se kombinuje sa snopom lokalnog oscilatora (LO). Na taj način, nakon mešanja sa LO, primljeni signal se pojačava, a proces detekcije je uglavnom ograničen šumom. Zbog toga se koherentna detekcija obično smatra sredstvom za povećanje osetljivosti prijemnika u FSO sistemima. Međutim, ostvarivanje ovog dobitka zahteva pažljivu optimizaciju strukture prijemnika i algoritama detekcije.

Koherentna detekcija omogućava odbacivanje pozadinskog šuma i namernih smetnji. Još jedna zanimljiva osobina koherentnih sistema je mogućnost slanja informacija putem amplitude, faze ili polarizacije optičkog polja, što omogućava značajno povećanje spektralne efikasnosti sistema. Tipične šeme modulacije koje se koriste u koherentnim sistemima uključuju višestepeni PSK, QAM ili PolSK.

Uprkos ovim prednostima, komercijalni FSO sistemi se oslanjaju na IM/DD šeme, zbog niže složenosti implementacije i nižih troškova. Međutim, postoji rastući trend prelaska na koherentne FSO sisteme zahvaljujući nedavnim naprecima u proizvodnji integrisanih koherentnih prijemnika i integrisanih kola velike brzine za digitalnu obradu signala, što je značajno povećalo praktičnost koherentne detekcije.

U koherentnim prijemnicima postoje dva pristupa detekciji signala: homodinska i heterodinska detekcija. Homodinska detekcija omogućava bolju osetljivost prijema, ali zahteva preciznu optičku fazno zatvorenu petlju (PLL), što je veoma skupo za realizaciju. Zbog toga je heterodinska detekcija češće razmatrana u literaturi. Izbor između homodinske i heterodinske detekcije predstavlja optimizacioni kompromis između osetljivosti prijema, složenosti implementacije i troškova sistema. Među nedavnim eksperimentalnim demonstracijama koherentnih FSO linkova su homodinska BPSK transmisija brzinom 5,625 Gbps na udaljenosti od 142 km, i polarizaciono multipleksirana QPSK transmisija brzinom 112 Gbps preko kanala bez turbulencije [3].

Koherentni FSO sistemi imaju poboljšane performanse u odnosu na IM/DD sisteme u prisustvu turbulencije samo kada je veličina prijemne aperture ograničena ili kada ekvivalentni nekoherentni prijemnik trpi značajan termički šum ili interferenciju.

Turbulencija deformiše koherenciju primljenog polja signala, a rezultujuće neprecizno usklađivanje talasnog fronta između dolaznog signala i lokalnog oscilatora (LO) smanjuje primljenu snagu. Odgovarajuća fazna distorzija degradira performanse sistema, posebno kada je prečnik prijemne aperture veći od koherentne dužine primljenog talasnog fronta. Da bi se kompenzovala ova fazna distorzija, potrebno je primeniti zonalnu ili modalnu kompenzaciju. Kompenzacija faze ima za cilj adaptivno praćenje talasnog fronta snopa kako bi se ispravile promene izazvane turbulencijom. Efikasna fazna kompenzacija omogućava optimizaciju performansi koherentnih FSO sistema u uslovima atmosferske turbulencije.

## 2. Optičke bežične hibridne mreže: trendovi, mogućnosti i izazovi istraživanja

Optičke bežične komunikacije (OWC) predstavljaju izvanredno rešenje u odnosu na radio-frekventne (RF) sisteme. Pokazano je da OWC tehnologije mogu da podrže veliki saobraćaj generisan masovnom povezanošću u Internetu stvari (IoT) i predstojećim komunikacionim sistemima pete i šeste generacije (5G/6G). Pošto su karakteristike OWC i RF tehnologija komplementarne, njihova kombinovana primena smatra se obećavajućim pristupom za optimizaciju performansi i pouzdanosti 5G i budućih komunikacionih sistema.

Hibridni RF/optički i optički/optički bežični sistemi nude odlično rešenje za prevazilaženje ograničenja pojedinačnih tehnologija, istovremeno obezbeđujući njihove pozitivne karakteristike. Hibridni RF/optički bežični sistem sastoji se od RF i optičkih bežičnih tehnologija, dok optički/optički hibridni sistem obuhvata dve ili više vrsta OWC tehnologija. Zajedničko postavljanje ovih sistema omogućava optimizaciju performansi u pogledu protoka podataka, pouzdanosti i energetske efikasnosti pojedinačnih mreža.

Multimedijalne aplikacije svakodnevno eksponencijalno rastu, stvarajući ogromnu količinu mobilnih podataka koji zahtevaju bežičnu povezanost visokih brzina prenosa. Predstojeća komunikaciona tehnologija pete i šeste generacije (5G/6G) doneće brojne nove servise uz ultra-visok kapacitet sistema, masovnu povezanost uređaja, ultra-nisku latenciju, izuzetno visok nivo bezbednosti, veoma nisku potrošnju energije i izuzetno visok kvalitet korisničkog iskustva (QoE). Podrška ovako velikom obimu podataka predstavlja ozbiljan izazov za buduće komunikacione sisteme 5G i dalje generacije. Stoga eksponencijalni porast korišćenja mobilnih podataka zahteva efikasna tehnička rešenja kako bi se krajnjim korisnicima obezbedio garantovan kvalitet usluge (QoS) [24]-[26].

Dobro je poznato da komunikacije zasnovane na radio-frekvenciji (RF) postaju sve ograničenije zbog nedostupnosti dovoljnog spektra u bežičnim mrežama. Zbog toga se, radi podmirivanja rastuće potražnje, mnogi istraživači okreću nelicenciranom optičkom spektru [1 mm–10 nm] kao obećavajućoj dopunskoj tehnici RF komunikacijama. Optičke bežične komunikacije (OWC) predstavljaju sistem koji koristi optički spektar kao medijum za komunikaciju.

Zahvaljujući brzom napretku tehnologije dioda koje emituju svetlost (LED), OWC je postao obećavajuće rešenje. OWC tehnologija može da koristi veoma širok optički spektar i da obezbedi visokokvalitetne komunikacione karakteristike kao što su odsustvo elektromagnetnih smetnji, visok nivo bezbednosti i velika energetska efikasnost. Upotrebom OWC tehnologije demonstrirani su protoci podataka od 100 Gbps pri standardnim nivoima osvetljenja u zatvorenom prostoru [27], [28].

Za realizaciju bežičnog prenosa podataka, neke OWC tehnologije—kao što su komunikacija vidljivom svetlošću (VLC) i Light Fidelity (LiFi) koriste postojeću rasvetnu infrastrukturu. Pored toga, OWC tehnologije u potpunosti podržavaju rastući trend energetske efikasne komunikacije. Pošto većini OWC tehnologija nije potrebna složena infrastruktura, moguće je održati sve važniju „zelenu agendu“ i minimizovati troškove instalacije. Budući da svetlost ne prolazi kroz zidove, OWC sistemi omogućavaju i poboljšanu bezbednost podataka.

U OWC sistemima vidljiva svetlost (VL), infracrveno zračenje (IR) ili ultravioletni (UV) spektar koriste se kao propagacioni mediji. Na osnovu ova tri optička opsega razvija se veliki broj bežičnih komunikacionih sistema. Najperspektivnije OWC tehnologije su VLC, LiFi, komunikacija optičkom kamerom (OCC) i komunikacija kroz slobodan prostor (FSO). Propagacioni medijum, komunikacioni protokol, arhitektura i scenariji primene razlikuju se za svaku od ovih tehnologija. VLC, LiFi i OCC imaju određene sličnosti i razlike koje će biti razmatrane [29].

Uprkos brojnim prednostima OWC sistema, postoje i određena ograničenja, kao što su jaka zavisnost od komunikacije u vidnom polju (LOS), mala pokrivenost, osetljivost na iznenadne blokade veze, smetnje koje stvaraju različiti izvori svetlosti, degradacija performansi usled spoljne atmosfere i ograničena snaga predajnika. Prevazilaženje ovih ograničenja predstavlja značajan izazov za uspešno uvođenje OWC tehnologija.

Upotreba RF opsega (3 kHz–300 GHz) strogo je regulisana od strane različitih lokalnih i međunarodnih institucija. Osim toga, smetnje predstavljaju ozbiljan problem u RF komunikacijama. Ipak, bežične tehnologije zasnovane na RF nude veću mobilnost i bolje performanse u uslovima kada linija vidljivosti (NLOS) nije dostupna. Upravo ove posebne karakteristike RF sistema mogu da nadomeste određena ograničenja OWC sistema.

Kako bi se obezbedio visok kvalitet usluge (QoS), konvergencija heterogenih mreža (HetNets), koje obuhvataju i RF i optičke bežične mreže, igraće važnu ulogu u integraciji različitih delova spektra. Istovremeni rad dve ili više različitih pristupnih tehnologija kao što su makroćelije, mikroćelije, femtoćelije i atocelije, naziva se heterogene mreže (HetNets). U okviru HetNets strukture, različite pristupne tehnologije međusobno se dopunjuju radi rasterećenja saobraćaja, kao i za prevazilaženje ograničenja u pogledu kvaliteta usluge. Dodatni sloj u HetNets arhitekturi omogućava dopunski bežični kapacitet na mestima gde je on najpotrebniji. Kako bi se prevazišla ograničenja i RF i optičkih bežičnih sistema, predloženi su različiti hibridni RF/optički bežični sistemi. Hibridni RF/optički bežični sistem kombinuje RF i optičke bežične tehnologije, pri čemu krajnji korisnici mogu istovremeno da iskoriste široko pokrivanje koje obezbeđuju RF sistemi, kao i stabilne i visoke brzine koje pružaju optički bežični sistemi. Ovakve mreže su praktično izvodljive, jer RF i OWC sistemi mogu koegzistirati bez međusobnih smetnji i mogu raditi u istom okruženju. Na primer, u kancelarijama ili zatvorenim prostorima.

Hibridni pristup integriše dve ili više različitih tehnologija (npr. RF/optička, RF/FSO, WiFi/LiFi, femtocell/VLC, komunikacija preko elektroenergetskih vodova (PLC)/VLC, Bluetooth Low Energy (BLE)/OCC, VLC/FSO, LiFi/OCC i akustička/optička) i može da obezbedi prednosti obe tehnologije [37], [45]–[59]. Hibridne mreže mogu igrati važnu ulogu u balansiranju opterećenja, poboljšanju pouzdanosti linka, omogućavanju neprimetnog prelaska pri kretanju korisnika, povećanju energetske efikasnosti, dostupnosti bežične povezanosti u udaljenim oblastima (npr. u svemiru, okeanu i dubokim podzemnim okruženjima), unapređenju bezbednosti i smanjenju interferencija. Zbog ovih prednosti, ovakve mreže privlače značajnu istraživačku pažnju. U terestričkim okruženjima mogu postojati i RF/optičke i optičke/optičke bežične hibridne mreže. Za oba pristupa mogu se formirati različite kombinacije hibridnih sistema. Optičko/optički bežični sistem sastoji se od dve ili više vrsta OWC tehnologija [29].

Pravilnim izborom kombinacije tehnologija i upravljačkih mehanizama, moguće je dodatno optimizovati performanse sistema u različitim propagacionim i scenarijima upotrebe.

Akustična komunikacija može se koristiti u okviru akustično/optičkog bežičnog hibridnog sistema za podvodne komunikacije (UWC). Različite vrste hibridnih sistema mogu se birati u zavisnosti od potreba i specifičnih komunikacionih okruženja. Mogućnost izgradnje višeslojnih (multi-tier) mreža predstavlja jednu od ključnih prednosti hibridnih mreža. U višeslojnoj arhitekturi, pokrivenost jedne mreže preklapa se sa pokrivenošću jedne ili više dodatnih mreža. Unutar doma, RF pristupna tačka (AP), npr. WiFi ili femtoćelijska pristupna tačka (FAP), formira manji sloj mreže. Dodavanjem VLC ili LiFi atocelija formira se novi sloj, stvarajući troslojnu mrežu. LiFi implementiran putem ulične rasvete takođe može da formira dvoslojnu mrežu. U okviru tržnog centra korisnici mogu koristiti OCC sistem (optičku komunikaciju kamerom) kako bi odredili svoju lokaciju i pristupili informacijama o proizvodima, čime se formira dvoslojna mreža. U autobusu korisnici mogu pristupati makroćelijskoj, femtoćelijskoj ili LiFi atocelijskoj mreži, čime se stvara troslojna mreža. Femtoćelija predstavlja RF malu ćeliju koja se koristi da proširi pokrivenost mobilne mreže unutar određenog ciljnog geografskog područja. Celularna LiFi mreža naziva se atocelijskom mrežom, pri čemu je veličina ćelije manja u poređenju sa tipičnom RF femtoćelijom.

## **2.1. Pregled sistema. Razmatrane mreže za optičke bežične hibridne sisteme**

Hibridni bežični sistemi omogućavaju integraciju dve ili više bežičnih tehnologija radi optimizacije performansi i prevazilaženja ograničenja pojedinačnih tehnologija. Hibridni RF/optički bežični sistemi omogućavaju konvergenciju ili integraciju RF i OWC mreža, dok optičko/optički bežični hibridni sistemi obezbeđuju konvergenciju ili integraciju dve ili više različitih OWC tehnologija. Cilj hibridnih bežičnih sistema je veoma sličan konceptu konvergencije fiksne i mobilne mreže (FMC). U tom kontekstu, hibridni sistemi se projektuju sa ciljem optimizacije kvaliteta usluge, iskorišćenja resursa i pouzdanosti komunikacije u heterogenim okruženjima. FMC predstavlja objedinjavanje žičnih i bežičnih tehnologija u jedinstveno rešenje. Ovaj pristup obezbeđuje neometanu povezivost između fiksnih i bežičnih mreža i omogućava pružanje usluga bez obzira na to da li se koriste fiksne ili mobilne mreže.

Elektromagnetni spektar koji se koristi za različite RF i optičke komunikacije prikazan je na Slici 2.1. Različite kategorije elektromagnetnog spektra imaju različite nazive, zasnovane na ponašanju talasa tokom prenosa, emisije i apsorpcije, kao i na njihovim praktičnim primenama.

VLC koristi LED svetiljke ili laserske diode (LD) kao predajnike i fotodetektore (PD) kao prijemnike. Ova tehnologija koristi isključivo vidljivu svetlost (VL) kao medijum komunikacije i može obezbediti prenos podataka, osvetljenje i lokalizaciju. Brzina prenosa podataka od 100 Gbps je postignuta korišćenjem VLC. VLC može biti jednokratan ili dvosmeran, kao i tačka-do-tačka (point-to-point) ili tačka-do-više-tačaka (point-to-multipoint). Podrška za mobilnost i osvetljenje nije obavezna u VLC sistemima. Na performanse VLC sistema značajno utiču sunčeva svetlost i ambijentalni izvori svetla, zbog čega nije pogodna za primenu na otvorenom prostoru. Pored toga, u unutrašnjim VLC sistemima stvaraju se „praznine u pokrivenosti“ (coverage holes), a komunikaciona udaljenost je ograničena. Praznina u pokrivenosti označava područje u kojem je jačina primljenog signala veoma niska, toliko da komunikacija između predajnika i prijemnika nije moguća. Zbog navedenih ograničenja, VLC

se u hibridnim arhitekturama često koristi kao deo optimizovanog sistema, gde druge tehnologije preuzimaju komunikaciju u nepovoljnim uslovima.

Tehnologija LiFi je slična WiFi-u. Ona omogućava bežičnu vezu velike brzine, uz istovremeno osvetljenje. Slično kao kod VLC (Visible Light Communication), koristi LED diode ili laserske diode (LD) kao predajnike i fotodetektore (PD) kao prijemnike, i takođe podržava komunikaciju, osvetljenje i lokalizaciju. U LiFi sistemu, predajnik i prijemnik su prisutni na oba kraja komunikacije, što omogućava dvosmernu komunikaciju. Pored toga, podržava i komunikaciju tipa tačka-više tačaka. Podrška za mobilnost i osvetljenje je obavezna u LiFi-u. Modulacija intenziteta koja se koristi u LiFi-u ne može biti percipirana ljudskim okom, pa je komunikacija jednako neprimetna kao kod drugih RF sistema. Performanse LiFi-ja u velikoj meri zavise od sunčeve svetlosti i ambijentalnih izvora svetlosti. Takođe, u zatvorenim prostorima mogu nastati „praznine“ u pokrivenosti. Obično se LiFi ili VLC sistem mogu koristiti u istoj hibridnoj arhitekturi. Najvažnije razlike između LiFi i VLC sistema su:

- 1) LiFi omogućava komunikaciju tipa tačka-više tačaka, dok VLC ne mora nužno da podržava ovu vrstu komunikacije,
- 2) VLC koristi vidljivu svetlost (VL) kao medijum za komunikaciju, dok LiFi koristi vidljivu svetlost za direktnu vezu (forward link) i vidljivu svetlost ili infracrvenu svetlost (IR) za povratnu vezu (reverse link).

U okviru hibridnih sistema, LiFi se koristi kao komponenta za optimizaciju unutrašnje pokrivenosti i kapaciteta, uz oslanjanje na RF ili druge OWC tehnologije za podršku mobilnosti i pouzdanosti.

OCC koristi LED diode kao predajnike i kameru kao prijemnik. Podaci koji se prenose sa različitih izvora svetlosti lako se istovremeno hvataju i razlikuju pomoću senzora slike u kameri. Sunčeva svetlost i drugi izvori pozadinskog šuma eliminišu se odvajanjem piksela povezanih sa njima. OCC sistem može obezbediti komunikaciju bez smetnji čak i u spoljnim uslovima. Iako OCC pruža stabilne performanse u spoljnim okruženjima, ostvariva brzina prenosa podataka je relativno niska [6]. Kao rezultat toga, jedine aplikacije koje OCC podržava su aplikacije koje zahtevaju niske brzine prenosa podataka [30], [31].

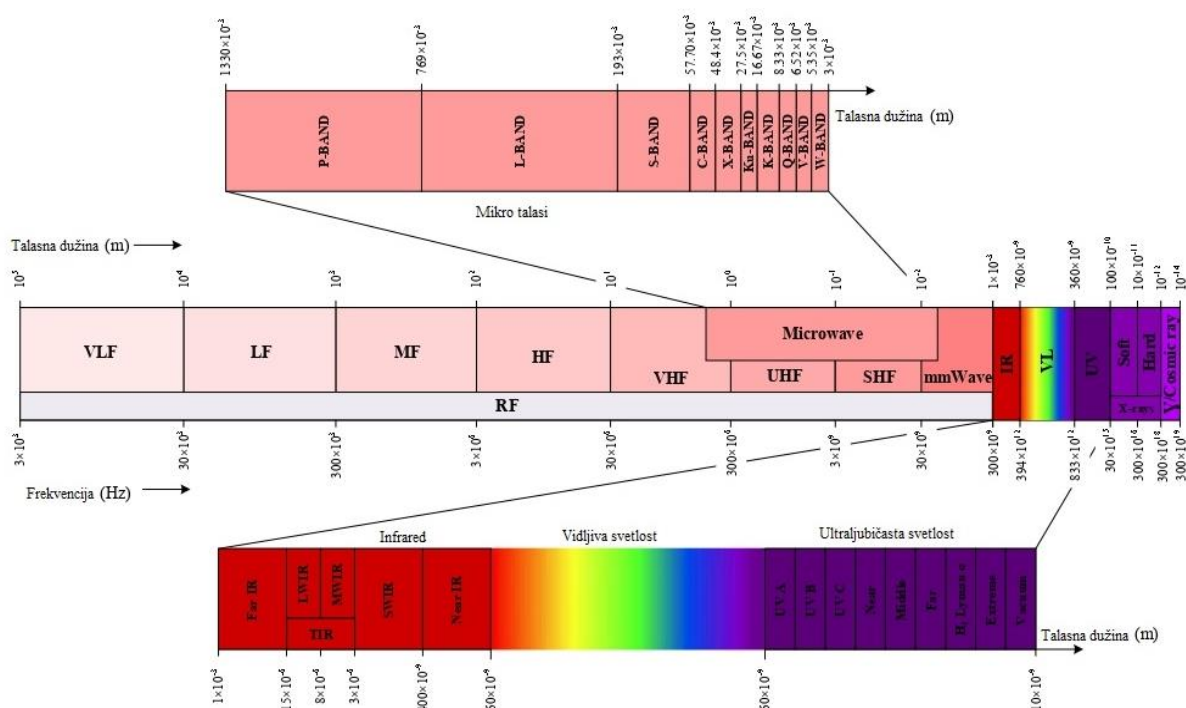
FSO koristi laserske diode (LD) kao predajnike i fotodetektore (PD) kao prijemnike. Laserske zrake koje proizvodi LD predajnik FSO sistema su fokusirane, i zbog njihove koherentne prirode mogu putovati na velike udaljenosti. Zbog ove osobine, LD diode izazivaju manje smetnji i omogućavaju komunikaciju visokih brzina prenosa podataka. Ova tehnologija se obično koristi sa infracrvenom (IR) svetlošću kao medijumom za komunikaciju. Ona omogućava izuzetno dug domet komunikacije tipa tačka-tačka sa odličnom brzinom prenosa podataka. Performanse FSO sistema zavise od uslova okoline. Pored toga, precizno usmeravanje je izazovno, posebno kada su predajnik, prijemnik ili oba u pokretu [30], [31].

Zbog ovih karakteristika, FSO se u hibridnim RF/FSO arhitekturama koristi kao ključni element za optimizaciju kapaciteta i brzine prenosa, dok RF link obezbeđuje robusnost u nepovoljnim propagacionim uslovima.

Tabela 2.1.1. prikazuje poređenje različitih OWC tehnologija u smislu nekoliko važnih karakteristika. Poređenje karakteristika različitih OWC tehnologija predstavlja osnovu za

optimizaciju izbora tehnologije u hibridnim bežičnim sistemima. Hibridni sistemi obuhvataju ne samo OWC tehnologije, već mogu uključivati i RF tehnologije.

RF male ćelije, npr. tehnologija femtocelijske mreže, široko se koriste u domovima korisnika kako bi obezbedile visok kvalitet usluge (QoS). Baza male ćelije (sBS), npr. FAP, predstavlja malu baznu stanicu koja je postavljena da opslužuje 6–8 korisnika. sBS-ovi rade u spektru licenciranom za pružaoce mobilnih usluga. Mreže malih ćelija omogućavaju pružaočima usluga da prošire mobilnu pokrivenost do ivice ćelije, posebno u oblastima gde je pristup ograničen ili nedostupan. Postojeće širokopojasne mreže, npr. Ethernet, kablovska televizija (CATV) i PLC mreže, koriste se za povratni prenos saobraćaja mreža malih ćelija. RF frekventni spektar koji se koristi za male ćelije je veoma vredan i zahteva optimizovano upravljanje radi efikasnog korišćenja resursa. Tehnologije malih ćelija predstavljaju odličan pristup za pružanje prednosti FMC (Fixed-Mobile Convergence) [31].



**Slika 2.1.1. Elektromagnetni spektar**

**Makroćelijska mreža:** Ova tehnologija se najčešće koristi na otvorenom prostoru kako bi obezbedila veću pokrivenost i mobilnost korisnika. Međutim, MBS ne može pružiti vezu sa visokim brzinama prenosa podataka, a njen kapacitet je ograničen za servisiranje velikog broja korisnika, zbog čega se frekventijskim spektrom mora veoma pažljivo upravljati.

Komunikacioni sistemi mikrotalasnih linkova koriste snop radio talasa u opsegu mikrotalasnih frekvencija za prenos informacija između dve tačke na velikoj udaljenosti uz visoku brzinu prenosa podataka. Mikrotalasni komunikacioni sistem omogućava komunikaciju tipa tačka-tačka i predstavlja dobru alternativu optičkim vlaknima, posebno u udaljenim područjima. Može obezbediti komunikacioni link na udaljenosti većoj od 100 km. Na performanse ove komunikacije utiču vremenski uslovi, kao što su kiša i solarne oluje [31].

Bluetooth je standard bežične tehnologije za razmenu podataka do brzine od 2 Mbps na kratkim udaljenostima, koristeći radio talase kratke talasne dužine u opsegu od 2,400 do 2,485 GHz. Njegova potrošnja energije je veoma niska, ali je i nivo bezbednosti nizak.

WiFi tehnologija omogućava RF-baziranu bežičnu lokalnu mrežu uređaja zasnovanu na standardu IEEE 802.11. Standard IEEE 802.11ad može podržati brzinu prenosa podataka do približno 8 Gbps. Iako se koriste različiti sistemi enkripcije, postoje sigurnosni problemi u ovoj tehnologiji.

Podvodna akustična komunikacija je tehnologija za razmenu podataka ispod vode, koja može obezbediti UWC link dometa do 20 km, što je najduži domet među svim UWC tehnologijama. Međutim, brzina prenosa podataka u ovoj tehnologiji je samo u opsegu kbps [31].

**Tabela 2.1.1.** Poređenje različitih OWC tehnologija

|                          | VLC                                                                                                                                                                                                                                                     | LiFi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | OCC                                                                                                                                                                                | FSO                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Predajnik                | LED/LD                                                                                                                                                                                                                                                  | LED/LD (kombinovani LED-ovi sa optičkim difuzorom)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | LED                                                                                                                                                                                | LD                                                                                                                                                                                                                           |
| Prijemnik                | PD/Kamera                                                                                                                                                                                                                                               | PD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Kamera                                                                                                                                                                             | PD                                                                                                                                                                                                                           |
| Komunikaciona udaljenost | 20 m                                                                                                                                                                                                                                                    | 10 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 60 m                                                                                                                                                                               | Više od 10,000 km                                                                                                                                                                                                            |
| Podrška za mobilnost     | Nije obavezno                                                                                                                                                                                                                                           | Nije obavezno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Nije obavezno                                                                                                                                                                      | Ne                                                                                                                                                                                                                           |
| Nivo smetnji             | Nizak                                                                                                                                                                                                                                                   | Nizak                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Nula                                                                                                                                                                               | Nizak                                                                                                                                                                                                                        |
| Komunikaciona topologija | Jednosmerna ili dvosmerna                                                                                                                                                                                                                               | Dvosmerna                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Jednosmerna                                                                                                                                                                        | Jednosmer na ili dvosmerna                                                                                                                                                                                                   |
| Brzina prenosa podataka  | 10 Gbps koristeći LED i 100 Gbps koristeći LD                                                                                                                                                                                                           | 10 Gbps koristeći LED i 100 Gbps koristeći LD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 55 Mbps                                                                                                                                                                            | 40 Gbps                                                                                                                                                                                                                      |
| Spektar                  | VL                                                                                                                                                                                                                                                      | IR/VL/UV                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | IR/VL                                                                                                                                                                              | IR/VL/UV                                                                                                                                                                                                                     |
| Regulacija spektra       | Ne                                                                                                                                                                                                                                                      | Ne                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Ne                                                                                                                                                                                 | Ne                                                                                                                                                                                                                           |
| Prednosti                | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Veoma velika brzina prenosa podataka</li> <li>-Veoma širok raspoloživi spektar</li> <li>-Širok spektar primene</li> <li>-Istovremena upotreba osvetljenja i komunikacije</li> <li>-Visoka bezbednost</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Dvosmerna komunikacija</li> <li>-Komunikacija od tačke do više tačaka</li> <li>-Podrška za malu mobilnost</li> <li>-Veoma velika brzina prenosa podataka</li> <li>-Veoma širok raspoloživi spektar</li> <li>-Širok spektar primene</li> <li>-Istovremena upotreba osvetljenja i komunikacije</li> <li>-Visoka bezbednost</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Dobre performanse u spoljašnjim uslovima</li> <li>- Istovremena upotreba osvetljenja i komunikacije</li> <li>-Visoka bezbednost</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Veoma velika brzina prenosa podataka</li> <li>-Veoma dugačak vremenski period komunikacije</li> <li>-Visoka bezbednost</li> <li>-Performanse nisu značajno pogođene kišom</li> </ul> |
| Ograničenja              | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Podrška za mobilnost nije zagarantovana</li> <li>-Mala oblast pokrivenosti</li> <li>-Na performanse utiču uslovi okoline</li> <li>-Slabe performanse u</li> </ul>                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Mala oblast pokrivenosti</li> <li>- Na performanse utiču uslovi okoline</li> <li>-Slabe performanse u spoljašnjim primenama</li> </ul>                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Nije za komunikaciju na velike udaljenosti</li> <li>-Samo za aplikacije sa malom brzinom prenosa podataka</li> <li>-Samo za</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Na performanse značajno utiču magla, sneg i prašina</li> <li>-Problem od neusklađenosti</li> </ul>                                                                                  |

|  |                                                                                                   |                                                                          |                                    |                                                       |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|  | spoljašnjim primenama<br>-Može doći do rupe u pokrivenosti<br>-Veoma ograničena NLOS komunikacija | -Može doći do rupe u pokrivenosti<br>-Veoma ograničena NLOS komunikacija | komunikaciju na niskoj udaljenosti | predajnika i prijemnika<br>-Samo komunikacija u LOS-u |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|

**Tabela 2.1.2.** Ključne prednosti i ograničenja različitih RF tehnologija

| <b>Tehnologija</b>              | <b>Prednosti</b>                                                                                                                                                                                     | <b>Ograničenja</b>                                                                                |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WiFi                            | -Komunikacija velikom brzinom prenosa podataka<br>-Nelicencirani slobodni spektar<br>-Srednja pokrivenost<br>-Umerena podrška mobilnosti<br>-Niski troškovi implementacije<br>-LOS/NLOS komunikacija | -Nema garantovanog kvaliteta usluge (QoS)<br>-Nizak nivo bezbednosti<br>-Ogroman efekat smetnji   |
| Femtoćelije                     | -Garantovani QoS<br>-Srednja pokrivenost<br>-Umerena podrška za mobilnost<br>-LOS/NLOS komunikacija                                                                                                  | -Ograničen spektar<br>-Ograničen kapacitet                                                        |
| Makroćelije                     | -Garantovani QoS<br>-Široka pokrivenost<br>-Potpuna podrška za mobilnost<br>-LOS/NLOS komunikacija                                                                                                   | -Ograničen spektar<br>-Niska brzina prenosa podataka<br>-Skupo                                    |
| Mikotalasi/mmWave link          | -Performanse nisu značajno pogođene snegom, maglom i prašinom                                                                                                                                        | - Performanse značajno pogođene kišom<br>- Podložno elektromagnetnim i drugim smetnjama           |
| Bluetooth                       | -Nelicencirani slobodni spektar<br>-LOS/NLOS komunikacije                                                                                                                                            | -Nizak nivo bezbednosti<br>-Veliki efekat smetnji<br>-Ograničen operativni domet                  |
| Podvodna akustična komunikacija | -Komunikacija na velike udaljenosti<br>-LOS/NLOS komunikacija                                                                                                                                        | -Veoma niska brzina prenosa podataka<br>-Dugo kašnjenje propagacije<br>-Osetljivo na prirodu vode |

## 2.2. Način funkcionisanja hibridnih sistema

Hibridni sistem sadrži dve ili više mreža. Ove mreže mogu se koristiti na različite načine, u zavisnosti od scenarija primene i tipa dostupnih mreža. Ako su dve mreže prisutne istovremeno, mogući su sledeći tipovi komunikacije:

- 1) Istovremeni pristup obe mreže: Prijemnik istovremeno prima informacije sa obe mreže, čime se poboljšava pouzdanost sistema.
- 2) Pristup najboljoj mreži među dostupnim mrežama: Prijemnik procenjuje koja je mreža najbolja među dostupnim mrežama i povezuje se sa njom.

- 3) Pristup jednoj mreži za napredni put, a drugoj za povratni put: U ovom hibridnom sistemu jedna mreža se koristi za napredni put, dok se druga koristi za povratni put.
- 4) Pristup u zavisnosti od tipa saobraćaja: Različite aplikacije zahtevaju različite nivoe QoS, što podržava raznovrsnost mreža. Stoga se dostupne mreže klasifikuju prema tipu aplikacije kako bi služile specifičnim potrebama.
- 5) Pristup mreži najvišeg prioriteta i korišćenje drugih kao rezervnih mreža: U ovom sistemu jedna mreža se koristi za konekciju, dok se druga mreža čuva kao rezervna.

Izbor odgovarajućeg načina pristupa mreži predstavlja ključni mehanizam za optimizaciju performansi hibridnog sistema u zavisnosti od uslova kanala, zahteva saobraćaja i dostupnih mrežnih resursa.

Važna pitanja u vezi sa hibridnim sistemom obuhvataju deljenje resursa, protokol za deljenje uplink/downlink veze, raspoređivanje paketa, podršku za mobilnost, balansiranje opterećenja, izbor mreže i bezbednost na fizičkom sloju. Sistem za zajedničku alokaciju resursa iterativno optimizuje snagu i širinu pojasa dodeljenu od strane pristupnih tačaka (AP) njihovim korisnicima u hibridnom bežičnom sistemu, sa ciljem maksimizacije ukupnih performansi i obezbeđivanja zahtevanog kvaliteta usluge.

Pristup deljenju uplink/downlink veze zavisi od strategija primene i tipa bežičnih tehnologija koje se koriste u hibridnom sistemu. Uređaji prijemnika zasnovani na LED-ovima nisu opremljeni visokim snagama. Primeri takvih uređaja su pametni telefoni. Zbog toga LED-bazirani OWC sistemi, poput VLC i LiFi, ne mogu dobro funkcionisati za uzlaznu komunikaciju u hibridnom RF/optical wireless sistemu. Stoga se RF sistem obično koristi za upravljanje i kontrolu uzlazne komunikacije u RF/optical wireless hibridnim sistemima. Silazna komunikacija može se upravljati bilo optičkim, bilo RF sistemima, kroz različite metode. Performanse optičkog bežičnog sistema prikladnog za silaznu komunikaciju zavise od prirode samog optičkog sistema. OWC sistemi, poput VLC i LiFi, obično se koriste za veze visokih brzina prenosa podataka. U međuvremenu, RF downlink funkcioniše kao dodatak koji podržava prebacivanje veze (handover), prevazilaženje NLOS situacija i minimizaciju efekta smetnji [31].

Postoje tri načina za obezbeđivanje downlink komunikacije kroz RF/optical wireless hibridni sistem. Relevantne karakteristike za downlink veze su:

- 1) Optička mreža za downlink vezu: Ovo je najjednostavniji oblik implementacije. Downlink komunikacija se obavlja nezavisno preko OWC linka. Tehnički izazovi u ovom scenariju nastaju zbog neusaglašenosti LOS (line-of-sight) i blokade svetlosti. Na optički link obično utiču: fading, prostiranje po više putanja, interferencija među simbolima, interferencija višestrukog pristupa i fazom indukovani šum intenziteta.
- 2) RF kao rezervna opcija optičke downlink veze: RF link funkcioniše kao rezervna silazna veza u ovoj strategiji. Ova RF rezervna veza omogućava postizanje veće pouzdanosti u prenosu podataka. Kada dođe do neusaglašenosti LOS, blokade ili smanjenja kvaliteta signala na optičkoj downlink vezi, prenos podataka se prebacuje na rezervnu RF mrežu. Ovo pomaže u održavanju neprekidne komunikacije. Pored toga, kada se kvalitet optičkog signala oporavi, prenos se vraća na optičku downlink

vezu. Ovaj pristup se može primeniti u okruženjima gde česta blokada optičkog LOS-a predstavlja problem.

- 3) Istovremena upotreba optičkog i RF sistema za downlink vezu: U ovoj strategiji, optički i RF linkovi se koriste istovremeno u downlink vezi kako bi se omogućio prenos podataka velikog kapaciteta. Ova strategija maksimizuje brzinu prenosa podataka u downlink vezi. Međutim, ona zahteva složeno upravljanje dinamičkim saobraćajem i algoritme za razdvajanje tokova podataka. Ova strategija je posebno pogodna za situacije gde je potreban veliki kapacitet. Performanse optičkog linka zavise od blokade LOS-a i mobilnosti korisnika. Stoga se performanse optičkog linka znatno smanjuju usled ponovljenih blokada LOS-a i mobilnosti korisnika. Ipak, ovi problemi se mogu efikasno rešiti primenom odgovarajućih tehnika, kao što su kodovanje kanala, relejna tehnologija i propagacioni protokoli.

Izbor odgovarajuće downlink strategije ima direktan uticaj na optimizaciju kapaciteta, pouzdanosti i kontinuiteta komunikacije u hibridnim RF/optičkim sistemima.

Jedan od problema sa kojima se susreće hibridni bežični sistem jeste odluka o raspoređivanju paketa (packet scheduling). Efikasna odluka o raspoređivanju adekvatno balansira saobraćajno opterećenje između pojedinačnih sistema. U hibridnom komunikacionom sistemu, paketi koji stižu u sistem raspoređuju se za prenos kroz jednu od razmatranih mreža. Efektivna odluka o raspoređivanju je ključna za maksimizaciju ukupnih performansi sistema [31].

### **2.3. RF/Optičke bežične hibridne mreže, unutrašnji hibridni sistemi**

Različiti RF/optical wireless hibridni sistemi mogu se implementirati kroz različite kombinacije, u zavisnosti od zahteva sistema i scenarija primene [32–38]. Takve RF/optical wireless hibridne mreže omogućavaju iskorišćavanje komplementarnih prednosti RF i optičkih tehnologija, čime se mogu unaprediti ukupne performanse sistema.

Ako korisnik zahteva veću propusnost, obično se prelazi na optičku bežičnu mrežu. Ukoliko korisnik zahteva NLOS komunikaciju ili veću podršku za mobilnost, tada se bira RF bežični sistem. Primena RF/optical wireless hibridnih sistema moguća je kako u zatvorenim, tako i u otvorenim prostorima, uključujući komunikacije u vozilima i podvodne komunikacije. Ovakav adaptivni izbor pristupne tehnologije omogućava optimizaciju performansi u skladu sa zahtevima korisnika i uslovima okruženja.

Iako su scenariji primene RF/optical wireless hibridnih sistema slični scenarijima za pojedinačne RF i optičke sisteme, hibridni sistemi unapređuju performanse mreže u poređenju sa pojedinačnim sistemima. Razmatrani su različiti slučajevi RF/optical wireless hibridnih sistema.

Trenutno se RF tehnologije kao što su WiFi, femtoćelije i Bluetooth, kao i optičke bežične tehnologije poput VLC, LiFi i OCC sistema, široko koriste za većinu bežičnih aplikacija za unutrašnji prostor. U većini unutrašnjih scenarija, višeslojni HetNet sistemi koriste kombinaciju makroćelija, koje obezbeđuju širu pokrivenost i niže brzine prenosa, RF

femtoćelija i WiFi mreža, koje poboljšavaju pokrivenost kao i optičkih atocelija koje obezbeđuju dodatni kapacitet korišćenjem optičkog spektra.

LiFi i VLC omogućavaju rasterećenje saobraćaja sa kapacitetom opterećenih licenciranih makroćelija i/ili RF malih ćelija/femtoćelija. Na taj način, hibridni RF/optical wireless sistemi prevazilaze ograničenja pojedinačnih mreža i istovremeno koriste njihove prednosti. U kontekstu unutrašnjih scenarija, termin RF se generalno odnosi na WiFi, femtoćelijske i makroćelijske mreže.

Pošto prijemni uređaji poput pametnih telefona ne mogu biti opremljeni LED izvorima visoke snage za uplink komunikaciju, VLC i LiFi sistemi ne mogu postići zadovoljavajuće performanse za uplink komunikaciju, iako je tehnički moguće obezbediti i uplink i downlink. OCC omogućava jednosmernu komunikaciju, dok se komunikacija u suprotnom smeru obavlja putem LiFi, VLC ili RF mreža.

Sve kombinacije uplink, downlink i dvosmerne komunikacije (uplink/downlink) moguće su kroz VLC i LiFi mreže. RF sistemi obezbeđuju i uplink i downlink u svim predstavljenim scenarijima. Ovi hibridni bežični sistemi ostvaruju više ključnih ciljeva savremenih bežičnih komunikacija, uključujući:

- 1) poboljšanu propusnost zahvaljujući raspodeli saobraćaja (load balancing),
- 2) smanjenu interferenciju zajedničkim raspoređivanjem RF i OWC tehnologija koje se odlikuju različitim karakteristikama,
- 3) glatko preuzimanje veze (handover) između OWC sistema, uz podršku široke RF pokrivenosti,
- 4) povećanu pouzdanost veze obezbeđivanjem i LOS i NLOS komunikacionih mogućnosti.

## **2.4. Hibridni sistemi sa WiFi-jem zasnovanim na RF-u i malim ćelijama**

Različite kombinacije mogu se ostvariti korišćenjem hibridnih sistema koji uključuju OWC tehnologije zajedno sa RF-baziranim WiFi i malim ćelijama radi optimizacije ukupnih performansi sistema. Hibridni sistemi kao što su WiFi/VLC, male ćelije/VLC, WiFi/LiFi, RF/OCC i male ćelije/LiFi poboljšavaju ukupne performanse sistema. I LiFi i VLC obezbeđuju visoke brzine prenosa, dok WiFi i male ćelije pružaju znatno širu pokrivenost i bolju podršku za mobilnost.

Ako su LED predajnici postavljeni blizu jedan drugog, VLC i LiFi sistemi mogu trpeti posledice interferencije. RF mreže obezbeđuju pokrivanje “rupa” u pokrivenosti koje nastaju u LiFi i VLC mrežama, čime se olakšava proces handover-a. U tom kontekstu, koordinisano korišćenje RF i OWC tehnologija omogućava optimizaciju pokrivenosti i kontinuiteta veze u prisustvu interferencije i promenljivih uslova propagacije.

## **2.5. Hibridni sistemi sa makroćelijama**

WiFi ili male ćelije nisu uvek dostupne u svakom zatvorenom prostoru. Za ovakve scenarije u zatvorenom, hibridni sistemi makroćelija/VLC ili makroćelija/LiFi poboljšavaju nivo kvaliteta usluge (QoS). Pozadinski saobraćaj koji zahteva nisku mobilnost, visoku brzinu

prenosa i relativno niži QoS opslužuje se putem LiFi ili VLC mreže, dok se servisi koji zahtevaju višu mobilnost i viši QoS povezuju na makroćelijsku mrežu u zatvorenom okruženju. Pored toga, makroćelijska mreža obezbeđuje pokrivanje „rupa“ u pokrivenosti koje nastaju u LiFi i VLC mrežama, čime se olakšava proces handover-a. Slično kao i sistemi WiFi/VLC, male ćelije/VLC, WiFi/LiFi i male ćelije/LiFi, hibridni sistemi makroćelija/VLC i makroćelija/LiFi takođe podržavaju rasterećenje saobraćaja ka brzim i jeftinijim VLC i LiFi mrežama, čime se poboljšava iskorišćenost spektra, pouzdanost veze, neprekidno kretanje korisnika optičkih bežičnih mreža i bezbednost [31].

VLC i LiFi rasterećuju sve teži saobraćaj u makroćelijskoj mreži, poboljšavajući spektralnu i energetska efikasnost bez uvođenja dodatnih interferencija. Ovaj tip hibridnog sistema obično se formira preko različitih bežičnih konekcija, jer u hibridnom sistemu postoje različite pristupne mreže. Optičke pristupne tačke (AP) u domovima povezuju se putem Ethernet-a, CATV-a, PLC-a ili drugih bežičnih mreža. Istovremeno, spoljne makro-bazne stanice (MBS) povezuju se putem različitih optičkih vlakana, FSO-a ili drugih bežičnih tehnologija.

## **2.6. Izbor mreže u zatvorenim RF/optičkim bežičnim hibridnim sistemima**

U hibridnim RF/VLC i RF/LiFi sistemima, saobraćaj se raspodeljuje između dve mreže sa ciljem optimizacije kvaliteta usluge i maksimalnog iskorišćenja raspoloživih resursa. Mreža u hibridnom sistemu može biti izabrana na osnovu kriterijuma kao što su: tip saobraćaja, potreban nivo bezbednosti, potrebna brzina prenosa podataka, zahtev za osvetljenjem, podrška mobilnosti i tip usluga u uzlaznoj/silaznoj vezi. Nekoliko uobičajenih pristupa za izbor mreže su: fazi logika, model reda čekanja i učenje putem nagrađivanja (reinforcement learning). Detalji kriterijuma za izbor odgovarajuće mreže:

Prenos u uzlaznoj/silaznoj vezi: U zatvorenom okruženju, mreže se mogu dodeljivati na osnovu tipa uzlazne i silazne veze. Uobičajeno, optička silazna veza obezbeđuje veći obim podataka u poređenju sa uzlaznom vezom. VLC i LiFi mreže podržavaju usluge sa većim brzinama prenosa podataka u poređenju sa RF sistemima. Stoga se VLC ili LiFi mreže mogu koristiti za silazni prenos, dok se RF mreže mogu koristiti za podršku uzlaznom prenosu. Kao posledica toga, veliki deo saobraćaja može biti preusmeren sa RF mreža na optičke mreže, čime se značajno smanjuje efekat interferencije.

Tip saobraćaja: Neke usluge, poput real-time govorne komunikacije i bankarstva, zahtevaju nizak protok podataka, ali visok nivo kvaliteta usluge (QoS). Nasuprot tome, određeni tipovi saobraćaja, kao što je video-strimovanje, zahtevaju visok protok podataka, dok im nizak nivo QoS-a nije od ključnog značaja. Zbog toga se mreža može birati u zavisnosti od tipa saobraćaja, jer RF i OWC mreže podržavaju različite nivoe QoS-a.

Potreban nivo bezbednosti: Optičke veze su osetljive na prepreke. Kada korisnik koristi optičku bežičnu mrežu u zatvorenoj prostoriji, informacije ne mogu da prodru van te prostorije i ne mogu biti presretnute od strane osobe koja se nalazi izvan nje. Stoga je nivo bezbednosti važan parametar pri izboru mreže za određenu uslugu.

LOS/NLOS: Optički bežični sistemi ne obezbeđuju pouzdanu komunikacionu vezu u NLOS uslovima. Međutim, RF sistemi mogu da obezbede komunikaciju u takvim situacijama. Zbog toga je razmatranje LOS ili NLOS uslova još jedan važan parametar pri izboru mreže.

**Zahtev za osvetljenjem:** Tokom određenih delova dana upotreba LED-ova možda neće biti potrebna radi osvetljenja. Na primer, osvetljenje nije potrebno tokom praznika u kancelariji, tokom dana ili u kasnim noćnim satima. U tim periodima deo ili celokupna bežična povezanost može biti preuzeta od strane RF mreža ukoliko su one u stanju da pruže potrebne usluge.

**Podrška za mobilnost:** Usluge koje zahtevaju podršku za mobilnost mogu biti pružene preko RF mreža, dok se usluge koje ne zahtevaju značajnu mobilnost mogu obezbediti putem optičkih mreža.

Na osnovu ovih kriterijuma moguće je realizovati adaptivne strategije izbora mreže koje omogućavaju optimizaciju performansi hibridnih RF/optičkih sistema u zatvorenim prostorima.

## **2.7. Mogućnosti za hibridne optičke/RF sisteme u zatvorenom prostoru**

Hibridni sistemi u zatvorenom prostoru mogu pružiti mnoge mogućnosti za bežične korisnike kroz optimizaciju raspodele saobraćaja i korišćenja mrežnih resursa. Preusmeravanje saobraćaja ka optičkim bežičnim mrežama: Preusmeravanje saobraćaja ka VLC i LiFi mrežama može poboljšati performanse RF-baziranog nelicenciranog WiFi-ja, kao i licenciranih malih ćelija i makroćelijskih sistema. Performanse WiFi mreže ozbiljno se degradiraju usled visokog nivoa interferencije od susednih WiFi pristupnih tačaka i/ili više aktivnih korisnika koji dele ograničeni opseg WiFi AP-a. Iako tehnologija malih ćelija koristi licencirani frekvencijski opseg, ona takođe može izazvati interferenciju. Usluge koje zahtevaju visok QoS, npr. glasovne komunikacije, kao i relativno veću mobilnost, mogu biti podržane RF mrežama, dok korisnici sa malom mobilnošću ili statični korisnici sa uslugama koje zahtevaju relativno niži QoS, npr. pozadinski saobraćaj, mogu biti podržani LiFi (ili VLC) mrežama. Stoga ovi hibridni sistemi omogućavaju preusmeravanje velikog dela saobraćaja sa RF mreža na LiFi (ili VLC) mreže. Preusmeravanje saobraćaja može se izvršiti na osnovu klasifikacije uplink/downlink saobraćaja ili tipa saobraćaja [31].

**Poboljšanje pouzdanosti veze:** Postojanje dve ili više mreža svakako povećava pouzdanost veze. Hibridni sistemi kao što su VLC/WiFi, VLC/mala ćelija, LiFi/WiFi, LiFi/mala ćelija, VLC/makroćelija i LiFi/makroćelija formiraju mreže sa dva nivoa koje obezbeđuju pouzdanu povezanost između predajnika i prijemnika. Prisustvo više mreža omogućava optimizaciju pouzdanosti veze kroz adaptivni izbor dostupne komunikacione tehnologije.

**Poboljšanje neprekidnog kretanja:** Pored brzog preusmeravanja saobraćaja, svi hibridni RF/VLC i RF/LiFi sistemi obezbeđuju izuzetno neprekidnu povezanost. RF-bazirani WiFi, male ćelije i makroćelije pružaju širu pokrivenost za korisnike u zatvorenom prostoru. Stoga RF mreže mogu podržati neprekidno kretanje između dve optičke mreže tako što obezbeđuju pokrivenost u “rupama” optičkih mreža. Na ovaj način se optimizuje kontinuitet komunikacije tokom kretanja korisnika u zatvorenim prostorima.

**Energetska efikasnost:** Potrošnja energije u optičkim bežičnim sistemima je niska u poređenju sa RF sistemima. Osim toga, LED diode se koriste za osvetljenje. Preusmeravanje saobraćaja sa RF mreža na optičke mreže smanjuje ukupnu potrošnju energije. Unutrašnji RF/optical hibridni sistemi značajno smanjuju potrošnju energije. Time se ostvaruje optimizacija energetske potrošnje hibridnog sistema u poređenju sa isključivo RF rešenjima.

Poboljšanje bezbednosti: Optičke bežične mreže su veoma osetljive na prepreke. Kao posledica toga, informacije ne mogu biti presretnute izvan prostorije. Stoga svi hibridni sistemi kao što su VLC/WiFi, VLC/mala ćelija, LiFi/WiFi, LiFi/mala ćelija, VLC/makroćelija, RF/OCC i LiFi/makroćelija povećavaju nivo bezbednosti [31].

Smanjenje interferencije: Nivoi interferencije u optičkim i RF mrežama značajno su smanjeni u unutrašnjim RF/optical hibridnim bežičnim mrežama. RF i optički signali međusobno se ne ometaju. Preusmeravanje saobraćaja sa RF na optičke bežične sisteme smanjuje nivo prenosa snage u korisničkim uređajima (UE) i RF pristupnim tačkama (AP). Korišćenje RF mreža za pokrivanje „rupa“ u pokrivenosti može smanjiti prenešenu snagu LED-ova. Pored toga, korisnici koji su jako pogođeni interferencijom mogu biti servisirani putem mreže koja je manje pogođena u hibridnim RF/optical bežičnim sistemima. Ovakav pristup omogućava optimizaciju interferencijskog okruženja u zatvorenim hibridnim RF/optičkim sistemima.

Poboljšanje iskorišćenosti spektra: Primena RF/optical hibridnih bežičnih sistema za korisnike u zatvorenom prostoru poboljšava iskorišćenost vrednog RF spektra. Pozadinski saobraćaj sa visokim protokom podataka preusmerava se na optičke bežične mreže, dok saobraćaj koji zahteva viši prioritet ili veću mobilnost podržava RF sistem.

Sve navedene prednosti ukazuju da hibridni RF/optički sistemi u zatvorenom prostoru omogućavaju optimizaciju spektralne efikasnosti uz istovremeno očuvanje kvaliteta usluge.

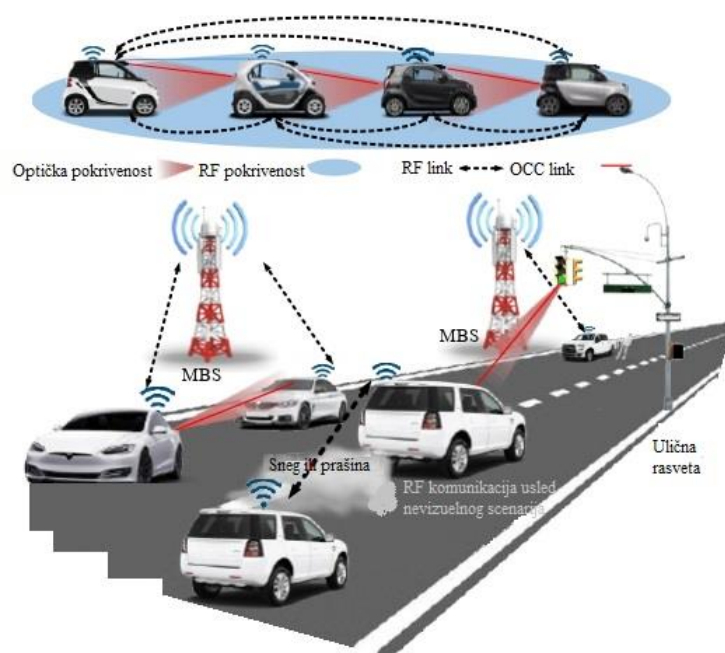
## **2.8. RF/optički bežični hibridni sistemi u vozilima**

Zbog bezbednosnih razloga, pouzdanost veze je od presudnog značaja u V2X komunikacijama. U tom kontekstu, primena hibridnih RF/optičkih sistema omogućava optimizaciju pouzdanosti i dostupnosti komunikacione veze u V2X okruženjima. Iako OWC ima mnoge prednosti za V2X komunikacije, njegova primena je ograničena na LOS (line-of-sight) uslove. Stoga, kombinacija sa RF sistemima, kao što je 5,9 GHz DSRC (dedicated short-range communications), značajno poboljšava kvalitet veze. DSRC je zrela tehnologija koja može obezbediti komunikaciju na relativno dužim udaljenostima. Nasuprot tome, osim FSO, druge OWC tehnologije ne mogu obezbediti uporedive udaljenosti komunikacije, ali se smatra da imaju veliki potencijal u uslovima visoke gustine saobraćaja, dok njihova velika geografska pokrivenost takođe predstavlja značajnu prednost.

VLC može podržati vrlo kratke međuvazdušne LOS komunikacije između vozila, dok OCC može obezbediti komunikaciju do 60 m, a FSO još duže point-to-point komunikacije. Za relativno duže distance, poruke u VLC se prenose putem multi-hop metoda. Kod poruka visokog prioriteta, multi-hop prenosi mogu dovesti do povećanog end-to-end (E2E) kašnjenja.

Izbor odgovarajuće komunikacione tehnologije u okviru hibridnog sistema omogućava optimizaciju end-to-end kašnjenja u zavisnosti od prioriteta poruka.

Korišćenje RF/optical hibridnih bežičnih sistema može se primeniti u različitim V2X komunikacijama. Slika 2.8.1 prikazuje neke scenarije primene RF/optical hibridnih sistema u vozilima i opisuje scenarije za vehicle-to-vehicle (V2V) i vehicle-to-infrastructure (V2I) komunikacije. Svako vozilo na putu šalje hitne informacije ka određenoj destinaciji (tj. drugim vozilima ili saobraćajnoj infrastrukturi) uz pomoć najbliže MBS (makro-bazne stanice).



**Slika 2.8.1.** Scenariji primene hibridnih RF/optičkih mreža u vozilnim sistemima

Korišćenjem OCC-a, svaka kamera montirana na vozilu prima signal od vozila koje se nalazi ispred, koje se kreće unutar vidnog polja (FOV) te kamere. Pored toga, kamera istovremeno prima optičke signale sa saobraćajne infrastrukture. Nije moguće komunicirati sa vozilom koje se nalazi ispred prvog vozila koristeći samo OCC, zbog čega se DSRC koristi za uspostavljanje takve komunikacije.

Bežični hibridni sistem u vozilima je posebno izazovan zbog pokretne prirode predajnika i prijemnika, kao i dinamičkih vremenskih uslova. Pored toga, ovaj scenario zahteva podršku infrastrukture, npr. saobraćajnih svetala i čelijske povezanosti.

Za spoljašnje vozne komunikacije, ova hibridna arhitektura može obezbediti bolji QoS za V2X komunikacije [39]. Najvažniji aspekti korišćenja hibridnog sistema su preusmeravanje saobraćaja i pouzdanost veze. Preusmeravanje saobraćaja na optičku VLC mrežu rasterećuje opterećenje zagušenih RF sistema, kao što je DSRC, čime se poboljšavaju performanse RF sistema. Pored toga, performanse RF sistema ozbiljno se degradiraju usled visokog nivoa interferencije od neplaniranih susednih RF pristupnih tačaka, što se takođe rešava preusmeravanjem velikog saobraćaja na optičke bežične mreže.

Pouzdanost veze je veoma važan problem u V2X komunikacijama. Kao rezultat primene hibridnog sistema, verovatnoća kvara veze se smanjuje u svim situacijama, uključujući najnepovoljnije okruženje, NLOS pozicioniranje između predajnika i prijemnika, kao i visoku gustinu vozila. Neki kriterijumi, poput LOS/NLOS, potrebne udaljenosti komunikacije i uslova okoline, mogu se uzeti u obzir pri izboru mreže u RF/optical hibridnim bežičnim sistemima.

Razmatranje LOS/NLOS je važan parametar pri izboru mreže u RF/optical V2X komunikacijama. Optički FSO podržava komunikaciju većeg dometa sa preciznim usmeravanjem između predajnika i prijemnika. Nasuprot tome, OCC podržava komunikaciju srednjeg dometa, dok VLC baziran na LED/PD podržava samo kratke distance. Postojeći RF

sistemi podržavaju komunikaciju srednjeg dometa za V2X. Stoga se mreža u RF/optical hibridnom sistemu može birati na osnovu udaljenosti komunikacije. Optički sistemi su u velikoj meri podložni uticaju okoline, uključujući maglu, prašinu i okolna svetla. Zbog toga su uslovi okoline takođe važan kriterijum pri izboru odgovarajuće mreže.

Uzimajući u obzir LOS/NLOS uslove, udaljenost komunikacije i uticaj okoline, izbor mreže u RF/optičkim hibridnim V2X sistemima može se formulisati kao optimizacioni problem sa više kriterijuma.

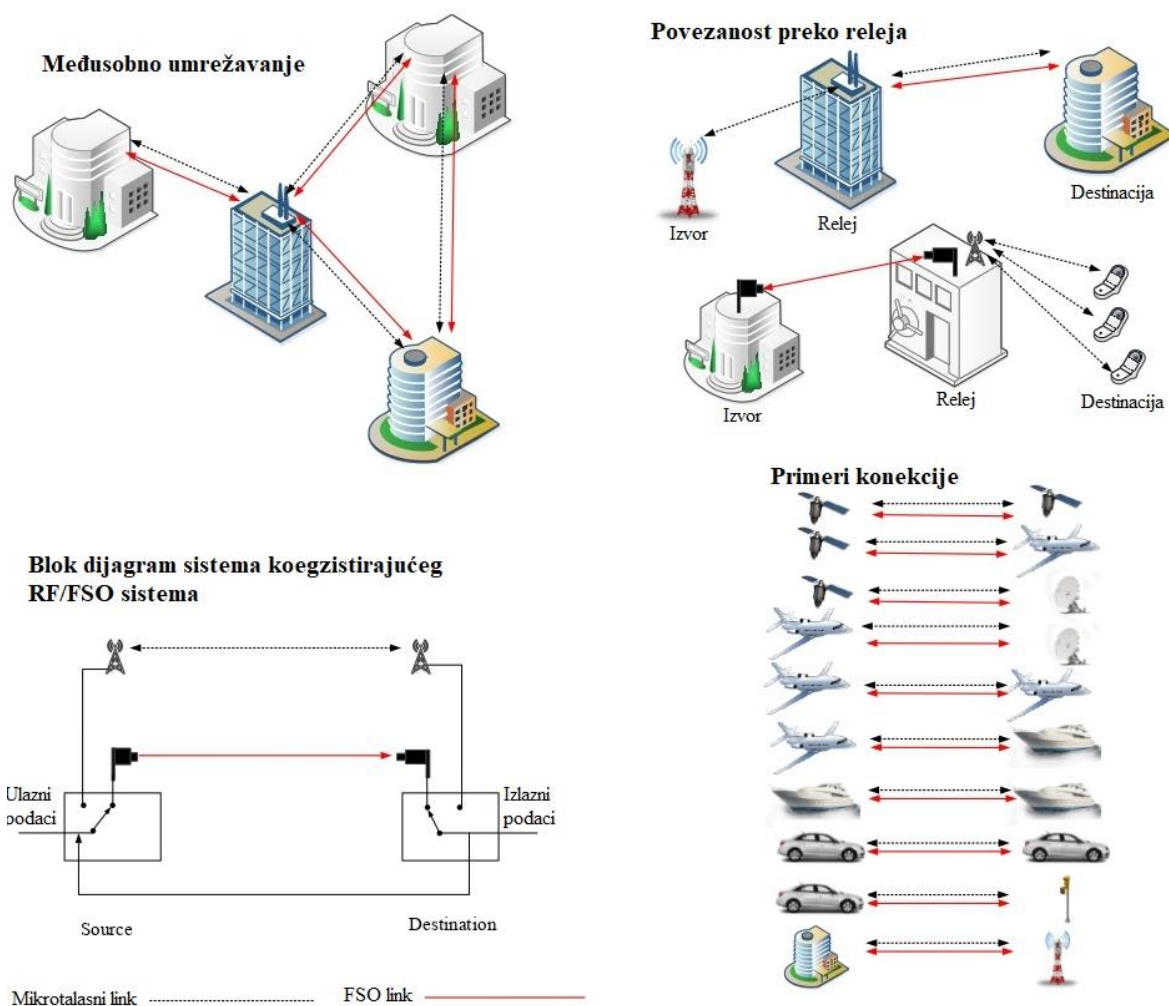
## **2.9. RF/optički bežični hibrid u slobodnom prostoru**

FSO postaje atraktivno rešenje za bežične komunikacione sisteme, posebno za problem „poslednje milje“, zbog svojih očiglednih prednosti, kao što su izuzetno širok dostupni opseg, niska cena implementacije i spektralni opseg bez licence [40]. FSO sistem obezbeđuje veoma visokobrzinski point-to-point komunikacioni link na otvorenom prostoru. Međutim, ovaj sistem značajno pati od atmosferskih efekata, posebno u uslovima atmosferske turbulencije i smanjene vidljivosti, kao što su magla, sneg i prašina. Konkretno, FSO sistem zavisi od dostupnosti LOS veze, što uvodi kritična ograničenja za mobilne čvorove [41].

Precizno usmeravanje predajnika prema PD-u predstavlja još jedno ograničenje FSO sistema. Toplotna ekspanzija, dinamička opterećenja vetrom i slabiji zemljotresi izazivaju vibracije predajnog snopa, što dovodi do neusaglašenosti između FSO predajnika i prijemnika. Istovremena upotreba RF sistema, kao što su microwave i mmWave linkovi, može prevazići ova ograničenja. RF linkovi koji koriste milimetarske talase ili mikrotalase značajno su pogođeni kišnim uslovima. Pored toga, RF sistemi ne mogu obezbediti komunikaciju na veoma dugim udaljenostima sa visokim brzinama [31].

Stoga je FSO/RF hibridni sistem potencijalno rešenje za obezbeđivanje pouzdanosti veze u različitim vremenskim uslovima, jer su linkovi različito pogođeni u zavisnosti od vremenskih prilika. U FSO/RF hibridnom sistemu FSO sistem se koristi kao primarna mreža, dok RF sistem funkcioniše kao sekundarna rezervna mreža. Ovaj hibridni sistem može se koristiti čak i za free-space komunikacione sisteme velikog dometa, kao što su linkovi avion–avion, inter-satelit, satelit–zemlja, zemlja–satelit, satelit–avion, avion–satelit, avion–zemlja, brod–brod i brod–infrastruktura, sa veoma visokom pouzdanošću.

Na Slici 2.9.1 prikazan je pregled implementacija hibridnog RF/FSO sistema. Model sistema pokazuje da se jedna od dostupnih mreža koristi za povezivanje linka. Hibridni sistemi koji sadrže dve mreže, RF i FSO linkove, koriste se za međumrežno povezivanje sa povećanom pouzdanošću veze. Povezivanje putem releja predstavlja važnu karakteristiku ovog hibridnog sistema. Ovaj hibridni sistem zasnovan na releju se takođe naziva mešana RF/FSO mreža. Na Slici 2.9.1 su prikazani i primeri moguće povezanosti.



**Slika 2.9.1.** Primer spoljašnjih hibridnih RF/FSO mreža i njihova primena

Za FSO komunikacije, ova hibridna arhitektura obezbeđuje bolju pouzdanost veze u različitim uslovima okoline. Najvažnija prednost ovog hibridnog sistema je dostupnost veze u bilo kojim najnepovoljnijim uslovima okoline. Sistem može efikasno raditi u svim vremenskim uslovima. Zbog dinamičnih promena vremenskih uslova, odgovarajući izbor mreže je važan u hibridnoj RF/FSO povezanosti.

Najvažniji parametri koji se uzimaju u obzir pri izboru mreže u hibridnim RF/FSO sistemima su uslovi okoline i potrebna udaljenost komunikacije. FSO link je u velikoj mjeri pogođen maglom, prašinom i snegom, dok su linkovi mikrotalasa i milimetarskih talasa znatno pogođeni kišom. U normalnim vremenskim uslovima FSO sistem se može koristiti, dok izbor linka zavisi od prirode vremenskih prilika. Ipak, FSO može obezbediti i duži domet komunikacije u poređenju sa RF linkovima. Stoga se mreža može birati na osnovu potrebne udaljenosti komunikacije. Ovakav adaptivni izbor linka može se posmatrati kao mehanizam optimizacije performansi hibridnog RF/FSO sistema u smislu povećanja dostupnosti veze i smanjenja prekida komunikacije u promenljivim propagacionim uslovima.

## 2.10. RF/optičke i akustično/optičke hibridne mreže pod vodom

U poslednjih nekoliko godina, bežične optičke komunikacije pod vodom (UWOC) privukle su veliku pažnju zbog svoje primene u raznim potencijalnim oblastima, kao što su monitoring životne sredine, inspekcija naftovoda i istraživanja na otvorenom moru. Za mnoge primene podvodnih bežičnih komunikacionih sistema neophodan je kompromis između dometa i brzine prenosa. Mogući načini realizacije podvodnih komunikacija uključuju akustiku, RF i optiku [42]–[46].

U poređenju sa RF zasnovanim zemaljskim komunikacijama, podvodne komunikacije zasnovane na RF i akustičnim talasima ne mogu obezbediti veze sa velikim brzinama. Akustične komunikacije omogućavaju linkove do 20 km, što je najduži domet među svim UWC tehnologijama, zbog čega je ova metoda široko korišćena u podvodnim bežičnim komunikacijama. Međutim, s obzirom na to da je frekvencijski opseg rada ovog sistema između desetina herca i stotina kiloherca, brzina prenosa podataka u ovom sistemu je ograničena na kbps. Pored toga, zbog sporih brzina propagacije, akustični linkovi su skloni ozbiljnim kašnjenjima u komunikaciji.

RF sistemi pokazuju izuzetno loše performanse za podvodne komunikacije zbog faktora kao što su višestruka propagacija, vremenske varijacije kanala i jaka atenuacija signala, posebno na velikim udaljenostima. Zbog toga je RF komunikacija ograničena kratkim dometom linka.

Korišćenje LD plave svetlosti talasne dužine 405 nm smatra se važnim istraživačkim problemom za UWC sisteme. Optičke komunikacije mogu obezbediti LOS link sa brzinom prenosa podataka u Gbps dometu na udaljenostima od 10 do 100 m. Tehničke prednosti UWOC sistema uključuju najniže kašnjenje linka, najviši nivo sigurnosti komunikacije, najveću brzinu prenosa i najniže troškove implementacije u poređenju sa drugim metodama.

UWOC sistemi ne funkcionišu dobro u NLOS scenarijima, a precizno usmeravanje između predajnika i prijemnika je neophodno za LOS komunikaciju. Takođe, performanse UWOC sistema mogu biti ozbiljno degradirane usled apsorpcije i rasipanja svetlosti u morskoj vodi, turbulencije kanala, grešaka usklađivanja i drugih faktora, što može dovesti do ponovljenih prekida komunikacije. Stoga je pouzdanost UWOC sistema potrebno dodatno unaprediti. Tabela 2.10.1 prikazuje osnovne razlike među tri podvodne komunikacione tehnologije.

Na osnovu razmatranja prednosti i nedostataka svake od UWC tehnologija, može se zaključiti da prisustvo više komunikacionih sistema, odnosno hibridnog sistema, može prevazići njihova ograničenja. Moguće je imati RF/optical, acoustic/optical, pa čak i RF/acoustic/optical hibridne sisteme za UWC. Slika 2.10.1 prikazuje osnovne mogućnosti povezivanja hibridnih RF/optical, RF/acoustic i acoustic/optical sistema u podvodnim komunikacijama. Komunikacija je moguća između različitih čvorova unutar vode, kao i između čvora unutar vode i čvora izvan vode.

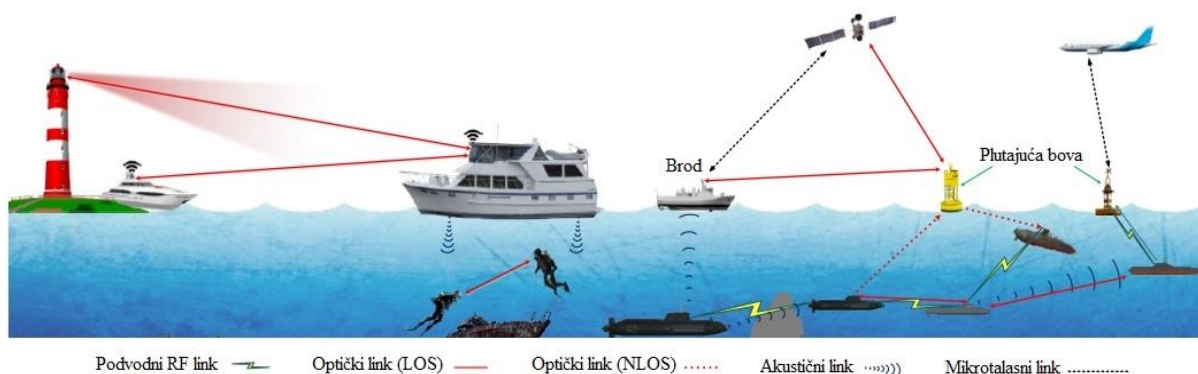
Hibridni sistemi mogu doneti značajne prednosti za UWC, kao što su preusmeravanje saobraćaja na optičke bežične mreže i povećanje pouzdanosti veze. U hibridnom sistemu, preusmeravanje saobraćaja na optičku mrežu povećava kapacitet sistema, jer RF i akustične mreže ne mogu obezbediti link vrlo velike propusnosti kao optičke bežične mreže. Takvo preusmeravanje i izbor komunikacione tehnologije predstavlja oblik optimizacije performansi

hibridnog sistema, kojim se postiže bolji kompromis između propusnog opsega, pouzdanosti veze i komunikacione udaljenosti.

**Tabela 2.10.1.** Osnovne razlike između tri UWC tehnologije

|                          | <b>RF</b>                    | <b>Akustična</b>                  | <b>UWOC</b>                                           |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Frekvencija              | 30–300 Hz ili MHz opsezi     | 10 Hz–100 kHz                     | $10^{12}$ – $10^{15}$ Hz                              |
| Transmisiona snaga       | U opsegu od milivata do vata | Obično desetine vati              | Nekoliko vati                                         |
| Data rate                | Mbps opseg                   | kbps opseg                        | Gbps                                                  |
| Komunikaciona udaljenost | do 10 m                      | do 20 km                          | 10–100 m                                              |
| Veličina antene          | 0.5 m                        | 0.1 m                             | 0.1 m                                                 |
| Performanse parametara   | Provodljivost i permitivnost | Temperatura, salinitet i pritisak | Absorpcija, rasejanje, zamućenost i organska materija |
| Propagaciono kašnjenje   | Umereno                      | Visoko                            | Slabo                                                 |
| Slabljenje               | 3.5–5 dB/m                   | 0.1–4 dB/km                       | 0.39 dB/m u okeanu i 11 dB/m u zamućenju              |
| LOS/NLOS                 | Oba                          | Oba                               | LOS samo                                              |

U RF/optical hibridnom sistemu, usluge velikih brzina za komunikacije na dugim i kratkim udaljenostima mogu se realizovati pomoću optičkog bežičnog sistema, dok RF sistem može služiti za komunikacije na kratkim udaljenostima. Slično tome, u acoustic/optical hibridnom sistemu, LOS usluge sa visokim brzinama se postižu korišćenjem optičkog bežičnog sistema, dok akustični sistem može služiti za NLOS komunikacije.



**Slika 2.10.1.** Osnovna povezanost hibridnog RF/optičkog sistema u podvodnim komunikacijama

Pouzdanost veze je niža u UWC u poređenju sa vazdušnim komunikacijama. Stoga prisustvo dva ili više komunikacionih sistema sigurno obezbeđuje veću pouzdanost veze. RF ili akustični sistem može funkcionisati u slučaju gubitka preciznog usmeravanja između predajnika i prijemnika, čime se poboljšava pouzdanost veze [31].

Najvažniji kriterijumi za izbor odgovarajuće mreže u podvodnim komunikacijama su potrebna udaljenost komunikacije, tip saobraćaja i precizno usmeravanje optičkog linka. Akustični sistem se može koristiti za veoma udaljene komunikacije, dok se RF sistem može koristiti samo za vrlo kratke udaljenosti. UWOC može biti korišćen za srednje udaljenosti uz podršku visokobrzinskih komunikacija, ali zahteva vrlo precizno usmeravanje između predajnika i prijemnika. Stoga, u situacijama kada je precizno usmeravanje moguće, linkovi se mogu podržavati pomoću UWOC-a, dok se u ostalim situacijama koriste RF ili akustični sistemi.

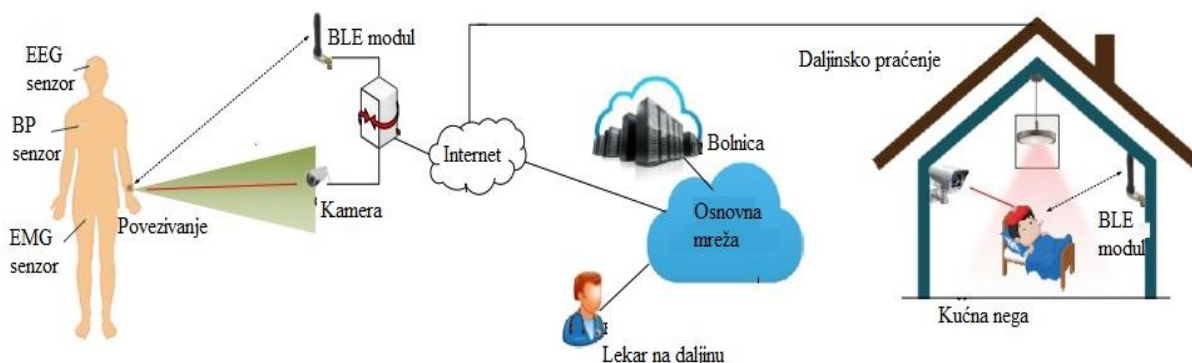
## **2.11. RF/optički bežični hibrid u e-zdravstvu**

Obezbeđivanje dobrog sistema za praćenje je od velikog značaja u zdravstvenim sistemima. Trenutno, većina zemalja stavlja akcenat na unapređenje ljudskih zdravstvenih sistema. Za svako potencijalno eHealth rešenje da bi bilo funkcionalno, neophodna je povezanost nosivih senzora/pločica sa mrežom. Ova komunikacija se trenutno ostvaruje korišćenjem RF tehnologije zasnovane na BLE (Bluetooth Low Energy).

Međutim, postoje brojni nedostaci korišćenja postojećih RF tehnologija za eHealth rešenja. RF za zdravstvena rešenja izaziva ozbiljne elektromagnetne smetnje, a mnogi medicinski uređaji su veoma osetljivi na takve smetnje, što može dovesti do nepravilnog rada uređaja. S druge strane, BLE obezbeđuje komunikacioni link u NLOS (non-line-of-sight) uslovima.

OCC (Optical Camera Communication) sistem predstavlja komplementarno obećavajuće rešenje za povezivanje nosivih senzora/pločica sa mrežom. Njegovo glavno ograničenje je nedostupnost linka u NLOS uslovima. Stoga, u budućim eHealth sistemima, hibridni sistem koji kombinuje OCC i BLE mogao bi biti atraktivno rešenje za praćenje zdravlja u realnom vremenu koristeći patch konekciju.

Na Slici 2.11.1 prikazana je osnovna povezanost u hibridnim RF/optičkim bežičnim sistemima. Telesni senzori, npr. EEG (elektroencefalogram), BP (krvni pritisak) i EMG (elektromiografija), prikupljaju podatke sa različitih delova tela. Senzori su povezani sa kožnom pločicom koja ima integrisan modul OCC i BLE. Ova pločica može biti povezana sa kamerom i BLE modulom za OCC, odnosno RF konekciju. OCC ne funkcioniše u NLOS uslovima. Kao što je prikazano na Slici 2.11.1, pacijent je povezan na OCC sistem tokom LOS (line-of-sight) uslova, dok se za NLOS uslove koristi BLE.



**Slika 2.11.1.** Primeri povezivanja hibridnih RF/optičkih sistema u e-zdravstvu

Hibridni sistem se koristi i za daljinsko praćenje pacijenata. Stanje pacijenta se meri kod kuće pomoću različitih telesnih senzora. Informacije se prikupljaju putem BLE/OCC hibridnog sistema, što omogućava lekaru da prati stanje pacijenta na daljinu. Osoba koja koristi invalidska kolica se prati putem hibridnog RF/OCC sistema. OCC sistem prikuplja informacije o zdravstvenom stanju osobe preko kožne pločice. Informacije se šalju putem makroćelijske mreže ili satelitske mreže povezane sa centralnom mrežom.

Još jedan primer primene hibridnog RF/OCC sistema je pružanje hitne medicinske pomoći u ambulantnom vozilu. Informacije o pacijentu se prikupljaju putem BLE/OCC hibridnog sistema instaliranog u vozilu. 5G makroćelijska ili satelitska mreža povezuje ambulantu sa centralnom mrežom radi daljinskog praćenja.

Veoma je važno obezbediti izuzetno pouzdan link za praćenje pacijenata u realnom vremenu sa što nižim nivoom smetnji. Pouzdanost linka je manja kod OCC sistema kada se koristi u NLOS uslovima, dok BLE generiše značajne smetnje. Stoga, prisustvo dva komunikaciona sistema svakako poboljšava pouzdanost linka. Pored toga, BLE/OCC hibridni sistem takođe unapređuje bezbednost podataka pacijenta, jer podaci u OCC sistemu ne mogu biti hakovani izvan mreže. Glavni faktori koji se uzimaju u obzir pri izboru mreže u hibridnom BLE/OCC sistemu su LOS/NLOS situacije [31].

## 2.12. RF/optički bežični hibrid u lokalizaciji, pozicioniranju i navigaciji

I optički i RF sistemi koriste se za lokalizaciju, pozicioniranje i navigaciju. Tačnost lokalizacije u VLC, LiFi i OCC sistemima bolja je u poređenju sa WiFi sistemom u LOS uslovima.

WiFi sistem obezbeđuje bolju tačnost u NLOS uslovima. U poređenju sa RF tehnologijama, usmerene optičke mreže omogućavaju centimetarsku tačnost pri pozicioniranju u zatvorenom prostoru. Ipak, u optičkim sistemima performanse se značajno pogoršavaju u NLOS scenarijima. Performanse optičkih sistema su slabije u spoljašnjim uslovima zbog različitih vremenskih prilika.

Kao rezultat toga, koegzistencija omnidirekcionih RF tehnologija sa usmerenim optičkim bežičnim tehnologijama poboljšava ukupne performanse pri lokalizaciji, pozicioniranju i navigaciji, kako u zatvorenom tako i na otvorenom prostoru.

Hibridni RF/optički bežični signali unapređuju proces lokalizacije iz udaljene lokacije. U zatvorenom okruženju, pametni telefon može biti lokalizovan uz pomoć LED rasvete. RF/optički hibridni sistem poboljšava performanse lokalizacije. Korišćenjem OCC tehnologije, kamera pametnog telefona prima signale od više LED izvora koji se nalaze u njenom vidnom polju (FOV). Primljeni signali sadrže mnoštvo informacija, kao što su fizička veličina LED-ova i njihove koordinatne vrednosti ( $x$ ,  $y$  i  $z$ ), što omogućava određivanje rastojanja između kamere i LED-ova.

Pošto se položaj pametnog telefona neprestano menja, svaka procenjena pozicija šalje se serveru rasvete putem WiFi pristupne tačke (AP). Ovaj server zatim smanjuje grešku u proceni lokalizacije određivanjem sledeće moguće pozicije uređaja. Na ovaj način hibridni RF/optički sistem omogućava optimizaciju performansi lokalizacije kroz iterativno smanjenje greške procene položaja.

RF/optički hibridni sistemi mogu se primeniti i u scenarijima lokalizacije vozila. Svaka kamera postavljena na vozilu prima LED podatke i određuje informacije o lokaciji, koje se zatim mogu deliti sa vozilima na većim udaljenostima. Makro bazne stanice (MBS) prosleđuju ove informacije o lokaciji ka jezgru mreže. Na ovaj način, hibridni RF/optički sistemi poboljšavaju proces lokalizacije iz udaljenih lokacija. Hibridni RF/optički bežični sistem obezbeđuje izuzetno pouzdanu komunikacionu vezu. Zbog postojanja dva sistema, tačnost lokalizacije je takođe povećana. LOS/NLOS uslovi i uticaj okruženja predstavljaju ključne faktore za efikasan odabir mreže u RF/optičkom bežičnom hibridnom sistemu za potrebe lokalizacije, pozicioniranja i navigacije.

### **2.13. RF/optički sistemi za povezivanje preko mreže za prenos podataka**

Obezbeđivanje visokokapacitetne bekhaul infrastrukture koja može da podrži ogromnu gustinu čvorova i prenese veliku količinu generisanih podataka u 5G i budućim komunikacionim sistemima predstavlja veliki izazov.

Trenutno korišćene bekhaul veze mogu se generalno podeliti u četiri vrste: bakarne žice, radio-veze (npr. mmWave i mikrotalasi), optička vlakna i FSO veze. Iako su žična rešenja poput optičkih vlakana veoma važna u 5G i novijim komunikacionim sistemima, ona nisu od centralnog značaja. Tradicionalno, bakarne linije bile su najrasprostranjenija tehnologija za bekhaul mreže. Međutim, brzine koje obezbeđuju T1 i E1 linije su niske (1,544 Mb/s za T1 i 2,048 Mb/s za E1) [47]. Za veće kapacitete potrebno je paralelno povezivanje više linija, što linearno povećava troškove. Zbog toga ova tehnologija postaje preskupa i neodrživa za visoke brzine prenosa u 5G i budućim mrežama.

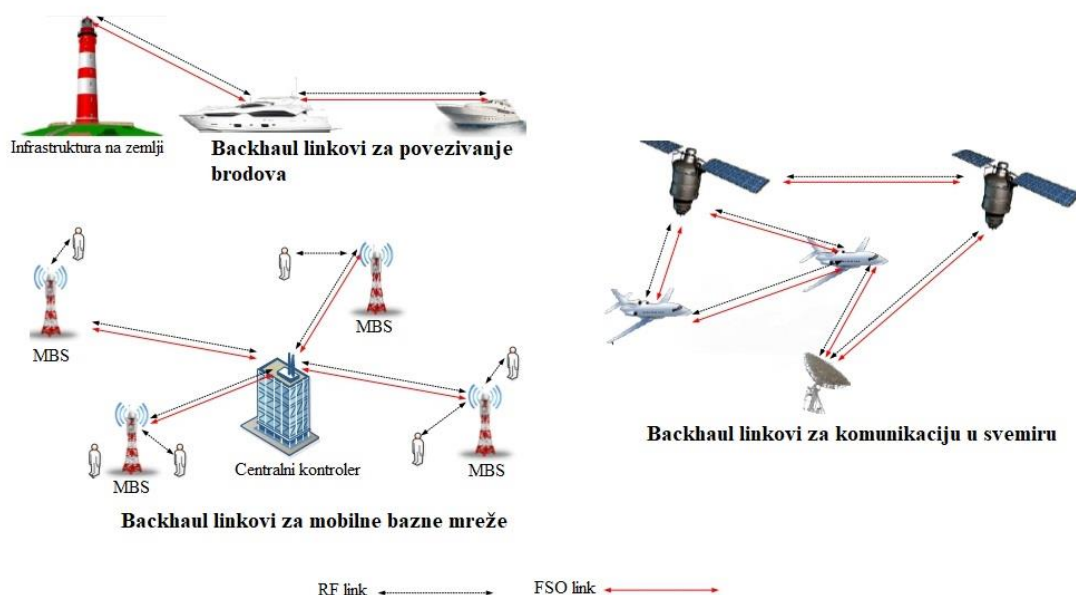
Optička vlakna nude komunikacione linkove brzine preko 10 Gbps na velikim udaljenostima. Ipak, njihova instalacija može biti ograničena zbog visokih troškova, naročito u ultra-gustim sredinama, a u nekim udaljenim ili infrastrukturno ograničenim područjima čak i nemoguća zbog zabrana ili fizičkih ograničenja.

Bežične tehnologije predstavljaju realnu alternativu bakru i optičkim vlaknima, naročito tamo gde postavljanje kablova nije izvodljivo. FSO sistemi su dobra zamena optičkim vlaknima jer mogu obezbediti visokokapacitetnu bekhaul vezu. Takođe, upotreba sličnih optičkih predajnika i detektora kao kod vlakana omogućava približno isti raspoloživi frekventni opseg.

Kapacitet FSO bekhaula je uporediv sa optičkim vlaknima, ali je cena implementacije znatno niža. Ostale prednosti FSO sistema uključuju laku instalaciju, odsustvo interferencije, brzo postavljanje i niske troškove održavanja.

Glavni nedostatak FSO sistema je snažna osetljivost na atmosferske uslove, posebno turbulenciju i smanjenu vidljivost usled magle, snega i prašine. Zahteva jasan LOS i podložan je problemu neusklađenosti predajnika i prijemnika. Nasuprot tome, RF linkovi zasnovani na mmWave i mikrotalasima nisu ozbiljno pogođeni maglom, snegom i prašinom, ali značajno trpe u kišnim uslovima.

Najbolje rešenje za poboljšanje pouzdanosti FSO bekhaul sistema jeste integracija sa RF sistemom, odnosno formiranje FSO/RF hibridnog bekhaul sistema. U takvoj arhitekturi, FSO se koristi kao primarna bekhaul mreža, dok RF sistem funkcioniše kao rezervna veza. Slika 2.13.1 prikazuje neke scenarije primene RF/FSO hibridnih mreža u bekhol konektivnosti. Hibridni sistemi obezbeđuju visokokapacitetne bekhaul linkove za bazne stanice, povezanost brodova, svemirske komunikacije i udaljene oblasti. Ovaj sistem može da posluži kao zamena za optička vlakna u složenim i teško dostupnim regionima. Postojanje dva sistema u RF/FSO hibridnoj mreži povećava kapacitet i pouzdanost bekhaul veze.



**Slika 2.13.1.** Scenariji primene za RF/FSO backhaul povezivanje

U poređenju sa hibridnim RF/FSO sistemom, integracija optičkih bežičnih tehnologija (OWI) odnosi se na spajanje optičkih vlakana i bežičnih mreža [48]–[50]. Kombinujući visok kapacitet mreža optičkih vlakana sa sveobuhvatnošću i mobilnošću bežičnih mreža, OWI formira platformu koja podržava bežične aplikacije sa velikim protokom podataka. U OWI sistemu, bežične pristupne tehnologije obezbeđuju mobilnost i sveobuhvatan pristup, dok mreža optičkih vlakana omogućava prenos velike količine saobraćaja ka pozadinskoj infrastrukturi. Kao što je već pomenuto, optička vlakna nisu uvek moguća opcija, a FSO predstavlja dobru alternativu infrastrukturi optičkih vlakana. Stoga FSO sistem može imati sličnu ulogu kao mreža optičkih vlakana u ostvarenju ciljeva OWI. Dodavanje RF sistema (mikrotalasnih i mmWave

veza) FSO sistemu, odnosno hibridno RF/FSO backhaul povezivanje, obezbeđuje pouzdanost backhaul linkova.

## **2.14. Optičke/Optičke bežične hibridne mreže**

Različite tehnologije optičkih bežičnih komunikacija pokazuju različite karakteristike. Zbog toga se optičko/optički-bežični hibridni sistemi planiraju kako bi se povećala pouzdanost veze i zadovoljio potreban nivo QoS korisnika. Takav pristup omogućava optimizaciju performansi optičkih bežičnih sistema kroz prilagođavanje korišćene tehnologije zahtevima servisa i uslovima okruženja

Hibridna rešenja LiFi/OCC i VLC/OCC predstavljaju moguće optičko/optičko bežične hibridne sisteme za korisnike u zatvorenom prostoru. VLC i LiFi obezbeđuju relativno visoke protoke, ali su manje otporni na uticaj interferencije u poređenju sa OCC sistemom. Zbog toga su ovi pristupi efikasni za primenu optičkih bežičnih mreža, kako bi se izbegli interferencijski efekti kod VLC ili LiFi sistema, kao i da bi se nadoknadio niži protok OCC sistema.

Hibridni sistemi LiFi/OCC, VLC/OCC i FSO/OCC takođe predstavljaju moguća optičko/optička hibridna rešenja za V2X komunikacije, sa ciljem prevazilaženja ograničenja pojedinačnih tehnologija. OCC može da obezbedi relativno veći domet komunikacije uz stabilnu vezu pri rastojanju u V2X scenarijima. FSO može da ostvari dobar učinak na veoma velikim rastojanjima, ali je znatno pogođen spoljašnjim atmosferskim uslovima i zahteva precizno usmeravanje predajnika i prijemnika.

Najvažnija prednost koju donose hibridni optički/optički sistemi je poboljšana pouzdanost veze. Hibridni sistemi LiFi/OCC, VLC/OCC i FSO/OCC značajno povećavaju pouzdanost veze. Postojanje dve mreže omogućava pružanje usluga sa manjim uticajem smetnji kod LiFi/VLC sistema i kompenzuje nisku brzinu prenosa podataka kod OCC sistema. Pouzdanost veze je posebno važna u V2X komunikacijama i sigurno se poboljšava primenom hibridnih optičkih/optičkih sistema.

Za izbor veze u hibridnim optičkim/optičkim mrežama mogu se uzeti u obzir parametri kao što su efekat smetnji, zahtevi za brzinom prenosa podataka, komunikaciona udaljenost i tip saobraćaja. Pored toga, precizno usmeravanje predajnika i prijemnika u FSO linkovima predstavlja važan faktor u FSO-baziranim bežičnim hibridnim sistemima za V2X komunikacije.

## **2.15. Izazovi i otvorena istraživačka pitanja**

Za uspešnu implementaciju različitih hibridnih sistema mora se efikasno rešiti niz pitanja. Jedan od najvažnijih izazova je izbor mreže. Efikasan metod za izbor mreže je ključan za hibridni sistem. Iako hibridna bežična mreža može poboljšati performanse sistema, ona istovremeno komplikuje proces odabira pristupne mreže zbog kombinacije heterogenih bežičnih tehnologija.

U homogenim mrežama izbor mreže je relativno jednostavan – obično se bira mreža sa najjačim signalom. Međutim, u optičkim hibridnim mrežama prisutne su dve ili više heterogenih tehnologija, koje mogu značajno da se razlikuju po karakteristikama RF i optičkih sistema.

Uključivanje različitih faktora čini izbor mreže složenim zadatkom. Optimalna odluka o izboru mreže zavisi od okruženja, a za postizanje visokog QoE korisnika potrebni su precizni i inteligentni algoritmi za izbor mreže [51]. Takvi algoritmi predstavljaju osnovu optimizacije performansi hibridnih sistema, jer direktno utiču na kvalitet korisničkog iskustva, kašnjenje i pouzdanost komunikacije.

Kriterijumi za izbor mreže variraju u zavisnosti od tipa optičke mreže i razlikuju se od kriterijuma postojećih RF mreža. Potrebno je uzeti u obzir različite heterogene parametre i razviti efikasnu politiku odabira kako bi se iskoristile prednosti hibridnih mreža. Pored toga, vreme računanja mora biti minimizirano kako bi se smanjilo kašnjenje. Iako su istraživači proučavali ovaj problem u teorijskim radovima, uspešna primena hibridnih RF/optical i optical/optical mreža i dalje predstavlja izazov.

Access Protocol: Podrška za mobilnost korisnika je ključna za buduće bežične sisteme. Budući da se korisnici kreću kako u zatvorenom, tako i na otvorenom prostoru, lokalizacija mobilnog prijemnika i koordinacija između LED predajnika i RF bazne stanice predstavljaju ključne izazove u dizajnu pristupnog protokola [52]. Trenutni protokoli kao što je CSMA/CA analizirani su uglavnom za scenario jedne mreže, a ne za RF/optical hibridne mreže. Zbog toga je potrebno dodatno istraživanje za dizajn CSMA/CA protokola specifično za različite hibridne bežične sisteme. Takođe, postoji širok prostor za razvoj protokola za kontrolu pristupa srednjem sloju (MAC) za uplink komunikacije u RF/optical i optical/optical hibridnim mrežama.

Heterogeni tip prijemnika: Podrška za heterogene prijemnike je posebno važna u hibridnim mrežnim sistemima. Prijemnici za dve različite tehnologije unutar hibridnog sistema moraju biti aktivni istovremeno. Karakteristike RF i optičkih prijemnika značajno se razlikuju, pa je kombinovanje RF i optičkih sistema u jednu hibridnu mrežu i simultano slanje istih podataka kroz različite mreže kritičan izazov.

Handover predstavlja ključni faktor u hibridnim sistemima. Iako su efikasni vertical handover (VHO) mehanizmi detaljno istraženi u RF komunikacijama, svojstva optičkog kanala i nasumično kretanje korisnika čine VHO između RF i optičkih bežičnih mreža znatno složenijim nego u potpuno radio okruženju. Različita svojstva i mehanizmi fizičkog i data-link sloja u heterogenim optičkim i RF mrežama predstavljaju značajan izazov za upravljanje mobilnošću u hibridnim sistemima.

Relevantna istraživačka pitanja uključuju definisanje odgovarajućih kriterijuma za handover i razvoj efikasnih algoritama za optičke hibridne mreže. Izazovi obuhvataju uticaj korisničke mobilnosti na procenu kanala i samu proceduru handover-a. Optički sistemi su posebno osetljivi na blokadu kanala zbog prepreka što dodatno komplikuje odabir mreže tokom handover-a. Handover treba da bude kratkog trajanja kako bi zadovoljavao zahteve 5G sistema. Zbog toga se dizajn handover mehanizama u hibridnim RF/optičkim mrežama svodi na optimizaciju trajanja handover-a i smanjenje degradacije performansi tokom prelaza između mreža. Vreme razmene signalizacije između korisnika i centralne jedinice varira od ~30 ms do 3000 ms, u zavisnosti od algoritama korišćenih u RF/VLC i RF/LiFi hibridnim sistemima, kao i gubitaka prenosa tokom tog perioda. Osim toga, mala pokrivenost LiFi i VLC u zatvorenim prostorima dovodi do velikog broja handover-a, pa je izbegavanje nepotrebnog handover-a takođe veoma važno.

Load balancing: Efikasno raspoređivanje opterećenja u hibridnim mrežama predstavlja tehnički izazov. Prvi problem u optičkim hibridnim mrežama je kako raspodeliti korisnike među

dostupnim pristupnim mrežama koje pripadaju različitim tehnologijama pristupa. Pronalaženje optimalne korisničke asocijacije zahteva rešavanje zajedničkog problema asocijacije i raspodele resursa. Mehanizam za load balancing treba da se sprovodi periodično tokom trajanja sesije. Tokom kretanja korisnika, može biti potrebno prebacivanje na bolje dostupne pristupne tačke (APs), što može zahtevati i handover. Sve ove činjenice čine optimalno raspoređivanje opterećenja u hibridnim mrežama značajno izazovnim.

**High-capacity backhaul network:** Zbog podrške aplikacijama visokih brzina prenosa podataka i masivnoj povezanosti u hibridnim mrežama, generiše se ogroman ukupni protok podataka u pristupnoj mreži. Za podršku ovakvom protoku, izuzetno visokokapacitetni backhaul i dalje ostaje otvoren istraživački izazov.

**Seamless steering of transmitted data:** U hibridnim sistemima postoji više predajnika. Prenos podataka ka željenom prijemniku može varirati zbog promena u komunikacionom okruženju, vrste podataka i kretanja korisnika. Takođe, dodela AP-a i besprekorno usmeravanje podataka predstavljaju značajne izazove. Glavne brige u vezi sa ovim problemom su minimizacija gubitka podataka, optimalan izbor predajnika i minimizacija kašnjenja.

**Different backhaul network connectivity and synchronization:** U hibridnim sistemima, uključene mreže mogu koristiti iste ili različite sisteme za backhaul prenosa saobraćaja. Na primer, indoor femtocell i LiFi mogu koristiti istu Ethernet ili CATV mrežu za backhauling u femtocell/LiFi hibridnom sistemu. Suprotno tome, indoor LiFi može koristiti Ethernet, dok outdoor macrocell koristi optičke fiber mreže za backhauling u macrocell/LiFi hibridnom sistemu.

Backhauling saobraćaja za korisnika u hibridnom sistemu preko različitih backhaul mreža zahteva preciznu sinhronizaciju. Takođe, prelazak između različitih backhaul mreža zahteva glatki handover. Kod mobilnih mreža, backhauling zahteva kontinuirano podešavanje usmeravanja backhaul konekcije, što predstavlja dodatni izazov. Buduća istraživanja treba da se fokusiraju na ovaj važan tehnički izazov.

**Software-defined networking (SDN) control for hybrid systems:** Efikasno upravljanje i kontrola različitih optičkih hibridnih sistema predstavlja ključni izazov, posebno u gusto naseljenim mrežama. U tom kontekstu, software-defined networking (SDN), kao opšta mrežna paradigma, može pružiti efikasna rešenja zahvaljujući centralizovanom upravljanju mrežnim resursima putem SDN kontrolera [53].

Generalno, SDN sistem se sastoji od tri sloja:

- 1) Application layer (aplikativni sloj): ovde se definišu strategije za hibridne OWC aplikacije u zavisnosti od zahteva mreže, uključujući kontrolu saobraćaja, upravljanje bezbednošću i upravljanje tokovima mrežnih podataka.
- 2) Control layer (kontrolni sloj): omogućava implementaciju kontrolnih i upravljačkih protokola, kao što su ažuriranje flow protokola, mehanizam za izbor mreže u hibridnom sistemu, generisanje funkcija i programiranje interfejsa. Sloj komunicira sa aplikativnim slojem preko northbound API.
- 3) Infrastructure layer (infrastrukturni sloj): sadrži uređaje hibridne OWC mreže, poput rutera i switch-eva, koji primaju naredbe za prosleđivanje paketa iz kontrolnog sloja preko southbound API.

Primena SDN tehnologija omogućava smanjenje potrošnje energije kontrolom saobraćaja podataka. Sa razvojem hibridnih OWC aplikacija koje zahtevaju real-time zadatke i komunikaciju sa više korisnika, SDN pristup postaje ključan za virtualizaciju mrežnih funkcija i efikasno upravljanje optičkim hibridnim sistemima.

Cross-layer design: Do sada su RF/optical wireless hibridni sistemi uglavnom istraživani sa aspekta fizičkog sloja, dok se retko obraćala pažnja na metrike sloja za pristup medijumu (data-link layer). S obzirom na drastičan porast potražnje za pouzdanim servisima osetljivim na kašnjenje, potrebno je razmotriti QoS metrike kako fizičkog, tako i data-link sloja. U tom kontekstu, cross-layer analiza između fizičkog i data-link sloja postaje ključna za procenu performansi hibridnih sistema.

Iako postoji mnogo studija o cross-layer analizi u različitim RF scenarijima, istraživanja koja se bave performansama cross-layer dizajna u OWC sistemima su vrlo ograničena. Takođe, trenutno dostupne studije nisu dovoljne da reše sve izazove RF/optical wireless hibridnih sistema, što predstavlja važan pravac za buduća istraživanja.

Limited uplink communication using optical systems: U hibridnim sistemima, putanje za forward (downlink) i return (uplink) komunikaciju mogu biti iste ili različite, u zavisnosti od tipa hibrida i aplikacionog scenarija. Međutim, optical wireless sistemi trenutno nisu praktično pogodni za uplink zbog nekoliko razloga:

- 1) Ograničena energija mobilnih uređaja: Mobilni uređaji, kao što su smartfoni i laptopovi, imaju ograničenu bateriju, a emitovanje svetlosnog signala za komunikaciju zahteva značajnu potrošnju energije.
- 2) Osetljivost na orijentaciju: Uplink VLC koristi uski snop svetlosti koji mora biti precizno usmeren. Čak i male promene položaja uređaja mogu ozbiljno degradirati kvalitet veze.
- 3) Uticaj na osvetljenje i udobnost: Emitovanje svetlosnih signala za uplink može uticati na unutrašnje osvetljenje i izazvati nelagodnost za ljudsko oko.

Zbog ovih izazova, VLC se idealno koristi kao downlink-only tehnologija unutar RF/optical wireless hibridnog sistema. Stoga, realna implementacija uplink komunikacije preko OWC sistema predstavlja značajan izazov u RF/VLC i RF/LiFi hibridnim sistemima.

Modulation techniques in optical/optical wireless hybrid systems: U optical/optical (O/O) hibridnim sistemima, modulacione tehnike za OCC se razlikuju od onih koje se koriste u LiFi i VLC sistemima. Razlog je što OCC ne može da podrži visoku brzinu modulacije zbog ograničene frekvencije kadrova kod konvencionalnih kamera. To stvara izazove pri korišćenju istog LED izvora svetlosti kao predajnika za dve različite OWC tehnologije, kao što su OCC i LiFi. Dakle, implementacija različitih modulacionih šema za O/O hibridne sisteme predstavlja značajan izazov.

Performance enhancement in mixed RF/FSO relay systems: Atmosferska turbulencija i greška u usmeravanju (pointing error) mogu ozbiljno degradirati end-to-end performanse u dual-hop RF/FSO sistemima, npr. povećavajući broj grešaka ili smanjujući kapacitet veze. Povećanje predajne snage može ublažiti ove probleme, ali može negativno uticati na bezbednosne performanse. Stoga je efikasna raspodela snage ključna za performanse RF/FSO relay sistema.

Underwater communication (UWC): Istraživanje hibridnih sistema za podvodnu komunikaciju je još u ranoj fazi i zahteva detaljnu analizu. Posebnu pažnju treba posvetiti adaptivnom prebacivanju između akustičnog i optičkog režima, u hibridnim optičko/RF i optičko/akustičnim mrežama.

Hybrid transmission (LED transmitters): Trenutno se LED predajnici koriste u LiFi/OCC i VLC/OCC hibridnim sistemima. Korišćenje istih LED dioda za različite tehnologije povećava:

- 1) kompleksnost sistema,
- 2) troškove,
- 3) fizičku zapreminu sistema.

Pošto OCC i LiFi/VLC funkcionišu na različitim modulacionim opsezima, teško je simultano prenositi podatke za oba sistema kroz isti LED predajnik. Malo istraživanja je posvećeno ovom problemu, te je dalje istraživanje ključ za budući razvoj indoor optical/optical hibridnih sistema.

Različite bežične pristupne tehnologije imaju različite prednosti i ograničenja, pri čemu RF i optički signali, zahvaljujući nepreklapanju spektralnih opsega, mogu biti istovremeno korišćeni bez međusobne interferencije. RF tehnologije su robusne u NLOS uslovima i pri visokoj pokretljivosti korisnika, dok optičke bežične tehnologije obezbeđuju visoke brzine prenosa podataka i povećanu sigurnost, ali zahtevaju LOS i precizno usmeravanje. Slično tome, i među optičkim bežičnim tehnologijama postoje komplementarne karakteristike: LiFi omogućava visoke protoke i podršku većem broju korisnika u zatvorenom prostoru, dok OCC obezbeđuje stabilniju komunikaciju na većim udaljenostima uz smanjeno ometanje, ali je ograničen frekvencijom kamere i LOS uslovima. Ove komplementarne osobine predstavljaju osnovnu motivaciju za razvoj hibridnih bežičnih sistema zasnovanih na optičkoj bežičnoj komunikaciji, sa ciljem prevazilaženja ograničenja pojedinačnih tehnologija i ispunjavanja rastućih zahteva 5G i narednih generacija komunikacionih sistema.

Glavne prednosti RF bežičnih sistema su bolja podrška mobilnosti zahvaljujući širokoj pokrivenosti, fleksibilnost i podrška komunikaciji u LOS/NLOS uslovima, dok su ključna ograničenja propusnost i niži protok podataka. Nasuprot tome, široko dostupna propusnost i veći protok podataka su glavne prednosti većine OWC sistema. Uobičajena ograničenja OWC tehnologija su ograničena ili nepostojeća podrška za NLOS komunikaciju, vrlo niska ili nikakva podrška mobilnosti i uticaj atmosferskih uslova.

Hibridni bežični sistemi koji kombinuju RF i optičke bežične tehnologije omogućavaju prevazilaženje ograničenja pojedinačnih pristupa i efikasnu podršku različitim komunikacionim scenarijima. U zavisnosti od zahteva aplikacije, hibridni sistemi mogu koristiti različite kombinacije mreža, koje mogu raditi istovremeno ili u režimu primarne i rezervne veze, kao i u jednosmernim (single-hop) ili višesmernim (multi-hop) konfiguracijama.

Dve pojedinačne mreže u hibridnom bežičnom sistemu mogu ili zasebno deliti uplink i downlink korisnika, ili služiti potpuno različitim korisnicima. Mreža u hibridnom bežičnom sistemu se bira na osnovu kriterijuma kao što su tip saobraćaja, tip veze (uplink/downlink), potrebna komunikaciona udaljenost, LOS/NLOS scenario, potrebni nivo bezbednosti i potrebna podrška mobilnosti. Efikasan mehanizam koji uzima u obzir odgovarajuće kriterijume je ključan za pravilno raspoređivanje opterećenja među mrežama.

Povećanje brzine prenosa podataka kroz preusmeravanje saobraćaja, podršku za nesmetano kretanje i smanjenje interferencije su glavni razlozi za upotrebu hibridnih bežičnih sistema u zatvorenim prostorima. Suprotno tome, poboljšanje pouzdanosti veze i prevazilaženje atmosferskih uticaja su važni razlozi zbog kojih se primenjuju hibridni bežični sistemi na otvorenom. Istovremena upotreba mikrotalasnih/milimetarskih veza i FSO tehnologija u RF/FSO hibridnoj backhaul konektivnosti omogućava prevazilaženje atmosferskih efekata kao što su kiša, sneg, prašina i magla.

RF/optika hibridni bežični sistemi značajno smanjuju interferenciju, dok istovremeno poboljšavaju druge performanse. Nasuprot tome, optika/optika hibridni bežični sistemi ne služe za smanjenje interferencije. Primarni cilj upotrebe različitih optika/optika hibridnih sistema je poboljšanje pouzdanosti veze. Među različitim scenarijima primene, implementacija hibridnih bežičnih sistema u pokretnim mrežama je izazovna, jer su i pristupna i backhaul mreža u pokretu, a pritom treba uzeti u obzir i atmosferske uslove na otvorenom. Pored toga, za druge mreže predstavlja izazov ukoliko podaci korisnika treba da se prenose kroz različite tipove backhaul mreža zbog korišćenja zasebnih mreža za uplink i downlink.

Ciljevi i izazovi različitih hibridnih bežičnih sistema su različiti, a za njihovo rešavanje predloženi su različiti pristupi. Povećanje protoka podataka predstavlja glavni cilj implementacije RF/VLC i RF/LiFi hibridnih bežičnih sistema. Za uspešnu implementaciju ovih hibridnih sistema, neka pitanja su prepoznata kao značajni istraživački izazovi, uključujući poboljšanje performansi handover-a, povećanje energetske efikasnosti, inteligentni izbor mreže, proširenje pokrivenosti, smanjenje verovatnoće prekida veze, smanjenje stope greške, efikasne tehnike balansiranja opterećenja, maksimizaciju spektralne efikasnosti, unapređenje bezbednosti, efikasnu raspodelu resursa i minimizaciju troškova.

## **2.16. Poređenje FSO i RF komunikacije**

FSO sistemi se lako integrišu i mogu biti pušteni u rad veoma brzo. Postavljanje FSO sistema ne zahteva dodatne građevinske radove i može se realizovati korišćenjem već postojeće RF infrastrukture. Upravo komplementarna priroda RF i FSO tehnologija dovela je do brojnih predloga hibridnih RF/FSO implementacija [54].

Dat je pregled integracije IR FSO sistema u postojeću RF infrastrukturu, uz kratku uporednu analizu RF i FSO tehnologija u cilju isticanja komplementarnost obe tehnologije. Predložene su različite tehnike prebacivanja između FSO i RF u okviru hibridnog sistema. Među ovim konfiguracijama sistema, razmatrani su doprinosi u sledećim pristupima:

- 1) Soft switching;
- 2) Hard switching;
- 3) Prebacivanje zasnovano na mašinskom učenju;
- 4) Diversity scheme.

Dato je i poređenje u smislu složenosti hardvera. Specifikacije RF/FSO sistema dostupnih na tržištu, terenska ispitivanja i ključna implementirana rešenja su takođe razmatrani. Analizirani su doprinosi hibridnih RF/FSO sistema za svemirske i blizu-Zemlje aplikacije.

Razmatrana su i pitanja koja se uglavnom odnose na troškove. Predložen je set korisnih pravaca za buduća istraživanja.

FSO i RF komunikacije, od kojih svaka ima brojne prednosti i ograničenja. Na primer, prašina i magla drastično utiču na FSO, dok kiša ozbiljno utiče na RF. RF zraci imaju tendenciju da se više šire u poređenju sa FSO, međutim, FSO signali su osetljiviji na greške u usmeravanju. Razmatrane su prednosti i nedostaci FSO i RF sistema u pogledu propusnog opsega, zauzeća prostora, bezbednosti, poverljivosti i otpornosti na efekte propagacije kanala. Što motivise integraciju obe tehnologije kako bi se stvorili robusni hibridni sistemi.

Trenutno je RF tehnologija izbor za bežične komunikacije. Međutim, radio-komunikacija zahteva plaćanje licenci za korišćenje nekoliko opsega strogo regulisanog spektra. S druge strane, FSO ne pati od ovog problema, jer je spektralni opseg svetlosti nelicenciran. Kada je u pitanju propusni opseg, FSO poseduje ogroman opseg u rasponu od nekoliko stotina THz, dok RF ima znatno manji dostupni opseg. RF frekvencije ispod 10 GHz su gotovo iskorišćene zbog svojih povoljnih komunikacionih svojstava, dok prelazak na više frekvencije donosi veće troškove, veću složenost i izazove u propagaciji. Trenutna RF tehnologija podržava brzine prenosa podataka u rasponu od Mbps do Gbps. Međutim, najmodernija FSO tehnologija sa modulacijom intenziteta i direktnom detekcijom (IM/DD) može podržati brzine prenosa podataka u Gbps dometu, a može dostići i preko Tbps kada se koriste koherentni optički sistemi.

U IM/DD sistemu intenzitet lasera moduliše koristeći RF signal. Modulisani optički signal se detektuje pomoću fotodetektora na prijemu. Nasuprot tome, koherentni sistem uključuje korišćenje intenziteta i faze optičkog nosioca, što zahteva kontinuirano praćenje faze pomoću uređaja poznatog kao lokalni oscilator. Ovo povećava složenost sistema i njegovu cenu.

Brzi FSO sistemi su mogući korišćenjem potpuno optičkih mreža, jer svetlosni signali koji dolaze iz optičkog vlakna mogu biti usmereni u FSO kanal i obrnuto, bez potrebe za posrednim uređajima za konverziju električno–optičko i optičko–električno, koji ograničavaju propusni opseg. Štaviše, ova konfiguracija doprinosi smanjenju ukupnog kašnjenja sistema.

## 2.17. Sistemski otisak i geometrijski gubitak

Željena širina snopa primljenog signala nakon propagacije kroz bežični kanal prvenstveno definiše veličinu prijemnog terminala. Uska širina snopa smanjuje gubitak snage i veličinu terminala. Širina snopa, na poziciji prijemnika  $z_{RX}$  duž propagacije, proporcionalna je talasnoj dužini  $\lambda$  i obrnuto proporcionalna prečniku otvora predajnika  $D_T$ , tj.:

$$\omega(z_{RX}) = \sim \frac{\lambda}{D_T} \quad (2.17.1)$$

Sa fiksnim  $D_T$ , prelazak sa RF na FSO će značajno smanjiti širinu snopa. Za potrebe poređenja, pretpostavljena RF frekvencija je 50 GHz za mogući 5G sistem sa pripadajućom talasnom dužinom  $\lambda = 1.6 \times 10^{-3}$  m. Takođe, razmotrana infracrvena talasna dužina korišćena za FSO sistem sa  $\lambda = 1550$  nm =  $155 \times 10^{-9}$  m. Čak i u ovom scenariju, koji je povoljan za RF sistem, relativno smanjenje veličine tačke prelaskom sa RF na FSO biće približno  $\frac{1}{2}$ .

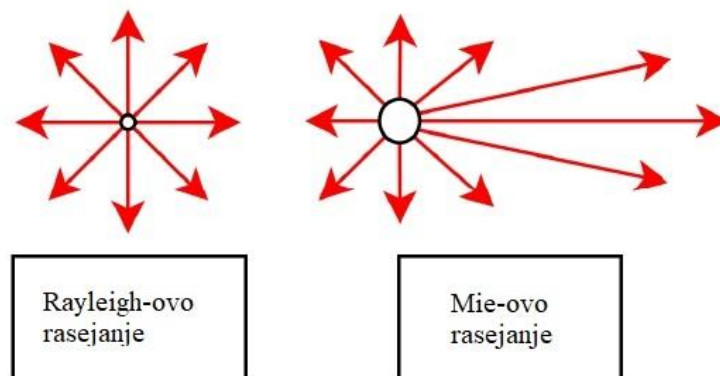
$4 \times 10^3$ . Ovo poboljšanje u širini snopa od više od tri reda veličine smanjuje prečnik otvora predajnika  $D_T$  za manji otisak FSO sistema u poređenju sa RF. Smanjenje prečnika otvora predajnika smanjuje gubitak snage signala na prijemniku zbog geometrijskog gubitka puta. Male veličine snopa čine FSO pogodnijim za backhaul aplikacije, dok je RF poželjniji za pristupne mreže.

FSO ima manje ograničenja u odnosu na RF tehnologiju kada su u pitanju nivo snage i rizici od EMF (elektromagnetnog zračenja) zbog svoje tačka-do-tačka topologije i prirode uskog snopa. Slično tome, iz istih razloga, fizički sloj bezbednosti (PLS) kod FSO je viši, jer nije lako presresti kolimirane IR signale korišćenjem merača snage i analizatora spektra. Pored toga što su nevidljivi golim okom, neki infracrveni FSO signali su takođe nevidljivi za standardnu fotografiju ili moderne video kamere. FSO signali ne mogu da prođu kroz neprovidne objekte duž puta propagacije, kao što su zidovi; stoga su sigurni od skrivenih napadača. Nasuprot tome, RF je podložan problemima prisluškivanja. Takođe je pokazano da FSO veze mogu doprineti poboljšanju fizičke sigurnosti RF-a kada se instaliraju paralelno sa RF vezom. Napredna bezbednost bežičnih IR optičkih snopova dolazi uz cenu da je FSO, u poređenju sa RF, ograničen na konfiguraciju tačka-do-tačka, što smanjuje pokrivenost i domet ove tehnologije. Treba napomenuti da u nekim situacijama FSO signali mogu biti presretnuti, naročito kada je prisluškivač postavljen blizu legitimnog predajnika. U praksi, ovo zahteva primenu određenih mera za sprečavanje uljeza, kao što je postavljanje zaštitnog ekrana iza FSO prijemnika kako bi se blokiralo neopaženo svetlo u situacijama kada je površina padajućeg snopa veća od otvora prijemnika, kako je predloženo za komercijalni FSO proizvod.

## 2.18. Efekti prostiranja kanala

Iako je osnovni princip i FSO i RF tehnologija zasnovan na prenosu elektromagnetnih talasa kroz atmosferu, talasna dužina i interakcija talasa sa spoljnim okruženjem se drastično razlikuju između ove dve tehnologije. Generalno, FSO je osetljiviji na efekte propagacije.

Tokom propagacije kroz atmosferu, optički signali su podložni slabljenju. Slabljenje nastaje zbog dva glavna efekta: apsorpcije i rasejanja. Apsorpcija je izazvana interakcijom talasa sa molekularnim i aerosolnim česticama u atmosferi. Međutim, IR FSO talasne dužine se biraju tako da odgovaraju atmosferskim prozorima prenosa, gde je molekularna i aerosolska apsorpcija minimalna. Stoga je rasejanje, koje IR svetlosni talasi doživljavaju u atmosferi, glavni faktor koji dovodi do slabljenja prijemnog signala. Postoje dva glavna tipa rasejanja pri propagaciji kroz atmosferu: Rayleigh-ovo rasejanje i Mie-ovo rasejanje. Kao što je ilustrovano na Slici 2.18.1, Rayleigh-ovo rasejanje je difuzno rasejanje u svim pravcima, dok je Mie-ovo rasejanje pretežno u pravcu propagacije.



**Slika 2.18.1.** Ilustracija Rejljevog i Mijevog tipa rasejanja. Rejljevo je rasejanje u svim pravcima, dok Mijevo rasejanje teži da bude u direktnom smeru

Rayleigh-ovo rasejanje nastaje kada su čestice u atmosferi mnogo manje od talasne dužine. Mie-ovo rasejanje, naprotiv, predstavlja rasejanje elektromagnetnog talasa na česticama koje su veličinom uporedive ili veće od talasne dužine. RF talasi sa talasnim dužinama od  $10^{-2}\text{m}$  i većim skoro isključivo imaju Rayleigh-ovo rasejanje, dok FSO talasi sa tipičnim talasnim dužinama od  $10^{-6}\text{m}$  uglavnom imaju Mie-ovo rasejanje. Magla je primarni izvor Mie-ovog rasejanja. Ostali vremenski uslovi, poput kiše, snega i prašine, izazivaju treći tip rasejanja za FSO signale, pri česticama koje su veće od optičke talasne dužine.

Uticaj magle na FSO sisteme je značajno štetan, pri čemu slabljenje može dostići 200 dB/km, a u režimima niske vidljivosti čak i 350 dB/km. Slabljenje u prašnjavim kanalima pri niskoj vidljivosti može biti veće nego kod magle, što je pokazano u eksperimentu sa FSO sistemom u laboratorijski simuliranoj olujnoj prašini. Slabljenje usled snega takođe može dostići 150 dB/km. U poređenju sa maglom i snegom, efekat slabljenja je manje drastičan tokom kiše, pri čemu je zabeležen gubitak od 45 dB/km za signale od 1550 nm u uslovima jake kiše. U tom kontekstu, kombinacija FSO i RF u jednom komunikacionom sistemu postaje posebno privlačna, jer RF talasi najviše trpe zbog kiše među svim atmosferskim uslovima, dok magla ima malo ili nikakav uticaj na propagaciju RF signala [3], [15], [55].

FSO kanali su takođe podložni turbulenciji koja nastaje usled slučajnih promena indeksa prelamanja izazvanih fluktuacijama temperature i pritiska u atmosferi. Atmosferska turbulencija gotovo isključivo utiče na FSO sisteme zbog kratke talasne dužine u poređenju sa RF. Atmosferska turbulencija može se modelovati korišćenjem numeričkih modela zasnovanih na Kolmogorovljevoj teoriji i statističkih modela. Različiti statistički modeli su široko korišćeni u literaturi za modelovanje turbulencije FSO kanala, poput negativno eksponencijalnog, log-normalnog, Gamma-Gamma i Malaga modela.

Dinamička opterećenja vetrom koja uzrokuju ljuljanje zgrada, slabi zemljotresi i male vibracije izazvane drumskim saobraćajem uzrokuju da se snop signala nasumično pomera sa svoje putanje. Ovi efekti se nazivaju greške u usmeravanju i predstavljaju dodatni izazov za FSO veze, značajno utičući na pouzdanost prenosa ako se ne kompenzuju. Greške u usmeravanju se obično modeluju korišćenjem Relejeve (Rayleigh) distribucije [56].

Što se tiče šuma, FSO je podložan ambijentalnom šumu od sunca, dok je RF podložan termičkom šumu. Kompletno poređenje FSO i RF tehnologija je sažeto u Tabeli 2.18.1.

**Tabela 2.18.1.** Poređenje RF i FSO tehnologija

| Tehnologija                     | RF                            | FSO                                 |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Dostupni spektar                | ~ 300 GHz                     | ~ 100s THz                          |
| Licence                         | Licencirano                   | Bez licence                         |
| Otisci terminala                | Beliki broj                   | Mali broj                           |
| Potrošnja energije              | Desetine [W]                  | Sesetine [mW]                       |
| Brzine prenosa podataka         | Mbits/Gbits                   | Tbits                               |
| Konfiguracija                   | LoS/NLoS                      | LoS                                 |
| Latencija                       | Umerena                       | Niska                               |
| Izvori smetnji                  | Smetnje sa drugim korisnicima | Pozadinsko ambijentalno osvetljenje |
| Bezbednost                      | Podležno EMF zračenju         | Bezbedno za oči i kožu              |
| Sigurnost                       | Osetljivo na prisluškivanje   | Bezbedno                            |
| Osetljivost na greške usmerenja | Niska                         | Visoka                              |
| Propagacioni efekti             | Slabljenje usled fedinga      | Slabljenje usled turbulencija       |

Najčešći LoS modeli za FSO i RF kanale pod različitim uslovima prostiranja [57]-[62]:

1) Mijev model rasejanja. Empirijski model za prostiranje usled magle. Parametri modela:  $V$  [km], domet vidljivosti [m],  $\lambda$  [ $\mu\text{m}$ ] radna talasna dužina,  $q$  Raspodela veličine rasejanih čestica.

$$A = \frac{13}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} [\text{dB/km}] \quad (2.18.1)$$

2) Model prostiranja usled paršine. Parametri modela:  $V$  [km],  $\lambda=1550$  nm.

$$A_d = -52V^{-1.05} [\text{dB/km}] \quad (2.18.2)$$

3) Model prostiranja usled snežnih padavina. Parametri modela:  $V$  [km] opseg vidljivosti,  $k$  konstanta.

$$A_s = k/V [\text{dB/km}] \quad (2.18.3)$$

4) Model prostiranja usled kiše. Parametri modela:  $R$  [mm/hr] intenzitet padavina,  $(k, \alpha)$  parametri modela.

$$A_R = KR^\alpha \quad (2.18.4)$$

5) Log-normal model za prostiranje usled slabih turbulencija.

$$f(I) = \frac{1}{2I\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \exp\left(-\left(\ln\frac{I}{I_0} + \frac{\sigma_I^2}{2}\right)^2 / 2\sigma_I^2\right) \quad (2.18.5)$$

6) Statistički model pogodan za prostiranje usled jakih turbulencija.

$$f(I) = \frac{1}{I_0} \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right), I_0 > 0 \quad (2.18.6)$$

7) Umerene i jake turbulencije, Gamma-gamma model. Parametri modela:  $(\alpha \ \beta)$  - parametri turbulencije,  $\Gamma(\cdot)$  - Gama funkcija,  $K_\nu(\cdot)$  - Modifikovana Beselova funkcija drugog reda.

$$8) f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad (2.18.7)$$

9) Za sve uslove turbulencije, Malaga model. Parametri modela:  $\beta$  - količina feding parametara,  $\Omega$  - Srednja snaga LoS.

$$f(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} \alpha_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta+\Omega}}\right) \quad (2.18.8)$$

$$\begin{cases} A = \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\gamma^{1+\alpha/2}\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\gamma\beta}{\gamma\beta+\Omega}\right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}} \\ \alpha_k = \frac{(\beta-1)}{(k-1)!} \frac{(\gamma\beta+\Omega)^{1-\frac{k}{2}}}{(k-1)!} \left(\frac{\Omega}{\gamma}\right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{k}{2}} \end{cases}$$

10) Nakagami-m model fedinga. Parametri modela:  $x$  - amplituda feding kanala,  $m$  - parameter fedinga,  $\Omega$  - srednje kvadratna vrednost.

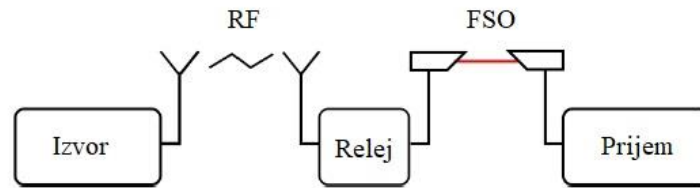
$$f(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right) \quad (2.18.9)$$

11) Rician model fedinga. Parametri modela:  $K$  - odnos direktne i rasejane komponente,  $I_0(\cdot)$  - Modifikovana Beselova funkcija prvog reda.

$$f(x) = \frac{2(K+1)x}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{(K+1)}{x^2}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}x\right) \quad (2.18.10)$$

## 2.19. Hibridni RF/FSO sistem, rad i mehanizmi prekida

Mogući scenario za primenu FSO tehnologije jeste njeno kombinovanje sa RF prenosnim sistemima kako bi se popunio jaz u povezivosti između RF pristupne mreže i optičkog (backbone) sistema. Šematski prikaz dvostrukog (dual-hop) heterogenog RF/FSO sistema dat je na Slici 2.19.1. Dual-hop konfiguracija ima dva osnovna dizajna: Amplify and Forward (AF) i Decode and Forward (DF).

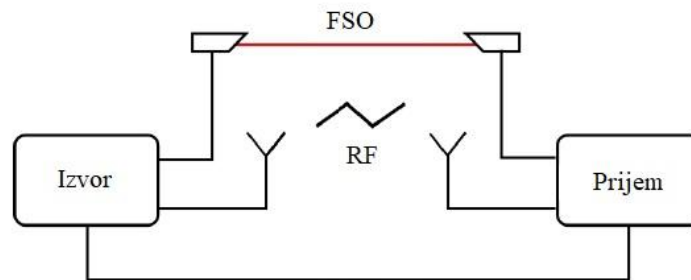


**Slika 2.19.1.** Šematski prikaz mešovite serijske konfiguracije sa dva skoka (RF/FSO). RF signali na relejnom čvoru se konvertuju u optičke signale i prosleđuju ka odredištu na FSO linku

U AF sistemu, podaci koji su prvobitno kodirani na RF kanalu primaju se antenom na relejnom čvoru. Primljeni električni signali konvertuju se u optičke signale, zatim pojačavaju i prosleđuju FSO predajniku na releju [58].

U slučaju DF prosleđivanja, signal se dekodira, regeneriše i potom ponovo emituje ka FSO čvoru.

AF pristup je u praksi često manje složen od DF pristupa, jer ne zahteva dekodiranje na relejnom čvoru, ali može dovesti do pojačavanja šuma u odnosu na DF pristup.



**Slika 2.19.2.** Šematski prikaz hibridne RF/FSO konfiguracije. Podaci se mogu prenositi preko RF ili FSO veze, ili preko oba

Pored primene u dual-hop konfiguraciji, RF/FSO tehnologije mogu biti instalirane paralelno, formirajući hibridni komunikacioni sistem. Razmatrani su različiti režimi rada hibridnih RF/FSO sistema prema rešenjima predloženim u literaturi. Predstavljana su dva mehanizma prebacivanja između RF i FSO linkova, poznata kao tvrdo i meko prebacivanje. Treći mehanizam je zasnovan na upotrebi algoritama mašinskog učenja. Četvrti mehanizam obrađuje slučaj kada oba, i RF i FSO predajnici, rade istovremeno, što je poznato kao diverziti šema.

U sistemima zasnovanim na tvrdom preklapanju, u svakom trenutku je aktivna samo jedna veza – RF ili FSO. Povratna sprega od prijemnika ka predajniku koristi se za koordinaciju između dva komunikaciona terminala radi izvršavanja preklapanja. Moguć je mehanizam tvrdog preklapanja za hibridne FSO/RF sisteme ili korišćenje FSO veze dokle god je njen kvalitet iznad unapred definisanog praga, a kada se kvalitet veze pogorša ispod tog praga, komunikacija se preusmerava na RF vezu. Moguć je i dizajn sa dva FSO praga, pri čemu FSO veza ima različite pragove za prelazak u „uključeno“ i „isključeno“ stanje. Ovakav pristup pokazao je performanse slične klasičnom tvrdom preklapanju, uz istovremeno smanjenje broja preklopa i očuvanje FSO podsistema [58], [59].

U okviru pristupa mekog preklapanja, kanalno kodovanje se koristi za koordinaciju između FSO i RF veza. Glavna prednost mekog u odnosu na tvrdo preklapanje jeste to što se kapacitet FSO veze ne gubi u situacijama kada je RF veza izabrana. Mehanizam mekog preklapanja se preporučuje na kratkim Raptor kodovima. Kod Raptor kodova, svaka poruka koju šalju RF i FSO podsistemi razlikuje se od prethodne.

Dekoder prihvata čitav blok čim prikupi dovoljan broj poruka, nezavisno od toga da li su one pristigle preko RF ili FSO predajnika. Ovakav pristup omogućava iskorišćavanje FSO kapaciteta koji bi ostao neupotrebljen u scenarijima dalekih transmisija, kada bi primljena optička snaga bila ispod praga predviđenog za mehanizam tvrdog preklapanja. Moguće je ostvariti povećanje protoka od četiri puta (ili više) u poređenju sa tvrdim preklapanjem za scenarije prenosa na 1 km i 2 km. Ipak, za transmisije dužine oko pola kilometra, tvrdo i meko preklapanje pokazuju slične prosečne performanse u pogledu protoka zbog dovoljne optičke snage na prijemniku [61].

Mašinsko učenje predstavlja veoma fleksibilan alat koji je pronašao primenu u gotovo svim oblastima komunikacija. U RF i optičkim komunikacionim sistemima koristi se za različite zadatke, kao što su nadzor performansi, identifikacija modulacionih formata, modelovanje kanala i digitalna obrada signala [31]. Međutim, u kontekstu hibridnih FSO/RF sistema, broj dostupnih studija je i dalje ograničen.

Razmatrane su različite metode mašinskog učenja, uključujući algoritme kao što su Random Forest, Decision Tree i drugi, sa ciljem predikcije indikatora jačine primljenog signala (RSSI) u hibridnom FSO/RF sistemu zasnovanom na tvrdom preklapanju. Precizna predikcija RSSI parametra omogućava brže i efikasnije prebacivanje između FSO i RF veze: pri niskim RSSI vrednostima koristi se niskopropusna RF veza, dok se pri visokim vrednostima aktivira visokopropusna FSO veza. Dobijeni rezultati ukazuju na visoku tačnost predikcije RSSI parametra, pri čemu se algoritam Decision Tree pokazao kao posebno efikasan.

## **2.20. Komercijalno dostupna RF/FSO rešenja**

Najnoviji tržišni podaci pokazuju da će očekivane investicije u FSO opremu premašiti 300 miliona dolara do 2029. Na tržištu postoji veliki broj komercijalno dostupnih FSO proizvoda, a pojedini među njima omogućavaju i prenos podataka putem RF kanala [61]. Važno je napomenuti da se okvirna cena sistema menja u zavisnosti od nivoa prilagođavanja i veličine porudžbine.

Pojedina hibridna komercijalna rešenja nude FSO veze koje u idealnim vremenskim uslovima mogu da podrže brzine do 30 Gbps, kao što su EC Systems (EL-10Gex) i Mostcom (Artolink M1-30GE). Maksimalni prenosni domet takođe može dosezati i do 5 km kod rešenja kompanija Collinear (HybridCNX-520) i fSONA (SONAbeam 10G-E+). Međutim, u otežanim atmosferskim uslovima (gustoj magli, prašini ili snegu), komunikacioni sistem se najčešće prebacuje na rezervni RF kanal. Tada se brzina prenosa smanjuje za više od jednog reda veličine, kako je navedeno za sisteme Communication by Light (CBL-AirLaserIP1000plus), LightPointe (HyBridge SXR-5) i fSONA (SONAbeam 10G-E+). Većina kompanija koristi nelicencirane RF opsege za rezervne radio linkove kako bi se smanjili troškovi i izbegle

interferencije. Ovi opsezi obuhvataju niže frekvencijske opsege (najčešće 2.4 i 5 GHz) kao i više milimetarske opsege iznad 60 GHz [60].

Latencija predstavlja ključan parametar u savremenim i narednim generacijama bežičnih mreža. Na primer, globalni standard 5G New Radio (NR) definiše ciljnu latenciju vazdušnog interfejsa od 1 ms. U tom kontekstu, trenutni komercijalni proizvodi pokazuju da FSO veze ostvaruju latenciju u rasponu od 0,1 ms (Hyperion Technologies) do 50 ns (Trimble), pri čemu se odgovarajuće udaljenosti prenosa kreću od 0,3 do 3,5 km. Ovi rezultati dodatno podstiču primenu FSO sistema u naprednim bežičnim komunikacionim mrežama. Pored toga, aktuelna komercijalna rešenja rade u opsezima talasnih dužina od 850 nm i 1550 nm. Oba opsega odlikuje niska atmosferska slabljenja. Osim što su bezbedni za oči, jedna od prednosti opsega od 1550 nm jeste relativno niska cena FSO predajnih i prijemnih komponenti. U ovom opsegu široko se primenjuju napredni VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser) predajnici i visoko osetljivi APD (Avalanche Photodiode) prijemnici. Proliferacija brzih predajnika, pojačavača, komponenti za multipleksiranje po talasnim dužinama (WDM) i savremenih prijemnika dodatno optimizuje FSO transmisiju u opsegu od 1550 nm. Maksimalna komercijalna brzina u opsegu od 850 nm ograničena je na 1 Gbps uz primenu VCSEL predajnika i OOK (On-Off Keying) modulacije, dok se brzine veće od 10 Gbps (OOK) mogu postići korišćenjem unapređenih mrežnih modula malog formata SFP+ u opsegu od 1550 nm [61].

Prilikom testiranja RF/FSO sistema za rastojanje veze od 2,9 km, maksimalno ostvarene brzine prenosa iznosile su 155 Mbps za FSO vezu i 11 Mbps za RF vezu. Na osnovu detektovane primljene snage FSO kanala, primenjen je mehanizam tvrdog preklapanja kako bi se vršilo prebacivanje između dve paralelne veze. RF/FSO veze bile su izložene različitim atmosferskim uslovima, uključujući sneg, izmaglicu, oblačnost i maglu. Snežne oluje i magla su najnepovoljniji uslovi koji utiču na dostupnost veze. Ukupna dostupnost FSO veze je premašila 99,98% u posmatranom periodu.

Prilikom testiranja na rastojanju od 30 km između dva tornja visine oko 30 metara, ostvareni protok podataka iznosio je do 10 Gbps za FSO kanal i 1 Mbps za RF kanal. Tokom intervala izveštavanja od 30 minuta, komunikacija je pet puta (tokom ukupno 7 minuta) prebacivana na RF vezu zbog prekida FSO veze tokom maglovitih uslova [60].

Komercijalni sistemi zasnovani na VCSEL FSO predajnicima ograničeni su na protoke reda veličine do 1 Gbps. Nasuprot tome, SFP+-bazirani predajnici omogućavaju protoke do 30 Gbps i ostvaruju veće rastojanje prenosa u poređenju sa VCSEL rešenjima.

U većini terenskih ispitivanja fokus je na zavisnosti propusnog opsega linka od vremenskih uslova, pri čemu je najčešće primenjivan mehanizam tvrdog preklapanja, zbog svoje jednostavnosti. Međutim, efikasnost drugih strategija preklapanja zahteva dodatna istraživanja.

Snežne oluje, magla, visoka vlažnost vazduha i povišene temperature (iznad 40°C) predstavljaju najznačajnije atmosferske uslove koji narušavaju performanse FSO linkova [5]. Ipak, neophodna su dodatna terenska ispitivanja u ekstremnim uslovima poput jakih padavina i pešanih oluja pre šire primene ove tehnologije.

## 2.21. RF/FSO za svemirske komunikacije

Sateliti imaju širok spektar primena, uključujući daljinsko osmatranje, praćenje klimatskih promena, istraživanje dubokog svemira, smanjenje digitalnog jaza i obezbeđivanje povezanosti u ruralnim područjima [63]. Postoje tri glavne vrste satelita u Zemljinoj orbiti:

- 1) Sateliti u niskoj Zemljinoj orbiti (LEO): Ovi sateliti rade u neposrednoj blizini Zemlje, na visinama između 160 i 2000 km. LEO sateliti se uglavnom koriste za snimanje i odlikuju se malom latencijom zbog relativno kratkog rastojanja prostiranja signala u svemiru. U poslednje vreme, LEO satelitske konstelacije, odnosno grupe satelita koji rade koordinisano, privlače značajnu pažnju i sve češće se primenjuju za obezbeđivanje povezanosti u ruralnim područjima.
- 2) Sateliti u srednjoj Zemljinoj orbiti (MEO): Ovi sateliti rade na visinama iznad 2000 km i ispod geostacionarne orbite. MEO sateliti se primarno koriste za navigaciju, komunikacione usluge i proučavanje svemirskog okruženja.
- 3) Sateliti u geosinhronoj Zemljinoj orbiti (GEO): Ovi sateliti ostaju fiksirani u odnosu na Zemlju, u geostacionarnoj orbiti (35.786 km) iznad ekvatora, i rotiraju istom ugaonom brzinom kao i Zemlja. GEO sateliti se tipično koriste za TV emitovanje i predstavljaju osnovu za globalnu pokrivenost koju obezbeđuju pojedine kompanije za satelitske komunikacije, uz minimalan broj satelita.

U satelitskim komunikacijama, veza koja povezuje mrežu sa satelitom naziva se primarna (feeder) veza. Satelit prenosi signale ka korisnicima na tlu putem više usmerenih snopova, poznatih kao korisničke veze.

Tradicionalne satelitske komunikacije istorijski su zasnovane na mikrotalasnim frekvencijskim opsezima, posebno na L opsegu (1–2 GHz), Ku opsegu (12–18 GHz) i Ka opsegu (26,4–40 GHz). U poređenju sa Ku i Ka opsezima, L opseg je manje podložan slabljenju signala izazvanom padavinama. Ka i Ku opsezi obezbeđuju širu raspoloživu propusnost i omogućavaju upotrebu manjih komponenti. U Ku opsegu, samo 1 GHz propusnog opsega dodeljen je satelitskim servisima, pri čemu je polovina namenjena za uplink, a druga polovina za downlink. U Ka opsegu, oko 6 GHz propusnog opsega je određeno za potrebe satelitske komunikacije [64]–[69].

Optičke komunikacije u svemiru ostvarile su ogroman napredak tokom godina [67]. Rana demonstracija inter-satelitske komunikacije prijavila je uspešnu transmisiju bez grešaka od 5,6 Gbps između dva satelita u niskoj Zemljinoj orbiti (LEO) – NFIRE i TerraSar-X – tokom nekoliko sekundi. Takođe su demonstrirane i FSO veze sa tla ka satelitu (uplink) i sa satelita ka tlu (downlink). Prve demonstracije uplink i downlink veza datiraju iz 1994. godine, kada je ostvarena dvosmerna komunikacija brzinom od 1,024 Mbps između japanskog Engineering Test Satellite-VI (ETS-VI) i zemaljske stanice [69].

Godine 2016, sistem SOTA (Small Optical TrAnsponder), razvijen od strane Nacionalnog instituta za informacionu i komunikacionu tehnologiju (NICT) u Japanu, korišćen je za uspostavljanje optičke komunikacione veze između LEO satelita (SOCRATES) i zemaljske stanice povezane sa nemačkim centrom za aeronautiku. NASA, u saradnji sa MIT Lincoln Laboratory, trenutno razvija optički komunikacioni sistem od 200 Gbps koji će biti instaliran na LEO Cubesatu (mali satelit na visini od 740 km) sa downlink vezom koja bi mogla

dostići 200 Gbps i omogućiti prenos više od 50 terabajta podataka dnevno do zemaljske stanice, u okviru programa TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD).

Pored velike dostupne propusnosti, optičke satelitske veze zahtevaju uređaje sa malim fizičkim dimenzijama koji troše manje energije u poređenju sa uređajima koji rade u mikrotalasnim opsezima, koji se tipično koriste za komunikaciju između Zemlje i satelita. Kako se ubrzava razvoj satelitskih komunikacija, više kompanija razvija optičke FSO primarne veze i inter-satelitske veze kako bi u svemir dovele propusnost sličnu optičkim vlaknima. Na primer, projekti Lightspeed-Telesat i Starlink-SpaceX imaju za cilj uspostavljanje FSO međusatelitskih veza unutar svojih satelitskih konstelacija kako bi pružili širokopojasni internet pristup širom sveta [60].

Optičke veze su poželjnije u poređenju sa RF vezama za svemirske primene zbog manjeg divergiranja optičkih talasa u odnosu na RF talase. Međutim, optičke veze između Zemlje i satelita podložne su turbulencijama i vremenskim uslovima, naročito u donjim slojevima atmosfere.

Mešanje optičkih komunikacija i RF tehnologija može biti veoma korisno u primenama vezanim za satelitske i komunikacije u dubokom svemiru [60]. Optičke veze su podložne atmosferskoj turbulenciji koja utiče na veze Zemlja–svemir i svemir–Zemlja. Iako RF i optički snopovi mogu da se prostiru kroz istu geometrijsku putanju u atmosferi, efekti kanala u većini slučajeva su izraženiji na optičkim signalima. Ovi efekti nastaju zbog različitih gustina vazduha na različitim visinama iznad tla i razlike u turbulentnom ponašanju vazduha bliže tlu.

Distorzije snopa izazvane atmosferom su znatno veće blizu tla zbog intenzivnije turbulencije i veće gustine vazduha. To znači da će downlink snop doživeti većinu poremećaja bliže prijemniku, što rezultuje manjim distorzijama intenzitetskog profila snopa u poređenju sa uplink slučajem, gde se većina atmosferskih poremećaja javlja odmah nakon napuštanja predajnika, a njihovi negativni difrakcioni efekti mogu da se akumuliraju tokom dužih udaljenosti prenosa. Može biti korisno da hibridni RF/FSO sistem koristi FSO za downlink, a RF za uplink. Ovo je takođe povoljno jer RF signali u downlink-u mogu doprineti zagušenju spektra na zemlji zbog velike veličine snopa. RF signali mogu izazvati interferenciju u uplink-u, ali ne toliko izraženu kao u slučaju downlink-a. FSO može dodatno biti koristan za downlink sa stanovišta energetske efikasnosti zbog smanjene potrošnje energije. Međutim, neophodna su dalja istraživanja kako bi se razvili napredni mehanizmi usmeravanja, akvizicije i praćenja (PAT) za FSO sisteme namenjene primeni u blizini Zemlje [68].

Predloženo je više konfiguracija satelitskih i vazdušnih mreža zasnovanih na hibridnim RF/FSO vezama, kao što su:

- 1) Satelitsko–vazdušno–terestričke mreže, gde platforma na velikoj nadmorskoj visini (HAP) služi kao relej između satelita i zemaljskih terminala.
- 2) Prostorne mreže, u kojima komunikacione veze, kao što su satelit–satelit (u istoj ili različitim orbitama) ili HAP–HAP, mogu biti uspostavljene korišćenjem RF ili FSO tehnologija.
- 3) Hibridne mreže, gde se RF veza koristi za kanal zemlja–vazduh, FSO za kanal vazduh–vazduh, a hibridni RF/FSO sistem za kanal vazduh–zemlja. Takva konfiguracija omogućava efikasno korišćenje frekvencijskog spektra, poboljšane protoke podataka i inherentnu bezbednost.

- 4) Višesnopni satelitski sistemi velikog protoka, gde je feeder veza u FSO opsegu, dok je korisnička veza između satelita i korisničkog terminala u RF Ka-opsegu [60].

Još jedna potencijalna primena korišćenja FSO zajedno sa RF sistemima, jeste ostvarivanje satelitski zasnovane kvantne distribucije ključeva (QKD). Satelitska QKD podrazumeva distribuciju tajnih enkripcijskih ključeva radi unapređenja bezbednosti komunikacionih sistema velikog dometa. Oblast satelitske QKD komunikacije konstantno raste, i očekuje se da će ovi istraživački i razvojni naponi rezultovati globalnom QKD mrežom koja može unaprediti enkripciju konvencionalnih komunikacija u blizini Zemlje.

Za komunikaciju u dubokom svemiru, RF tehnologija može imati koristi od dobro uspostavljene infrastrukture postojećih sistema. FSO se može koristiti kao komplementarna tehnologija za povećanje protoka podataka ove infrastrukture, otvarajući mogućnosti za različite primene kao što su video prenos u realnom vremenu iz svemira i prenos slika visoke rezolucije.

NASA je 2013. godine sprovela Lunar Laser Communication Demonstration (LLCD), koja je bila deo misije LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer). U okviru ove demonstracije ostvarena je serija full-duplex komunikacija između satelita u lunarnom orbitu (na udaljenosti od oko 400.000 km od Zemlje) i više zemaljskih stanica (u Španiji i SAD) sa maksimalnim protokom od 20 Mbit/s u uplinku i 622 Mbit/s u downlinku [60]. U saradnji sa kompanijom SpaceX, NASA takođe radi na instaliranju FSO sistema za misiju Psyche, čiji je cilj istraživanje metalnog asteroida koji orbitira između Marsa i Jupitera. Ideja je da se performanse komunikacije unaprede 10 do 100 puta u odnosu na trenutnu RF tehnologiju, bez povećanja mase, zapremine ili potrošnje energije.

Glavni ograničavajući faktor široke primene RF/FSO sistema jeste njihov trošak. Troškovi izgradnje optičke bežične infrastrukture od strane mrežnih operatora predstavljaju značajan izazov, posebno kada se koriste koherentna detekcija ili sofisticirani PAT sistemi u FSO vezama. Međutim, povrat investicije u terestričkim primenama može biti brz, naročito ako se koriste IM/DD sistemi i ako FSO predstavlja primarnu vezu radi uštede energije.

Troškovi takođe mogu varirati u zavisnosti od geografskog položaja instalacije. Ukoliko se hibridni sistem implementira na lokaciji gde je magla dominantan vremenski uslov, sistem će se uglavnom oslanjati na radio-tehnologiju, što dovodi do viših operativnih troškova (OPEX). Programiranje uređaja da izvršavaju mehanizme prebacivanja takođe može generisati dodatne troškove. Da bi se izgradilo poverenje u ovu tehnologiju, trebalo bi da se instalira na pilot lokacijama, poput gradova sa pretežno vedrim vremenskim uslovima tokom cele godine.

Korišćenje algoritama mašinskog učenja za efikasno prebacivanje između FSO i RF veza još uvek nije u potpunosti iskorišćeno. Efikasni algoritmi bazirani na mašinskom učenju mogu se razviti na osnovu više parametara, poput degradacije kanala. Takvi parametri mogu se veoma precizno predvideti različitim ML alatima [70].

ML-bazirano prebacivanje takođe može biti zasnovano na potrošnji energije ili drugim parametrima koji nisu povezani sa kanalom, poput EMF zračenja. Ovakav pristup može biti pogodan u slučajevima kada je RF primarni izvor komunikacije. U tom slučaju, FSO sistem se može uključiti kako bi se smanjila količina (ili trajanje) EMF zračenja na određenoj lokaciji. Primena ML algoritama u paralelnim vezama zahteva merenja kanala u različitim uslovima RF i FSO veza radi izgradnje modela učenja. Relativno nov pristup, Generative Adversarial Networks (GAN), može se koristiti za proširenje skupa podataka u ovakvim scenarijima. GAN

predstavlja duboku neuronsku mrežu koja uči da generiše nove podatke sa istom statistikom kao i originalni skup podataka. Korišćenje GAN modela može smanjiti količinu podataka prikupljenih u realnim spoljnim uslovima potrebnih za treniranje ML modela za RF/FSO prebacivanje, posebno imajući u vidu da je prikupljanje takvih merenja često dugotrajan process [60].

Do 2021. godine, više od 35% svetske populacije nije imalo pristup internetu. Veliki procenat stanovništva takođe je nedovoljno povezan, sa ograničenim pristupom internetu, čak i u razvijenim zemljama. Hibridni RF/FSO može značajno doprineti povezivanju nepovezanih i nedovoljno povezanih regiona u svetu.

Postavljanje novih optičkih mreža može biti skupo, posebno u smislu kapitalnih troškova, koji obuhvataju inicijalne troškove instalacije [71]. Operativni troškovi RF/FSO sistema uporedivi su sa troškovima RF-only sistema, posebno ako je FSO veza operativna duže vreme, čime se smanjuje ukupna potrošnja energije. Korišćenje samo RF veza takođe možda neće biti dovoljno da zadovolji stalno rastuće zahteve za kapacitetom.

Zajednička instalacija RF i FSO tehnologija može biti praktično i ekonomski isplativo rešenje za povezivanje udaljenih područja uz veću otpornost na prirodne nepogode. Komercijalno dostupni plug-and-play hibridni sistemi mogu pokriti udaljenosti do 10 km i mogu se brzo instalirati bez građevinskih radova potrebnih za polaganje optičkih vlakana pod zemljom. RF/FSO sistemi mogu doprineti poboljšanju internet protoka za stanovnike gusto naseljenih oblasti. Obezbeđivanje pouzdane konekcije na ovakvim lokacijama omogućava primenu novih tehnologija za pametnu poljoprivredu, praćenje klimatskih promena i internet stvari (IoT) uređaje.

Masivne MIMO konfiguracije mogu značajno doprineti povećanju protoka podataka radio veza. Masivni MIMO može omogućiti da se protok RF veza približi onome što može da obezbedi jedna FSO veza. Napredak u VCSEL tehnologiji takođe je doveo do razvoja brojnih FSO izvora koji se mogu nezavisno modulisati na jednom čipu. Postoje i različita rešenja za multi-aperturne detektore u konfiguracijama sa direktnom i koherentnom detekcijom. Novo razvijene antene mogu se ugraditi radi proširenja vidnog polja optičkih detektora [72]. MIMO RF/FSO sistemi mogu doprineti poboljšanju pouzdanosti obe vrste veza.

Postoji značajno interesovanje za korišćenje orbitalnog ugla momenta (OAM) elektromagnetnog talasa kako bi se povećao kapacitet prenosa. Ortogonalnost između OAM snopova omogućila je dodatni multiplexing u optičkoj komunikaciji. OAM multiplexing je moguć u FSO, kao i u radio komunikacijama. Prenosi veći od Tbps su mogući korišćenjem OAM multiplexinga optičkih signala koji se prostiru u slobodnom prostoru, dok su Multi-Gbps prenosi takođe mogući u RF domenu.

OAM multiplexing je poseban slučaj prostornog multiplexinga, koji uključuje korišćenje ortogonalnih porodica modova za prenos nezavisnih tokova podataka, kao što su Laguerre-Gaussian (LG), Hermite-Gaussian (HG) i Ince-Gaussian (IG) modalne baze. Još jedan perspektivan aspekt korišćenja prostornog multiplexinga je ostvarivanje diverziteta bez ikakvih zahteva u vezi sa razmakom između predajnih ili prijemnih apertura. Diverzitet nije ograničen samo na OAM modove izvedene iz LG baze, već može obuhvatiti modove iz različitih baza, kao što su LG i HG modovi.

THz opseg je nedavno privukao značajnu pažnju i čini se da pruža brojne mogućnosti za bežične komunikacije. Napredak u uređajima i modelovanju može omogućiti implementaciju

THz komunikacija brže nego što je očekivano. Uključivanje ovog frekvencijskog opsega, koji se kreće od 100 GHz do 10 THz, popunjava prazninu između RF i optičkog opsega i dovodi do kreiranja multiband sistema. Multiband sistemi mogu pružiti dodatnu otpornost na širok spektar uslova kanala. Eksperimentalna istraživanja pokazala su da THz signali gotovo da nisu pogođeni prašinom. Multiband može otvoriti nove primene. Iako vodena para u atmosferi snažno apsorbira THz signale, oni se mogu koristiti zajedno sa RF/FSO sistemima za obezbeđivanje visokoprotodne veze u scenarijima bez linije vidljivosti (NLOS) ili za prenos na kratkim rastojanjima [60].

Prenos u multiband režimu može biti posebno interesantan za primene u blizini Zemlje i u dubokom svemiru. THz snopovi imaju manju divergenciju u poređenju sa RF snopovima, što može pružiti dobar kompromis između osetljivosti na usmeravanje i geometrijskog gubitka. THz komunikacioni sistemi mogu ponuditi performanse uporedive sa FSO sistemima za veze Zemlja–satelit u suvim regionima. Još jedna prednost paralelnih multiband prenosa je jačanje tajnosti sistema. Ukoliko se detektuje neovlašćeni korisnik u jednom opsegu, prebacivanje komunikacije na jednu od druge dve tehnologije otežava presretanje ili ometanje signala. Takođe je moguće podeliti istu informaciju preko različitih komunikacionih opsega, ograničavajući bilo kog prislušivača da ne otkrije korisne informacije prisluškujući samo jedan opseg. Ovo može pružiti dodatnu sigurnost RF/FSO mrežama.

Solarne RF bazne stanice se implementiraju u različitim delovima sveta. Napajanje RF lokacija pomoću solarnih panela može obezbediti napajanje radio baznih stanica u udaljenim područjima ili regionima bez pouzdane mrežne konekcije. Jedna buduća ideja za istraživanje je izgradnja hibridnih RF/FSO mreža koje same proizvode energiju. Poseban scenario od interesa je korišćenje FSO sistema za smanjenje potrošnje energije na lokacijama koje rade na baterije, kako bi se izbegli ili smanjili periodi nestanka struje, prvenstveno zato što FSO sistemi obično troše manje energije od RF sistema, čime se obezbeđuje duži vek trajanja baterija.

Korišćenje solarne energije kao izvora može smanjiti ugljenični otisak ćelijskih baznih stanica u poređenju sa onima koji rade na gorivo. Komercijalno dostupni solarni paneli mogu se koristiti za dekodiranje informacijskih signala dok istovremeno prikupljaju energiju. Mogu se postići visoke brzine prenosa podataka reda veličine od 1 Gbps kada se koriste solarne ćelije koje funkcionišu kao fotodetektor [60]. MIMO konfiguracija je moguća koristeći solarne ćelije. Upotreba solarnih detektora velikih površina takođe može olakšati zahteve za PAT sistemima FSO čak i u prisustvu atmosferske turbulencije ili blagih grešaka u usmeravanju.

### 3. Analiza i optimizacija performansi FSO kanala primenom statističkih modela atmosferske turbulencije

Statističko modelovanje atmosferske turbulencije predstavlja ključni aspekt u predviđanju performansi signala. Tri raspodele — Gamma-Gamma, Rician i Nakagami- $m$  — imaju značajnu ulogu u razumevanju i prognoziranju uticaja atmosferskih uslova na optičke (FSO) komunikacione sisteme u slobodnom prostoru. Analiza ovih statističkih modela ne služi samo za opis ponašanja FSO kanala, već predstavlja osnovu za izbor odgovarajućih modela i parametara u cilju optimizacije performansi hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema u različitim propagacionim uslovima. Gamma-Gamma raspodela pruža uvid u efekte fluktuacije, Rician raspodela obrađuje scenarije sa dominantnom linijom vidljivosti, dok se Nakagami- $m$  raspodela koristi za modelovanje situacija sa višestrukim rasipanjem signala.

Za Gamma-Gamma raspodelu, grafički biće prikazani različiti oblici raspodele u zavisnosti od jačine turbulencije. Širenje raspodele, koje predstavlja indikator degradacije signala, jasno će biti prikazano u funkciji intenziteta turbulencije. U slučaju Rician raspodele, izveden je izraz za funkciju gustine verovatnoće (PDF) u zavisnosti od faktora  $K$ . Takođe, vizuelno će biti prikazan odnos raspodele pri porastu  $K$  faktora, čime se ilustruje veza između dominantne komponente i komponente nastale usled rasipanja.

Za Nakagami- $m$  model sprovedena je analiza osobina ove raspodele u zavisnosti od parametra fadanga  $m$ . Ispitivanjem karakteristika raspodele koje će biti predstavljene olakšan je proces izbora odgovarajućeg modela za analizu sistema. Uprkos ograničenjima koja prate FSO sisteme, statističko modelovanje turbulencije pruža dragocene uvide za optimizaciju performansi sistema u realnim uslovima.

Optička vlakna imaju ključnu ulogu u prenosu informacija kroz širokopojasne internet mreže. U telekomunikacijama su optička vlakna postala standardna infrastruktura za prenos informacija. Optička vlakna, zahvaljujući velikom propusnom opsegu i malim gubicima, koriste se za prenos signala na velikim udaljenostima. Primena optičkih vlakana dodatno je olakšana njihovom relativno pristupačnom cenom i kompatibilnošću komponenti sa bežičnim komunikacionim sistemima. Radi prevazilaženja određenih ograničenja, ovi sistemi se često kombinuju sa bežičnim komunikacionim sistemima.

Urbana okruženja i nepristupačni tereni mogu predstavljati poseban izazov, jer izgradnja optičkih sistema može zahtevati znatno vreme, što otežava brzo širenje mreže. FSO sistemi mogu funkcionisati kao alternativa ili dopuna optičkim vlaknima. U slučaju prekida prenosa signala kroz optička vlakna, FSO sistemi mogu služiti kao privremeno zaobilazno rešenje. Biće izloženi razlozi za primenu FSO sistema, njihova jednostavnost implementacije i isplativost, analiziraće se arhitektura FSO sistema, kao i faktori koji doprinose širokoj primeni ove tehnologije.

FSO predstavlja tehnologiju za bežični prenos podataka zasnovanu na optičkoj propagaciji signala kroz slobodan prostor u infracrvenom delu spektra. Za FSO sisteme neophodno je postojanje direktne vidljivosti (LOS – Line of Sight) između predajnika i prijemnika. Neke od prednosti FSO sistema uključuju: kompatibilnost komponenti sa optičkim vlaknima, veliki propusni opseg koji omogućava brz prenos podataka, fleksibilnost koja

omogućava izgradnju sistema na nepristupačnim lokacijama, nelicencirani frekvencijski opseg, usmerenost optičkog snopa koja obezbeđuje visoku energetska efikasnost, nevidljivi optički snopovi su uski i teško uočljivi, što otežava njihovu detekciju i dodatno povećava bezbednost prenosa podataka.

Pored svojih prednosti, FSO sistemi imaju i određene nedostatke koji mogu ograničiti njihovu primenu. Glavni nedostaci uključuju ograničen domet (zahtev za direktnom vidljivošću) i osetljivost na slabljenje signala usled atmosferske turbulencije. Atmosferska turbulencija predstavlja najčešći ograničavajući faktor u procesu implementacije FSO sistema i nastaje kao posledica jačeg zagrevanja vazduha pri površini Zemlje u poređenju sa višim slojevima atmosfere. Ovaj sloj toplijeg vazduha, koji je manje gust, podiže se i turbulentno meša sa hladnijim vazduhom, uzrokujući nasumične fluktuacije temperature vazduha.

Promene izazvane turbulencijom mogu se posmatrati kao diskretne ćelije ili vrtlozi različitih temperatura, koji se ponašaju poput refraktivnih prizmi različitih dimenzija i uglova prelamanja. Sa stanovišta geometrijske optike, ovi vrtlozi se mogu posmatrati kao sočiva koja nasumično prelamaju svetlosne zrake, što dovodi do izobličenja svetlosnog snopa na prijemu. Nasumične promene amplituda signala usled interakcije sa vrtlozima nazivaju se fluktuacije. Slabljenje signala izazvano atmosferskom turbulencijom može dovesti do grešaka u prenosu informacija, što se manifestuje pogrešno prenetim bitovima (BER – Bit Error Rate).

Kako bi se takvi uslovi predvideli, neophodno je izvršiti statističko modelovanje atmosferske turbulencije. Zbog same prirode atmosferske turbulencije, ne postoji mogućnost njenog univerzalnog modelovanja.

Biće analizirana tri različita statistička modela: Gamma–Gamma, Rician i Nakagami-m. Rezultati ove analize su od velikog značaja, jer mogu u velikoj meri olakšati izbor odgovarajuće raspodele i pojednostaviti proces implementacije FSO sistema. Projektovanje bežičnih optičkih sistema često zahteva kombinovanje različitih pristupa. Takav pristup se često zasniva na analizi koja objedinjuje navedene modele. U narednim potpoglavljima biće detaljno razmotrene Gamma–Gamma, Rician i Nakagami-m raspodele, kao najčešće korišćeni statistički modeli za opis fadinga u FSO kanalima.

### 3.1. Gamma-Gamma raspodela kao osnov za analizu i optimizaciju FSO performansi

Gamma-Gamma model zasniva se na procesu modulacije fluktuacija optičkog signala koji prolazi kroz turbulentnu atmosferu, pri čemu dominiraju uslovi niskog rasipanja i visoke refrakcije. Ovaj model opisuje atmosferske fluktuacije izazvane vrtlozima velikih i malih razmera, čime omogućava širok opseg primene u modelovanju atmosferske turbulencije. Prema teoriji fluktuacija, normalizovano primljeno zračenje  $X$  definiše se kao proizvod dva nezavisna slučajna procesa  $X_x$  i  $X_y$  [18]:

$$X = X_x X_y \quad (3.1.1)$$

$$f = (X_x) \frac{a(aX_x)}{\Gamma(a)} e^{-aX_x}; X_x > 0; a > 0 \quad (3.1.2)$$

$$f = (X_y) \frac{\beta(\beta X_y)}{\Gamma(\beta)} e^{-\beta X_y}; X_y > 0; \beta > 0 \quad (3.1.3)$$

Ako se izraz (3.1.1) napiše u obliku  $X = X_x X_y$  i uvrsti u jednačinu (3.1.3), dobija se modifikovani izraz:

$$f = (X/X_x) \frac{\beta \left( \beta \frac{X}{X_x} \right)}{X_x \Gamma(\beta)} e^{-\beta \frac{X}{X_x}} \quad (3.1.4)$$

Da bi se dobila bezuslovna raspodela iradijanse, formira se srednja vrednost izraza (3.1.4) korišćenjem gama raspodele iz jednačine (3.1.2), čime se dobija PDF nove gama–gama raspodele:

$$P_x(X) = \int_0^x f(X/X_x) f(X_x) dX_x = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} X^{\frac{\alpha+\beta}{2}} K_{\alpha+\beta}(2\sqrt{\alpha\beta X}), X > 0 \quad (3.1.5)$$

gde je  $X$  intenzitet signala,  $\Gamma(\cdot)$  gama funkcija, a  $K(\cdot)$  modifikovana Beselova funkcija drugog reda. Parametri  $\alpha$  i  $\beta$  predstavljaju ključne faktore ove raspodele, koji ukazuju na prisustvo fluktuacija velikih i malih razmera.

$$\alpha = \left[ \exp \left( \frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1 + 1.1\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.1.6)$$

$$\beta = \left[ \exp \left( \frac{0.51\sigma_R^2}{\left(1 + 0.69\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.1.7)$$

gde  $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  predstavlja Rytov-u varijansu i koristi se kao mera jačine atmosferskih turbulencija, pri čemu se one klasifikuju na sledeći način:

- 1)  $0 < \sigma^2 \leq 0.3$  – označava slabe turbulencije,
- 2)  $0.3 < \sigma^2 \leq 5$  – označava umerene turbulencije,
- 3)  $\sigma^2 > 5$  – označava jake turbulencije.

Parametar  $C_n^2$  predstavlja indeks prelamanja i koristi se kao mera intenziteta turbulencije, čineći ključni element u njenoj klasifikaciji. Za horizontalno prostiranje signala,  $C_n^2$  se kreće u opsegu od  $10^{-17}$  do  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ , pri čemu je porast vrednosti indeksa prelamanja povezan sa pojačanjem efekata intenziteta turbulencije [7].

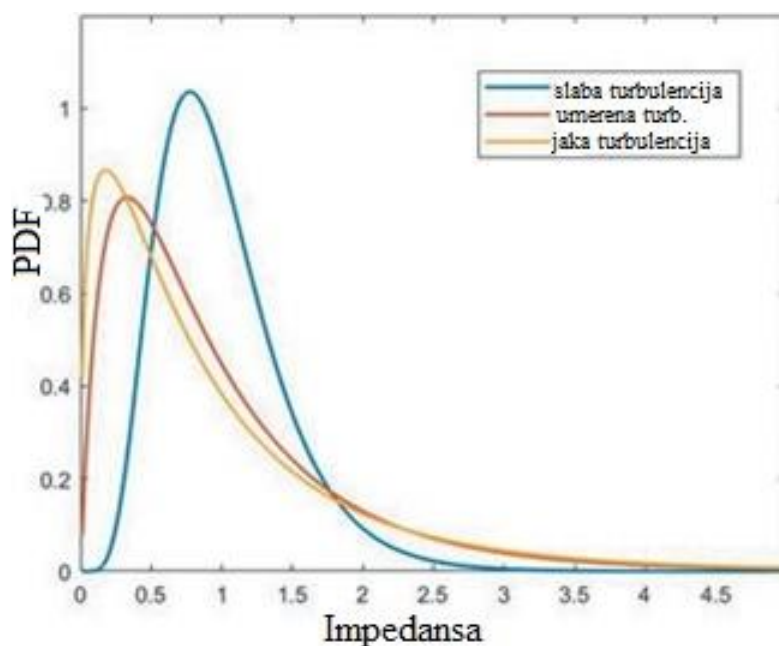
Parametar  $K$  predstavlja talasni broj i može se odrediti izrazom  $k = 2\pi/\lambda$ , gde  $\lambda$  predstavlja talasnu dužinu i određuje stepen fluktuacija u faznom aspektu signala. Duže talasne dužine karakterišu manja disperzija i refleksija, što može smanjiti oscilacije u faznom aspektu signala i umanjiti vrednost varijanse.

Parametar  $L$  predstavlja dužinu prostiranja signala, pri čemu veće udaljenosti direktno utiču na povećanje vrednosti Rytov-e varijanse.

Tabela 3.1.1 prikazuje vrednosti parametara za slabe, umerene i jake turbulencije. Ovaj model se dobro uklapa sa eksperimentalnim merenjima zračenja. Primenom formule za gamma-gamma raspodelu mogu se predstaviti različiti oblici raspodele u zavisnosti od nivoa turbulencije, u rasponu od slabih, preko umerenih, do jakih turbulencija. Na osnovu ovakve analize moguće je izvršiti izbor odgovarajućih parametara sistema i statističkog modela kanala, čime se postavlja osnova za optimizaciju performansi FSO komunikacionih sistema u različitim uslovima atmosfere turbulencije. Prikazani grafik jasno pokazuje razliku u raspodeli u zavisnosti od jačine turbulencije Slika 3.1.1. Može se uočiti da sa porastom jačine turbulencije dolazi do širenja raspodele, praćenog povećanjem opsega zračenja.

**Tabela 3.1.1.** Vrednosti parametara pod uticajem turbulencije

| Parametar    | Slaba turbulencija | Umerena turbulencija | Jaka turbulencija |
|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| $\alpha$     | 11.6               | 4                    | 4.2               |
| $\beta$      | 10.1               | 1.9                  | 1.4               |
| $\sigma_R^2$ | 0.2                | 1.6                  | 3.5               |



**Slika 3.1.1.** Gamma-gamma raspodela pod uslovima slabe, umerene i jake turbulencije

### 3.2. Rician raspodela za analizu performansi FSO sistema sa dominantnom LOS komponentom

Rician-ov model se koristi za opis slabljenja signala kada postoji jedna jaka komponenta koja odgovara direktnoj vidljivosti (LOS – Line of Sight) između predajnika i prijemnika, kao i više slabijih komponenti. Ovaj model raspodele se primenjuje za opis terestričkih mobilnih kanala u urbanim i slabo naseljenim područjima, kao i u mobilnim satelitskim kanalima. Funkcija gustine verovatnoće (PDF) Rician-ovog fadingsa može se predstaviti sledećim izrazom:

$$p_x(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} e^{\frac{(x^2+s^2)}{2\sigma_x^2}} I_0\left(\frac{xs}{\sigma_x^2}\right), x > 0 \quad (3.2.1)$$

gde je  $I_0(\cdot)$  modifikovana Beselova funkcija prvog reda nultog stepena,  $\sigma_x^2$  snaga rasejanih komponenti,  $x$  predstavlja omotač željenog signala, a  $s$  je amplituda dominantne komponente [98].

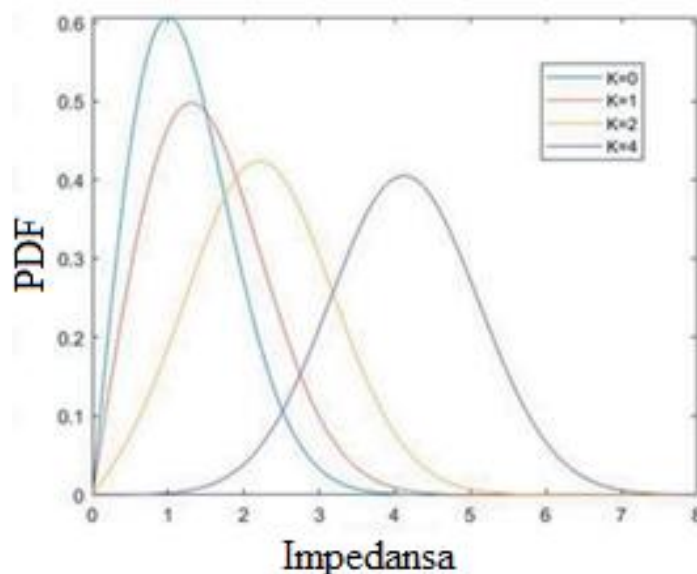
$$K = \frac{s^2}{2\sigma_x^2} \quad (3.2.2)$$

$$\Omega = s^2 + 2\sigma_x^2 \quad (3.2.3)$$

Ako se vrednosti parametara  $K$  i  $\Omega$  uvrste u prethodni izraz, dobija se izvedeni izraz za funkciju gustine verovatnoće (PDF) Rician modela:

$$p_x(x) = \frac{2x(K+1)}{\Omega} e^{-K\frac{(K+1)x^2}{\Omega}} I_0\left(2x\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}\right) \quad (3.2.4)$$

Kao što se može videti iz izraza, parametri koji učestvuju u jednačini su  $K$ -faktor (Rician-ov faktor), anvelopa signala  $x$  i faktor snage  $\Omega$ .  $K$ -faktor predstavlja odnos komponenti koje potiču od direktnog prostiranja signala duž linije vidljivosti (dominantna komponenta) i komponenti nastalih usled rasejanja. Rician-ov faktor može da ima vrednosti od 0, kada se Rician-ov model svodi na Rejljev, do  $\infty$  u slučaju kada u kanalu nema fadingsa. Povećanje  $K$ -faktora doprinosi boljim karakteristikama prenosa signala. Zbog toga se Rician raspodela često koristi za analizu performansi FSO sistema u smislu odnosa signal–šum i verovatnoće greške u prisustvu dominantne LOS komponente. Sa aspekta FSO sistema, povećanje prečnika predajnika i prijemnika, kao i raspoložive snage, može doprineti povećanju efektivne vrednosti  $K$ -faktora. Omotač signala  $x$  varira u skladu sa prenetom informacijom, dok faktor snage  $\Omega$  predstavlja ukupnu snagu obe komponente i ima ulogu skalirajućeg faktora raspodele.



Slika 3.2.1. Rician raspodela u funkciji od parametra  $K$

### 3.3. Nakagami-m raspodela za analizu i optimizaciju performansi RF i FSO kanala

Nakagami-m raspodela opisuje omotač signala u kanalima sa više klastera, gde ne postoji dominantna komponenta, a prenos se zasniva na rasejanim komponentama. PDF Nakagami-m fedinga može se predstaviti sledećim izrazom [98]:

$$f_v(v) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m V^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}v^2}, \quad z > 0, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (3.3.1)$$

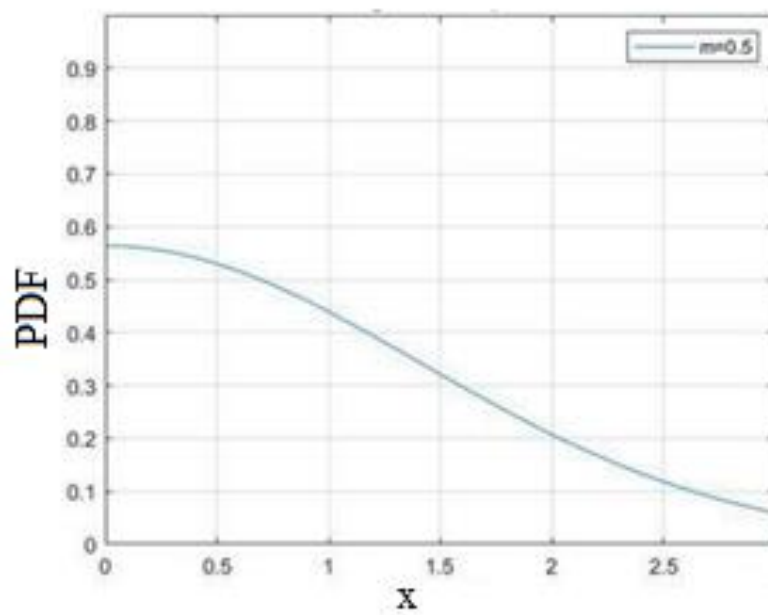
Primljeni nivo signala  $V$  predstavlja prosečnu jačinu signala na prijemu. Veća vrednost ovog nivoa ukazuje na povoljnije uslove za prijem signala, što rezultuje manjim brojem grešaka pri prijemu. Prosečna snaga signala  $\Omega = E[V^2]$  predstavlja srednju snagu signala koji se prostire kroz kanal. Veća snaga omogućava bolje karakteristike komunikacionog kanala i smanjuje verovatnoću grešaka pri prijemu. Parametar  $m$  predstavlja ključni faktor koji utiče na oblik raspodele. Veće vrednosti parametra  $m$  ukazuju na manji nivo fluktuacija signala, što dovodi do manjeg stepena fedinga. Na osnovu toga, Nakagami-m raspodela omogućava analitičku procenu i optimizaciju performansi RF i FSO kanala kroz odgovarajući izbor parametra  $m$  u zavisnosti od propagacionih uslova. Ovaj parametar omogućava prilagođavanje raspodele različitim okruženjima.

Parametar raspodele fedinga uvek zadovoljava uslov  $m \geq 0,5$ . Sa porastom ovog parametra poboljšavaju se performanse sistema, pri čemu se u skladu s tim mogu definisati određene karakteristike ove raspodele:

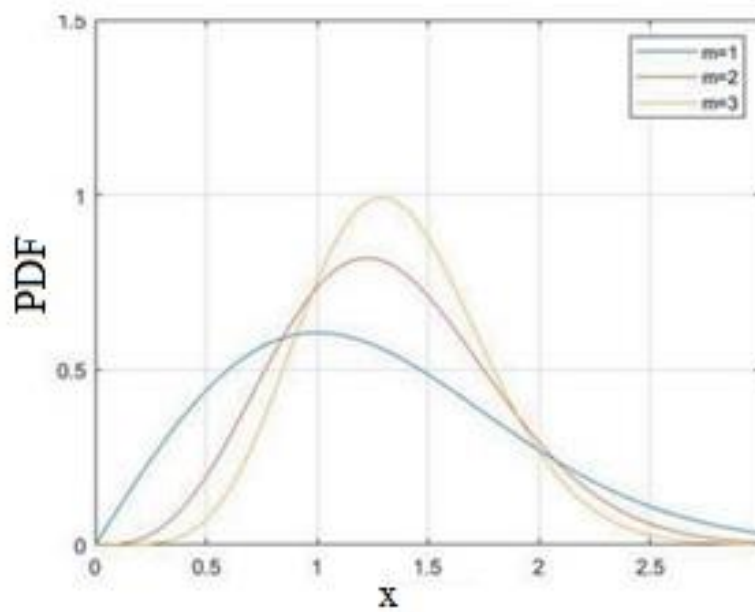
- 1) Za slučaj kada je  $m = 1$  i  $\Omega = 2\sigma^2$ , dobija se Rejljeva raspodela kao poseban slučaj.
- 2) Za  $m = 0,5$  raspodela se svodi na jednostranu Gausovu raspodelu (Slika 3.3.1).
- 3) Za  $m \rightarrow \infty$  formira se model u kome ne postoji feding u kanalu.

Slika 3.3.1 ilustruje primer Nakagami-m raspodele za vrednost parametra  $m = 0,5$  i  $\Omega = 1$ . Sa slike se može uočiti da raspodela ima oblik jednostrane Gausove raspodele.

Prikazan je oblik Nakagami-m raspodele pri povećanju parametra  $m$ . Kao ilustrativni primeri uzete su vrednosti  $m = 1$ ,  $m = 2$  i  $m = 3$ , dok je  $\Omega = 1$  ostalo nepromenjeno. Za vrednost  $m = 1$  dobija se Rejljeva raspodela, kao što je navedeno u njenim karakteristikama. Sa porastom vrednosti parametra  $m$ , raspodela poprima oblik Ricianove raspodele sa većom amplitudom oscilacija. Ovaj model pruža veliku fleksibilnost za prilagođavanje i modelovanje u različitim uslovima okruženja. U praksi je neophodno sprovoditi merenja u različitim atmosferskim uslovima kako bi se dobili parametri potrebni za izračunavanje matematičkih očekivanja.



**Slika 3.3.1.** Nakagami-m raspodela za  $m=0.5$



**Slika 3.3.2.** Nakagami-m raspodela za  $m=1$ ,  $m=2$  i  $m=3$

#### 4. Statistička analiza propagacije šuma u mešovitim RF/FSO dual-hop AF sistemima

Istražen je takozvani efekat propagacije šuma u mešovitom RF/FSO sistemu sa pojačanim i prosleđenim (AF) prenosom, koji se koristi za prenos podataka u bežičnim senzorskim mrežama. Propagacija šuma odnosi se na efekat pojačavanja šuma na relejnom čvoru usled ograničenog pojačanja, što direktno utiče na krajnji SNR sistema. Efekat propagacije šuma može biti značajan, posebno kada čvorovi senzora napajani baterijama imaju veoma ograničenu izlaznu snagu. Predstavljen je tačan izraz za kumulativnu funkciju raspodele (CDF) odnosa signal-šum (SNR) od kraja do kraja mešovitim RF/FSO AF relejnom sistemu za višesmernu komunikaciju. Pretpostavljen je strogo ograničen pojačavajući faktor na releju, koji je obično zanemaren u postojećim studijama performansi mešovitog RF/FSO AF sistema. Međutim, on bi trebalo da se uzme u obzir za pravilnu procenu efekta propagacije šuma, posebno ako snaga releja nije beskonačna ili senzor ima ograničen budžet za prenosnu snagu. Dobijeni CDF se koristi za procenu performansi sistema, kao što su verovatnoća prekida veze (outage probability), prosečna stopa grešaka po bitu (ABER) i ergodični kapacitet. Numerička istraživanja pokazuju da je predložena analiza u potpunosti u skladu sa simulacijom i da je razlika u performansama usled uključivanja efekta propagacije šuma značajna (oko 2–12%), posebno kada je SNR u srednjem ili niskom opsegu (npr. 10–20 dB).

Kako je RF veza podložna jakom fadingu, FSO veza ima sličan fenomen fedinga, poznat kao atmosferska turbulencija, koja izaziva fluktuacije u indeksu prelamanja. Pored toga, FSO veza trpi i grešku usmeravanja, koja se odnosi na neusklađenost između predajnika i prijemnika usled dinamičkih opterećenja vetrom ili slabih zemljotresa. U prethodnim studijama o evaluaciji hibridnih RF-FSO dual-hop sistema, RF veza je modelovana pomoću različitih statističkih modela, uključujući Rayleigh, Rician,  $\kappa$ - $\mu$ , Nakagami-m, generalizovani Nakagami-m, generalizovani-K i Extended Generalized-K (EGK) fading. Sa druge strane, FSO veza se pretpostavlja da trpi efekte modela Malaga-M, eksponencijalnog Weibulla, Gamma-Gamma sa greškama usmeravanja, i Double Generalized Gamma (DGG) [74], [75].

U dual-hop AF (amplify-and-forward) sistemima, signal sa izvora koji stigne do relejnog čvora, nakon što je pretrpeo izobličenja kanala, pojačava se pojačanjem  $G$ . Pošto je maksimalna izlazna snaga releja obično ograničena, pojačanje mora biti ograničeno prema:

$$G \leq \frac{P_r}{P_s |h_1|^2 + \sigma} \equiv G_U, \quad (4.1)$$

gde su  $P_s$  i  $P_r$  snage prenosa na izvoru i maksimalno dostupna snaga na releju,  $|h_1|^2$  je snaga kanala prvog skoka, a  $\sigma$  predstavlja nivo šuma [76], [77].

Kada se koristi maksimalno pojačanje  $G_U$ , krajnji odnos signal/šum (SNR,  $\gamma_e$ ) sistema je dat formulom:

$$\gamma_e = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1}, \quad (4.2)$$

gde su  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  SNR vrednosti prvog i drugog skoka, respektivno. Za hibridne RF/FSO sisteme, postoji veliki broj radova koji pružaju statističku analizu  $\gamma_e$ , jer ona uglavnom određuje

performanse sistema, uključujući verovatnoću prekida veze (OP), prosečnu stopu greške po bitu (BER) i kapacitet kanala [78]. Međutim, u postojećim modelima,  $\gamma_e$  se ne tretira direktno, već se umesto toga istražuje aproksimativna verzija:  $\gamma_a = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$ . Ponekad se  $\gamma_a$  dodatno aproksimira sa  $\gamma_m = \min \{\gamma_1, \gamma_2\}$ . Očigledno je da važi  $\gamma_e < \gamma_a \leq \gamma_m$ , pa postojeći modeli sigurno precenjuju performanse hibridnog RF/FSO AF relaja. Konkretno,  $\gamma_a$  se može dobiti postavljanjem  $\sigma = 0$ , pri čemu je pojačanje releja beskonačno u zavisnosti od jačine kanala, što se često naziva idealnim pojačanjem ili pojačanjem inverzijom kanala. Performanse procenjene pomoću aproksimativnih SNR vrednosti obično zanemaruju efekat propagacije šuma u AF relejnom sistemu.

Propagacija šuma je u praksi uzrokovana ograničenom izlaznom snagom na relej čvoru i postaje naročito značajna kada je SNR prvog skoka nizak ili kada komunikacioni link uključuje više skokova. U bežičnim senzorskim mrežama, senzori sa baterijskim napajanjem obično imaju vrlo ograničen proračun za prenos, pa SNR prvog skoka na releju neizbežno bude nizak. Stoga se primena mešanog RF/FSO AF relaja u bežičnim senzorskim mrežama mora adekvatno proceniti uključivanjem efekta propagacije šuma.

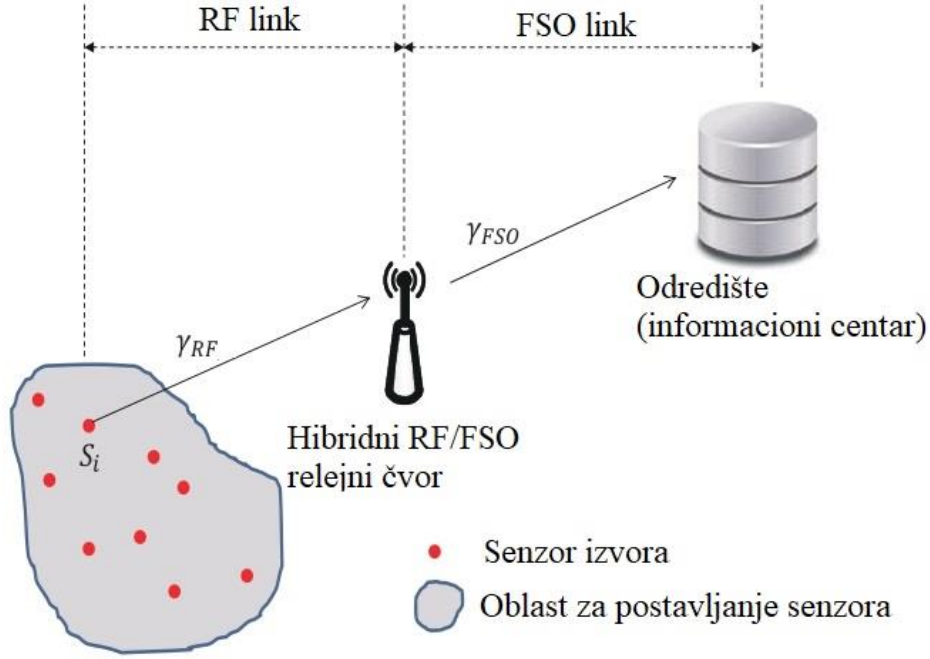
Biće analizirana verovatnoća greške  $\gamma_e$  i efekat propagacije šuma na performanse sistema. Uzimajući u obzir šum pojačan na releju, može se uočiti degradacija performansi usled propagacije šuma u poređenju sa aproksimativnim rezultatima. Pretpostavljeno je da RF veza modelovana Nakagami-m fadingom, dok je FSO veza modelovana Gamma-Gamma fadingom.

Numerička ispitivanja degradacije performansi pokazuju da, ako je SNR svakog skoka 10 dB, u poređenju sa performansama aproksimiranim korišćenjem  $\gamma_a$ , tačna verovatnoća prekida (OP) je degradirana do 18,5%, prosečan BER do 12,17%, a kapacitet do 8,08%. Iako se razlika u performansama smanjuje na oko 1% kada je SNR veći od 30 dB, tačna analiza je izuzetno značajna u srednjem i niskom SNR opsegu.

#### 4.1. Model sistema i statistika fedinga

Razamtra se asimetrični hibridni RF/FSO AF relejni komunikacioni sistem u kojem izvorni senzor (S) i odredišni centar podataka (D) komuniciraju preko posrednog relejnog čvora (R) kao na Slici 4.1. Pretpostavlja se da je S-R veza RF tipa, dok je R-D veza FSO tipa.

Ovaj model je primenjiv u bilo kojoj senzorskoj mrežnoj situaciji koja se sastoji od RF veze između udaljenih senzora (ili terminala) i FSO relejnog linka srednje ili velike udaljenosti između posrednog čvora klastera i centra za prikupljanje informacija. Na primer, u projektu Loon, topli vazdušni baloni su povezani FSO mrežnim linkovima u funkciji relejnog prenosa podataka kako bi pružili internet usluge na LTE nivou u područjima sa slabom infrastrukturuom [79]. Vazdušni meteorološki senzori povezani RF vezom u balonu takođe se mogu povezati sa informacijskim centrom na zemlji pomoću FSO linka.



**Slika 4.1.1.** Model sistema

Neka  $\gamma_{RF}$  i  $\gamma_{FSO}$  označavaju SNR RF i FSO veze, respektivno. Pošto se razmatra pojačavajući relej sa strogo ograničenom snagom [77], SNR od izvora do odredišta (end-to-end SNR) se izražava kao:

$$\gamma_e = \frac{\gamma_{RF} \gamma_{FSO}}{\gamma_{RF} + \gamma_{FSO} + 1} \quad (4.1.1)$$

Redosledi RF–FSO i FSO–RF su ekvivalentni u pogledu krajnjeg odnosa signal–šum kada se koristi pojačanje ograničeno strogo definisanom izlaznom snagom releja. Ako se prepostavi da RF veza ima Nakagami- $m$  feding, tada  $\gamma_{RF}$  prati gama raspodelu sa parametrom fedinga  $m$  i parametrom  $\Omega$ , uz prosečan SNR  $\bar{\gamma}_{RF}$ . Funkcija gustine verovatnoće (PDF) u tom slučaju data je izrazom:

$$f_{\gamma_{RF}}(x) = \left( \frac{m}{\Omega \bar{\gamma}_{RF}} \right)^m \frac{x^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp \left( -\frac{m}{\Omega \bar{\gamma}_{RF}} x \right), \quad (4.1.2)$$

gde je  $\Gamma(\cdot)$  gama funkcija, definisana kao  $\Gamma(x) = \int_0^\infty z^{x-1} e^{-z} dz$ . Za FSO vezu, neka  $\eta$  i  $l$  označavaju efektivni fotoelektrični koeficijent konverzije i koeficijent kanala FSO veze, respektivno. Tada se SNR FSO veze modeluje kao  $\gamma_{FSO} = \frac{(\eta l)^w}{N_0}$ , gde je  $N_0$  varijansa belog Gausovog šuma nulte srednje vrednosti na prijemniku, a  $w \in \{1, 2\}$  predstavlja korišćenu tehniku detekcije (tj.  $w = 1$  i  $w = 2$  odgovaraju HD i IM/DD detekciji, respektivno).  $I = I_l I_p I_f$ , gde  $I_l$  predstavlja gubitke na putu,  $I_p$  grešku usmeravanja, a  $I_f$  feding izazvan atmosferskom turbulencijom.  $I_l = 1$ , budući da je  $I_l$  deterministička veličina [79], dok su  $I_p$  i  $I_f$  slučajne promenljive sa funkcijama gustine verovatnoće  $f_{I_p}(x)$  i  $f_{I_f}(x)$ . Prema [56], PDF greške usmeravanja  $I_p$  dat je izrazom:

$$f_{I_p}(x) = \frac{\delta^2}{\Phi \delta^2} x^{\delta^2-1}, 0 \leq x \leq \Phi, \quad (4.1.3)$$

gde je  $\delta$  odnos između ekvivalentnog poluprečnika snopa i standardne devijacije pomeraja usled greške usmeravanja na prijemniku (odnosno, što je veća vrednost  $\delta$ , to je manji uticaj greške usmeravanja), dok  $\Phi$  predstavlja deo prikupljene snage pri radijalnom pomeraju  $r = 0$ . Funkcija gustine verovatnoće (PDF) za  $I_f$  data je u sledećem obliku:

$$f_{I_f}(x) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta x}), x > 0, \quad (4.1.4)$$

gde su  $\alpha$  i  $\beta$  parametri atmosferske turbulencije, a  $K_a(\cdot)$  označava modifikovanu Beselovu funkciju drugog reda, reda  $a$ . Korišćenjem uopštenog razvoja u red snaga modifikovane Beselove funkcije drugog reda, PDF iz izraza (4.1.4) može se zapisati u sledećem obliku:

$$f_{I_f}(x) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j(\alpha, \beta) x^{j+\beta-1} + \sum_{j=0}^{\infty} a_j(\beta, \alpha) x^{j+\alpha-1}, \quad (4.1.5)$$

gde su koeficijenti dati sa:

$$a_j(\alpha, \beta) = \frac{\pi(\alpha\beta)^{j+\beta} \csc(\pi(\alpha-\beta))}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(j-\alpha+\beta+1)\Gamma(j+1)}. \quad (4.1.6)$$

Mora važiti da  $\alpha - \beta$  nije ceo broj. Korišćenjem izraza (4.1.5), kumulativna funkcija raspodele (CDF) promenljive  $I_f$  može se izvesti u obliku:

$$F_{I_f}(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \left( \frac{a_j(\alpha, \beta)}{j+\beta} x^{j+\beta} + \frac{a_j(\beta, \alpha)}{j+\alpha} x^{j+\alpha} \right). \quad (4.1.7)$$

Korišćenjem izraza (4.1.3) i (4.1.7), kumulativna funkcija raspodele (CDF) promenljive  $I = I_l I_p I_f$  može se izraziti kao:

$$F_I(x) = \int_0^{\Phi} F_{I_f}\left(\frac{x}{t}\right) f_{I_p}(t) dt = \sum_{j=0}^{\infty} [b_j(\alpha, \beta, \delta) x^{j+\beta} + b_j(\beta, \alpha, \delta) x^{j+\alpha}], \quad (4.1.8)$$

gde je  $b_j(\alpha, \beta, \delta) = \frac{a_j(\alpha, \beta) \delta^2}{(j+\beta)(\delta^2-j-\beta) \Phi^{j+\beta}}$ .

Korišćenjem izraza (4.1.8), CDF promenljive  $\gamma_{\text{FSO}}$  se dobija kao:

$$F_{\gamma_{\text{FSO}}}(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[ \frac{b_j(\alpha, \beta, \delta)}{\left(\eta^w \mu_w\right)^{\frac{j+\beta}{w}}} x^{\frac{j+\beta}{w}} + \frac{b_j(\beta, \alpha, \delta)}{\left(\eta^w \mu_w\right)^{\frac{j+\alpha}{w}}} x^{\frac{j+\alpha}{w}} \right], \quad (4.1.9)$$

gde  $\mu_w$  označava prosečan SNR. Preciznije, za  $\mu_w$  važi: kada je  $w = 1$ ,  $\mu_1 = \bar{\gamma}_{\text{FSO}}$  i kada je  $w = 2$ ,  $\mu_2 = \frac{\bar{\gamma}_{\text{FSO}} \alpha \beta \delta^2 (\delta^2 + 2)}{(\alpha + 1)(\beta + 1)(\delta^2 + 1)^2}$ .

## 4.2. Tačna statistička analiza $\gamma_e$

Uvođenjem međusobno isključivih događaja koji formiraju particiju:  $\{\gamma_{RF} \geq x\}$  i  $\{\gamma_{RF} < x\}$ , CDF promenljive  $\gamma_e$  može se ekvivalentno izraziti kao:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_e}(x) &= \Pr\left(\frac{\gamma_{RF}\gamma_{FSO}}{\gamma_{RF} + \gamma_{FSO} + 1} < x\right) = \Pr\left(\gamma_{FSO} < \frac{x(\gamma_{RF} + 1)}{\gamma_{RF} - x}, \gamma_{RF} \geq x\right) + \Pr(\gamma_{RF} < x) \\ &= \int_0^x f_{\gamma_{RF}}(t) dt + \int_x^\infty F_{\gamma_{FSO}}\left(\frac{x(t+1)}{t-x}\right) f_{\gamma_{RF}}(t) dt. \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

$\underbrace{\quad}_{F_{\gamma,1}} \qquad \underbrace{\quad}_{F_{\gamma,2}}$

$F_{\gamma,1}$  predstavlja kumulativnu funkciju raspodele (CDF)  $\gamma_{RF}$  i dat je izrazom:

$$F_{\gamma,1} = \frac{\gamma\left(m, \frac{mx}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}\right)}{\Gamma(m)}, \quad (4.2.2)$$

gde je  $\gamma(s, x)$  donja nepotpuna Gama funkcija, definisana kao  $\gamma(s, x) = \int_0^x t^{s-1} e^{-t} dt$ , dok je  $\Gamma(m)$  standardna Gama funkcija.

$$F_{\gamma,2} = \int_x^\infty \left[ \sum_{j=0}^\infty \frac{b_j(\alpha, \beta, \delta)}{\left(\frac{\eta^w \mu_w}{x}\right)^{\frac{j+\beta}{w}}} \left(\frac{t+1}{t-x}\right)^{\frac{j+\beta}{w}} + \frac{b_j(\beta, \alpha, \delta)}{\left(\frac{\eta^w \mu_w}{x}\right)^{\frac{j+\alpha}{w}}} \left(\frac{t+1}{t-x}\right)^{\frac{j+\alpha}{w}} \right] \left(\frac{m}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}\right)^m \frac{t^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-\frac{mt}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}} dt \quad (4.2.3)$$

$$\begin{aligned} (a) \quad &= \left\{ \begin{aligned} &\sum_{j=0}^\infty \sum_{l=0}^\infty \sum_{k=0}^\infty \left[ \frac{j+\beta}{\binom{w}{l}} \left(-\frac{j+\beta}{\binom{w}{k}}\right) \frac{b_j(\alpha, \beta, \delta)}{\left(\frac{\eta^w \mu_w}{x}\right)^{\frac{j+\beta}{w}}} + \frac{j+\alpha}{\binom{w}{l}} \left(-\frac{j+\alpha}{\binom{w}{k}}\right) \frac{b_j(\beta, \alpha, \delta)}{\left(\frac{\eta^w \mu_w}{x}\right)^{\frac{j+\alpha}{w}}} \right] \\ &\times \frac{(-x)^k}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}\right)^m \int_x^\infty t^{m-l-k-1} e^{-\frac{mt}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}} dt, \quad x \geq 1 \\ &\sum_{j=0}^\infty \sum_{l=0}^\infty \sum_{k=0}^\infty \frac{j+\beta}{\binom{w}{l}} \left(-\frac{j+\beta}{\binom{w}{k}}\right) \frac{b_j(\alpha, \beta, \delta)(-x)^k}{\Gamma(m) \left(\frac{\eta^w \mu_w}{x}\right)^{\frac{j+\beta}{w}}} \left(\frac{m}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}\right)^m \\ &\times \left( \int_1^\infty t^{m-l-k-1} e^{-\frac{mt}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}} dt + \int_x^1 t^{m+l-k-\frac{j+\beta}{w}} e^{-\frac{mt}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}} dt \right) \\ &+ \frac{j+\alpha}{\binom{w}{l}} \left(-\frac{j+\alpha}{\binom{w}{k}}\right) \frac{b_j(\beta, \alpha, \delta)(-x)^k}{\Gamma(m) \left(\frac{\eta^w \mu_w}{x}\right)^{\frac{j+\alpha}{w}}} \left(\frac{m}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}\right)^m \\ &\times \left( \int_1^\infty t^{m-l-k-1} e^{-\frac{mt}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}} dt + \int_x^1 t^{m+l-k-\frac{j+\alpha}{w}} e^{-\frac{mt}{\Omega\bar{\gamma}_{RF}}} dt \right), \quad x < 1 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

$$F_{\gamma_e} = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \frac{j+\beta}{\binom{w}{l}} \left( -\frac{j+\beta}{\binom{w}{k}} \right) \frac{b_j(\alpha, \beta, \delta)}{\left( \frac{\eta^w \mu_w}{x} \right)^{\frac{j+\beta}{w}}} + \frac{j+a}{\binom{w}{l}} \left( -\frac{j+a}{\binom{w}{k}} \right) \frac{b_j(\beta, \alpha, \delta)}{\left( \frac{\eta^w \mu_w}{x} \right)^{\frac{j+a}{w}}} \right\} \\ & \times \frac{(-x)^k}{\Gamma(m)} \left( \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)^{l+k} \Gamma \left( m - l - k, \frac{mx}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right) + \frac{\gamma \left( m, \frac{mx}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)}{\Gamma(m)}, \quad x \geq 1 \\ & \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-x)^k}{\Gamma(m)} \left[ \frac{j+\beta}{\binom{w}{l}} \left( -\frac{j+\beta}{\binom{w}{k}} \right) \frac{b_j(\alpha, \beta, \delta)}{\left( \frac{\eta^w \mu_w}{x} \right)^{\frac{j+\beta}{w}}} \left\{ \left( \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)^{l+k} \Gamma \left( m - l - k, \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{u=0}^{\infty} \frac{(-1)^u}{\Gamma(u+1)} \left( \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)^{m+u} \frac{1-x^{m+l-k+u-\frac{(j+\beta)}{w}}}{m+l-k+u-\frac{(j+\beta)}{w}} \right\} + \frac{j+\alpha}{\binom{w}{l}} \left( -\frac{j+\alpha}{\binom{w}{k}} \right) \frac{b_j(\beta, \alpha, \delta)}{\left( \frac{\eta^w \mu_w}{x} \right)^{\frac{j+\alpha}{w}}} \left\{ \left( \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)^{l+k} \right. \right. \\ & \left. \left. \times \Gamma \left( m - l - k, \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right) + \sum_{u=0}^{\infty} \frac{(-1)^u}{\Gamma(u+1)} \left( \frac{m}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)^{m+u} \frac{1-x^{m+l-k+u-\frac{(j+\alpha)}{w}}}{m+l-k+u-\frac{(j+\alpha)}{w}} \right\} \right] + \frac{\gamma \left( m, \frac{mx}{\Omega_{\bar{\gamma}_{RF}}} \right)}{\Gamma(m)}, \quad x < 1 \end{aligned} \right. \quad (4.2.5)$$

$F_{\gamma,2}$  je definisana u jednačini (4.2.3). Jednakost označena sa (a) = u (4.2.4) dobijena je primenom generalizovane binomne Njutnove teoreme na član  $\frac{t+1}{t-x_w}^{j+\alpha}$  (ili  $\beta$ ) u jednačini (4.2.3). Korišćenjem izraza [80] (3.381.3) za integral  $\int_x^{\infty} t^{m-k-1} e^{-mt/\bar{\gamma}_{RF}} dt$  u (4.2.4), i predstavljanjem preko sume, i eksponencijalne funkcije u  $\int_1^x t^{m-k-1-j+(\alpha \text{ ili } \beta)/w} e^{-mt/\bar{\gamma}_{RF}} dt$  u (4.2.4), konačno se dobija CDF krajnjeg SNR-a  $\gamma_e$  prikazan u jednačini (4.2.5). Dat je tačan izraz za CDF-a krajnjeg SNR-a u dual-hop RF/FSO AF sistemu sa ograničenim pojačanjem releja, uzimajući u obzir i efekte RF fedinga i FSO turbulencije sa greškama usmeravanja.

### 4.3. Primena $F_{\gamma_e}$ za procenu performansi

Korišćenjem  $F_{\gamma_e}$  dobijenog u (4.2.5), performanse sistema mogu se proceniti na sledeći način:

- 1) Verovatnoća prekida definiše se kao verovatnoća da trenutni izlazni SNR  $\gamma_e$  padne ispod unapred definisanog praga  $\gamma_{th}$ . Pošto već imamo CDF  $\gamma_e$ , verovatnoća prekida se jednostavno izražava kao:

$$P_{out} = \Pr \{ \gamma_e < \gamma_{th} \} = F_{\gamma_e}(\gamma_{th}) \quad (4.3.1)$$

- 2) Prosečna BER za različite binarne modulacije može se izraziti integracijom preko CDF-a:

$$P_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^{\infty} e^{-qx} x^{p-1} F_{\gamma_e}(x) dx \quad (4.3.2)$$

gde su  $p$  i  $q$  parametri koji zavise od vrste binarne modulacije, a  $\Gamma(p)$  je Gama funkcija. Ovim pristupom, korišćenje tačno izračunatog  $F_{\gamma_e}$  omogućava preciznu procenu i verovatnoće prekida i prosečne BER u dual-hop RF/FSO AF sistemima.

- 3) Ergodični kapacitet definiše se kao  $\bar{C} = \mathbb{E}[\log_2(1 + c\gamma_e)]$ , kao u [7,10], gde je  $c = 1$  za HD, a  $c = e/(2\pi)$  za IM/DD. Primenom metode parcijalne integracije, ergodični kapacitet se može izraziti preko  $F_{\gamma_e}(x)$  na sledeći način:

$$\bar{C} = \frac{c}{\ln(2)} \int_0^{\infty} \frac{1 - F_{\gamma_e}(x)}{1 + cx} dx \quad (4.3.3)$$

#### 4.4. Numerički rezultati statistike fedinga

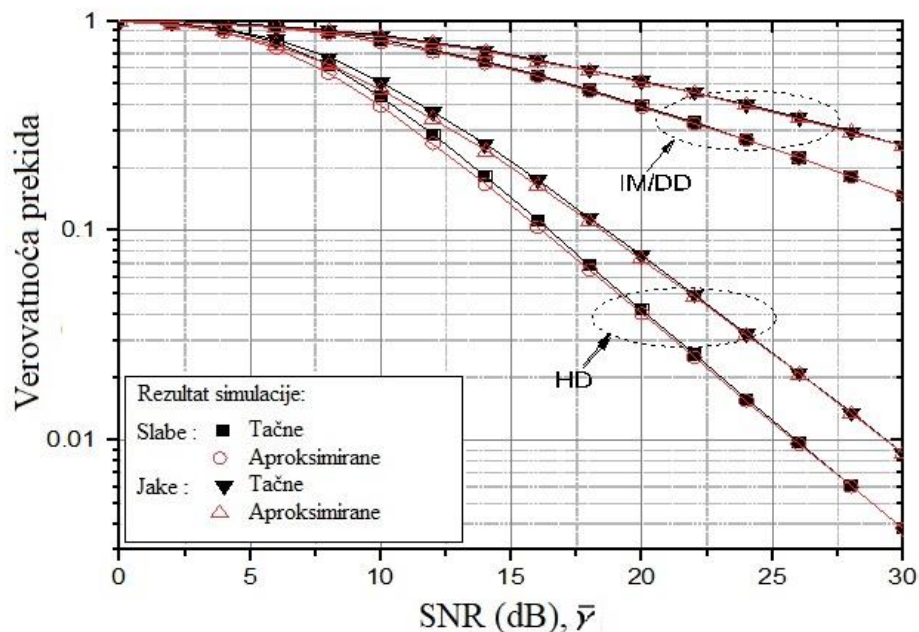
U simulaciji FSO veza se modeluje korišćenjem Gamma-Gamma feding kanala, pri čemu se razmatraju uslovi slabe ( $\alpha=2.902$  i  $\beta=2.51$ ), srednje ( $\alpha=2.296$  i  $\beta=1.822$ ) i jake ( $\alpha=2.064$  i  $\beta=1.342$ ) atmosferske turbulencije [82]. Pretpostavlja se i da su  $\eta=0.8$  i  $\Phi=1$  pri  $r=0$  za FSO vezu.

Za RF vezu, koja je podvrgnuta Nakagami- $m$  fedingu, uzimaju se parametri  $m=1.1$  i  $\Omega=1$ . Prosečni SNR za FSO i RF veze se smatra jednakim i označava se sa  $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_{\text{FSO}} = \bar{\gamma}_{\text{RF}}$ . Za prag otkazivanja veze koristi se  $\gamma_{\text{th}}=1$ . Prilikom numeričke evaluacije beskonačnih serija u tačno dobijenom CDF izrazu iz (4.2.5), koristi se gornja granica za indekse niza  $j, l$  i  $k$ , tako da  $j, l, k \leq 50$ .

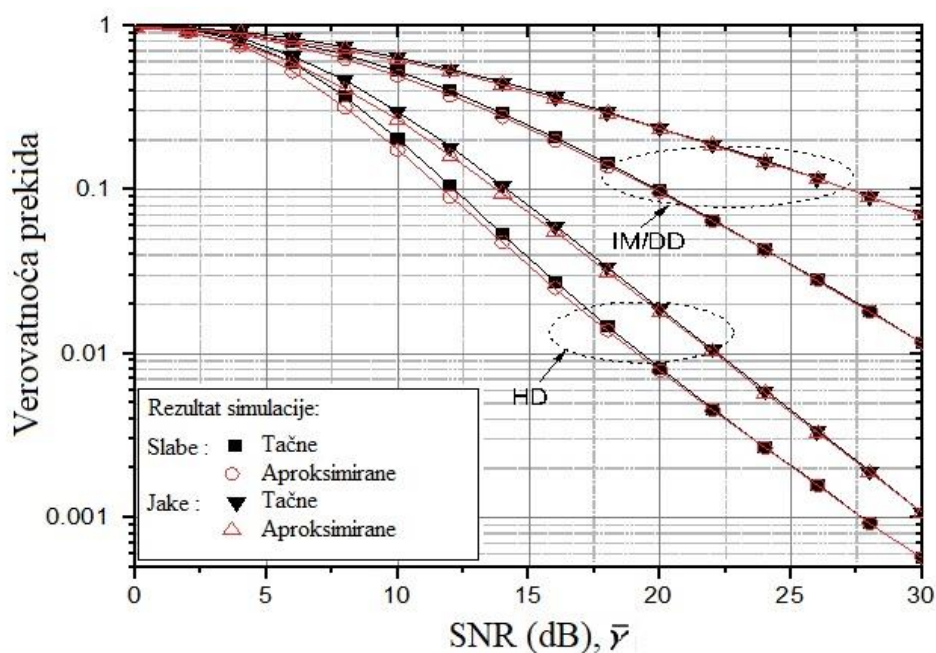
Slike 4.4.1 i 4.4.2 potvrđuju analitički rezultat CDF-a  $\gamma_e$  poređenjem sa simulacionim rezultatima. U obe slike razmatrana su različita odstupanja u usmeravanju,  $\delta = 1$  i  $\delta = 6.7$ . Uočava se savršeno poklapanje analitičkih i simulacionih rezultata, čime se potvrđuje tačnost izvedenog izraza.

Razlika između rezultata dobijenih korišćenjem „tačnog“ i „aproksimativnog“ SNR-a direktno ilustruje efekat propagacije šuma u AF relejnom sistemu. Ova razlika postaje izraženija pri nižim SNR vrednostima, pri prelasku sa IM/DD na HD detekciju, kao i pri prelasku sa jake na slabu turbulenciju i sa većeg na manje odstupanje u usmeravanju.

Na primer, pri SNR = 10 dB, degradacija verovatnoće prekida zbog propagacije šuma iznosi oko 10,71% za HD prijemnik u uslovima slabe turbulencije (Slika 4.4.1). Ova vrednost se smanjuje na 7,98% pri jakim turbulencijama, ali raste do 18,5% u slučaju manjeg odstupanja u usmeravanju (Slika 4.4.2). Za IM/DD prijemnik, odgovarajuće degradacije iznose 2,43%, 1,69% i 6,58%, respektivno.. Ako je SNR veći od 30 dB, razlika u svim testiranim tačkama postaje manja od 1%.



**Slika 4.4.1.** Poređenje CDF-a (odnosno verovatnoće prekida), dobijenih korišćenjem tačnog  $\gamma_e$  i aproksimativnog  $\gamma_a$ .  $\delta = 1$ , prikazani su rezultati za slabu i jaku turbulenciju



**Slika 4.4.2.** Poređenje CDF-a (odnosno verovatnoće prekida), dobijenih korišćenjem tačnog  $\gamma_e$  i aproksimativnog  $\gamma_a$ .  $\delta = 6.7$ , prikazani su rezultati za slabu i jaku turbulenciju

U Tabeli 4.4.1 prikazan je procenat degradacije performansi za prosečnu stopu grešaka po bitu (postavljanjem  $p = q = 1$ ) i ergodični kapacitet ( $\bar{C}$ ). Trend promene degradacije prosečne BER vrednosti je sličan kao i kod verovatnoće prekida (OP). Međutim, kod ergodičnog kapaciteta trend se čini drugačijim, zavisno od tipa detekcije, pretpostavke o grešci usmeravanja i parametara turbulencije, posebno ako se pretpostavlja HD detekcija. U svakom slučaju, razlika

iznosi od 2,44% do 12,17% pri SNR od 10 dB, dok se smanjuje na manje od 1% pri SNR od 30 dB.

**Tabela 4.4.1.** Procenat degradacije performansi usled efekta propagacije šuma u poređenju sa aproksimativnim rezultatima dobijenim korišćenjem  $\gamma_a$

|              |     | HD           |       |                |       | IM/DD        |       |                |       |
|--------------|-----|--------------|-------|----------------|-------|--------------|-------|----------------|-------|
|              |     | $\delta = 1$ |       | $\delta = 6.7$ |       | $\delta = 1$ |       | $\delta = 6.7$ |       |
| Turbulencija | SNR | BER          | $C^-$ | BER            | $C^-$ | BER          | $C^-$ | BER            | $C^-$ |
| Slaba        | 10  | 9.28         | 5.69  | 12.17          | 3.97  | 3.35         | 8.08  | 6.88           | 5.64  |
|              | 20  | 3.72         | 0.46  | 3.72           | 0.27  | 1.30         | 0.90  | 2.79           | 0.55  |
|              | 30  | 0.52         | 0.03  | 0.38           | 0.02  | 0.25         | 0.08  | 0.54           | 0.04  |
| Umerena      | 10  | 8.79         | 5.74  | 11.61          | 4.06  | 2.83         | 7.97  | 5.57           | 5.70  |
|              | 20  | 3.59         | 0.47  | 4.12           | 0.29  | 1.09         | 0.92  | 2.08           | 0.58  |
|              | 30  | 0.42         | 0.03  | 0.50           | 0.02  | 0.21         | 0.08  | 0.45           | 0.05  |
| Jaka         | 10  | 7.76         | 5.83  | 10.26          | 4.25  | 2.44         | 7.82  | 4.64           | 5.71  |
|              | 20  | 3.09         | 0.50  | 4.13           | 0.32  | 0.92         | 0.92  | 1.64           | 0.61  |
|              | 30  | 0.47         | 0.04  | 0.74           | 0.02  | 0.18         | 0.09  | 0.29           | 0.05  |

## 5. Evaluacija performansi hibridnih RF/FSO sistema korišćenjem Nakagami-m i Gamma-Rician modela za One-Hop i Multi-Hop scenarije

Predstavljen je sveobuhvatan model za evaluaciju performansi hibridnih RF/FSO sistema. Nedavno predloženi Gamma-Rician model korišćen je za statističku karakterizaciju turbulencije u FSO kanalu, dok je Nakagami-m model fadinga primenjen za modelovanje RF propagacije. Izvedeni su zatvoreni izrazi za funkciju kumulativne raspodele (CDF) posmatranog odnosa signal-šum (SNR) na prijemu, kao i izraz u zatvorenom obliku za prosečnu stopu grešake po bitu (ABER) pri korišćenju koherentne binarne fazne modulacije (CBPSK) [81]. Analizirana su dva načina prenosa u relejnim hibridnim RF/FSO sistemima. Na osnovu dobijenih izraza, izvršena je evaluacija ABER performansi ovih sistema u funkciji različitih parametara kanala i broja skokova, čime je analiziran njihov uticaj na robusnost hibridnih konfiguracija. Analitički razvoj hibridnog RF/FSO sistema zasnovanog na Nakagami-m i Gamma-Rician statističkim modelima, uključujući izvođenje zatvorenih izraza za CDF i ABER u One-Hop i Multi-Hop scenarijima, predstavljen je u ranijem radu autora [81].

Dosadašnja istraživanja, pružaju sveobuhvatne preglede optičkih bežičnih hibridnih mreža, ističući komplementarne karakteristike RF i optičkih bežičnih komunikacionih (OWC) tehnologija. Ove studije naglašavaju potencijal hibridnih sistema da podrže nove 5G mreže i dalje, korišćenjem različitih kombinacija RF i optičkih tehnologija, uključujući komunikaciju vidljivim svetlom (VLC), Light Fidelity (LiFi), optičku komunikaciju pomoću kamera (OCC) i FSO.

Analiza performansi i modelovanje kanala predstavljaju ključni aspekt razumevanja hibridnih sistema. Razmatrani su izazovi koje atmosferska turbulencija i poravnanje nameću FSO sistemima, predstavljajući hibridne pristupe kao efikasno sredstvo za ublažavanje ovih problema. Razmatran je tehnološki napredak u oblasti optičkih bežičnih komunikacija (OWC), naročito u zatvorenim prostorima pri čemu je istaknuta integracija VLC i LiFi tehnologija sa RF sistemima. Istraživan je potencijal kombinovanja VLC i FSO tehnologija, pokazujući značajna poboljšanja u prenosu podataka i bezbednosti sistema. Dat je uvid u ultraljubičaste (UV) komunikacije koje, iako različite, nude relevantne aspekte modelovanja kanala i uticaja okoline primenljive na FSO sisteme. Savremena istraživanja i dalje potvrđuju efikasnost hibridnih RF/FSO sistema u dinamičkom prilagođavanju uslovima u realnom vremenu, čime se obezbeđuje robusna i neprekidna komunikacija.

FSO i RF hibridni komunikacioni sistemi objedinjuju prednosti obe tehnologije kako bi se prevazišla njihova pojedinačna ograničenja, nudeći robusno rešenje za savremene komunikacione potrebe [82], [83]. FSO sistemi koriste svetlosne zrake u infracrvenom spektru za prenos podataka, obezbeđujući veliki propusni opseg, nisku latenciju i otpornost na elektromagnetne smetnje. Ove karakteristike čine FSO sisteme posebno pogodnim za primenu u urbanim sredinama. Međutim, FSO sistemi su veoma osetljivi na atmosferske uslove kao što su magla, prašina i turbulencija, koji mogu ozbiljno degradirati signal ili čak dovesti do potpunog prekida veze. Pored toga, precizno poravnanje optičkih uređaja je od ključnog značaja, što predstavlja značajan izazov kod instalacija na visokim zgradama, gde oscilacije izazvane vetrom mogu dovesti do podrhtavanja snopa i nestabilnosti signala. Nasuprot tome,

RF komunikacioni sistemi, iako generalno imaju niže brzine prenosa i manji propusni opseg u poređenju sa FSO sistemima, pokazuju znatno veću otpornost u nepovoljnim vremenskim uslovima, održavajući komunikaciju kroz oblake i maglu. Ova robusnost obezbeđuje kontinualan prenos podataka u situacijama kada su FSO signali degradirani ili onemogućeni.

Integracija RF i FSO tehnologija najčešće se realizuje primenom relejne tehnologije, gde se različiti segmenti prenosnog puta realizuju putem FSO ili RF veze u zavisnosti od trenutnih uslova. Relejne stanice imaju ključnu ulogu u ovakvim sistemima, jer kontinuirano prate uslove prenosa i dinamički prebacuju između FSO i RF linkova kako bi se obezbedile optimalne performanse. Kada su atmosferski uslovi povoljni, koristi se FSO veza zbog većih brzina prenosa i niže latencije, dok u nepovoljnim uslovima RF veza preuzima ulogu kako bi se obezbedio pouzdan prenos podataka.

Postoje dve osnovne konfiguracije ovakvih hibridnih sistema: One-Hop i Multi-Hop. U One-Hop sistemu podaci se prenose direktno od predajnika do prijemnika. Ova konfiguracija obezbeđuje dobar balans između visokih performansi i pouzdanosti, što je čini pogodnom za scenarije u kojima je neophodan stabilan prenos velikih brzina nezavisno od vremenskih uslova [81].

Multi-Hop sistemi, sa druge strane, predstavljaju napredniji nivo bežične komunikacije i zasnivaju se na upotrebi više relejnih stanica. Svaka relejna stanica prima, analizira, pojačava i prosleđuje signal ka narednoj stanici, čime se produžava domet propagacije i prevazilaze ograničenja direktnog prenosa. Multi-Hop mreže mogu biti realizovane u paralelnim, serijskim ili kombinovanim konfiguracijama, pri čemu svaka od njih nudi specifične prednosti u pogledu robusnosti i performansi [76].

U okviru ovog poglavlja, predložena je nova šema prenosa u kojoj se FSO veza koristi sve dok je njen odnos signal–šum (SNR) iznad određenog praga. Kada se kvalitet FSO veze pogorša, aktivira se RF veza, a signali sa obe veze se kombinuju korišćenjem dvogranskog maksimalnog odnosnog kombajnera. Izvedena je nova analitička forma kumulativne funkcije raspodele (CDF) primljenog SNR-a, koja se koristi za analizu performansi prekida veze. Rezultati pokazuju značajna poboljšanja performansi u pogledu verovatnoće prekida u poređenju sa sistemima koji koriste samo FSO ili samo RF vezu, naročito u uslovima vedrog i nepovoljnog vremena.

Do sada su ispitivane performanse prenosa mešovitog RF–FSO kooperativnog relejnog sistema korišćenjem  $\alpha$ – $\mu$  i eksponencijalne Weibull raspodele za modelovanje fedinga [84]. Analizirana je verovatnoća prekida prenosa i verovatnoća bezbednog prenosa u različitim uslovima fedinga, pružajući uvid u bezbednosne prednosti hibridnih RF–FSO sistema. Naglašen je značaj razmatranja različitih modela fedinga radi precizne procene performansi i bezbednosti hibridnih komunikacionih sistema. Dobijeni rezultati pokazuju da hibridni sistemi mogu obezbediti poboljšane performanse u pogledu prenosa, što ih čini pogodnim za primene u bezbednim komunikacijama.

Razmatraće se različite relejno podržane hibridne arhitekture i njihove performanse u različitim uslovima okruženja. Korišćenjem različitih modulacionih šema i tehnika diverzitetskog kombinovanja, biće pokazano kako se hibridni sistemi mogu dinamički prilagođavati promenljivim atmosferskim uslovima kako bi se održale pouzdane komunikacione veze. Dat je sveobuhvatan okvir za projektovanje i optimizaciju hibridnih RF/FSO sistema sa ciljem postizanja visokih brzina prenosa i velike pouzdanosti.

Radi procene karakteristika RF/FSO sistema, neophodno je izvršiti statističko modelovanje relejnih hibridnih RF/FSO sistema. Predstavljen je novi relejni hibridni RF/FSO model, koji se zasniva na Nakagami-m raspodeli za modelovanje RF fedinga i Gamma–Gamma raspodela za modelovanje FSO kanala atmosferske turbulencije [85]. Prikazani su rezultati proračuna prosečne verovatnoće greške po bitu (ABER) i verovatnoće prekida veze (OP) za oba tipa prenosnih sistema, One-Hop i Multi-Hop. Analiza dobijenih rezultata pokazuje da One-Hop RF/FSO sistemi imaju znatno bolje karakteristike u poređenju sa sistemima koji koriste isključivo FSO prenos. Takođe je utvrđeno da primena Multi-Hop sistema dodatno unapređuje performanse hibridnog RF/FSO sistema.

Predstavljen je hibridni RF/FSO sistem u kojem je primarna FSO veza modelovana Gamma–Gamma statističkim modelom, dok je rezervna RF veza modelovana Rayleigh raspodelom [78]. Analiza prosečne verovatnoće greške po bitu (ABER) i verovatnoće prekida veze (OP), kao i poređenje sa rezultatima FSO komunikacionog sistema, pokazali su da predloženi sistem obezbeđuje bolje performanse u različitim vremenskim uslovima.

U okviru daljeg razvoja hibridnih RF/FSO sistema, predstavljen je novi relejni statistički model za analizu performansi prenosnih sistema, u kome se Nakagami-m raspodela koristi za modelovanje RF fedinga, dok se Gamma-Rician statistički model primenjuje za opis FSO komunikacionog kanala. Osnovni analitički okvir ovog sistema, zajedno sa izvođenjem zatvorenih izraza za kumulativnu funkciju raspodele (CDF) i prosečnu verovatnoću greške po bitu (ABER) u One-Hop i Multi-Hop scenarijima, detaljno je razmatran u [81]. Na osnovu tog modela, izvršena je analiza performansi korišćenjem koherentne binarne fazne modulacije (CBPSK), pri čemu su dobijeni i diskutovani rezultati ABER-a za FSO i hibridne RF/FSO komunikacione sisteme u zavisnosti od vremenskih uslova i ključnih sistemskih parametara.

### 5.1. Model sistema i kanala. Modelovanje RF fedinga

Za modelovanje RF fedinga koristi se funkcija gustine verovatnoće (PDF) Nakagami-m raspodele, koja se može izraziti sledećom formulom [86]:

$$f_{Y_{RF}}(Y_{RF}) = \left( \frac{m^m \gamma_{RF}^{m-1}}{\Gamma(m) \mu_{RF}^m} \right) e^{\left( -\frac{m Y_{RF}}{\mu_{RF}} \right)} \quad (5.1.1)$$

gde je  $m$  faktor statistike fedinga i njegova vrednost je uvek  $m \geq 0.5$ ,  $\mu_{RF}$  predstavlja prosečan SNR, a  $\Gamma(\cdot)$  označava Gama funkciju.

Izraz (5.1.1) se takođe može predstaviti i koristiti pomoću Meijer G funkcije:

$$f_{Y_{RF}}(Y_{RF}) = \left( \frac{m}{\mu_{RF}} \right)^m \frac{\gamma_{RF}^{m-1}}{\Gamma(m)} G_{0,1}^{1,0} \left( \frac{m Y_{RF}}{\mu_{RF}} \right) \quad (5.1.2)$$

Izraz za kumulativnu funkciju raspodele (CDF) dobija se rešavanjem integrala [87]:

$$F_{Y_{RF}}(Y_{RF}) = \int_0^{Y_{RF}} f_{Y_{RF}}(Y_{RF}) dY_{RF} \quad (5.1.3)$$

Zamenom izraza (5.1.2) u izraz (5.1.3) i primenom pravila (07.34.21.0084.01) iz [80], dobija se sledeća jednačina:

$$F_{Y_{RF}}(\gamma_{RF}) = \left( \frac{1}{\Gamma(m)} \right) G_{1.2}^{1.1} \left( m, 0 \mid \frac{m\gamma_{RF}}{\mu_{RF}} \right) \quad (5.1.4)$$

Dobijeni rezultat predstavlja kumulativnu funkciju raspodele (CDF) Nakagami-m raspodele izraženu pomoću Meijer G funkcije [80].

## 5.2. Modelovanje RF fedinga

Za modelovanje FSO veze koristi se Gamma-Rice statistički model. Izraz za funkciju gustine verovatnoće (PDF) pod uticajem greške u pozicioniranju u odnosu na SNR može se predstaviti sledećom formulom [15]:

$$f_{Y_{FSO}}(\gamma_{FSO}) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\xi^2 K^p e^{-K}}{2\gamma_{FSO} \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha)} G_{1.3}^{3.0} \left( \frac{1 + \xi^2}{\xi^2}, \alpha, p + 1 \mid \frac{(K+1) \xi^2 \alpha}{\xi^2 + 1} \sqrt{\frac{\gamma_{FSO}}{\mu_{FSO}}} \right) \quad (5.2.1)$$

gde je:

- $K$  Rice-ov faktor, koji označava odnos dominantne komponente i komponenti nastalih rasejanjem,
- $\xi = w_{Leq}/(2\sigma_s)$ ,
- $w_L$  je ekvivalentni radijus snopa na prijemniku,
- $\sigma_s$  označava standardnu devijaciju greške pomeranja (jitter) na prijemniku.

Ekvivalentni prečnik prijemne aperture  $w_{Leq}$  može se izraziti formulom:

$$w_{Leq}^2 = w_L^2 \frac{\text{erf}(v)\sqrt{\pi}}{2v} e^{v^2} \quad (5.2.2)$$

gde je:

$$v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}w_L}, A_0 = [\text{erf}(v)]^2, \quad (5.2.3)$$

pri čemu  $\text{erf}(\cdot)$  predstavlja funkciju greške (error function), a  $\alpha$  označava broj velikih turbulencija u procesu rasejanja i može se izraziti formulom:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{0.49 \sigma_R^2}{(1+1.1 \sigma_R^{12/5})^{5/6-1}}} \quad (5.2.4)$$

gde je  $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  Rytov-ova varijansa,  $C_n^2$  je indeks prelamanja koji se koristi za definisanje jačine turbulencije,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  je talasni broj, a  $L$  je dužina propagacije.

Kumulativna funkcija raspodele (CDF) se dobija iz izraza:

$$F_{Y_{FSO}}(\gamma_{FSO}) = \int_0^{\gamma_{FSO}} f_{Y_{FSO}}(\gamma_{FSO}) d\gamma_{FSO} \quad (5.2.5)$$

Zamenom jednačine (5.2.2) u izraz (5.2.5) dobija se CDF:

$$F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{FSO}) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{p+\alpha-2} \xi^2 K^p e^{-K}}{\pi \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha)} G_{2,6}^{5,1} \left( \frac{A}{B, 0} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2}{16(\xi^2+1)^2} \frac{\gamma_{FSO}}{\mu_{FSO}} \right) \quad (5.2.6)$$

pri čemu su:  $A = 1, \frac{2+\xi^2}{2}, B = \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}$ .

### 5.3. Statističke karakteristike RF/FSO sistema zasnovane na selektivnom kombinovanju

Primenom šeme selektivnog kombinovanja, koja se ostvaruje upoređivanjem SNR vrednosti RF/FSO sistema sa maksimalnim izlaznim SNR-om [88]:

$$\gamma = \max(\gamma_{RF}, \gamma_{FSO}) \quad (5.3.1)$$

gde su  $\gamma_{RF}$  i  $\gamma_{FSO}$  SNR vrednosti RF i FSO sistema.

Kumulativna funkcija raspodele (CDF) u zavisnosti od SNR za hibridni RF/FSO sistem može se izraziti jednačinom:

$$F_{\gamma}(\gamma) = P_r(\max(\gamma_{RF}, \gamma_{FSO}) \leq \gamma) = P_r(\gamma_{RF} \leq \gamma, \gamma_{FSO} \leq \gamma) = F(\gamma_{RF}) F(\gamma_{FSO}) \quad (5.3.2)$$

Zamenom jednačina (5.1.4) i (5.2.6) u jednačinu (5.3.2) i primenom pravila za proizvod dve nezavisne Meijer-G funkcije, dobija se EGBMGF – Extended Generalized Bivariate Meijer-G Function, prema jednačini (07.34.16.0003.01) iz [80]. Ovaj izraz predstavlja CDF hibridnog RF/FSO sistema:

$$F(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{p+\alpha-2} \xi^2 K^p \exp(-K)}{\pi \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha)} G_{0,0}^{0,0} \begin{matrix} 1,1 & 5,1 \\ 1,2 & 2,6 \end{matrix} \left( \frac{1}{m, 0} \middle| \frac{A}{B, 0} \middle| m \frac{\gamma_{RF}}{\mu_{RF}} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2}{16(\xi^2+1)^2} \frac{\gamma_{FSO}}{\mu_{FSO}} \right) \quad (5.3.3)$$

### 5.4. ABER za One-Hop transmisione sisteme

Izraz za određivanje ABER dobija se rešavanjem integrala [89]:

$$P_{ABER}(\gamma) = \frac{\gamma^x}{2 \Gamma(x)} \int_0^{\infty} e^{-\gamma \gamma'} \gamma'^{x-1} F_{\gamma}(\gamma') d\gamma' \quad (5.4.1)$$

Gde su  $x = 0.5$  i  $y = 1$  parametri CBPSK modulacione tehnike. Zamenom jednačine (5.2.6) u jednačinu (5.4.1), primenom CBPSK modulacije i rešavanjem integrala koristeći pravilo (07.34.21.0088.01) iz [80], dobija se izraz za ABER FSO transmisije:

$$P_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{FSO}) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{p+\alpha-3} \xi^2 K^p \exp(-K)}{\pi \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha) \Gamma(x)} G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\frac{1}{2}, A}{B, 0} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2}{16(\xi^2+1)^2} \frac{\gamma_{FSO}}{\mu_{FSO}} \right) \quad (5.4.2)$$

Standardni One-Hop (OH) transmisioni sistem, zasnovan na prenosu od izvora do prijemnog čvora, dobija se zamenom jednačine (5.3.3) u jednačinu (5.4.1), primenom CBPSK modulacije i korišćenjem pravila (07.34.21.0081.01) iz [80], čime se dobija ABER:

$$P_{\gamma_{OH}}(\gamma_{OH}) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3} \xi^2 K^p \exp(-K)}{\pi \Gamma(m) \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha) \Gamma(x)} G_{1,0 \ 1,2 \ 2,6}^{0,1 \ 1,1 \ 5,1} \left( \begin{matrix} 1 \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} A \\ m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} B, 0 \\ \frac{m}{\mu_{RF}} \end{matrix} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2}{16(\xi^2+1)^2 \mu_{FSO}} \right) \quad (5.4.3)$$

## 5.5. ABER za Multi-Hop transmisione sisteme

Hibridni Multi-Hop RF/FSO sistem implementiran metodom Decode and Forward (DF) [87], gde se ekvivalentni n-ti SNR može predstaviti izrazom:

$$\gamma_{en} = \min(\gamma_{e1}, \gamma_{e2}, \dots, \gamma_{eN}) \quad (5.5.1)$$

CDF ekvivalentnog SNR-a za n-ti put može se izraziti kao:

$$F_{en} = 1 - [1 - F_{\gamma}]^M \quad (5.5.2)$$

Odabir šeme sa najboljim putem podrazumeva izbor signala sa najvećim trenutnim SNR-om:

$$\gamma_e = \max(\gamma_{no}, \gamma'_e) \quad (5.5.3)$$

gde je  $\gamma'_e = \max_{n=1, \dots, N}(\gamma_{en})$ .

Ako FSO i RF sistemi imaju jednak SNR u svim linkovima, izraz za CDF u zavisnosti od  $\gamma'_e$  može se dobiti kao:

$$F_{\gamma'_e}(\gamma) = [F_{ei}(\gamma)]^N = [1 - [1 - F_{\gamma}]^M]^N \quad (5.5.4)$$

Zamenom izraza za One-Hop ABER iz jednačine (5.4.3) u izraz za  $F_{\gamma}$  dobijamo CDF za Multi-Hop sistem:

$$F_{\gamma'_e}(\gamma) = \left[ 1 - \left[ 1 - \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3} \xi^2 K^p \exp(-K)}{\pi \Gamma(m) \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha) \Gamma(x)} G_{1,0 \ 1,2 \ 2,6}^{0,1 \ 1,1 \ 5,1} \left( \begin{matrix} 1 \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} A \\ m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} B, 0 \\ \frac{m}{\mu_{RF}} \end{matrix} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2}{16(\xi^2+1)^2 \mu_{FSO}} \right) \right]^M \right]^N \quad (5.5.5)$$

Ovaj izraz predstavlja CDF Multi-Hop RF/FSO sistema koji se koristi za dalju evaluaciju ABER-a.

## 5.6. ABER za Multi-Hop hibridni RF/FSO sistem

Kombinovanjem jednačina (5.2.4) i (5.3.2) dobija se CDF Multi-Hop hibridnog RF/FSO sistema:

$$F_{\gamma}(\gamma) = F_{\gamma} \left[ 1 - [1 - F_{\gamma}]^M \right]^N \quad (5.6.1)$$

Zamenom jednačine (5.6.1) u jednačinu (5.2.6) dobija se izraz za ABER Multi-Hop hibridnog transmisionog sistema:

$$F_Y(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3} \xi^2 K^p \exp(-K)}{\pi \Gamma(m) \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha) \Gamma(x)} \sum_t^n L_t G_{1,0 \ 1,2 \ 2,6}^{0,1 \ 1,1 \ 5,1} \left( \begin{matrix} 0 \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} A \\ B, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} m \\ \mu_{RF} \end{matrix} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2 z_t}{16(\xi^2+1)^2 \mu_{FSO}} \right) \left[ 1 - \left[ 1 - \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3} \xi^2 K^p \exp(-K)}{\pi \Gamma(m) \Gamma(p+1) p! \Gamma(\alpha) \Gamma(x)} G_{1,0 \ 1,2 \ 2,6}^{0,1 \ 1,1 \ 5,1} \left( \begin{matrix} 0 \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} A \\ B, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} m \\ \mu_{RF} \end{matrix} \middle| \frac{(K+1)^2 \xi^4 \alpha^2}{16(\xi^2+1)^2 \mu_{FSO}} \right) \right]^M \right]^N \quad (5.6.2)$$

Gde je  $L_t$  težinski koeficijent dobijen rešavanjem integrala  $\int_0^\infty \gamma^{x-1} e^{-\gamma} F_Y(\gamma) d\gamma$  koristeći Gauss-Laguerre polinoma:

$$L_t = \frac{(t+\frac{1}{2})z_t}{\left\{ n!(n+1)^2 \left[ L_{n+1}^{-1/2} z_t \right]^2 \right\}} \quad (5.6.3)$$

gde je  $z_t$ -ti koren generalizovanog Laguerre polinoma  $L_{n+1}$ [90].

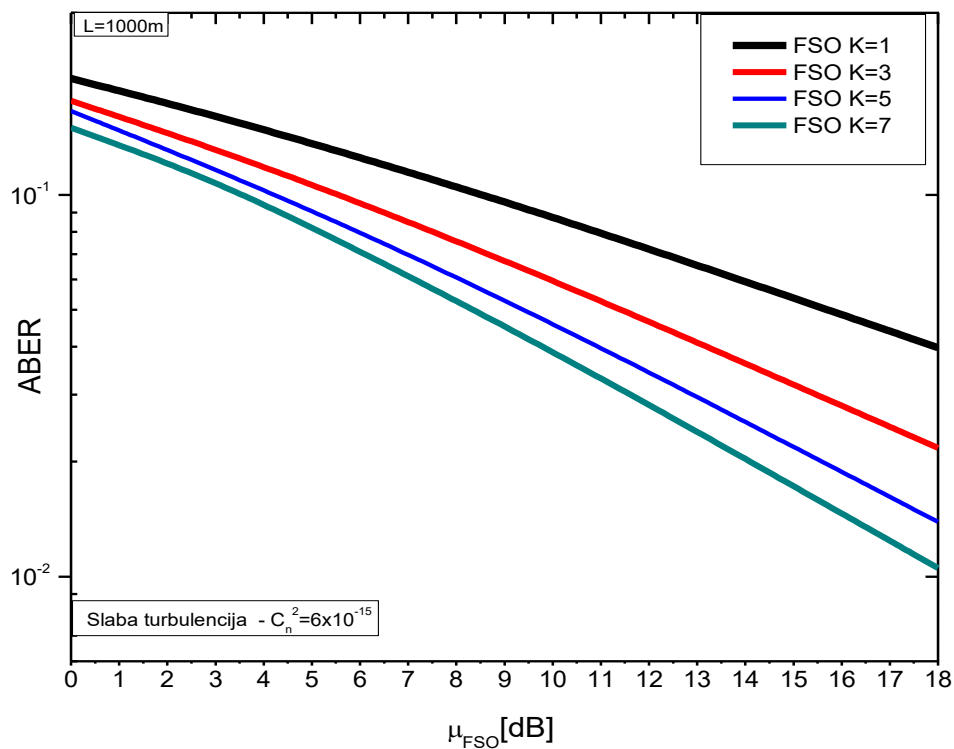
Ova formulacija omogućava numeričko izračunavanje ABER-a za Multi-Hop hibridne RF/FSO sisteme uz primenu Gauss-Laguerre kvadrature.

## 5.7. Numerički rezultati sistema

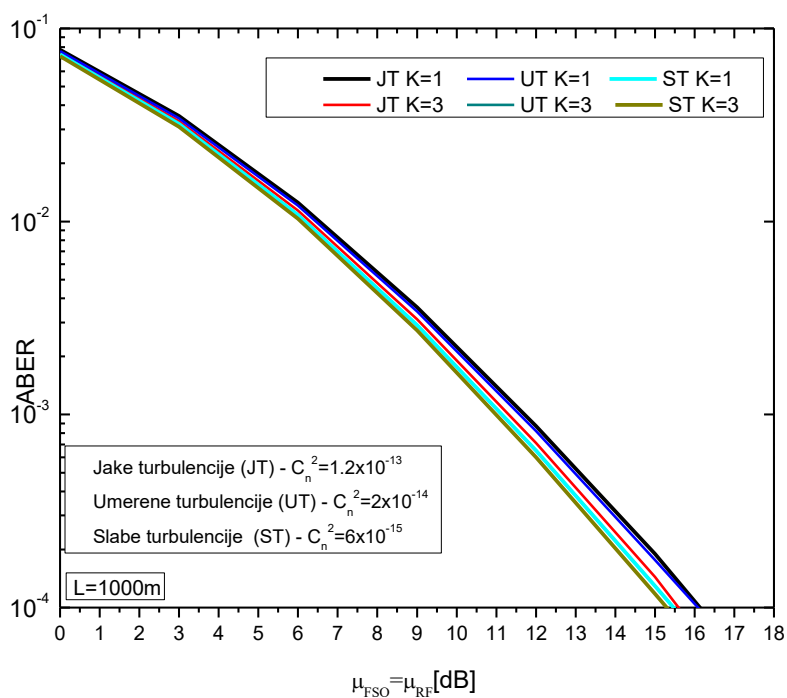
Za dobijanje rezultata korišćeni su sledeći parametri:

- 1) Udaljenost propagacije:  $L = 1000$  m; Talasa dužina:  $\lambda = 1550$  nm;
- 2) Indeks prelamanja karakterističan za različite nivoe turbulencije:
  - Slaba turbulencija:  $C_n^2 = 6 \times 10^{-15} m^{-2/3}$
  - Srednja turbulencija:  $C_n^2 = 2 \times 10^{-14} m^{-2/3}$
  - Jaka turbulencija:  $C_n^2 = 1.2 \times 10^{-13} m^{-2/3}$
- 3) Standardna devijacija šuma:  $\sigma_N = 10^{-7}$
- 4) Poluprečnik kružnog detektora:  $a = 0.05$  m
- 5) Poluprečnik optičkog snopa (zavisi od distance):  $w_L = 0.5$  m
- 6) Standardna devijacija pomeranja (jitter) na prijemu:  $\sigma_s = 0.2$  m
- 7) Fading statistički faktor:  $m = 2$ .

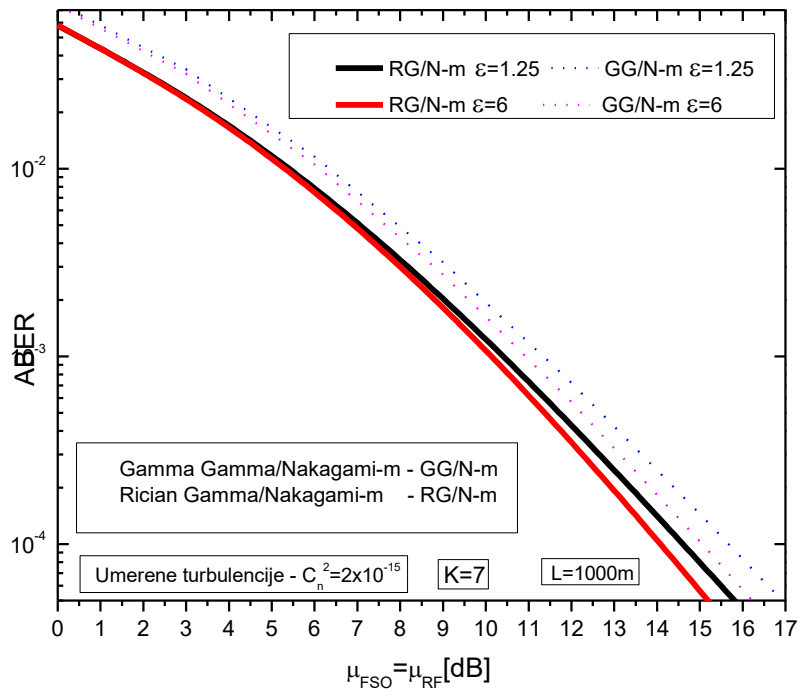
Dobijeni su grafici za FSO sistem i One-Hop hibridni RF/FSO sistem, uz razmatranje različitih vrednosti faktora  $K$  u zavisnosti od SNR-a pod uslovima slabe turbulencije.



Slika 5.7.1. Određivanje ABER-a u zavisnosti od K faktora za FSO sistem



Slika 5.7.2. Određivanje ABER-a u zavisnosti od K faktora za One-Hop hibridni RF/FSO sistem



**Slika 5.7.3.** Zavisnost ABER-a pri korišćenju hibridnih RF/FSO sistema sa Rician-Gamma raspodelom i Nakagami-m fedingom, i Gamma-Gamma raspodelom i Nakagami-m fedingom, u zavisnosti od greške usmeravanja

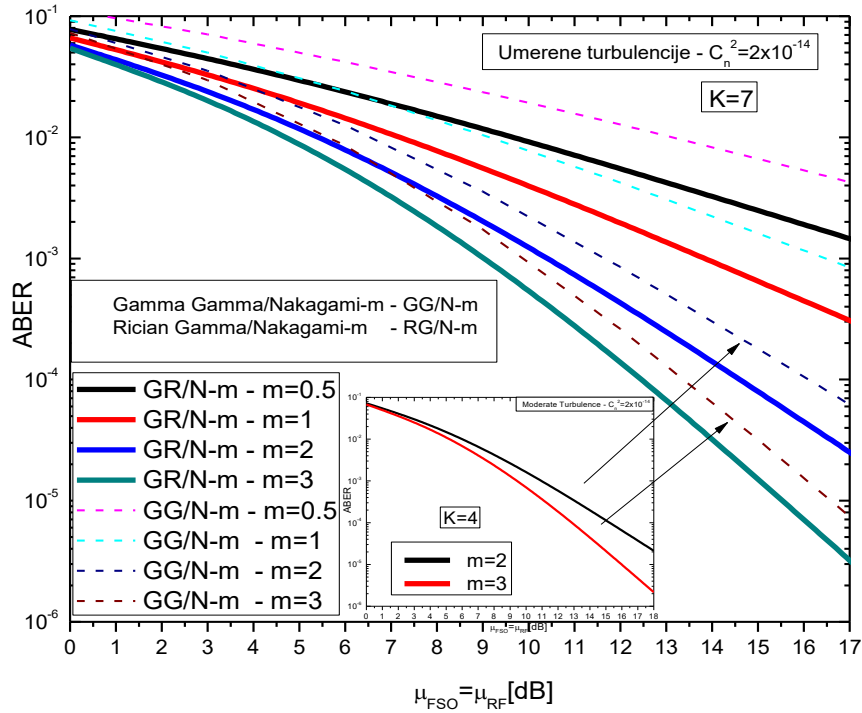
Kao što se očekivalo sa Slike 5.7.1, niže vrednosti  $K$  faktora i električnog SNR-a korelišu sa višim nivoima ABER-a, što ukazuje na optimalan rad sistema. Povećanje  $K$  faktora smanjuje ABER, čime se poboljšava performansa FSO sistema.

Slika 5.7.2 pokazuje da hibridni One-Hop RF/FSO sistemi nadmašuju FSO sisteme, a njihove performanse se poboljšava sa povećanjem SNR-a. Grafikon ukazuje da jačina turbulencije ima mali uticaj na performanse RF/FSO sistema. Tokom perioda sa većim nivoima atmosferske turbulencije, performanse FSO sistema opadaju, a prenos signala preuzima RF sistem, koji je otporniji na efekte turbulencije [81].

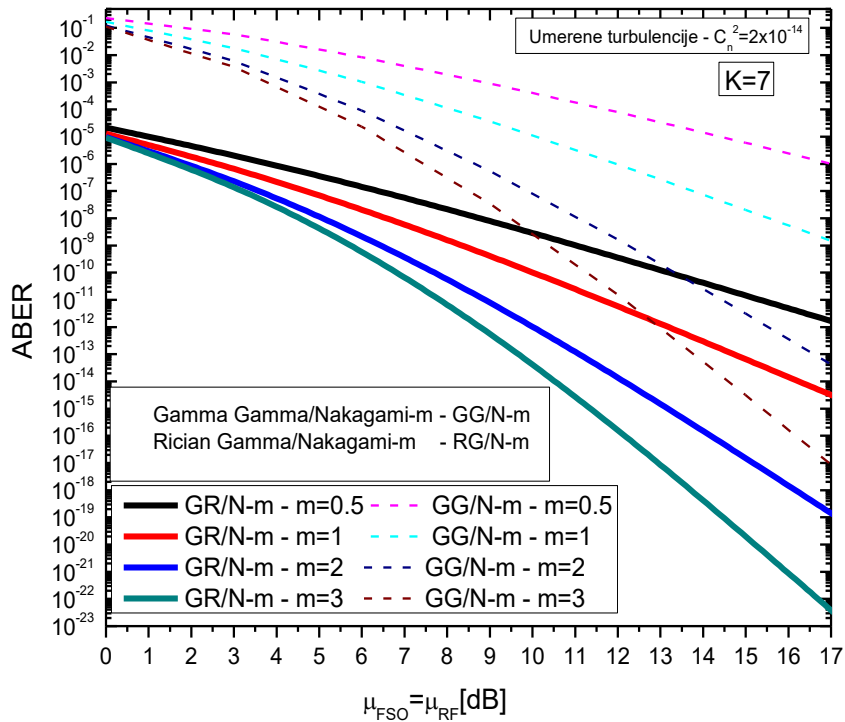
Slika 5.7.3 prikazuje zavisnost ABER-a pri korišćenju hibridnih One-Hop modela sa Gamma-Rician raspodelom i Nakagami-m fadingom, kao i sa Gamma-Gamma raspodelom i Nakagami-m fadingom, pod različitim uticajima greške pomeranja.

Sa Slike 5.7.3 jasno je da kod nižih vrednosti SNR-a greška usmeravanja ima minimalan uticaj na performanse sistema. Kako SNR raste, performanse sistema se poboljšavaju, ali efekat greške usmeravanja postaje izraženiji. Pored toga, izvršena je uporedna analiza između dva različita modela pod uslovima umerenih turbulencija.

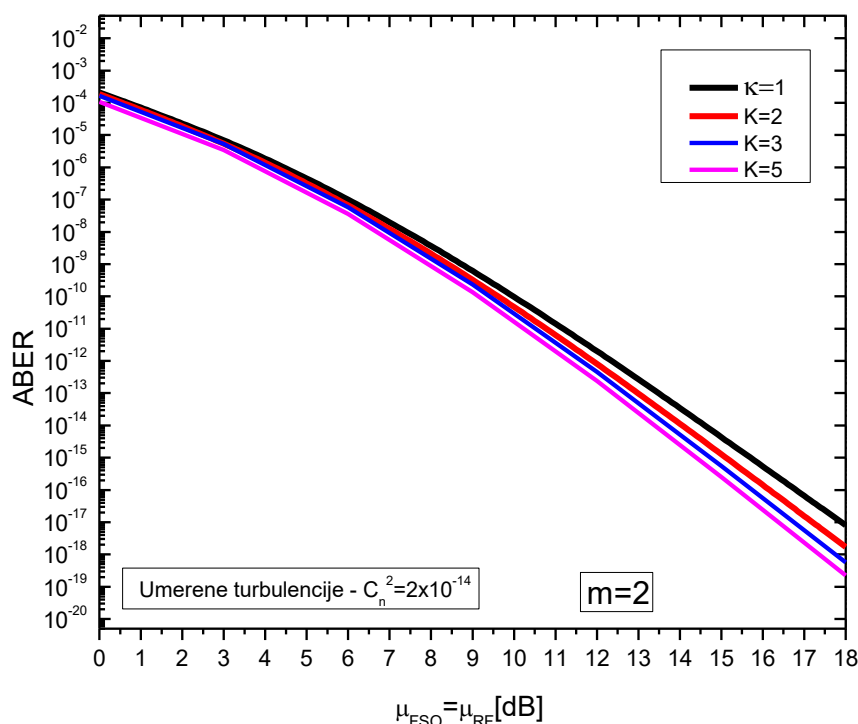
Slike 5.7.4 i 5.7.5 prikazuju One-Hop i Multi-Hop hibridne sisteme pod umerenim turbulencijama za različite vrednosti parametra  $m$ .



**Slika 5.7.4.** Analiza ABER-a korišćenjem Gamma-Gamma/Nakagami-m i Gamma-Rician/Nakagami-m modela za hibridne One-Hop FSO/RF sisteme



**Slika 5.7.5.** Analiza ABER-a korišćenjem Gamma-Gamma/Nakagami-m i Gamma-Rician/Nakagami-m modela za hibridne Multi-Hop sisteme

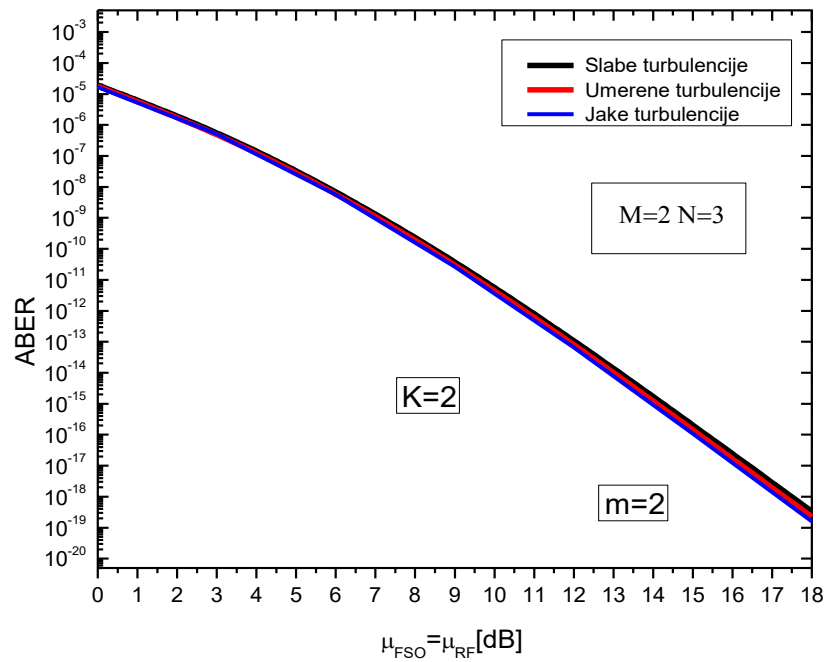


**Slika 5.7.6.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema korišćenjem Gamma-Rician/Nakagami- $m$  modela, sa strukturom od  $M=2$  i  $N=3$ , u zavisnosti od parametra  $K$

Sa slike 5.7.4 može se primetiti da niže vrednosti parametra  $m$  dovode do većih vrednosti ABER-a, što ukazuje na slabije performanse sistema.

Slika 5.7.5 prikazuje karakteristike sistema korišćenjem paralelnog hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema sa  $M=2$  i  $N=3$ . Ovaj grafikon uzima u obzir različite vrednosti parametra  $m$  u odnosu na SNR. Grafikon pokazuje da hibridni RF/FSO Multi-Hop sistem daje značajno bolje rezultate u poređenju sa hibridnim One-Hop RF/FSO sistemom. Predstavljeni model pokazuje odlična poboljšanja performansi sa povećanjem parametra  $m$ , što je očekivano.

Slike 5.7.6 i 5.7.7 prikazuju grafikon hibridnog Multi-Hop RF/FSO sistema sa istom strukturom  $M=2$  i  $N=3$  za različite vrednosti parametra  $K$  i različite intenzitete turbulencije.

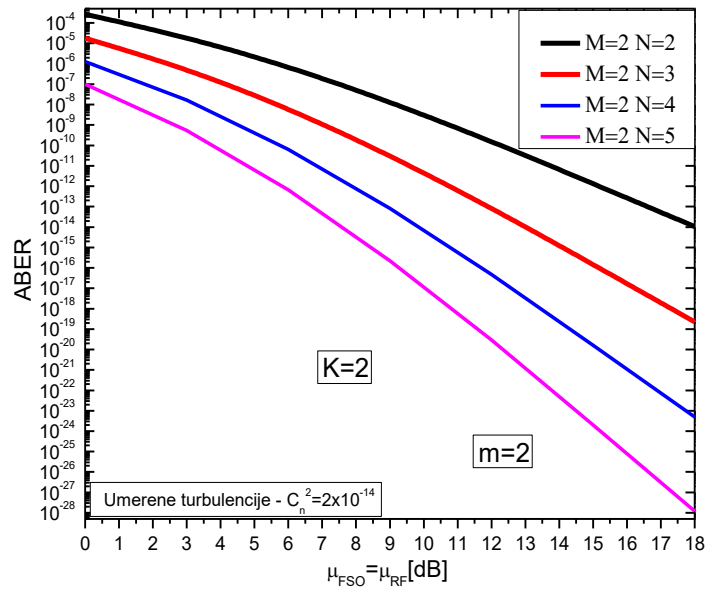


**Slika 5.7.7.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema korišćenjem Gamma-Rician/Nakagami-m modela, sa strukturom od  $M=2$  i  $N=3$ , u zavisnosti od intenziteta turbulencije

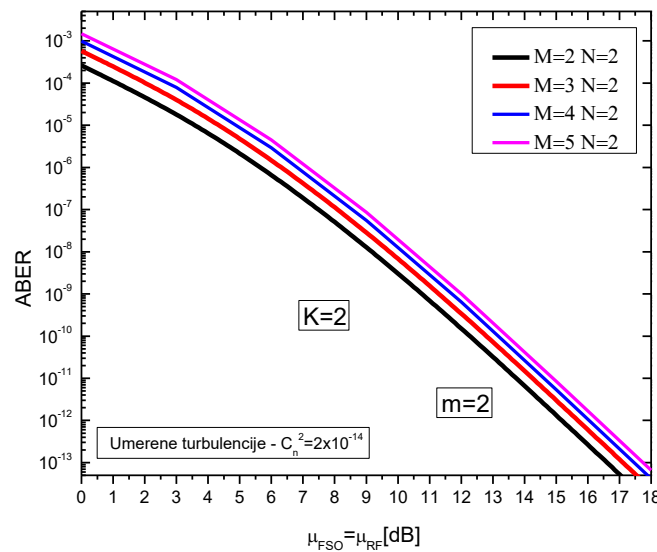
Slično kao kod One-Hop RF/FSO sistema, u hibridnim Multi-Hop RF/FSO sistemima povećanje parametra  $K$  smanjuje vrednost ABER-a, čime se poboljšavaju performanse sistema.  $K$  faktor u ovoj strukturi takođe može poslužiti kao pogodan parametar za fino podešavanje sistema prilikom analize uticaja uslova okoline na performanse RF/FSO sistema [81].

Kao što se i očekivalo, atmosferske turbulencije nemaju značajan uticaj na ove sisteme. Rezultati su čak značajno bolji u poređenju sa One-Hop sistemima. Razlog ovih rezultata je otpornost RF sistema u uslovima jake turbulencije. Kada performanse FSO sistema opadaju zbog prisustva atmosferskih turbulencija, RF sistem preuzima prenos, pokazujući svoju očiglednu otpornost na atmosferske poremećaje.

Slike 5.7.8 i 5.7.9 prikazuju grafički prikaz ABER-a u hibridnim Multi-Hop RF/FSO sistemima, u zavisnosti od relejne strukture sistema.



**Slika 5.7.8.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema koristeći Gamma-Rician/Nakagami-m model sa promenljivom strukturom prostiranja po više putanja i fiksnom strukturom hop-ova



**Slika 5.7.9.** Analiza ABER-a hibridnog RF/FSO Multi-Hop sistema koristeći Gamma-Rician/Nakagami-m model sa promenljivom strukturom hop-ova i fiksnom strukturom prostiranja po više putanja

Analiza je izvršena pod umerenim turbulencijama, sa parametrima postavljenim na  $K=2$  i  $m=2$ . Kao što je prikazano na Slici 5.7.8, održavanje konstantnog broja hop-ova dok se povećava broj puteva dovodi do nižeg ABER-a, čime se poboljšavaju performanse sistema. Ovo poboljšanje proizilazi iz izbora signala sa najvećim SNR-om kao izlazom, čime se povećava

verovatnoća da se odabere maksimalni SNR kada je dostupno više puteva. Tako se signal sa višim SNR-om sa većom verovatnoćom isporučuje prijemniku. Suprotno tome, konfiguracija sa konstantnim brojem puteva, ali povećanim brojem hop-ova, dovodi do povećanja ABER-a sa svakim hop-om, negativno utičući na performanse sistema [81]. Pretpostavljajući stabilne uslove tokom celokupne distance prenosa, ABER ostaje uniforman nakon svakog hop-a. Međutim, kako se broj hop-ova povećava, raste i dužina propagacije, što rezultuje povećanim kumulativnim ABER-om i, samim tim, degradacijom ukupnih performansi sistema.

## 6. Novi zatvoreni izraz za ABER u FSO sistemima zasnovan na modelu Zero-Boresight Double Rician i analiza performansi sa adaptivnom optikom

Predstavljen je analitički okvir za modelovanje atmosferske turbulencije u optičkim komunikacionim sistemima otvorenog prostora (FSO) korišćenjem Zero-Boresight Double Rician modela fedinga. Biće izveden izraz u zatvorenom obliku za prosečnu stopu grešake po bitu (ABER) u uslovima modulacije intenziteta sa direktnom detekcijom (IM/DD) i uključi–isključi (OOK) modulacijom. Dobijeni izraz omogućava efikasnu i tačnu evaluaciju performansi FSO veza u širokom opsegu uslova turbulencije.

Radi daljeg unapređenja robustnosti veze, u Double Rician modelu fedinga uključuje se uticaj adaptivne optike (AO). Analiza obuhvata korekciju različitih skupova Zernike modova i pokazuje kako promene njihovih koeficijenata utiču na stabilnost primljenog signala i ukupni kvalitet veze. Numerički rezultati pokazuju da kompenzacija Zernike modova nižeg reda značajno smanjuje smetnje izazvane turbulencijom i dovodi do primetnih poboljšanja u ABER performansama. Ova saznanja pružaju praktičnu osnovu za dizajn AO–poboljšanih FSO sistema sposobnih za dinamičku adaptaciju promenljivim atmosferskim uslovima.

Pošto se FSO komunikacija oslanja na propagaciju kroz atmosferu, uticaj atmosferskih uslova je neizbežan. Dominantno degradirajuće dejstvo predstavlja atmosferska turbulencija, koja izaziva nasumične fluktuacije intenziteta primljenog signala. Za karakterizaciju ovog fenomena predloženi su različiti statistički modeli, a izbor odgovarajućeg modela zavisi od predominantnog režima turbulencije. Među najčešće korišćenim modelima su log-normalna raspodela, Rician raspodela, negativna eksponencijalna raspodela, K-raspodela i Weibull raspodela. Model Gamma–Gamma široko je prihvaćen zbog sposobnosti da istovremeno opisuje fluktuacije malog i velikog opsega.

Iako se Gamma–Gamma model pokazao efikasnim u opisu fluktuacija osvetljenosti razdvajanjem uticaja turbulencije velikog i malog obima, on implicitno pretpostavlja da primljeno polje potiče od jedne dominantne strukture rasejanja. Nasuprot tome, u mnogim praktičnim FSO scenarijima, posebno kod horizontalnih urbanih veza, propagacije blizu tla i kanala sa višestrukim slojevima rasejanja i pomeranja snopa, primljeni signal često sadrži više koherentnih komponenti, od kojih svaka podleže nezavisnom slabljenju. Double Rician model preciznije opisuje ovaj fizički mehanizam predstavljajući optičko polje kao superpoziciju dva delimično koherentna Rician procesa, što dovodi do statistički boljeg slaganja sa izmerenim raspodelama pod uslovima jake ili složene turbulencije. Na osnovu ovog okvira uvedeni su kompozitni i generalizovani modeli, uključujući Double Rician model [91], koji pruža unapređenu tačnost u određenim uslovima turbulencije.

Da bi se ublažili efekti turbulencije, adaptivna optika (AO) pokazala se kao efikasna metoda za kompenzaciju izobličenja talasnog fronta. U radu Y. Wanga [92] uspostavljene su veze između performansi FSOC sistema i parametara adaptivne optike, uključujući broj korigovanih Zernike modova i propusni opseg korekcije u odnosu na Grinvudovu frekvenciju. Pokazano je da korekcija približno 35 modova i obezbeđivanje propusnog opsega većeg od Grinvudove frekvencije značajno smanjuje stopu grešake po bitu (BER). Pored toga, Y. Ata i M. S. Alouini [93] analizirali su FSO veze implementirane na platformama velikih visina

koristeći korekciju adaptivnom optikom zasnovanu na Zernike modovima u kombinaciji sa Gamma–Gamma modelom fedinga, pri čemu su izveli izraze za verovatnoću prekida i performanse i potvrdili značajno poboljšanje kada se primenjuje AO.

Ispitivane su šeme koherentne detekcije i pokazano je kako fluktuacije faze i amplitude utiču na performanse u zavisnosti od odnosa prečnika otvora i koherentne dužine, kao i od sposobnosti AO korekcije. Iako Gamma–Gamma model ostaje dominantan analitički okvir za procenu performansi FSO sistema pod uticajem atmosferske turbulencije, najnovija istraživanja su pokazala da u scenarijima sa više klastera rasejanja ili snažnim fluktuacijama indeksa prelamanja Double Rician model pruža tačnije predstavljanje fluktuacija osvetljenosti. Međutim, postojeća istraživanja koja uključuju Double Rician model uglavnom su ograničena na izvođenje raspodela verovatnoće osvetljenosti, bez pružanja izraza u zatvorenom obliku za ključne performanse, kao što je prosečna stopa grešaka po bitu (ABER) u sistemima zasnovanim na IM/DD detekciji. Takođe, primena adaptivne optike (AO) za ublažavanje efekata turbulencije pretežno se analizira u okviru pretpostavke Gamma–Gamma turbulencije [92], [93], dok kombinovani uticaj Double Rician fedinga i AO korekcije talasnog fronta nije analitički razmatrana. Ovaj istraživački jaz motiviše razvoj izraza za ABER i okvira za analizu performansi koje će biti predstavljene.

Biće primenjen Zero-Boresight Double Rician model kako bi bio izveden novi zatvoreni izraz za prosečnu stopu grešake po bitu (ABER) u uslovima modulacije intenziteta sa direktnom detekcijom i OOK signalizacijom. Korektivni uticaj adaptivne optike uključen je preko Zernike modalne dekompozicije, što omogućava evaluaciju poboljšanja performansi kao funkcije broja i tipa korigovanih modova. Cilj je analizirati performanse FSO sistema pogođenog atmosferskom turbulencijom korišćenjem Zero-Boresight Double Rician modela fedinga i prikazati poboljšanja ostvarena primenom korekcije adaptivnom optikom zasnovane na Zernike modovima.

## 6.1. Model sistema, atmosferski model kanala

Zero-Boresight Double Rician model koristi se za modelovanje atmosferskih turbulencija i može se izraziti kao:

$$f_I(I) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(1+K_1)(1+K_2)K_1^p K_2^q \exp(-K_1) \exp(-K_2) \xi^2}{\Omega_1 \Omega_2 A_0 \Gamma(p+1) \Gamma(q+1) p! q!} G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{\xi^2}{\xi^2 - 1}, p, q \middle| \frac{(1+K_1)(1+K_2)I}{\Omega_1 \Omega_2 A_0} \right) \quad (6.1.1)$$

Parametar  $\Omega$  predstavlja ukupnu snagu primljenog signala, dok je  $K_j$  Rician faktor koji opisuje odnos između snage dominantne komponente i rasejanih komponenti, a može se dobiti iz sledećeg izraza:

$$K_j = \left( \frac{\bar{\alpha}_{rj}^2 + \sigma_{rj}^2 + \sigma_{ij}^2}{\sqrt{\bar{\alpha}_{rj}^4 + 2\bar{\alpha}_{rj}^2(\sigma_{ij}^2 - \sigma_{rj}^2) - (\sigma_{ij}^2 - \sigma_{rj}^2)^2}} - 1 \right)^{-1} \quad (6.1.2)$$

gde  $\bar{\alpha}_{rj}^2$  označava prosečnu vrednost realnog dela efektivnih koeficijenata turbulencije, dok  $\sigma_{rj}^2$  i  $\sigma_{ij}^2$  predstavljaju varijanse realnog, odnosno imaginarnog dela efektivnih koeficijenata turbulencije, za  $j = 1, 2$ .

$$\bar{\alpha}_{rj}^2 = \exp \left( -\frac{\sigma_{xj}^2 + \sigma_{\phi j}^2}{2} \right) \quad (6.1.3)$$

$\sigma_{\phi}^2$  predstavlja preostale fazne devijacije i može se dobiti iz sledećeg izraza:

$$\sigma_{\phi j}^2 = C_j \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (6.1.4)$$

gde  $C_j$  predstavlja Zernike-ov koeficijent, čija se vrednost određuje na osnovu broja termina (modova),  $D$  označava prečnik otvora, a  $r_0 = 1.68(C_n^2 L k^2)^{-3/5}$  predstavlja generalizovani Friedov parametar, koji definiše prečnik koherentnog talasnog fronta. Varijansa amplitude može se odrediti iz izraza za indeks fluktuacije:  $\sigma_i^2 = \exp(4\sigma_{xj}^2) - 1$ .

$$\sigma_{rj}^2 = \left( \frac{1 + \exp(-2\sigma_{\phi j}^2) - 2\exp(-\sigma_{xj}^2 - \sigma_{\phi j}^2)}{2N} \right) \quad (6.1.5)$$

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1 - \exp(-2\sigma_{\phi j}^2)}{2N} \quad (6.1.6)$$

gde  $\sigma_{\phi j}^2$  i  $\sigma_{xj}^2$  označavaju varijansu faznih, odnosno amplitudnih fluktuacija, dok  $N$  predstavlja broj statistički nezavisnih ćelija na prijemnom otvoru (RA) i može se izraziti kao:

$$N = \left( 1.09 \left( \frac{r_0}{D} \right)^2 \Gamma \left( \frac{6}{5}, 1.08 \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \right) \right)^{-1} \quad (6.1.7)$$

gde  $\Gamma(a, x)$  označava donju nepotpunu Gama funkciju.

Primena adaptivne optike smanjuje fazna izobličenja u primljenom talasnom frontu, čime se efektivno povećava ekvivalentni Rician  $K$ -faktor. To dovodi do užeg rasporeda osvetljenosti i smanjenih fluktuacija intenziteta, što direktno rezultuje nižim vrednostima ABER u IM/DD sistemima.

Za procenu nivoa ABER prikazana je tabela koja klasifikuje Zernike-ove polinome prema njihovim redovima  $n$  i indeksima  $m$ , zajedno sa njihovom fizičkom interpretacijom u smislu optičkih ABER.

**Tabela 6.1.1.** Klasifikacija Zernikeovih polinoma po modovima

| Red<br>(n) | Oznaka<br>( $Z_n^m$ ) | Primarne<br>ABER           | Uloga korekcije u FSO sistemima                                                |
|------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 0          | $Z_0^0$               | Piston                     | Nije potrebna korekcija.                                                       |
| 1          | $Z_1^{-1}, Z_1^1$     | Nagib u<br>horizontalnoj i | Korekcija smanjuje pomeranje snopa<br>(beam wander) – snop ostaje centriran na |

|             |                                           |                                            |                                                                                                                                                                           |
|-------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                                           | vertikalnoj ravni                          | prijemniku, što dovodi do manjeg gubitka energije.                                                                                                                        |
| 2           | $Z_2^{-2}, Z_2^0, Z_2^2$                  | Fokusiranje, zakrivljenost snopa           | Korekcija poboljšava fokusiranje snopa – više energije dolazi na prijemni otvor, što rezultira stabilnijim odnosom signal–šum (SNR) i boljom stopom greške po bitu (BER). |
| 3           | $Z_3^{-3}, Z_3^{-1}, Z_3^1, Z_3^3$        | Mod                                        | Korekcija uklanja „rep“ snopa – više energije je koncentrisano u centru, što povećava efikasnost detekcije.                                                               |
| 4           | $Z_4^{-4}, Z_4^{-2}, Z_4^0, Z_4^2, Z_4^4$ | Sferna aberacija i astigmatizmi višeg reda | Korekcija smanjuje interferenciju talasnog fronta – smanjuje fluktuacije i omogućava stabilniji prenos podataka.                                                          |
| 5           | $Z_5^{-5} \dots Z_5^5$                    | Modovi višeg reda i astigmatizam           | Korekcija uklanja složena izobličenja – značajno poboljšava performanse pod jakim turbulencijom i na dugim vezama.                                                        |
| 6 ili višeg | $Z_6^m, Z_7^m \dots$                      | Aberacije višeg reda                       | Korekcija omogućava visoku rezoluciju talasnog fronta – što je ključno za FSO sisteme velike propusnosti i primene u 5G/6G mrežama.                                       |

Red aberacije  $n$  označava složenost aberacije; što je red veći, talasni front je složeniji i sadrži više talasa preko otvora. Indeks azimutalne simetrije  $m$  određuje simetriju duž kružnog otvora, a numerički indeks dobija se iz izraza:  $j = \frac{n^2+n}{2} + |m|$ .

## 6.2. Određivanje PDF-a kao funkcije SNR-a sa OOK modulacijom

U FSO sistemima sa IM/DD i OOK modulacijom, signal se prvo modeluje u intenzitetu, a zatim prenosi kroz atmosferski kanal. Primljeni optički signal na fotodetektoru pretvara intenzitet optičke snage u struju, koja se potom detektuje. Detektovana struja može se izraziti kao:

$$y_T(t) = x(t)RI + n \quad (6.2.1)$$

gde  $x(t)$  označava anvelopu prenosnog signala,  $R$  predstavlja responsivnost fotodiode,  $I$  označava fluktuaciju intenziteta signala, a  $n$  predstavlja šum sa belom Gaussovom raspodelom i nultom srednjom vrednošću (AWGN – Additive White Gaussian Noise) sa varijancom  $\sigma_n^2$  [94], [95].

Odnos signal–šum (SNR) može se izraziti sledećim izrazom:

$$\gamma = \frac{(2PRI)^2}{2\sigma_n^2} \quad (6.2.2)$$

kao i prosečan odnos signal–šum:

$$\bar{\gamma} = E[\gamma] = E\left[\frac{(2P_T R I)^2}{2\sigma_n^2}\right] = \frac{(2P_T R)^2}{2\sigma_n^2} E[I^2]. \quad (6.2.3)$$

gde  $E[\cdot]$  označava matematičko očekivanje, a  $P_T$  predstavlja prosečnu prenetu snagu.

U literaturi se često koristi električni SNR, koji se može izraziti sledećom jednačinom:

$$\mu = \frac{(2P_T R)^2}{2\sigma_n^2} E^2[I] \quad (6.2.4)$$

gde je:

$$\gamma = \frac{\mu}{E^2[I]} I^2 \quad (6.2.5)$$

PDF kao funkcija SNR-a može se dobiti iz sledećeg izraza:

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{f_I(I)}{\partial \gamma / \partial I} \quad (6.2.6)$$

Zamenom izraza (6.1.1) i (6.2.2) u jednačinu (6.2.6) i primenom pravila iz [96], 07.34.16.0002.01], dobija se izraz za PDF kao funkciju SNR-a za IM/DD sa OOK modulacijom:

$$f_\gamma(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{K_1^p K_2^q \exp(-K_1) \exp(-K_2) \xi^4}{2\sqrt{\gamma} \Gamma(p+1) \Gamma(q+1) p! q!} G_{1,3}^{3,0} \left( \xi^2 + 1, p+1, q+1 \middle| \frac{(1+K_1)(1+K_2)\sqrt{\gamma}}{(\xi^2+1)\sqrt{\mu}} \right) \quad (6.2.7)$$

### 6.3. Određivanje indeksa fluktuacije

Indeks fluktuacije koristi se kao mera za procenu kvaliteta kanala u FSO komunikacionim sistemima, jer ukazuje na stepen u kojem je atmosferski kanal pogođen atmosferskom turbulencijom. Nivo fluktuacije može se izraziti kao:

$$\sigma_I^2 = \frac{E[I^2]}{E^2[I]} - 1 \quad (6.3.1)$$

$\sigma_I^2$  predstavlja indeks fluktuacije, pri čemu  $E[\cdot]$  označava matematičko očekivanje, a  $I$  predstavlja fluktuaciju intenziteta signala. Izraz za indeks fluktuacije koji je korišćen važi u uslovima slabe do umerene turbulencije, gde Rytov-a varijansa ostaje ispod praga ( $\sigma_R^2 < 1$ ), čime je obezbeđeno da se fluktuacije osvetljenosti mogu tačno modelovati primenjenom statističkom formulacijom. Na osnovu izraza (6.1.1), indeks fluktuacije može se lako odrediti izračunavanjem matematičkog očekivanja:

$$E[I] = \int_0^{\infty} I f_I(I) dI = \frac{A_0 \Omega_1 \Omega_2 \xi^2}{1 + \xi^2} \quad (6.3.2)$$

$$E[I^2] = \int_0^{\infty} I^2 f_I(I) dI = \frac{A_0^2 \Omega_1^2 \Omega_2^2 \xi^2 (2+4K_1+K_1^2)(2+4K_1+K_2^2)}{(2+\xi^2)(1+K_1)^2(1+K_2)^2} \quad (6.3.3)$$

$$\sigma_I^2 = \frac{E[I^2]}{E^2[I]} - 1 = \frac{(1+\xi^2)^2}{(2+\xi^2)\xi^2} \frac{(2+4K_1+K_1^2)(2+4K_1+K_2^2)}{(1+K_1)^2(1+K_2)^2} - 1 \quad (6.3.4)$$

#### 6.4. Određivanje ABER-a kao funkcije SNR-a sa OOK modulacijom

ABER za IM/DD sa OOK modulacijom određuje se iz sledećeg izraza:

$$P_e = \int_0^\infty \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2}\right) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (6.4.1)$$

gde, perema [15, Eq.06.27.26.0006.01]:

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left( \frac{1}{0, \frac{1}{2}} \middle| \frac{\gamma}{4} \right) \quad (6.4.2)$$

Zamenom jednačina (6.2.7) i (6.4.2) u jednačinu (6.4.1) i primenom pravila iz [15, Eq.07.34.21.0013.01], dobija se rešenje datog integrala, koje ujedno predstavlja izraz za ABER kao funkciju SNR-a:

$$P_e(\mu) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-2} K_1^p K_2^q \exp(-K_1) \exp(-K_2) \xi^4}{\pi^{\frac{9}{2}} \Gamma(p+1) \Gamma(q+1) p! q!} G_{3,6}^{5,2} \left( \frac{\frac{1}{2}, 0, \frac{2+\xi^2}{2}}{\frac{\xi^2}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}, \frac{q+1}{2}, \frac{q+2}{2}, -\frac{1}{2}} \middle| \frac{(1+K_1)^2 (1+K_2)^2}{4(\xi^2+1)^2 \mu} \right) \quad (6.4.3)$$

#### 6.5. Numerički rezultati predloženog sistema

Za dobijanje rezultata korišćeni su parametri iz Tabele 6.5.1. Ostale vrednosti parametara date su na slikama. Slika 6.5.1 ilustruje uticaj atmosferske turbulencije na FSO komunikacione sisteme.

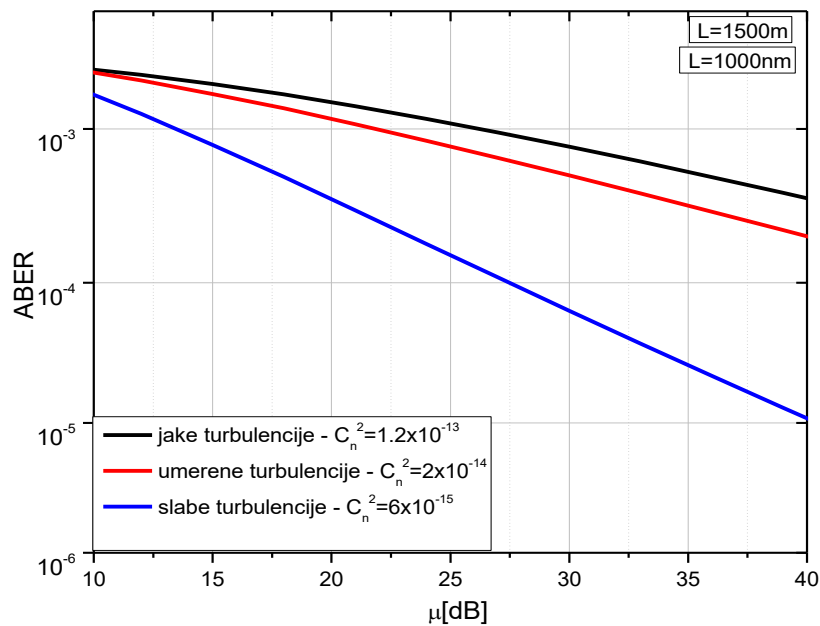
**Tabela 6.5.1.** Vrednosti parametara korišćenih za numeričke proračune

| Opis parametara                           | Simbol            | Vrednost                     |                                |                               |
|-------------------------------------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Indeks refleksije – jačina turbulencije   | $C_n^2[m^{-2/3}]$ | Slaba<br>$6 \times 10^{-15}$ | Umerena<br>$2 \times 10^{-14}$ | Jaka<br>$1,2 \times 10^{-13}$ |
| Talasna dužina                            | $\lambda[nm]$     | 1550                         |                                |                               |
| Razdaljina između predajnika i prijemnika | $L[m]$            | 1500                         |                                |                               |
| Primljena snaga na prijemniku             | $\mathcal{Q}[W]$  | 1                            |                                |                               |
| Poluprečnik kružnog detektora             | $a[m]$            | 0,05                         |                                |                               |
| Poluprečnik optičkog snopa na prijemniku  | $w_L[m]$          | 0,5                          |                                |                               |

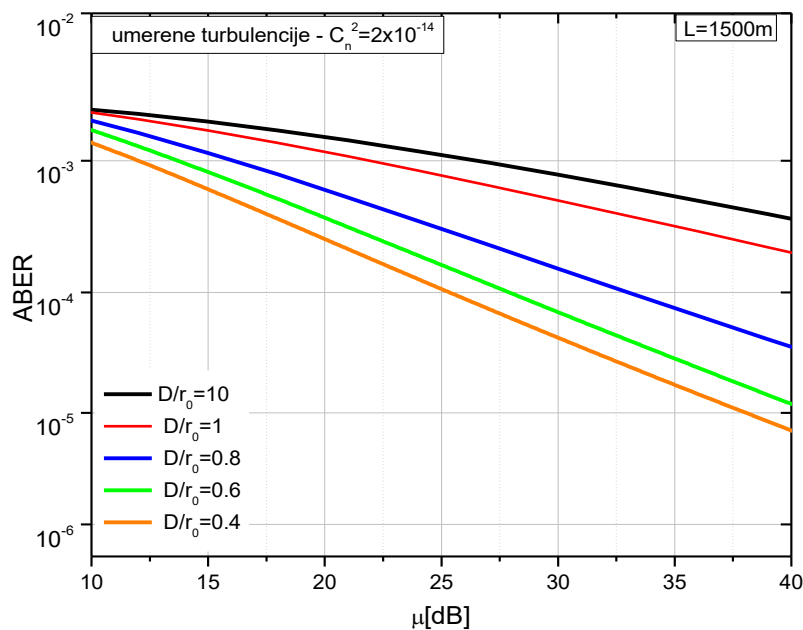
Sa Slike 6.5.1. može se uočiti da FSO sistem postiže najnižu ABER, odnosno najbolje performanse, u uslovima slabe atmosferske turbulencije. Kako intenzitet atmosferske

turbulencije raste, performanse FSO sistema se postepeno pogoršavaju, pri čemu su najlošije performanse zabeležene u uslovima jake turbulencije. Ovo ističe potrebu za primenom odgovarajućih tehnika ublažavanja turbulencije u scenarijima sa izraženim atmosferskim efektima.

Primenom izraza (6.4.3) dobijeni su rezultati za ABER kao funkcija odnosa normalizovanog prečnika prijemnog otvora i koherentne dužine (Friedov parametar). Fluktuacije amplitude su zanemarene pod pretpostavkom da  $\sigma_i^2 = 0$ , što znači da u modelu ostaje samo fazna komponenta turbulencije.



**Slika 6.5.1.** ABER Zero-Boresight Double Rician matematičkog modela za različite efekte atmosferske turbulencije



**Slika 6.5.2.** ABER Zero-Boresight Double Rician matematičkog modela za različite vrednosti odnosa normalizovanog prečnika prijemnog otvora i Friedovog parametra

Odnos  $D/r_0$  predstavlja ključni parametar za karakterizaciju performansi optičkog prijemnika pod uslovima atmosferske turbulencije. Sa grafa se može uočiti da kada je  $D \gg r_0$ , ABER je veći, što znači da su performanse sistema lošije. U tom slučaju, otvor prijemnika obuhvata veći deo izobličenog talasnog fronta, što dovodi do većih faznih varijacija i izraženijih aberacija. S druge strane, kada je  $D \approx r_0$ , uticaj faznih aberacija je delimično smanjen, što rezultuje blagim poboljšanjem performansi FSO sistema. Kada je odnos  $D/r_0 \ll 1$ , efekat faznih aberacija postaje minimalan, što dovodi do postepenog smanjenja ABER-a i značajnog poboljšanja performansi sistema.

Numerički rezultati jasno ilustruju kako parametri atmosferske turbulencije i dubina korekcije adaptivne optike zajednički utiču na performanse sistema. Na Slikama 6.5.1 i 6.5.2, jača turbulencija (ili veće vrednosti normalizovanog parametra otvora  $D/r_0$ ) dovodi do izraženijih fluktuacija, što direktno povećava ABER. Fizički, ovo odražava činjenicu da veći prijemni otvor hvata veći deo izobličenog talasnog fronta, uvodeći jače fazne nehomogenosti a time i pogoršavajući detekciju. Suprotno tome, kada je  $D/r_0$  mali, primljeni talasni front ostaje koherentniji, što rezultuje smanjenom fluktuacijom i nižim ABER-om.

Slike 6.5.3 i 6.5.4 prikazuju rezultate za ABER kao funkciju broja modova, čija primena odgovara korišćenju adaptivne optike. Razmatrana su dva pristupa: simetrični i asimetrični.

U prvom pristupu, adaptivna optika generiše identičan odgovor za fluktuacije velikog i malog opsega, zbog čega je broj modova isti (slika 6.5.3). Drugi pristup uzima u obzir različite uticaje modova na vortekse velikog i malog opsega. Pošto modovi malog opsega odgovaraju bržim faznim promenama, primenjuje se struktura sa većim brojem modova. Nasuprot tome, modovi velikog opsega karakterišu sporije promene, pa je primena velikog broja modova moguća samo u teorijskom smislu (Slika 6.5.4).

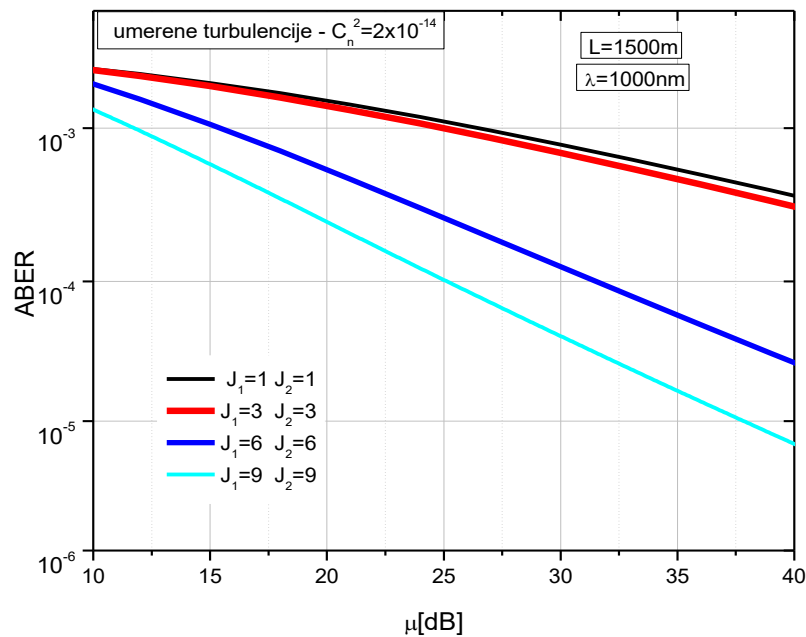
Pri malom broju korigovanih modova, kompenzuju se samo grube aberacije poput pomeranja snopa i osnovnog astigmatizma, što daje skromno, ali primetno poboljšanje performansi. Kako se broj kompenzovanih modova povećava, koriguju se aberacije višeg reda, što dovodi do užeg rasporeda osvetljenosti i shodno tome nižeg ABER-a [97].

Prikazane slike analiziraju uticaj broja modova, u smislu uticaja složenosti sistema na performanse FSO komunikacionih sistema u prisustvu adaptivne optike.

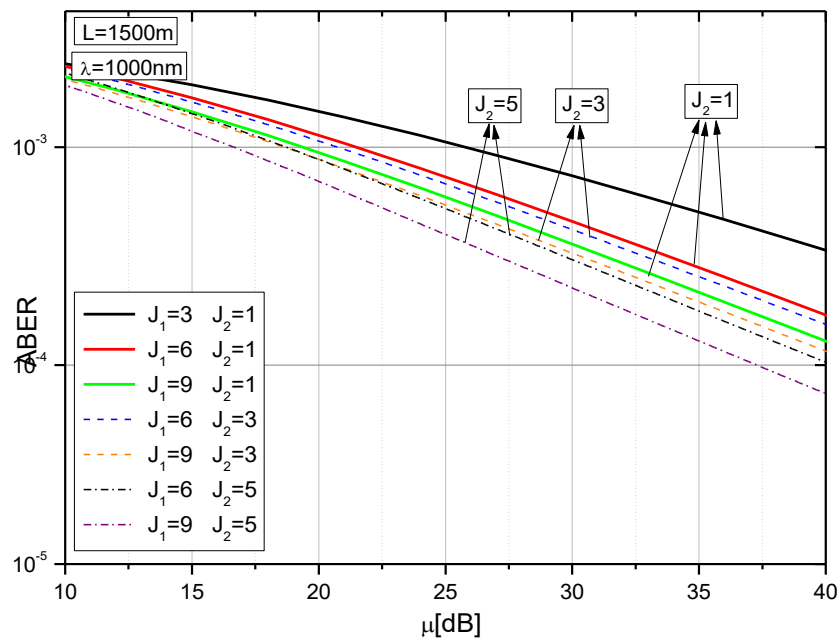
Slika 6.5.3 ilustruje efekat adaptivne optike korišćenjem simetričnog pristupa. Sa slike se može uočiti da povećanje broja modova značajno poboljšava performanse FSO sistema. Graf pokazuje da su performanse sistema najlošije za  $J_1 = J_2 = 1$ , tj. u odsustvu bilo kakve korekcije. Već pri  $J_1 = J_2 = 3$  dolazi do značajnog smanjenja ABER-a, što ukazuje na poboljšane performanse sistema [97]. Ova vrednost može se smatrati kompenzacijom nagiba, pri čemu je talasni front korigovan u horizontalnoj ( $x$ ) i vertikalnoj ( $y$ ) ravni. To predstavlja najjednostavniji oblik aberacije, jer uključuje samo korekciju pomeranja snopa bez ispravljanja složenijih deformacija. Za  $J_1 = J_2 = 6$  dolazi do dodatnog smanjenja ABER-a, što ukazuje na dalje poboljšanje performansi sistema. Ovaj broj modova omogućava korekciju do nivoa astigmatizma, uključujući kompenzaciju defokusa, koji nastaje zbog propagacije svetlosti kroz medijume sa različitim indeksom prelamanja. Ova kompenzacija ublažava izobličenja talasnog fronta izazvana atmosferskom turbulencijom.

Pri  $J_1 = J_2 = 9$  postiže se dalji napredak, jer ovaj nivo omogućava korekciju složenih izobličenja, uklanjanje „repastog“ oblika snopa i koncentrisanje više energije u centru, što

dovodi do povećane efikasnosti detekcije. Povećanje broja modova omogućava značajno poboljšanje performansi sistema; međutim, to zahteva složeniji dizajn i implementaciju adaptivne optike.



**Slika 6.5.3.** ABER u uslovima umerene turbulencije kao funkcija broja modova u simetričnom pristupu



**Slika 6.5.4.** ABER u uslovima umerene turbulencije kao funkcija broja modova u asimetričnom pristupu

Slika 6.5.4. prikazuje različit broj modova velikog i malog opsega. Korišćen je pristup u kojem je broj modova malog opsega veći od broja modova velikog opsega. Namerno su odabrane niže vrednosti modova velikog opsega jer su fluktuacije velikog opsega sporije i blaže,

što zahteva manji broj modova za adekvatnu kompenzaciju. Sa grafika se može uočiti da veći broj modova, kako malog, tako i velikog opsega, omogućava bolje performanse FSO sistema.

Pored toga, kombinovanjem različitih vrednosti ovih modova pruža se mogućnost finijeg podešavanja sistema i raznovrsnijeg prikaza uticaja povećanja broja modova. Za praktičnu primenu, kompenzacija približno 6–9 Zernikeovih modova pruža povoljan kompromis između dobitka u performansama i složenosti implementacije [97]. Dalja korekcija dodatno poboljšava ABER, ali zahteva disproportionalno veći broj aktuatora, što povećava troškove i latenciju sistema.

## 7. Hibridna RF/FSO komunikaciona veza u uslovima Nakagami- $m$ fedinga i atmosferske turbulencije modelovane inverznom hi-kvadrat gama raspodelom

Predložen je novi statistički pristup za procenu performansi hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema. RF kanal je opisan Nakagami- $m$  raspodelom, dok je FSO kanal modelovan primenom hi-kvadrat–inverzne gama raspodele, kojom se obuhvataju uticaji atmosferskih turbulencija i grešaka u usmeravanju. Za hibridni RF/FSO One-Hop sistem izveden je analitički izraz zatvorenog oblika za kumulativnu funkciju raspodele (CDF) pri selektivnom kombinovanju, kao funkcija prosečnog odnosa signal–šum (SNR). Dobijena CDF formulisana je pomoću proširene generalizovane Mejer-G funkcije (EGBMGF). Pored toga, izvedeni su novi analitički izrazi za prosečnu stopu greške po bitu (ABER), kako za hibridni RF/FSO sistem, tako i za odgovarajući FSO sistem, pri primeni koherentne binarne fazno-pomerene modulacije (CBPSK). Biće sprovedena uporedna analiza za različite vrednosti parametara kanala i nivoa turbulencije. Na taj način omogućava se identifikacija konfiguracija parametara koje dovode do optimizacije performansi hibridnog RF/FSO sistema u uslovima promenljive atmosferske turbulencije. Numerički rezultati, prikazani grafički, potvrdiće da predložena hibridna šema pokazuje izraženu otpornost na jake efekte turbulencije i neusklađenosti sistema.

U hibridnim RF/FSO sistemima koriste se dve osnovne konfiguracije:

- 1) Istovremeni prenos, gde RF i FSO veze funkcionišu paralelno, pružajući visoku pouzdanost, ali uz cenu smanjene spektralne efikasnosti.
- 2) Dinamičko prebacivanje, gde se prenos preusmerava između RF i FSO linka u zavisnosti od kvaliteta kanala, čime se postiže bolje korišćenje resursa, ali se povećava osetljivost na brze promene u okruženju [98].

Tehnike diverzitetskog kombinovanja, koje su prvobitno razvijene za RF sisteme, prilagođene su i za hibridne RF/FSO veze kako bi se ublažio efekat fedinga i poboljšala robusnost signala [99, 113]. Posebno su efikasne strategije u kojima se RF veza aktivira kada SNR FSO linka padne ispod unapred definisanog praga, čime se obezbeđuje kontinuitet komunikacije.

Hibridni RF/FSO One-Hop sistem, u kojem se podaci prenose direktno od izvora do odredišta bez upotrebe releja, zahteva precizno statističko modelovanje kako bi se procenile performanse. Zbog promenljivosti i složenosti uticaja kanala izazvanih atmosferskim uslovima, ne postoji univerzalni model. Zbog toga se primenjuju kompozitni statistički modeli za odvojeno modelovanje RF i FSO komponenti. U [100] korišćen je Gamma-Gamma model za FSO vezu i Nakagami- $m$  model za RF kanal, što je pokazalo poboljšanja u prosečnoj stopi greške po bitu (ABER) i verovatnoći prekida veze. U [101] je primenjena Malaga raspodela za FSO model fedinga i generalizovani  $\alpha$ - $\eta$ - $k$ - $\mu$  model za RF, demonstrirajući povećanu otpornost na atmosfersku turbulenciju i greške usmeravanja.

Analiziran je hibridni RF/FSO komunikacioni sistem sa jednim skokom u kome je RF feding modelovan korišćenjem Nakagami- $m$  raspodele, dok je FSO turbulencija predstavljena Hi-kvadrat-inverznom gama raspodelom. Izvedena je kumulativna funkcija raspodele (CDF) za kompozitni sistem na osnovu proizvoda nezavisnih CDF-ova oba kanala. Pored toga, predložen je novi analitički izraz za ABER primenom koherentne binarne fazno-pomerene modulacije (CBPSK). Performanse hibridnog modela upoređene su sa samostalnim FSO sistemom pod različitim nivoima turbulencije i parametrima sistema, pokazujući prednosti hibridnog pristupa u ublažavanju efekata atmosferskih smetnji i neusaglašenosti.

## 7.1. Model sistema hibridnog RF/FSO sistemima

Hibridni RF/FSO sistem se sastoji od dve veze, RF i FSO, koje koriste istu šemu digitalne modulacije. Na predajniku se signal istovremeno šalje preko RF i FSO veza, omogućavajući paralelni prenos. Za modelovanje feding efekata RF kanala koristi se Nakagami- $m$  raspodela. Funkcija gustine verovatnoće (PDF) Nakagami- $m$  raspodele, izražena kao funkcija SNR-a, može se predstaviti izrazom [100]:

$$f_{\gamma_1}(\gamma_1) = (m/\mu_1)^m \left( \frac{\gamma_1^{m-1}}{\Gamma(m)} \right) G_{0.1}^{1.0} \left( - \left| \frac{m\gamma_1}{\mu_1} \right| \right) \quad (7.1.1)$$

gde je  $m \geq 0,5$ ,  $m$  predstavlja jačinu koeficijenta fedinga,  $\gamma_1$  predstavlja SNR RF sistema,  $\mu_1$  predstavlja prosečan SNR, a  $\Gamma$  označava generalizovanu Gamma funkciju.

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \int_0^{\gamma_1} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \quad (7.1.2)$$

Zamenom izraza (7.1.1) u izraz (7.1.2) i rešavanjem integrala, dobijeni izraz predstavlja CDF:

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \left( \frac{1}{\Gamma(m)} \right) G_{1.2}^{1.1} \left( \frac{1}{m}, 0 \left| \frac{m\gamma_1}{\mu_1} \right| \right) \quad (7.1.3)$$

Za modelovanje turbulencije FSO veze korišćena je Hi-kvadrat-inverzna gama raspodela. Izraz za PDF pri primeni IM/DD u odnosu na SNR, dat je kao [103]:

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\xi^2 K^p \Gamma(b+\xi^2+1) \exp(-K)}{2\gamma_2(b+\xi^2)\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)} G_{2.2}^{2.1} \left( \begin{matrix} 1-b, 1+\xi^2 \\ \xi^2, p+1 \end{matrix} \left| \frac{(K+1)\xi^2}{(b-1)(\xi^2+1)} \sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}} \right. \right) \quad (7.1.4)$$

gde  $K$  označava Rajsov faktor, koji definiše odnos između direktne komponente i komponenata koje nastaju usled rasejanja,  $\gamma_2$  je SNR FSO sistema, a  $\xi$  predstavlja grešku laserskog usmeravanja, izračunatu kao  $\xi = w_{Leq} / 2\sigma_s$ , gde je  $\sigma_s$  standardna devijacija greške usmeravanja na prijemniku, a  $w_{Leq}$  je ekvivalentni poluprečnik primljenog snopa  $w_{Leq}^2 = w_L^2 \frac{\text{erf}(v)\sqrt{\pi}}{2v}$ , gde je  $v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}w_L}$ ,  $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$ , gde  $\text{erf}(\cdot)$  označava funkciju greške, a  $b$  predstavlja parametar raspodele, koji se može izračunati pomoću  $b = \frac{1}{\exp(\sigma_{ls}^2)-1} + 2$ .  $\sigma_{ls}^2$  se dobija iz  $\sigma_{ls}^2 = \sigma_{ls}^2(l_0) -$

$\sigma_{ls}^2(L_0)$ , i označava logaritamsku varijansu zračenja,  $\sigma_{ls}^2(l_0)$  i  $\sigma_{ls}^2(L_0)$  su efekti fluktuacija velikih i malih razmera.

$$\sigma_{ls}^2(l_0) = 0,04\sigma_1^2 \left( \frac{\eta_{xa}Q_{ls}}{\eta_{xa}+Q_{ls}} \right)^{7/6} \left[ 1 + 1,75 \left( \frac{\eta_{xa}}{\eta_{xa}+Q_{ls}} \right)^{1/2} - 0,25 \left( \frac{\eta_{xa}}{\eta_{xa}+Q_{ls}} \right)^{7/12} \right] \quad (7.1.5)$$

pri čemu su:  $\eta_{xa} = \frac{8,56}{1+0,18a^2+0,20\sigma_R^2Q_{ls}^{1/6}}$  i  $Q_{ls} = \frac{10,89L}{kl_0^2}$ .

Gde  $k$  predstavlja talasni broj,  $\lambda$  talasnu dužinu,  $l_0$  predstavlja turbulencije malih razmera,  $\sigma_R^2 = 1,23C_n^2k^{7/6}L^{11/6}$  predstavlja Ritovu varijansu.  $C_n^2$  je parametar indeksa prelamanja koji se koristi za definisanje intenziteta turbulencije, dok  $L$  je označava rastojanje propagacije.

$$\sigma_{ls}^2(L_0) = 0,04\sigma_1^2 \left( \frac{\eta_{xa_0}Q_{ls}}{\eta_{xa_0}+Q_{ls}} \right)^{7/6} \left[ 1 + 1,75 \left( \frac{\eta_{xa_0}}{\eta_{xa_0}+Q_{ls}} \right)^{1/2} - 0,25 \left( \frac{\eta_{xa_0}}{\eta_{xa_0}+Q_{ls}} \right)^{7/12} \right] \quad (7.1.6)$$

gde su:  $\eta_{xa_0} = \frac{\eta_{xa}Q}{\eta_{xa}+Q}$ ,  $Q = \frac{64\pi^2L}{kL_0^2}$  i  $d = \sqrt{k(2a)^2/4L}$  predstavlja ekvivalentni prečnik otvora blende, gde je  $a$  poluprečnik otvora blende prijemnika, dok  $L_0$  označava turbulencije velikih razmera.

Izraz za CDF se određuje sledećom jednačinom:

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \int_0^{\gamma_2} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \quad (7.1.7)$$

Zamenom jednačine (7.1.1) u (7.1.7), dobija se izraz za CDF:

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-2}\xi^2 K^p \Gamma(b+\xi^2+1) \exp(-K)}{\pi(b+\xi^2)\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)} G_{4,4}^{3,3} \left( 1, \frac{1-b}{2}, \frac{2-b}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \middle| \frac{4(K+1)^2\xi^4\gamma_2}{(\xi^2+1)^2(b-1)^2\mu_2} \right) \quad (7.1.8)$$

## 7.2. Statističke karakteristike hibridnog RF/FSO sistema sa One-Hop sistemom

U RF/FSO sistemu šema selektivnog kombinovanja se implementira upoređivanjem SNR RF/FSO veze sa izlaznim signalom SNR-a maksimalne vrednosti  $\gamma = \max(\gamma_1, \gamma_2)$ , pri čemu su  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  odnosi signal/šum (SNR) RF i FSO veza [102]. CDF hibridnog RF/FSO sistema se dobija kao proizvod pojedinačnih CDF-ova, [89]:

$$F_{\gamma}(\gamma) = P_r(\max(\gamma_1, \gamma_2) \leq \gamma) = P_r(\gamma_1 \leq \gamma, \gamma_2 \leq \gamma) = F(\gamma_1)F(\gamma_2) \quad (7.2.1)$$

Zamenom jednačina (7.1.3) i (7.1.7) u jednačinu (7.2.1) i primenom pravila proizvoda Majerovih funkcija, dobija se generalizovani oblik bivarijantne Majer-G funkcije (EGBMGF – Extended Generalized Bivariate Meijer-G Function) [15, Eq.07.34.16.0003.01], koji predstavlja CDF funkciju hibridnog RF/FSO sistema.

$$F_Y(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-2} \xi^2 K^p \Gamma(b+\xi^2+1) \exp(-K)}{\pi(b+\xi^2) \Gamma(m) \Gamma(p+1) p! \Gamma(b) \Gamma(b+\xi^2)} \times \\ G_{0,0 \atop 0,0}^{0,0 \atop 1,1 \atop 1,2 \atop 3,3 \atop 4,4} \left( \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, \frac{1-b}{2}, \frac{2-b}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}, 0 \end{matrix} \middle| m \frac{\gamma_1}{\mu_1} \left| \frac{4(K+1)^2 \xi^4 \gamma_2}{(\xi^2+1)^2 (b-1)^2 \mu_2} \right. \right) \quad (7.2.2)$$

### 7.3. Dobijanje izraza za ABER hibridnog RF/FSO sistema sa One-Hop sistemom

Izraz za određivanje ABER-a za hibridni RF/FSO sistem izveden je kao:

$$P_{ABER}(\gamma) = \frac{y^x}{2\Gamma(x)} \int_0^{\infty} e^{-y\gamma} \gamma^{x-1} F_Y(\gamma) d\gamma \quad (7.3.1)$$

gde  $x$  i  $y$  predstavljaju ABER parametre za binarnu modulacionu šemu.

**Tabela 7.3.1.** Vrednosti parametara  $x$  i  $y$  u zavisnosti od primenjenih formata modulacije

| Format modulacije                                  | x   | y   |
|----------------------------------------------------|-----|-----|
| Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK)     | 1   | 1   |
| Non-Coherent Binary Frequency Shift Keying (NBFSK) | 1   | 0.5 |
| Coherent Binary Frequency Shift Keying (CBFSK)     | 0.5 | 0.5 |
| Coherent Binary Phase Shift Keying (CBPSK)         | 0.5 | 1   |

Zamenom jednačine (7.1.8) u jednačinu (7.3.1), primenom CBPSK formata modulacije i primenom pravila [15, Eq.01.03.26.0004.01], gde je  $e^{-u\gamma} = G_{0,1}^1(y\gamma | -)$ , a zatim primenom pravila [15, Eq.07.34.21.0081.01], dobija se izraz za ABER hibridnog RF/FSO sistema prenosa sa jednim skokom:

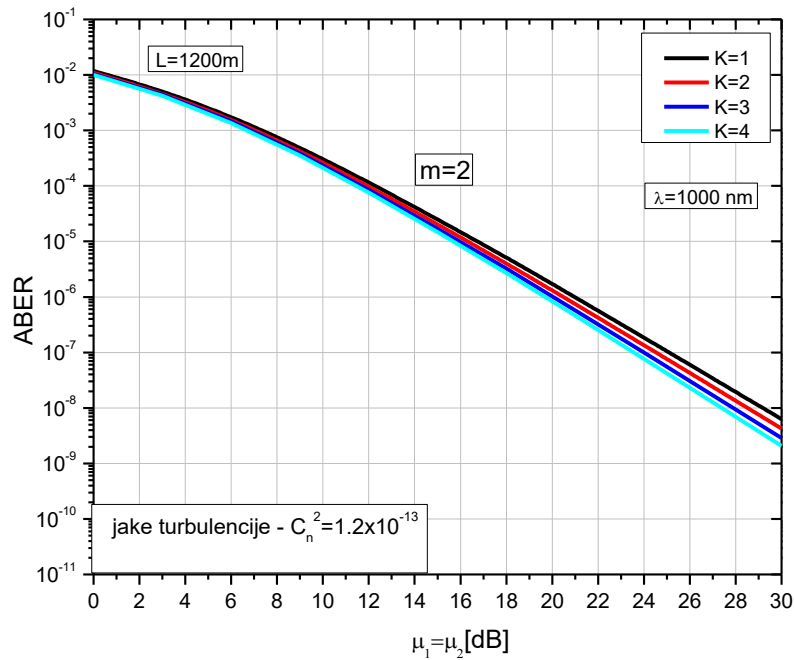
$$P_Y(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3} \xi^2 K^p \Gamma(b+\xi^2+1) \exp(-K)}{\pi(b+\xi^2) \Gamma(m) \Gamma(h) \Gamma(p+1) p! \Gamma(b) \Gamma(b+\xi^2)} \times \\ G_{1,0 \atop 1,0}^{0,1 \atop 1,1 \atop 1,2 \atop 3,3 \atop 4,4} \left( \begin{matrix} 0 \\ -m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, \frac{1-b}{2}, \frac{2-b}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}, 0 \end{matrix} \middle| \frac{m}{\mu_1} \left| \frac{(K+1)^2 \xi^4}{2(\xi^2+1)^2 (b-1)^2 \mu_2} \right. \right) \quad (7.3.2)$$

Zamenom jednačine (7.1.8) u jednačinu (7.3.1), primenom CBPSK formata modulacije i rešavanjem integrala korišćenjem pravila [15, Eq.07.34.21.0088.01], dobija se izraz za ABER od izvora do prijemnog čvora za FSO:

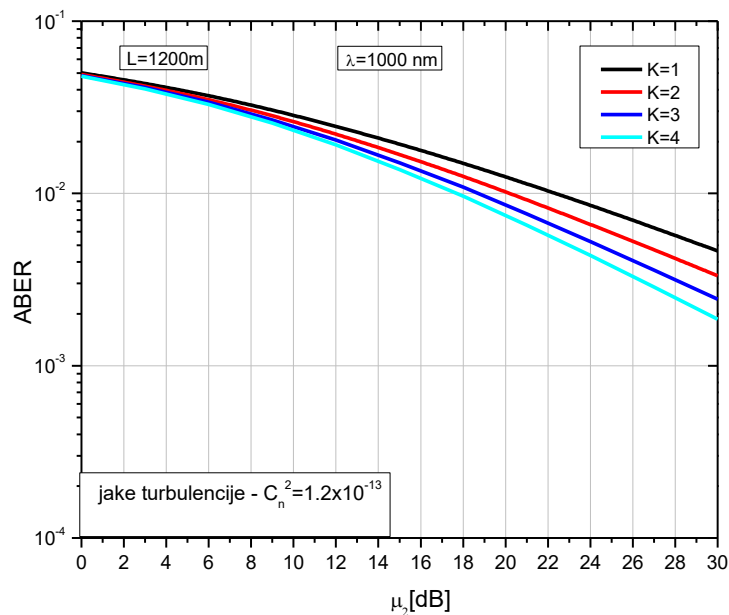
$$P_{Y_2}(\gamma_2) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3} \xi^2 K^p \Gamma(b+\xi^2+1) \exp(-K)}{\pi(b+\xi^2) \Gamma(p+1) p! \Gamma(b) \Gamma(b+\xi^2) G(h)} G_{5,4}^{3,4} \left( \begin{matrix} 1-x, 1, \frac{1-b}{2}, \frac{2-b}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}, 0 \end{matrix} \middle| \frac{4(K+1)^2 \xi^4}{(\xi^2+1)^2 (b-1)^2 \mu_2} \right) \quad (7.3.3)$$

## 7.4. Numerički rezultati predloženog sistema

Performanse predloženog hibridnog RF/FSO sistema, kao i samostalnog FSO sistema, analizirane su primenom izraza za ABER izvedenih u jednačinama (7.3.2) i (7.3.3). Svi rezultati dobijeni su pod pretpostavkom da obe veze imaju isti prosečni SNR ( $\mu_1 = \mu_2$ ).



**Slika 7.4.1.** ABER za hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom u uslovima jake turbulencije u zavisnosti od parametra  $K$  za CBPSK primenjenu modulacionu tehniku

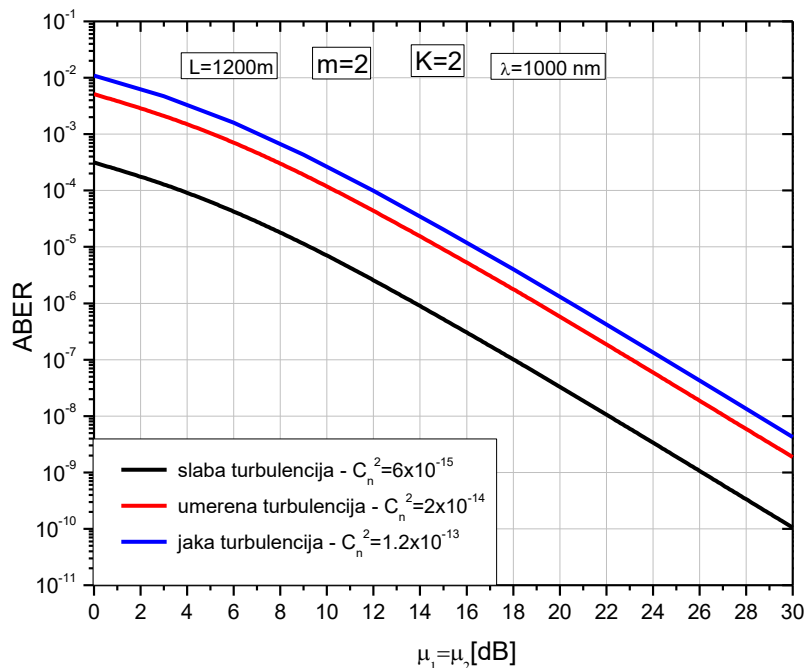


**Slika 7.4.2.** ABER za FSO sistem u uslovima jake turbulencije u zavisnosti od parametra  $K$  za primenjenu CBPSK modulacionu tehniku

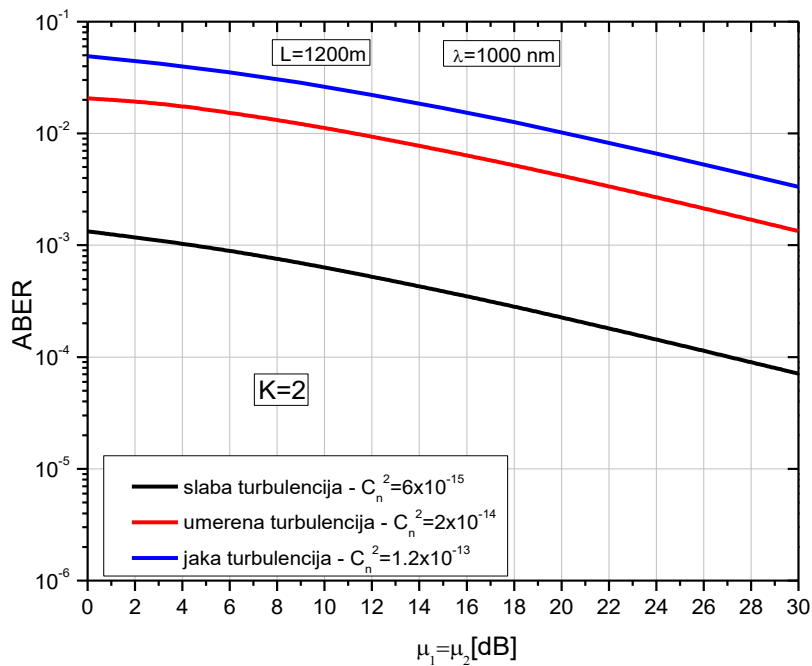
Na osnovu analize prikazanih grafikona može se uočiti da hibridni RF/FSO sistem ostvaruje znatno niže vrednosti ABER-a u odnosu na samostalni FSO sistem, što potvrđuje da primena hibridne arhitekture dovodi do poboljšanja ukupnih performansi sistema. Sa slika se može videti da sa porastom SNR-a dolazi do kontinuiranog smanjenja ABER-a. Dodatno unapređenje performansi može se postići povećanjem vrednosti parametra  $K$ , čime se ostvaruje manja verovatnoća greške kako kod FSO, tako i kod hibridnog RF/FSO sistema, što ukazuje na mogućnost optimizacije performansi sistema izborom odgovarajućih parametara kanala.

Slika 7.4.1 prikazuje ponašanje ABER-a hibridnog RF/FSO sistema u uslovima jake turbulencije za različite vrednosti parametra  $K$ . Uočava se da porast parametra  $K$  dovodi do značajnog unapređenja performansi sistema, što je posledica izraženije direktne komponente signala. Nasuprot tome, Slika 7.4.2 se odnosi na samostalni FSO sistem, ukazuje na znatno veće vrednosti ABER-a u istim uslovima, čime se dodatno potvrđuje veća robusnost hibridnog RF/FSO pristupa.

Slike 7.4.3 i 7.4.4 daju uporedni prikaz ABER performansi u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije. U svim razmatranim režimima hibridni RF/FSO sistem pokazuje bolje performanse u odnosu na samostalnu FSO vezu. Ovakvo unapređenje je rezultat primene selektivnog kombinovanja, pri čemu RF veza preuzima ulogu kompenzacije degradacije performansi na FSO putanji. Razlika u performansama postaje izraženija sa porastom jačine turbulencije, što dodatno naglašava prilagodljivost i robusnost hibridnog sistema u zahtevnim atmosferskim uslovima.

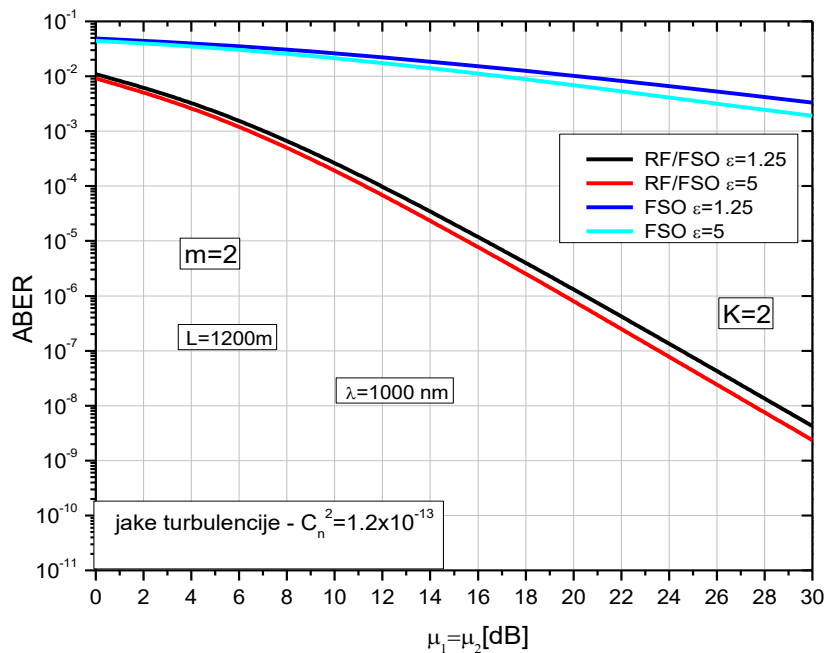


**Slika 7.4.3.** ABER za hibridni One-Hop RF/FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za vrednosti  $K=2$ ,  $K=2$  i  $m=2$  pri primeni CBPSK tehnike modulacije



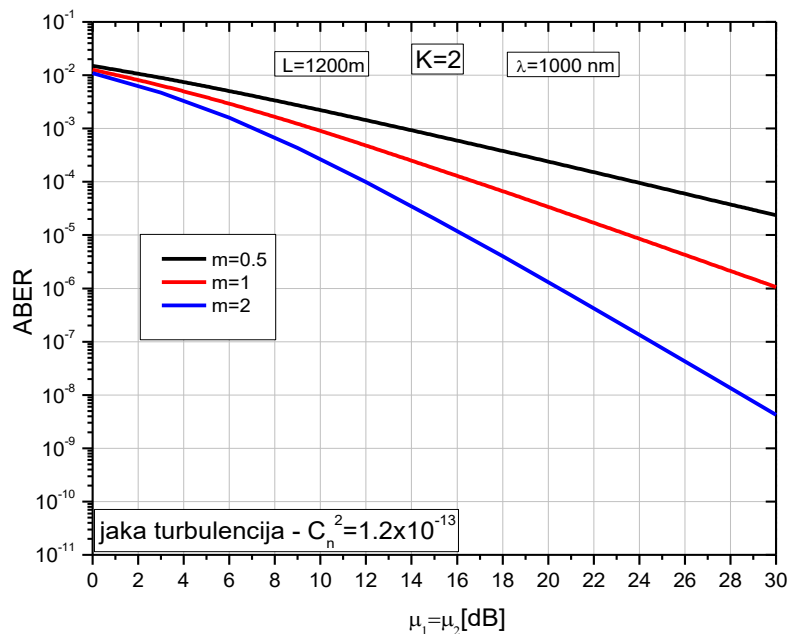
**Slika 7.4.4.** ABER za FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za  $K=2$  i primenjenu CBPSK modulacionu tehniku

Može se uočiti da su u uslovima slabije atmosferske turbulencije vrednosti ABER-a niže kako za hibridni RF/FSO sistem, tako i za samostalni FSO sistem. Pritom, hibridni RF/FSO sistem ispoljava veću otpornost na uticaj atmosferske turbulencije u odnosu na FSO vezu, što je u skladu sa očekivanjima. U situacijama kada usled turbulencije dolazi do degradacije performansi FSO linka u hibridnom sistemu RF veza preuzima prenos. Obzirom da je RF kanal znatno manje osetljiv na efekte turbulencije, ukupne performanse sistema ostaju stabilnije i kvalitetnije.



**Slika 7.4.5.** ABER za hibridne One-Hop RF/FSO i FSO sisteme kao funkcija greške pokazivanja

Na Slici 7.4.5 prikazan je ABER kao funkcija greške usmeravanja, kvantifikovane parametrom  $\xi$ . Manje vrednosti parametra  $\xi$  ukazuju na izraženije turbulencije i veću neusklađenost, što dovodi do degradacije performansi sistema. Sa porastom vrednosti  $\xi$ , oba sistema ostvaruju poboljšanje, pri čemu hibridni model zadržava trajnu prednost, naročito pri većim vrednostima SNR-a, gde efekti neusklađenosti dolaze do izražaja



**Slika 7.4.6.** ABER za hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom u uslovima slabe turbulencije za različite vrednosti parametra  $m$  za korišćenu CBPSK modulacionu tehniku

Na Slici 7.4.6 analiziran je uticaj Nakagami- $m$  parametra fedinga na performanse hibridnog sistema u uslovima slabe turbulencije. Povećanje vrednosti parametra  $m$  rezultuje boljim performansama, budući da veće vrednosti ovog parametra odgovaraju slabijem fedingu. Hibridni sistem pokazuje izraženu zavisnost od parametra  $m$ , posebno u oblastima niskog i srednjeg SNR.

Za početnu i minimalnu vrednost ovog parametra usvojena je vrednost  $m = 0,5$ , koja ujedno predstavlja njegovu donju granicu. Sa prikazanog grafikona uočava se da je za  $m = 0,5$  nivo ABER-a najveći, dok se sa porastom vrednosti parametra  $m$ , ABER postepeno smanjuje, što ukazuje na unapređenje performansi sistema. Dodatno povećanje SNR-a doprinosi daljem smanjenju ABER-a, čime se ukupne performanse sistema dodatno poboljšavaju.

Uopšteno posmatrano, dobijeni rezultati potvrđuju da predloženi hibridni RF/FSO model ostvaruje superiorne performanse pri različitim intenzitetima atmosferske turbulencije, nivoima grešaka usmeravanja i uslovima fedinga. Ovakva robusnost proističe iz komplementarnih svojstava RF i optičkih veza, kao i iz efikasnosti šeme selektivnog kombinovanja u ublažavanju degradacija komunikacione veze.

## 8. Zaključak

U poslednje vreme, kako RF sistemi ne mogu u potpunosti da ispune rastuće zahteve 5G i budućih komunikacionih sistema, različite OWC tehnologije postale su značajan deo bežičnih komunikacionih sistema. Izuzetne karakteristike OWC čine je obećavajućom komplementarnom opcijom RF-baziranim bežičnim komunikacionim sistemima. Zajednička implementacija dve ili više mreža sa različitim karakteristikama može prevazići ograničenja jedne mreže. Dakle, hibridni sistemi koji obuhvataju optički bežični sistem sa RF ili drugim optičkim sistemom mogu prevazići mnoga ograničenja pojedinačnih RF ili optičkih bežičnih mreža.

U prvom poglavlju razmatran je dizajn sveprisutnih i pouzdanih komunikacionih mreža nove generacije prepoznat kao jedan od glavnih tehničkih izazova sa kojima će se istraživači suočiti u narednom periodu. Razvoj novih i efikasnih bežičnih tehnologija za različite vrste transmisionih linkova od suštinskog je značaja za izgradnju budućih heterogenih komunikacionih mreža koje mogu podržati širok spektar tipova usluga sa različitim obrascima saobraćaja i zadovoljiti sve veće zahteve za višim brzinama prenosa podataka. FSO treba da bude priznat kao ključna komponenta takvih heterogenih mreža. Zahvaljujući svojoj velikoj optičkoj propusnosti, FSO sistemi mogu se u nekim aplikacijama koristiti kao moćna alternativa postojećim RF bežičnim sistemima, dok u drugim slučajevima mogu funkcionisati kao njihov komplement.

U drugom poglavlju razmotreni su scenariji hibridne arhitekture i mogućnosti koje oni pružaju. Za različite kombinacije hibridnih sistema razmatrani su RF-bazne makrocelije, male ćelije, WiFi i BLE, kao i optičke tehnologije komunikacije kao što su VLC, LiFi, OCC i FSO. Diskutovane su mogućnosti koje ovi hibridni sistemi pružaju, kao i arhitektura mreže, izbor mreže i scenariji primene. Razmotreni su različiti scenariji primene, uključujući unutrašnje prostore, vozila, svemir, eHealth i podvodne komunikacije. Obradeni su ključni pravci istraživanja različitih hibridnih mrežnih sistema. Takođe je ukazano na važne izazove koje treba prevazići za uspešnu implementaciju hibridnih mrežnih sistema u okviru 5G i budućih IoT paradigmi. Performanse optičkih bežičnih hibridnih sistema mogu biti dodatno poboljšane kroz čvrstu integraciju međusobno povezanih mreža i istraživanje inovativnih istraživačkih pravaca koji još nisu u potpunosti rešeni.

U trećem poglavlju predstavljene su raspodele koje se koriste za opis slabljenja signala u bežičnim komunikacionim sistemima. Na osnovu izloženog može se zaključiti da ne postoji jedinstven model koji bi bio primenljiv na sve turbulentne kanale. Svaka raspodela ima svoje specifične karakteristike, a njena primenljivost je ograničena na određene uslove i okruženja. Kod Gamma-Gamma raspodele prikazan je princip agregacije zračenja kao proizvod dva nezavisna slučajna procesa, od kojih je svaki opisan gama PDF-om.

Radi prilagođavanja sistema atmosferskim uslovima, slično kao kod Gamma-Gamma raspodele, integracijom dva različita modela mogu se formirati novi kombinovani modeli. Kreiranjem ovakvih statističkih modela može se značajno doprineti lakšem projektovanju FSO sistema, jer se svaki model može prilagoditi konkretnim atmosferskim uslovima. Zbog toga je od ključne važnosti dobro poznavanje okruženja kroz koje će se signal prostirati, kako bi se

pravilno izabrao ili konstruisao odgovarajući statistički model. Ovakav pristup omogućava direktnu optimizaciju performansi sistema kroz izbor odgovarajućeg statističkog modela i njegovih parametara u skladu sa konkretnim propagacionim uslovima.

U četvrtom poglavlju dat je tačan izraz za CDF end-to-end SNR u dual-hop hibridnom RF/FSO AF sistemu, koji se može koristiti za uzimanje u obzir efekta propagacije šuma pri evaluaciji performansi kao što su verovatnoća otkaza (OP), prosečna stopa grešaka po bitu (BER) i ergodični kapacitet.

Numerički rezultati pokazuju da degradacija performansi usled uključivanja efekta propagacije šuma iznosi oko 2–12% pri SNR od 10 dB, u zavisnosti od uslova prenosa. Iako se razlika u performansama smanjuje ispod 1% kada je SNR veći od 30 dB, adekvatna evaluacija efekta propagacije šuma ostaje važna, posebno kada se razmatra energetska ograničenost ili dual-hop RF/FSO AF sistem.

U petom poglavlju predstavljen je sveobuhvatan analitički model za procenu performansi hibridnih RF/FSO sistema koji integriše dva nezavisna statistička modela. Gamma-Rice model je korišćen za modelovanje turbulencije u FSO sistemu, dok je Nakagami- $m$  raspodela primenjena za RF model fadinga. Analiza prosečne verovatnoće greške po bitu (ABER) izvršena je korišćenjem CBPSK modulacije, ističući prednosti hibridnog RF/FSO sistema.

Uočen je značajan otpor hibridnog RF/FSO sistema, posebno u One-Hop konfiguraciji, prema atmosferskim turbulencijama, pri čemu on generalno nadmašuje samostalne FSO sisteme pod sličnim vremenskim uslovima. Pored toga, sistem je upoređen sa često korišćenim Gamma-Gamma/Nakagami- $m$  modelom. Analiza ABER-a paralelnog Multi-Hop hibridnog RF/FSO sistema pokazala je otpornost na atmosfersku turbulenciju i mogućnost finog podešavanja performansi korišćenjem  $K$  faktora i  $m$  parametra fadinga.

Uporedna analiza je pokazala da ovaj model postiže bolje rezultate, naročito u scenarijima sa nižim SNR-om. Hibridni RF/FSO sistem pokazuje izvanredne performanse, koje se mogu dodatno optimizovati podešavanjem  $K$  i  $m$  parametara zajedno sa SNR-om u skladu sa uslovima propagacije. U poređenju sa Gamma-Gamma/Nakagami- $m$  modelom, ovaj model pokazuje superiorne karakteristike, što ga čini pogodnim za precizno podešavanje sistema radi postizanja željenog nivoa performansi u različitim atmosferskim uslovima. Ovaj model značajno unapređuje razumevanje i analizu hibridnih RF/FSO sistema i proširuje spektar statističkih modela dostupnih za efikasniju implementaciju ovakvih sistema.

U šestom poglavlju dobijeni rezultati pokazuju da primena adaptivne optike može značajno poboljšati performanse i pouzdanost FSO komunikacionih sistema koji rade pod uslovima atmosferske turbulencije. Kompenzacijom ograničenog broja Zernikeovih modova može se postići značajno smanjenje izobličenja talasnog fronta i slabljenja signala, čak i bez potpune korekcije talasnog fronta. To dovodi do poboljšane stabilnosti veze i smanjenja stope greške po bitu, što je posebno važno u praktičnim primenama, kao što su gusti urbani ambijenti, veze za daljinsko osmatranje, optičke komunikacije visoke bezbednosti i vojni komunikacioni sistemi gde je kontinuitet prenosa ključan.

Međutim, iako povećanje broja korigovanih modova dodatno poboljšava performanse, praktična implementacija nameće određena ograničenja. Korekcija višeg reda zahteva deformabilna ogledala sa proporcionalno većim brojem aktuatora, što dovodi do povećane složenosti sistema, sofisticiranije kontrolne elektronike, veće potrošnje energije i ukupnog

povećanja troškova. Zbog toga izbor broja kompenzovanih modova mora predstavljati kompromis između željenog dobitka u performansama i izvodljivosti sistema.

Analiza potvrđuje da integracija Double Rician statističkog modela sa adaptivnom optikom pruža efikasan okvir za evaluaciju performansi i ublažavanje efekata turbulencije u FSO sistemima, i može poslužiti kao osnova za dizajn optimizovanih, ekonomičnih optičkih veza prilagođenih promenljivim atmosferskim uslovima.

U sedmom poglavlju predstavljen je novi hibridni RF/FSO model za analizu performansi, koji objedinjuje dva nezavisna statistička pristupa. U okviru istraživanja izvedeni su novi analitički izrazi za ABER, na osnovu kojih se procenjuju performanse hibridnog RF/FSO sistema, kao i FSO sistema sa direktnom propagacijom signala u vidnoj liniji pri primeni CBPSK modulacione tehnike. Detaljna uporedna analiza ova dva sistema sprovedena je za različite vrednosti sistemskih parametara, nivoa grešaka usmeravanja i intenzitete atmosferske turbulencije.

Na osnovu sprovedene analize i dobijenih rezultata izvedeno je nekoliko značajnih zaključaka. Predloženi hibridni RF/FSO One-Hop sistem pokazuje znatno bolje performanse u odnosu na samostalni FSO sistem u svim razmatranim scenarijima. Uočeno je da hibridna arhitektura poseduje izraženu otpornost na atmosferske turbulencije i greške usmeravanja, pri čemu se pouzdan prenos obezbeđuje adaptivnim prebacivanjem između RF i FSO veza u zavisnosti od trenutnih SNR uslova. Ovakav dinamički mehanizam omogućava kontinuitet prenosa podataka i nisku verovatnoću prekida veze, što čini sistem naročito pogodnim za primenu u urbanim okruženjima, platformama na velikim visinama i komunikacijama u vanrednim situacijama.

Takođe se može uočiti da parametar  $K$  ima značajnu ulogu u unapređenju performansi kako FSO, tako i hibridnih RF/FSO sistema. Pored toga, performanse hibridnog RF/FSO sistema u velikoj meri zavise od parametra  $m$  koji opisuje statističke karakteristike fadinga, pri čemu povećanje njegove vrednosti može značajno doprineti poboljšanju ukupnih performansi sistema. Ovi rezultati potvrđuju efikasnost predloženog statističkog modela i ukazuju na praktičnu primenljivost i održivost hibridnih RF/FSO veza u realnim komunikacionim okruženjima. Na taj način, rad potvrđuje da se optimizacija performansi hibridnih RF/FSO komunikacionih sistema može efikasno ostvariti kroz kombinaciju odgovarajućih statističkih modela, arhitektura i adaptivnih mehanizama u različitim propagacionim uslovima.

## 9. Literatura

- [1] A. A. Huurdeman, *The Worldwide History of Telecommunications*, Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2003.
- [2] D. L. Begley, "Free-space laser communications: a historical perspective", Annual Meeting of the IEEE, Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), Glasgow, Scotland, vol.2, pp.391–392, Nov. 2002.
- [3] M. A. Khalighi, M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, Issue 4, 2014.
- [4] E. Ciaramella, Y. Arimoto, G. Contestabile, M. Presi, A. D'Errico, A. Guarino, and M. Matsumoto, "1.28-Tb/s (32x40 Gb/s) free-space optical WDM transmission system," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 16, pp. 1121–1123, Aug. 2009.
- [5] K. Su, L. Moeller, R. B. Barat, and J. F. Federici, "Experimental comparison of performance degradation from terahertz and infrared wireless links in fog," *Journal of Optical Society of America (JOSA) A*, vol. 29, no. 2, pp. 179–184, 2012.
- [6] S. Zhang, S. Watson, J. J. D. McKendry, D. Massoubre, A. Cogman, E. Gu, R. K. Henderson, A. E. Kelly, and M. D. Dawson, "1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using CMOS-controlled GaN-based LEDs," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 1211–1216, Aug. 2013.
- [7] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation Through Random Media*, SPIE Press, 2nd edition, 2005.
- [8] F. Dios, J. A. Rubio, A. Rodríguez, and A. Comerón, "Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink," *Applied Optics*, vol. 43, no. 19, pp. 3866–3872, 2004.
- [9] C. Z. Cıil, Y. Baykal, H. T. Eyyuboğlu, and Y. Cai, "Beam wander characteristics of cos and cosh-Gaussian beams," *Applied Physics B, Lasers and Optics*, vol. 95, no. 4, pp. 763–771, 2009.
- [10] Y. Ren, A. Dang, B. Luo, and H. Guo, "Capacities for long-distance free-space optical links under beam wander effects," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 14, pp. 1069–1071, 2010.
- [11] H. T. Eyyuboglu, Y. Baykal, C. Z. Cıil, O. Korotkova, and Y. Cai, "Beam wander characteristics of flat-topped, dark hollow, cos and cosh Gaussian, J<sub>0</sub>- and I<sub>0</sub>-Bessel Gaussian beams propagating in turbulent atmosphere: A review," *Proceedings of SPIE, Atmospheric and Oceanic Propagation of Electromagnetic Waves IV*, vol. 75880N, pp. 1–9, Feb. 2010, San Francisco, CA.
- [12] S. Arnon, "Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless communication systems," *Optics Letters*, vol. 28, no. 2, pp. 129–131, 2003.
- [13] D. Kedar and S. Arnon, "Optical wireless communication through fog in the presence of pointing errors," *Applied Optics*, vol. 42, no. 24, pp. 4946–4954, 2003.

- [14] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, CRC Press, 2013.
- [15] I. I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," *Proceedings of SPIE, Optical Wireless Communications III*, vol. 4214, pp. 26–37, 2001, Boston, MA.
- [16] U. Ketprom, S. Jaruwatanadilok, Y. Kuga, A. Ishimaru, and J. A. Ritcey, "Channel modeling for optical wireless communication through dense fog," *Journal of Optical Networking*, vol. 4, no. 6, pp. 291–299, June 2005.
- [17] M. Grabner and V. Kvicera, "Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 513–520, Feb. 2014.
- [18] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, and R. L. Phillips, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 1554–1562, Aug. 2001.
- [19] N. D. Chatzidiamantis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, S. A. Kotsopoulos, and M. Matthaiou, "New results on turbulence modeling for free-space optical systems," *IEEE International Conference on Telecommunications (ICT)*, pp. 487–492, 2010, Doha, Qatar.
- [20] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, J. F. Paris, and A. Puerta Notario, "General analytical expressions for the bit error rate of atmospheric optical communication systems," *Optics Letters*, vol. 36, no. 20, pp. 4095–4097, 2011.
- [21] M. A. Kashani, M. Uysal, and M. Kavehrad, "A novel statistical model of turbulence-induced fading for free space optical systems, invited paper," *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2013, Cartagena, Spain.
- [22] B. Moision and J. Hamkins, "Multipulse PPM on discrete memoryless channels," *IPN Progress Report*, vol. 42-160, Feb. 2005, Jet Propulsion Laboratory.
- [23] M. A. Khalighi, N. Schwartz, N. Aitamer, and S. Bourennane, "Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 1, no. 6, pp. 580–593, Nov. 2009.
- [24] M. Shafi et al., "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no.6, pp. 1201-1221, 2017.
- [25] M. Jaber, M. A. Imran, R. Tafazolli, and A. Tukmanov, "5G backhaul challenges and emerging research directions: a survey", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1743-1766, 2016.
- [26] D. Zhang, Z. Zhou, S. Mumtaz, J. Rodriguez, and T. Sato, "One integrated energy efficiency proposal for 5G IoT communications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 1346-1354, 2016.
- [27] M. Obeed, A. M. Salhab, S. A. Zummo, and M. Alouini, "Joint optimization of power allocation and load balancing for hybrid VLC/RF networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 5, pp. 553-562, May 2018.

- [28] T. Koonen, "Indoor optical wireless systems: technology, trends, and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 8, pp. 1459-1467, Apr. 2018.
- [29] F. Wang, Z. Wang, C. Qian, L. Dai, and Z. Yang, "Efficient vertical handover scheme for heterogeneous VLC-RF systems," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 12, pp. 1172-1180, Dec. 2015.
- [30] B. Bag, A. Das, I. S. Ansari, A. Prokeš, C. Bose, and A. Chandra, "Performance analysis of hybrid FSO systems using FSO/RF-FSO link adaptation," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1-17, 2018.
- [31] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, "Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 22, No 2, pp. 930-966, 2020.
- [32] S. Shao and A. Khreishah, "Delay analysis of unsaturated heterogeneous omnidirectional-directional small cell wireless networks: the case of RF-VLC coexistence," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 12, pp. 8406-8421, 2016.
- [33] S. M. Nlom, A. R. Ndjiongue, and K. Ouahada, "Cascaded PLC-VLC channel: an indoor measurements campaign," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 25230-25239, 2018.
- [34] H. Lei, Z. Dai, K. H. Park, W. Lei, G. Pan, and M. S. Alouini, "Secrecy outage analysis of mixed RF-FSO downlink SWIPT systems," *arXiv:1806.01895*, 2018.
- [35] T. Wang, F. Yang, L. Cheng, and J. Song, "Spectral-efficient generalized spatial modulation based hybrid dimming scheme with LACO-OFDM in VLC," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 41153-41162, 2018.
- [36] M. I. Petkovic and Z. Trpovski, "Exact outage probability analysis of the mixed RF/FSO system with variable-gain relays," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 6, pp. 1-14, 2018.
- [37] E. Balti and M. Guizani, "Mixed RF/FSO cooperative relaying systems with co-channel interference," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 9, pp. 4014-4027, 2018.
- [38] J. Al-Khori, G. Nauryzbayev, M. M. Abdallah, and M. Hamdi, "Secrecy performance of decode-and-forward based hybrid RF/VLC relaying systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 10844-10856, 2019.
- [39] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, M. K. Hasan, and Y. Min Jang, "Integrated RF/optical wireless networks for improving QoS in indoor and transportation applications," *Wireless Personal Communications*, 2018.
- [40] P. Pesek, S. Zvanovec, P. Chvojka, Z. Ghassemloooy, and P. A. Haigh, "Demonstration of a hybrid FSO/VLC link for the last mile and last meter networks," *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 1-17, 2019.
- [41] M. Torabi and R. Effatpanahi, "Performance analysis of hybrid RF-FSO systems with amplify-and-forward selection relaying," *Optics Communications*, vol. 434, pp. 80-90, 2019.

- [42] N. Saeed, A. Celik, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Underwater optical wireless communications, networking, and localization: a survey," arXiv:1803.02442v1, 2018.
- [43] N. Saeed, A. Celik, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Energy harvesting hybrid acoustic-optical underwater wireless sensor networks localization," *Sensors*, vol. 18, no. 1, p. 51, 2018.
- [44] N. Farr, A. Bowen, J. Ware, and C. Pontbriand, "An integrated, underwater optical /acoustic communications system," in *Proc. IEEE SYDNEY OCEANS'10*, Sydney, NSW, Australia, 2010.
- [45] C. Moriconi, G. Cupertino, S. Betti and M. Tabacchiera, "Hybrid acoustic/optic communications in underwater swarms," in *Proc. OCEANS 2015*, Genova, 2015.
- [46] L. J. Johnson, R. J. Green, and M. S. Leeson, "Hybrid underwater optical/acoustic link design," in *Proc. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Graz, Austria, 2014.
- [47] H. Dahrouj, A. Douik, F. Rayal, T. Y. Al-Naffouri, and M. Alouini, "Cost-effective hybrid RF/FSO backhaul solution for next generation wireless systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 98-104, 2015.
- [48] P. Lin, T. Wang, J. Hu, Y. Suemura, S. Nakamura, and C. Qiao, "Optical-to-wireless-integration cost modeling," in *Workshop on High Performance Switching and Routing*, Brooklyn, NY, 2017.
- [49] J. Yu, X. Li, and W. Zhou, "Tutorial: broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication," *APL Photonics*, vol. 3, no.11, pp. 1-20, 2018.
- [50] M. Zhu, L. Zhang, J. Wang, L. Cheng, C. Liu and G. Chang, "Radio over-fiber access architecture for integrated broadband wireless services," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 23, pp. 3614-3620, 2013.
- [51] X. Wu, M. Safari, and H. Haas, "Access point selection for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 12, pp. 5375-5385, Dec. 2017.
- [52] X. Bao, J. Dai, X. Zhu, "Visible light communications heterogeneous network (VLC-HetNet): new model and protocols for mobile scenario," *Wireless Networks*, vol. 23, no. 1, pp. 299-309, 2017.
- [53] J. H. Cox et al., "Advancing software-defined networks: a survey," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25487-25526, 2017.
- [54] A. Douik, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M. Alouini, "Hybrid radio/free-space optical design for next generation backhaul systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 6, pp. 2563–2577, 2016.
- [55] M. A. Esmail, H. Fathallah, and M.-S. Alouini, "Outdoor FSO communications under fog: Attenuation modeling and performance evaluation," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, 2016.

- [56] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, 2007.
- [57] K. Kumar and D. K. Borah, "Quantize and encode relaying through FSO and hybrid FSO/RF links," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 6, pp. 2361–2374, 2015.
- [58] M. Usman, H. Yang, and M.-S. Alouini, "Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis," *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 1–13, 2014.
- [59] M. M. Abadi, Z. Ghassemlooy, S. Zvanovec, M. R. Bhatnagar, and Y. Wu, "Hard switching in hybrid FSO/RF link: Investigating data rate and link availability," in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2017, pp. 463–468.
- [60] A. Trichili, A. Ragheb, et al, "Retrofitting FSO Systems in Existing RF Infrastructure: A Non-Zero Sum Game Technology", *IEEE open journal of the communications society*, pp(99):1-1, 2021.
- [61] T. Rakia, F. Gebali, H. Yang, and M.-S. Alouini, "Performance analysis of multiuser FSO/RF network under non-equal priority with p persistence protocol," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 1802–1813, 2020.
- [62] S. Sharma, A. S. Madhukumar, and S. R, "Switching-based cooperative decode-and-forward relaying for hybrid FSO/RF networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 6, pp. 267–281, 2019.
- [63] I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," *Acta Astronautica*, vol. 159, pp. 123–135, 2019.
- [64] E. Zedini, A. Kammoun, and M.-S. Alouini, "Performance of multibeam very high throughput satellite systems based on FSO feeder links with HPA nonlinearity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 9, pp. 5908–5923, 2020.
- [65] L. Arienzo, "Green RF/FSO communications in cognitive relay based space information networks for maritime surveillance," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 4, pp. 1182–1193, 2019.
- [66] X. Liu, M. Lin, W.-P. Zhu, J.-Y. Wang, and P. K. Upadhyay, "Outage performance for mixed FSO-RF transmission in satellite-aerial-terrestrial networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 21, pp. 1349–1352, 2020.
- [67] M. Siddharth, S. Shah, and S. R, "Outage analysis of adaptive combining scheme for hybrid FSO/RF communication," in *2020 National Conference on Communications*, 2020, pp. 1–6.
- [68] M. S. Bashir and M.-S. Alouini, "Adaptive acquisition schemes for photon-limited free-space optical communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 416–428, 2021.

- [69] M. S. Bashir, M.-C. Tsai, and M.-S. Alouini, "Cramér-rao bounds for beam tracking with photon counting detector arrays in free-space optical communications," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, pp. 1–1, 2021.
- [70] M. A. Esmail, W. S. Saif, A. M. Ragheb, and S. A. Alshebeili, "Free space optic channel monitoring using machine learning," *Optics Express*, vol. 29, no. 7, pp. 10967–10981, 2021.
- [71] E. Yaacoub and M. Alouini, "A key 6G challenge and opportunity—connecting the base of the pyramid: A survey on rural connectivity," *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 4, pp. 533–582, 2020.
- [72] O. Alkhazragi, A. Trichili, I. Ashry, T. K. Ng, M.-S. Alouini, and B. S. Ooi, "Wide-field-of-view optical detectors using fused fiber-optic tapers," *Optics Letters*, vol. 46, no. 8, pp. 1916–1919, Apr 2021.
- [73] I. Kim, D. Kim, "Minimizing operational power cost in remote-area wireless sensor networks with a DF relay and outage constraints," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, pp. 247–250, 2015.
- [74] E. Zedini, I. S. Ansari, and M.-S. Alouini, "Performance analysis of mixed nakagami- m and gamma-gamma dual-hop FSO transmission systems". *IEEE Photon. J.*, 7, 1–20, 2015.
- [75] B. Ashrafzadeh, E. Soleimani-Nasab, M. Kamandar, M. Uysal, "A framework on the performance analysis of dual-hop mixed FSO-RF cooperative systems", *IEEE Trans. Commun.*, 67, 4939–4954, 2019.
- [76] M. Hasna, M.-S. Alouini, "End-to-end performance of transmission systems with relays over rayleigh-fading channels". *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2, 1126–1131. 2003.
- [77] J. B. Kim, D. Kim, "Comparison of tightly power-constrained performances for opportunistic amplify-and forward relaying with partial or full channel information", *IEEE Commun. Lett.*, 13, 100–102, 2009.
- [78] E. Zedini, H. Soury, and M.-S. Alouini, "On the performance analysis of dual-hop mixed FSO/Rf systems". *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 15, 3679–3689, 2016.
- [79] W. Gappmair, "Further results on the capacity of free-space optical channels in turbulent atmosphere". *IET Commun.*, 5, 1262–1267, 2011.
- [80] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*, Academic: New York, NY, USA, 2000.
- [81] Đ. Šarčević, N. Stanojević, S. Panić, P. Spalević, N. Gligorijević, and Č. Vasić, "Performance Evaluation of Hybrid RF/FSO Systems Using Nakagami-m and Gamma-Rician Models for One-Hop and Multi-Hop Scenarios", *Engineering Review*, accepted for publication.
- [82] X. Tang, Z. Ghassemloooy, S. Rajbhandari, W. Popoola, C. Lee, "Coherent polarization shift keying modulated free space optical links over a gamma-gamma turbulence channel", *Amer. J. Eng. Appl. Sci.*, 4, 520–530, 2011.

- [83] A. Upadhyay, M. Meenalakshmi, S. Chaturvedi, and V. K. Dwivedi, "Full duplex mixed FSO/RF relaying systems with self-interference and outdated CSI", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 55, no. 3, 2023, doi:10.1007/s11082-022-04265-8.
- [84] M. J. Saber, Z. Rezki, and M. S. Alouini, "Secrecy Performance Analysis of Mixed  $\alpha$ - $\mu$  and Exponentiated Weibull RF-FSO Coop. Relaying System," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 72342-72356, 2019, doi:10.1109/access.2021.3078610.
- [85] Y. Wu, J. Chen, J. Guo, G. Li, and D. Kong, "Performance Analysis of a Multi-Hop Parallel Hybrid FSO/RF System over a Gamma-Gamma Turbulence Channel with Pointing Errors and a Nakagami-m Fading Channel," In *Photonics MDPI*, vol. 9, no. 9, pp. 631, 2022,
- [86] W. A. Alathwary, and E. S. Altubaishi, "On the performance analysis of decode-and-forward multi-hop hybrid FSO/RF systems with hard-switching configuration," *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1-12, 2019.
- [87] M. A. Amirabadi, and V. T. Vakili, "Performance comparison of two novel relay-assisted hybrid FSO/RF communication systems," *IET Communications*, vol. 13, no. 11, pp. 1551-1556, 2019.
- [88] P. Wang, R. Wang, L. Guo, T. Cao, and Y. Yang, "On the performances of relay-aided FSO system over M distribution with pointing errors in presence of various weather conditions," *Optics Communications*, vol. 367, pp. 59-67, 2016.
- [89] K. O. Odeyemi, and P. A. Owolawi, "Selection combining hybrid FSO/RF systems over generalized induced-fading channels," *Optics Communications*, vol. 433, pp. 159-167, 2019.
- [90] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. A. Vetterling, and B. P. Flannery, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 1992.
- [91] N. Stanojević, B. Prlinčević, I. Milovanovic, P. Spalević, M. Stanojević, S. Panić, "Performance Analysis of Transmission Visible Watermarked Image over Zero Boresight Double Ricean Turbulence Channel", *Journal of Communications Technology and Electronics*, 66(12), pp.1370-1377, 2021.
- [92] Y. Wang, H. Xu, D. Li, R. Wang, C. Jin, X. Yin, Z. Cao, "Performance analysis of an adaptive optics system for free-space optics communication through atmospheric turbulence", *Scientific reports*, 8(1), 1124, 2018.
- [93] Y. Ata, M. S. Alouini, "HAPS based FSO links performance analysis and improvement with adaptive optics correction", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(7), pp. 4916-4929, 2022.
- [94] J. Schwiegerling, "Review of Zernike polynomials and their use in describing the impact of misalignment in optical system", *Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification XI 10377*, SPIE, pp. 74-81, 2017.
- [95] M. Niu, J. Cheng, J. F. Holzman, "Error rate performance comparison of coherent and subcarrier intensity modulated optical wireless communications", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 5(6), pp. 554-564, 2013

- [96] Wolfram Research, MeijerG functions, [Online]. Available: <http://functions.wolfram.com/PDF/MeijerG.pdf>
- [97] M. Nešić, N. Stanojević, P. Spalević, S. Panić, Č. Vasić, Đ. Šarčević, “Closed-Form ABER Analysis of FSO Links over a Zero-Boresight Double Rician Channel with Adaptive Optics”, *Optica Applicata*, accepted for publication.
- [98] S. Kenneth, M. Alouini, “Digital communication over fading channels“, Wiley-Interscience, NJ, USA, 2nd ed., 2005.
- [99] U. Muneer, H. Yang, M. Alouini, “Performance analysis of switching based hybrid FSO/RF transmission“, *Proc. IEEE VTC2014 80th Vehicular Technology Conf.*, Vancouver BC, Canada, pp. 1–5, 2014.
- [100] W. M. R. Shakir, “On performance analysis of hybrid FSO/RF systems“, *IET Communications* 13(11), pp. 1677-1684, 2019.
- [101] N. Vishwakarma, R. Swaminathan, “Performance analysis of hybrid FSO/RF communication over generalized fading models“, *Optics Communications* 487, 126796, 2021.
- [102] M. H. Abdullah, N. Stanojević, S. Panić, P. Spalević, Đ. Šarčević, S. Mitrović, “Performance Analysis of Hybrid RF/FSO Link over Nakagami-m Fading and Chi-Square–Inverse Gamma Atmospheric Turbulence with Pointing Errors”, *Optica Applicata*, accepted for publication.
- [103] N. Stanojević, Đ. Bandur, L. Mosurović, P. Spalević, S. Panić, “Exploring a novel turbulence model: the Chi-square/inverse Gamma approach for enhanced Free Space Optics (FSO) communication“, *Optica Applicata* 54(3), pp. 337-351, 2024.