

PERFORMANSE BEŽIČNIH OPTIČKIH TELEKOMUNIKACIONIH SISTEMA U PRISUSTVU FADINGA I INTERFERENCIJE

By Bojana Milosavljević

UNIVERZITET SINGIDUNUM

BEOGRAD

DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

PERFORMANSE BEŽIČNIH OPTIČKIH
TELEKOMUNIKACIONIH SISTEMA U PRISUSTVU
FEDINGA I INTERFERENCIJE

Mentor:

Prof. dr Petar Spalević

Student:

Bojana Milosavljević, 466028/2015

BEOGRAD, 2022.godina

UNIVERSITY OF SINGIDUNUM

BELGRADE

DEPARTMENT FOR PHD STUDIES

PhD Thesis

20

**PERFORMANCE OF WIRELESS OPTICAL
TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN THE PRESENCE OF
FADING AND INTERFERENCE**

Mentor:

PhD Petar Spalević

Student:

Bojana Milosavljević, 466028/2015

BELGRADE, 2022.

Mentor:

Prof. dr Petar Spalević

9

Univerzitet Singidunum, Beograd

Članovi komisije:

Prof. dr Mladen Veinović

Univerzitet Singidunum, Beograd

33

Prof. dr Stefan Panić

Prirodno-matematički fakultet,

Univerzitet u Prištini – K. Mitrovica

SADRŽAJ

APSTRAKT	I
ABSTRACT	II
4 SPISAK SLIKA.....	III
SPISAK TABELA	VI
1. UVOD.....	1
2. FREE SPACE OPTICS (FSO) KOMUNIKACIJA	5
2.1. Savremeni pogled na FSO komunikaciju: potencijal, tehnički izazovi, dostignuća i pravac istraživanja.....	5
2.2. Osnovne karakteristike optičkog bežičnog prenosa (OWC)	7
2.2.1. OWC tehnologije	8
2.2.2. Light Fidelity (LiFi).....	9
2.2.3. Visible Light Communication (VLC)	10
2.2.4. Optical Camera Communications (OCC)	10
2.2.5. Light Detection And Ranging (LiDAR)	11
2.3. Relevantna istraživanja	12
2.4. Princip rada FSO (Free space optics) tehnologije	13
2.4.1. Prednosti i mane FSO sistema	14
2.4.2. Klasifikacija FSO	15
2.4.3. Primena FSO sistema	17
2.4.4. FSO u IoT, 5G i B5G.....	20

2.5. FSO primopredajnik	22
2.6. Pouzdanost FSO sistema	24
2.6.1. Adaptivna optika (AO)	29
2.6.2. Relejni prenos	29
2.6.3. Modulacije u FSO sistemima.....	30
2.6.4. Modeliranje FSO kanala	32
2.6.5. Smanjenje pozadinskog šuma	34
2.6.6. Koherentni FSO sistemi	35
2.6.7. Hibridni FSO prenos	37
2.6.8. WiFo (WiFi-FSO) komunikacija	39
2.6.9. Radio preko FSO sistema (RoFSO)	40
2.6.10. Višekorisnička FSO komunikacija	41
2.6.11. MIMO FSO sistemi	41
2.6.12. FSO prenos u TCP sloju	43
2.7. FSO sistemi sledeće generacije	44
2.8. Primena bežičnog optičkog prenosa u 5G tehnologijama	45
2.8.1. 5G/B5G/ i IoT/IoE rešenje	47
2.8.2. Relejne FSO mreže	48
2.8.3. WDM FSO veza.....	48
2.8.4. Karakterizacija kanala.....	49
2.8.5. Pozicioniranje, akvizicija i praćenje (PAT-Pointing, Acquisition, Tracking)	49
2.8.6. Podvodna komunikacija (UWC).....	51
2.8.7. FSO umrežavanje	51
2.8.8. Bezbednost fizičkog sloja	51
2.8.9. Softverski definisana mrežna (SDN) kontrola.....	52
3. BEŽIČNI OPTIČKI SISTEMI PRENOSA U PRISUSTVU TURBULENCIJE	53

3.1. Optički prijemnici sa direktnom detekcijom	54
3.2. Detekcija praga u odsustvu turbulencija	55
3.3. Statistika smetnji u optičkom kanalu	61
4. BEŽIČNI OPTIČKI KOMUNIKACIONI SISTEMI	70
4.1. Analiza performansi FSO sistema zasnovana na novom Gamma-Chi-kvadrat PDF modelu scintilacije	70
4.1.1. Model atmosferske turbulencije	71
4.1.2. Model greške pozicioniranja	75
4.2. Analiza performansi FSO sistema zasnovana na novom osenčanom Chi-kvadrat PDF modelu scintilacije	77
4.3. Analiza dobijenih performansi sistema	83
4.4. Primena prostornih diverziteti tehnika za unapređenje performansi FSO prenosa	91
5. HIBRIDNA RF/FSO KOMUNIKACIJA	94
5.1. Osnovne pretpostavke	94
5.1.1. Modelovanje kanala	96
5.1.2. Informacije o stanju kanala i estimacija kanala	100
5.2. Hibridni FSO/RF komunikacioni sistem sa diverziteti prijemom	101
5.2.1. Model sistema	103
6. ZAKLJUČAK	106
LITERATURA	108

APSTRAKT

Postojeći komunikacioni sistem u domenu RF elektromagnetnog spektra nije u mogućnosti da zadovolji sve potrebe brzog i obimnog prenosa podataka, koje se javljaju usled ekspanzije i sve veće upotrebe IoT uređaja, 5G i B5G mreža, kao i raznovrsnih aplikacija i multimedijalnog sadržaja. Optička bežična komunikacija (OWC), koja koristi veliki opseg nelicenciranog dela spektra, se pokazala kao dobra alternativa za ublažavanje nedostataka konvencionalnog sistema za prenos podataka koji radi u RF domenu.

² FSO (Free Space Optics) tehnologija predstavlja jednu od vrsta optičkih bežičnih komunikacija, ima veliku upotrebu u LAN i MAN mrežama, bežičnom video nadzoru, koristi se u medicinske svrhe, u svemirskoj komunikaciji, za rešavanje problema poslednje milje itd. Primena bežičnih komunikacija, znatno može da doprinese performansama sistema, i to u smislu spektralne i energetske efikasnosti kao i u smislu pouzdanosti.

U disertaciji je u cilju utvrđivanja optimalnog scenarija prijema signala, kao i određivanja optimalnih vrednosti parametara takvog prenosa, izvršena analiza karakteristika bežičnog optičkog prenosa signala u prisustvu turbulencije i efekta greške pozicioniranja, koji se odvija pod kompozitnim uticajem navedenih smetnji. Za posmatrane scenarije prenosa razmatrane su ³ standardne mere performansi sistema, kao što su srednja verovatnoća greške po bitu, posmatrana za odgovarajuće modulacione formate, kao i verovatnoća otkaza. Predstavljena su analitička i numerička rešenja problema, a uticaji pojedinih parametara sistema na performanse bežičnog optičkog prenosa prikazani su i grafički.

Ključne reči: FSO (Free Space Optics) komunikacija, fading, interferencija, osenčeni Chi-kvadrat model optičkog kanala, hibridna RF/FSO komunikacija.

ABSTRACT

The existing communication system in the domain of the RF electromagnetic spectrum is not able to meet all the needs of fast and extensive data transmission, which arise due to the expansion and increasing use of IoT devices, 5G and B5G networks, as well as various applications and multimedia content. Optical wireless communication (OWC), which uses a wide range of unlicensed part of the spectrum, has proven to be a good alternative to alleviate the shortcomings of the conventional data transmission system operating in the RF domain.

FSO (Free Space Optics) technology represents one of the types of optical wireless communications, it is widely used in LAN and MAN networks, wireless video surveillance, it is used for medical purposes, in space communication, for solving last mile solutions, etc. The use of wireless communications can significantly contribute to system performances, in terms of spectral and energy efficiency as well as in terms of reliability.

Furthermore, in order to determine the optimal scenario of signal reception, as well as to determine the optimal values of the parameters of such transmission, an analysis of the characteristics of wireless optical signal transmission in the presence of turbulence and pointing error, which takes place under the composite influence of the aforementioned interferences, was performed. For the observed transmission scenarios, standard measures of system performance were considered, such as average bit error rate, observed for the corresponding modulation formats, as well as outage probability. Analytical and numerical solutions to the problem are presented, and the effects of certain system parameters on the performances of wireless optical transmission are also shown graphically.

Key words: FSO (Free Space Optics) communication, fading, interference, shaded Chi-square distribution, hibrid RF/FSO communication.

SPISAK SLIKA

Slika 3.1. Sistem direktne detekcije za digitalni signal	61
Slika 3.2. Podešavanje praga za digitalni signal	63
Slika 3.3. Verovatnoća detekcije i lažnog alarma	63
Slika 3.4. Odnos praga signala i šuma (TNR) kao funkcija FAR/B	67
Slika 3.5. Geometrija širenja Gausovog snopa na rastojalju L levo od tankog Gausovog sočiva stvarne žižne daljine FG i efektivnog radijusa prenosa WG	69
Slika 3.6. Verovatnoća slabljenja signala kao funkcija ispod nivoa praga u uslovima slabe fluktuacije zračenja $\sigma_R^2 < 1$, pretpostavlja se da su unutrašnji i spoljašnji opsezi $l_0=0$, $L_0=\infty$, a DG je prečnik otvora prijemnika	72
Slika 3.7. Isto kao i slika 3.6. osim umerenih uslova fluktuacija zračenja $\sigma_R^2 > 1$	73
Slika 3.8. Isto kao i slika 3.6. osim jakih uslova fluktuacije zračenja $\sigma_R^2 \gg 1$	73
Slika 4.1. PDF za Gamma-Chi-square model optičkog kanala posmatran za slučajeve slabe i jake turbulencije	81
Slika 4.2. PDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala	86
Slika 4.3. PDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve različitih intenziteta signala	86
Slika 4.4. PDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve slabe i jake turbulencije	87
Slika 4.5. CDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala	88

Slika 4.6. CDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve slabe i jake turbulencije	88
Slika 4.7. CDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve različitih intenziteta signala	89
Slika 4.8. ABER za model Gamma-Chi-square atmosferskog turbulentnog kanala kao funkcija srednjeg električnog SNR-a.....	91
Slika 4.9. ABER za Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja kao funkcije srednjeg električnog SNR-a.....	92
Slika 4.10. ABER za Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja u slučaju različitih vrednosti standardne devijacije treperenja (jitter)	93
Slika 4.11. ABER za Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite vrednosti normalizovanog radijusa optičkog zraka	94
Slika 4.12. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model za slučajeve slabe i jake turbulencije	94
Slika 4.13. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala.....	95
Slika 4.14. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model za slučajeve različitih intenziteta optičkih signala.....	95
Slika 4.15. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za slučajeve različitih vrednosti standardne devijacije treperenja	96
Slika 4.16. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala	96
Slika 4.17. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite vrednosti parametra neusmerenosti optičkog zraka s	97
Slika 4.18. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite vrednosti normalizovanog radijusa optičkog zraka	97
Slika 4.19. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za slučajeve slabe i jake turbulencije	98

Slika 4.20. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za slučajeve različitih intenziteta optičkih signala	98
Slika 5.1. Hibridni FSO/RF sistem	105
Slika 5.2. Hibridna kodna reč.....	106
Slika 5.3. Model FSO/RF sistema.....	111

SPISAK TABELA

¹	³
Tabela 4.1. Broj članova sume koje treba sabrati u izrazu za PDF u jednačini (4.12) da bi se postigla tačnost na 5-toj značajnoj cifri	83

1. UVOD

Razvoj novih telekomunikacionih tehnologija usledio je kao posledica kako vojnih, tako i novih komercijalnih zahteva. Usled konstantnog rasta broja korisnika i razvoja savremenih visokokvalitetnih multimedijalnih aplikacija, napredne generacije bežičnih sistema moraće da ispune niz novih zahteva. Nasuprot bežičnim radio-frekvencijskim (RF) tehnologijama, optički sistemi obezbeđuju veći propusni opseg, veće brzine i bolji kvalitet prenosa. Pošto se implementacija sistema sa optičkim vlaknima pokazala kao dosta komplikovana i skupa, ovi sistemi predstavljaju dobar izbor za komunikacioni link na velikim udaljenostima. Međutim, kao jedno od rešenja za problem „poslednje milje“, koriste se optičke bežične komunikacije (OWC – Optical Wireless Communications), koje kombinuju brzinu optičkih sistema i fleksibilnost bežičnih komunikacija. Optičke bežične komunikacije predstavljaju savremenu bežičnu tehnologiju koja podrazumeva prenos optičkog signala kroz slobodan prostor (vazduh, svemir, vakuum i sl.). Karakterišu ih velike brzine prenosa, laka i jeftina implementacija, nelicencirani širok propusni opseg, kao i poboljšana bezbednost prenosa podataka.

Neprekidan razvoj različitih servisa bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema, dovodi do potrebe za proučavanjem i unapređenjem njihovih performansi. Osnovni zahtevi koji su prisutni u procesu unapređenja performansi bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema su: obezbeđivanje velikih brzina prenosa, kapaciteta kanala i što većeg dometa veze sa što manjom verovatnoćom greške. Nažalost, prostiranje korisnog signala u bežičnom optičkom medijumu, je praćeno raznim neželjenim efektima. Stoga je neophodno izvršiti i sveobuhvatnu analizu smetnji koje se javljaju pri prenosu.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji su upravo, bežični optički telekomunikacioni sistemi. Zbog prednosti koje imaju, poput velike brzine i pouzdanog prenosa, jednostavne i ekonomične implementacije, ovi sistemi su sve više aktuelni, kako u teorijskim razmatranjima, tako i sa stanovišta mogućih primena. U disertaciji je izvršena analiza karakteristika bežičnog optičkog prenosa signala u prisustvu turbulencije i efekta greške

pozicioniranja sa osvrtom na performanse prenosa, koji se odvija pod kompozitnim uticajem navedenih smetnji, u cilju utvrđivanja optimalnog scenarija prijema signala, kao i određivanje optimalnih vrednosti parametara takvog prenosa. Za posmatrane scenarije prenosa razmatrane su standardne mere performansi sistema, kao što su srednja verovatnoća greške po bitu posmatrana za odgovarajuće modulacione formate, kao i verovatnoća otkaza. Predstavljena su analitička i numerička rešenja problema, a uticaji pojedinih parametara sistema na performanse bežičnog optičkog prenosa prikazani su i grafički.

Doktorska disertacija sadrži uvod, još četiri poglavlja i zaključak. U uvodnom, prvom poglavlju istaknut je značaj i cilj istraživanja, i predstavljena je organizacija doktorske disertacije po poglavljima, kao i metodološki pristup.

U okviru drugog poglavlja date su osnovne karakteristike bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema i karakteristike prenosa kroz komunikacione kanale.

U okviru trećeg poglavlja razmatrane su osnovne smetnje koje se javljaju u bežičnim optičkim telekomunikacionim sistemima, kao i raspodele kojima se opisuju korisni signali, modeli turbulencije i efekti greške pozicioniranja u bežičnim optičkim telekomunikacionim sistemima.

U okviru četvrtog poglavlja predstavljene su statističke karakteristike prvog reda za razne tipove slučajnih promenljivih. Za navedene promenljive izračunata je gustina verovatnoće, kumulativna verovatnoća i momenti. Na osnovu dobijenih izraza biće iscrtani grafici promene gustine verovatnoće i kumulativne verovatnoće za različite vrednosti propagacionog okruženja. Razmatrani su bežični optički telekomunikacioni sistemi čiji prijemnici koriste diverziti tehniku kako bi se smanjio uticaj fedinga na performanse sistema. Korišćena diverziti tehnika je prostorna. Performanse sistema su razmatrane za slučaj MRC i SC kombinovanja. Za oba slučaja pokazan je pristup za određivanje gustina verovatnoće i kumulativna verovatnoća na izlazima iz prijemnika, kao i srednje verovatnoća greške po bitu (ABER). Povećanje efikasnosti prenosa i unapređenje kvaliteta signala na prijemu na ovaj način može biti razmatrano za slučajeve primene različitih modulacionih formata.

U okviru petog poglavlja biće razmatran hibridni RF/FSO sistem sa SC kombinerima na čijim se ulazima nalaze optički OWC i RF signal, tako da bi se vršio odabir signala većeg odnosa SNR. Za ovako modelovan sistem na izlazu iz diverziti kombineri predstavljen je pristup pomoću koga se određuje gustina verovatnoće i kumulativna verovatnoća prenosa.

Na kraju disertacije iznet je zaključak u kome će biti dat pregled najvažnijih rezultata dobijenih tokom izrade doktorske disertacije, kao i spisak referentne literature.

Opšta hipoteza od koje se krenulo prilikom istraživanja u disertaciji je - da je proučavanjem performansi bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema u prisustvu turbulencije i efekta greške pozicioniranja moguće odrediti optimalne parametre prenosa. Posebna hipoteza na kojoj je bilo zasnovano istraživanje je - da se opisivanjem osnovnih karakteristika bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema, uviđanjem dobrih i loših strana, kao i matematičkim i statističkim proračunavanjem parametara koji utiču na poboljšanje i degradiranje performansi, dobija mogućnost za projektovanje konkretnih modela bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema.

Cilj istraživanja je utvrđivanje karakteristika bežičnog optičkog prenosa u prisustvu različitih smetnji koje se javljaju, kao što su turbulencija i efekat greške pozicioniranja, a sve to kako bi se odredio optimalni scenario prenosa i odredile optimalne vrednosti parametara linkova takvog scenarija prenosa. Sa aspekta tehnološkog problema suvišno je govoriti koliko je tema aktuelna s obzirom da trend u telekomunikacijama itekako forsira bežične sisteme komunikacija. Takođe, ako se uzme u obzir neosporan rast u potražnji za brzim, lako pristupačnim i u svakom pogledu kvalitetnim povezivanjem sasvim je sigurno da će se javiti potreba da se nadmaše trenutne mogućnosti digitalnih telekomunikacionih sistema. Kao odgovor na prethodno navedene zahteve za povezivanjem, jedno od značajnih tehnoloških rešenja su svakako bežični optički sistemi.

U toku naučnog i istraživačkog rada upotrebljene su različite metode kako bi bili zadovoljeni osnovni metodološki zahtevi – objektivnost, pouzdanost, opštost i sistematičnost. U skladu sa izabranom problematikom, definisanim ciljevima istraživanja i postavljenim naučnim hipotezama radi definisanja naučnih i stručnih zaključaka i iznalaženja mogućih rešenja izvršena je teorijska analiza uz korišćenje rezultata istraživanja iz međunarodne naučne literature. U ovoj disertaciji su istraživana naučno-teorijska saznanja i relevantna literatura korišćenjem većeg broja metoda, i to: metode analize, metode generalizacije i specijalizacije, metode uporednog posmatranja i analize sadržaja. Primenom istorijskog metoda pribavljeni su rezultati istraživanja drugih autora koji su se bavili bežičnim optičkim prenosom signala u prisustvu različitih tipova smetnji.

Metoda kompleksnog posmatranja i analiza sadržaja primenjena je prilikom obrade rezultata iz preuzetih istraživanja sa drugih svetskih univerziteta i doktorskih disertacija. Ovi

rezultati su upotrebljeni u cilju definisanja pravca istraživanja problema bežičnog optičkog prenosa u prisustvu turbulencije i efekta greške pozicioniranja. Primenom analitičkog metoda, kao i metoda simulacije i eksperimentalnog metoda utvrđene su mogućnosti bežičnog optičkog prenosa u prisustvu fedinga i interferencije. Nakon utvrđivanja mogućnosti prenosa u navedenim sistemima, razmatrani su optimalni scenariji prenosa i određene optimalne vrednosti parametara linkova takvih scenarija prenosa. Na ovaj način primenjene su i metoda analize i sinteze.

Rezultati koji su izneti u ovoj disertaciji imaju veliki nivo generalnosti i primenljivosti, usled činjenice da je modelovanje propagacionih scenarija bilo izvršeno pomoću generalnog modela turbulencije. Izvedeni su analitički i numerički rezultati za statističke karakteristike signala na prijemu optičkog prijemnika u prisustvu efekta turbulencije optičkog signala i greške pozicioniranja. Takođe, predstavljen je pristup za analizu performansi sistema za slučajeve kada se na prijemu koriste diverziti kombineri različitih modela (SC, EGC, MRC). Dobijeni rezultati su grafički predstavljeni za različite parametre, na osnovu kojih je moguće utvrditi kako dati parametri utiču na kvalitet prijema signala kod optičkog prijemnika. Na osnovu dobijenih rezultata promene srednje verovatnoće greške po bitu signala za različite modulacione formate dat je prikaz uticaja parametara prenosa i odabrane modulacije na kvalitet prenosa.

Koristeći rezultate koji su predstavljeni u disertaciji može se predvideti ponašanje različitih realizacija bežičnih optičkih sistema za različite scenarije bežičnog prenosa i u različitim propagacionim okruženjima, što omogućava projektantima bežičnih optičkih sistema prenosa da za željene performanse sistema naprave racionalna sistematska rešenja. Predložene su i realizacije bežičnih optičkih sistema za koje je pokazano evidentno unapređenje performansi na prijemu, pa se otvara mogućnost njihove primene u cilju smanjivanja štetnog uticaja turbulencije, efekta pozicioniranja i ostalih tipova smetnji pri propagaciji signala u bežičnim optičkim sistemima.

2. FREE SPACE OPTICS (FSO) KOMUNIKACIJA

2.1. Savremeni pogled na FSO komunikaciju: potencijal, tehnički izazovi, dostignuća i pravac istraživanja

Usled velikog rasta upotrebe IoT uređaja, 5G i B5G mreža, raznovrsnih aplikacija i multimedijalnog sadržaja, postojeći sistem u domenu RF elektromagnetnog spektra nije u mogućnosti da zadovolji sve potrebe brzog i obimnog prenosa podataka. Optička bežična komunikacija (OWC), koja koristi veliki opseg nelicenciranog dela spektra, može da se smatra dobrom dopunom za ublažavanje nedostataka konvencionalnog sistema za prenos podataka koji radi u RF domenu. FSO sistemi koji rade u opsezu bliskim IR (NIR) opsegu, kojima se ostvaruje OWC konekcija, imaju veliku primenu između fiksnih primopredajnika koji pokrivaju udaljenost od nekoliko kilometara, i to upravo zbog visoke optičke vidljivosti, velikog propusnog opsega i brzine. FSO tehnologija ima veliku upotrebu u LAN i MAN mrežama, bežičnom video nadzoru, za medicinske svrhe, u svemirskoj komunikaciji, za rešavanje problema poslednje milje i mnoge druge. Uprkos očiglednim prednostima FSO tehnologija još uvek ne nalazi široku primenu. Međutim, i kod FSO sistema javljaju se određeni nedostaci, i to usled smetnji zbog atmosferskih turbulencija, faktora okoline kao što su: magla, aerosoli, varijacija temperature, jeke kiše, scintilacija itd. Ipak, FSO sistemi daju rešenje za rasterećivanje saobraćaja u RF mrežama, pa kombinovana primena FSO/RF sistema i radija preko FSO (RoFSO) sistema može da bude odlična podrška zahtevima 5G mreže, ova simbioza bi smanjila pojedinačna ograničenja svakog od ova dva sistema. Primena bežičnih komunikacija, znatno može da doprinese performansama sistema, i to u smislu spektralne i energetske efikasnosti kao i u smislu pouzdanosti. Tokom poslednjih decenija sprovedena su mnoga istraživanja ne temu FSO sistema i to u kontekstu modeliranja kanala, adaptivnog

prenosa i modulacije, tehnika ublažavanja ometajućih faktora kanalnog prenosa, arhitekture sistema i dizajna FSO prijemnika i predajnika.

Izvesno je da se poslednjih godina povećao prenos podataka u domenu multimedijalnog sadržaja, koji zahteva veći propusni opseg i brzine prenosa. 5G tehnologija nudi veliki kapacitet, izuzetnu povezanost uređaja, nisku potrošnju energije, a samim tim dobar kvalitet prenosa u domenu QoS usluga [1]. 5G mreža, kao ultra gusta heterogena mreža, omogućava sto puta veću povezanost i brzinu prenosa u poređenju sa postojećim bežičnim mrežama [2]. Zbog toga 5G i B5G tehnologija zahtevaju backhaul mrežu velikog kapaciteta koja bi mogla da podrži hiper-gusinu prenosa, brzi pristup, minimalnu potrošnju energije i minimalno kašnjenje [3]. Usled ograničenja u domenu spektra, RF tehnologija ne može u potpunosti da podrži ovakvu mrežu [4]. Sa brzim razvojem i velikom upotrebom tehnologije IoT (Internet Thing) i IoE (Internet of Everithing) eksponencijalno raste i broj pametnih uređaja koji se povezuju na mrežu. Trenutni raspoloživi elektromagnetni frekventijski opseg nije dovoljan za tehničke potrebe 5G mreže koja omogućava IoT (Internet Thing) koncept [5]. Usled ograničenja u frekventijskom opsegu RF sistema, podopsezi bivaju već raspoređeni i zauzeti. Kao način za prevazilaženje nedostataka RF tehnologije, istraživači nude bežičnu komunikaciju talasima milimetarske i nanometarske dužine. Za alternativu prenosa u RF spektru, akademska i industrijska zajednica predlažu upotrebu optičke bežične komunikacije OWC koja pokriva područje elektromagnetnog spektra 1mm-10nm [6], pa tako sam termin OWC možemo okarakterisati kao bežično povezivanje u domenu optičkog dela spektra. Opravdanost upotrebe OWC se ogleda u velikom broju unapređenih karakteristika prenosa koje pruža ova tehnologija, kao što su širok spektar, velike brzine prenosa, niža potrošnja energije, ekonomičnost itd.

Za razliku od mreža koje koriste RF opseg, OWC tehnologija ima prednosti koje se ogledaju u velikom kapacitetu prenosa podataka u rasponu od nekoliko nanometara do nekoliko kilometara, ²¹ kako za zatvoren tako i za otvoren prostor. Zbog korišćenja širokog optičkog spektra, OWC tehnologija omogućava dobre komunikacione karakteristike u smislu bezbednosti, prenosa bez elektromagnetnih smetnji i visoke efikasnosti sistema [7]. U uslovima unutrašnjeg prostiranja OWC prenos može da dostigne brzinu od 100Gb/s, a da pri tome praktična realizacija sistema ne zahteva velike infrastrukturne troškove. Svetlosni talasi OWC se ne prostiru izvan zidova objekta, čime je garantovana veća bezbednost komunikacije. Najčešće se kao propagacioni mediji koriste (VL) spektar vidljive svetlosti, (IR) infracrveni ili (UV) ultraljubičasti spektar.

Najperspektivniji bežični sistemi komunikacije OWC tehnologije su VLC (Visible light communication), LiFi (light fidelity), OCC (optical camera communication), FSO (Free space optics). Ali kako svi ovi sistemi pored svoje sličnosti imaju i razlika u smislu protokola, aplikacija i arhitekture, hibridni RF/OWC sistemi bi mogli predstavljati najsveobuhvatniji odgovor na sve potrebe korisnika u pogledu kvaliteta i brzine prenosa.

Nasuprot svojim velikim prednostima sama OWC tehnologija ima i nedostataka, na primer: ograničena oblast pokrivenosti, smetnje koje izazivaju višestruki izvori svetlosti, smetnje usled atmosferskih prilika, sve ovo kao i SINR (Signal-to-noise interference ratio) degradiraju performanse ovakvog sistema. Kada je u pitanju NLOS (non-line of sight) bežični prenos, RF tehnologija postiže bolje performanse, međutim upravo zbog ovakvog odnosa karakteristika RF/OWC hibridni optički prenosni sistem bi mogao zadovoljiti potrebe IoT/IoE i 5G/B5G sistema [8]. Hibridni optički prenosni sistemi su zasnovani na povezivanju dve ili više tehnologija prenosa, na primer: RF/FSO, LiFi/OCC, u cilju poboljšanja performansi sistema, npr, energetske efikasnosti, brzine protoka, vrednosti BER (verovatnoća greške po bitu), pouzdanosti itd. Hibridne optičke mreže su već našle primenu u mnogim aplikacijama [9].

2.2. Osnovne karakteristike optičkog bežičnog prenosa (OWC)

Širok opseg (EM) frekventijskog spektra omogućava i široku upotrebu spektra u domenu bežičnih optičkih komunikacija. Svaki od ovih opsega IR, VL, UV ima svoje jedinstvene karakteristike na osnovu kojih se razvijaju tipovi OWC tehnologije prenosa, na primer prenos u IR spektru se može koristiti pri realizacijama gde osvetljenje nije potrebno, prenos u UV frekventijskom opsegu podržava brzine koje zahtevju LOS i NLOS linkovi za komunikaciju na malim udaljenostima. Samim tim OWC tehnologija obezbeđuje dobre karakteristike prenosa od kratkih do velikih udaljenosti. Pored povoljnih karakteristika sistema, kao što su: veći nivo bezbednosti, niži troškovi, lakoća integracije sa postojećim sistemom i drugo, OWC evidentno pati od nedostataka pri degradaciji performansi sistema usled prepreka duž komunikacione veze.

2.2.1. OWC tehnologije

Optički prenos u domenu IR, VL ili UV dela spektra elektromagnetnog zračenja omogućavaju različite vrste oblika komunikacija. FSO sistem radi u IC i VL delu spektra, dok se UV deo spektra koristi za velike brzine NLOS i LOS tehnologije.

LiFi (light fidelity) je relativno nova tehnologija koja dopunjuje WiFi pružajući velike brzine prenosa podataka. Treba napomenuti da VLC i LiFi tehnologija omogućavaju ekstremno velike brzine u zatvorenom prostoru ali nisu efikasne pri prenosu podataka na otvorenom upravo zbog prepreka na koje nailazi svetlost. Zato se kao podvrsta OWC koristi sistem gde se kao predajnik upotrebljava LED dioda a kao prijemnik OCC (optical camera communication), čime sistem postiže visoke SNR performanse prevazilazeći smetnje čak i na otvorenom [10].

LiDAR je metod skeniranja na daljinu 3D mapa velike rezolucije. LiDAR aparat sadrži LD, skener i specijalizovan GPS uređaj, tako da ovi senzori daju podatke visoke rezolucije za analizu karakteristika pejzaža. Uprkos nedostacima, kao što su oštećenje kanala usled atmosferskih turbulencija, usmerenost između predajnika i prijemnika, efekat greške, FSO sistem bi mogao da bude obećavajuće rešenje za svetlosnu mrežu sledeće generacije [11], [12].

Prema delu spektra EM zračenja koje koristi, OWC tehnologija se može klasifikovati u tri kategorije: tehnologija infracrvenog, ultraljubičastog i vidljivog svetla. IR opseg se koristi u tehnologiji FSO od tačke do tačke, uključujući sledeće opsege: ultra kratki (750nm-1450nm), kratki (1400nm-3000nm), srednji (3000nm-8000nm), dugi (8000nm-15000nm) i ultra dugi (15000nm-1mm) talasni opseg. Prednost prenosa signala u VL spektru je bezbednost pri zračenju u odnosu na ljudsko zdravlje, pa se prenoseni signal može istovremeno koristiti i za osvetljenje i za prenos podataka. Takođe, NIR i VL prenos pokazuju dobre karakteristike u domenu LOS komunikacija, a zbog slabije brzine nisu pogodni za NLOS prenos podataka, dok prenos u UV spektru obezbeđuje dovoljnu brzinu i za NLOS/LOS vezu. Prenos u UV delu spektra (radna talasna dužina od 10 do 400nm) je relevantan za kratki i srednji domet LiFi tehnologije, kao i za ultra kratke, kratke, duge i ultra duge udaljenosti u FSO sistemima [13].

Svaka od OWC tehnologija prenosa (VLC, LiFi, OCC, LiDAR i FSO) ima svoje određene karakteristike u smislu: protokola, arhitekture, principa rada, tehnike modulacije, kanalnog medijuma, šeme za prenos, pa tako i ³⁶svaka od ovih tehnologija ima svoje prednosti i mane. Pri realizaciji OWC prenosa kao predajnici se obično koriste LED ili laserske LD diode, dok se fotodetektor (PD) ili kamere koriste kao prijemnici. Tako se prenos signala u IR, VL i UV delu elektromagnetnog spektra koristi kao komunikacioni medijum.

FSO predstavlja podvrstu OWC tehnologije, kod koje se obično kao kanalni medijum koristi NIR opseg spektara zbog niskog nivoa slabljenja, međutim može se koristiti i VL i UV deo spektra elektromagnetnog zračenja. Kao predajnik se koristi uski snop LD diode koji obezbeđuje velike brzine, dok se PD dioda koristi kao optički prijemnik. Zbog koherentne prirode laserske tehnologije, FSO signal može da putuje na velike udaljenosti omogućavajući komunikaciju od tačke do tačke uz velike brzine prenosa podataka. Za povećanje intenziteta signala lasera mogu se koristiti optički pojačavači, a potom se laserski snop, pre transmisije, ponovo skuplja i fokusira. Izlazni signal sa PD diode se odgovarajućim elektronskim kolima pretvara u napon, niskopropusni filter LPF eliminiše nivo šuma a demodulator obavlja proces slanja izvornog signala na odredište. Primena FSO sistema uključuje video nadzor, backhauling za mobilne mreže, za LAN to LAN povezivanje, podvodnu komunikaciju, komunikaciju između mikroprocesorskih čipova itd. Uprkos višestrukim prednostima FSO tehnologija ima i neke ograničavajuće faktore, na primer, spoljašnji vremenski uslovi (jaka kiša, magla, dim, oluja, sneg, oblaci i scintilacija), atmosferske turbulencije i fizičke prepreke.

2.2.2. Light Fidelity (LiFi)

Princip rada LiFi je sličan principu rada WiFi tehnologije, a takođe se koristi komunikacioni opseg nanometarskih talase. LiFi karakterišu velike brzine prenosa, a takođe se i ovde VLC, LD ili LED diode koriste kao optički predajnici, a PD kao prijemnik. LiFi je dvosmerna komunikacija za razliku od VLC komunikacije koja može biti jednosmerna i dvosmerna. LiFi podržava komunikaciju od tačke do tačke, od tačke do više tačaka, od više tačaka do više tačaka a time i neprikosnovenu mobilnost korisnika. Stoga je LiFi bežična mreža koja omogućava vezu više korisnika u okviru postojećeg HetNeta. IR, VL ili UV opseg elektromagnetnog zračenja se koristi kao medijuma za povratnu putanju, dok se VL opseg koristi za prenos podataka ka prijemniku. Optički izvor najčešće predstavljaju mikro LED diode, dok izvor signala najčešće predstavlja VCSEL laser brzine 56Gbps [14]. U zatvorenom prostoru ova tehnologija može istovremeno obavljati funkcije osvetljenja i prenosa podataka. Na otvorenom, kao primer upotrebe u svrhu prenosa podataka, možemo navesti kontrolu saobraćajne signalizacije ili kontrolu aplikacija koje upravljaju uličnim svetiljkama. Ključne karakteristike LiFi tehnologije su visoka bezbednost, velike brzine prenosa, ekonomičnost i dostupnost svetlosnog spektra. Nedotraci su smetnje koje izaziva sunčeva svetlost kao i drugi izvori ambijentalnog svetla, pa zbog toga LiFi tehnologija nije pogodna za prenos na velikim udaljenostima kao ni za prenos u spoljašnjoj sredini.

2.2.3. Visible Light Communication (VLC)

VLC tehnologija koristi LED i LD diode kao predajnik a PD diodu kao optički prijemnik, dok komunikacioni medijum predstavlja (VL) vidljiva svetlost. VLC obezbeđuje komunikaciju od tačke do tačke, od tačke do više tačaka (bilo jednosmernu ili dvosmernu), može da podrži brzinu prenosa od 100Gbps i nekoliko hiljada puta veći kapacitet propusnog opsega u poređenju sa RF tehnologijom [15]. VLC tehnologija ima mnogo primena u zatvorenom i otvorenom prostoru, neki od primera su: pametno osvetljenje, akustična komunikacija, pametne displej table, upotreba u avijaciji, u LAN mrežama itd. Upotrebom LED-a postiže se brzina 10 Gbps, dok LD dioda obezbeđuje brzinu od 100Gbps. VLC tehnologija nije pogodna za upotrebu u spoljašnjoj sredini kao ni za velike udaljenosti, ali je bezbedna u pogledu uticaja zračenja na ljudsko zdravlje.

2.2.4. Optical Camera Communications (OCC)

Optical Camera Communications (OCC) tehnologija kao predajnik koristi LED diode, kao prijemnik kameru a zračenje u IR i VL delu elektromagnetnog spektra kao komunikacioni medijum, OCC tehnologija se implementira u postojeću hardversku strukturu. Signal iz više izvora se na prijemu detektuje pomoću kamere tj. senzora slike. OSS može da ostvari prenos u spoljašnjem okruženju bez smetnji tako što senzori na prijemnoj strani odvajaju piksele smetnji kao što je sunčeva svetlost i svetlost ambijentalnih uslova [2]. Pri prenosu podataka sa malim vrednostima BER-a, postignuta brzina dostiže 45Mbps. OSS tehnologija je otporna na neke degradirajuće karakteristike sistema, kao što su velika slabljenja signala, smetnje usled sunčeve svetlosti i drugog ambijentalnog svetla, pozadinska buka, itd. OSS tehnologija je pogodna za pozicioniranje u zatvorenom prostoru, V2V, V2I, I2V komunikaciju, digitalnu signalizaciju, dron-dron komunikaciju, za prenos signala koji vrše detekciju pokreta i prepoznavanje lica, za deljenje podataka među mobilnim korisnicima, i karakteriše je otpornost na smetnje uz zadržavanje visokog kvaliteta prenetog signala sa aspekta odnoas SNR. Međutim, iako OSS tehnologija ima stabilnost u radu u spoljašnjim uslovima, brzina prenosa je relativno mala, takođe, blokiranje optičkih signala i treperanje svetlosti zbog male brzine kadrova mogu predstavljati jedan od nedostataka OSS-a.

2.2.5. Light Detection And Ranging (LiDAR)

LiDAR tehnologija se koristi za daljinsko optičko skeniranje objekata pri čemu se koristi bliski infracrveni (NIR) i VL deo spektra elektromagnetnog zračenja. Princip rada LiDAR tehnologije je slična radio detekciji objekata (RADAR). Osnovna razlika je ta što LiDAR koristi svetlosne talase dok RADAR koristi mikrotalase. Tehnologija je takva da se reflektovani signal sa željene lokacije vraća do prijemnika i na osnovu tog signala analiziraju se parametri kao što su: rastojanje, veličina i druge karakteristike objekta. Laserski zraci su otporni na čestice prašine, aerosoli, nemetalne predmete, kišne kapi, oblake itd. LiDAR mapira fizičke karakteristike predmeta dajući 3D sliku visoke rezolucije. LiDAR tehnologija sadrži laserski izvor, fotodetektor, skener i uređaj za pozicioniranje i navigaciju koji prati kretanje objekta.

LiDAR tehnologija ima primenu u meteorologiji, robotici, šumarstvu, transportu, svemirskim istraživanjima, arhitektonskim istraživanjima, koristi se u vojne svrhe itd.

U nastavku, napomenućemo još neke tehnologije bežičnog umrežavanja, kao što su:

- WiFi tehnologija omogućava bežično umrežavanje, koristi poseban radio frekvencijski opseg, zasnovan na standardu IEEE802.11. WiFi ima veliku brzinu prenosa do 8Gbps pri mobilnosti korisnika i koristi se i u LOS i u NLOS okruženju. Prednosti tehnologije su nelicencirani besplatni spektar i mali troškovi implementacije, nedostaci su nizak nivo bezbednosti kao i smetnje.
- Microwave link networks [16], [17] - Ova tehnologija podržava komunikaciju od tačke do tačke radio snopom u mikrotalasnom frekvencijskom opsegu. Zbog velike brzine prenosa i udaljenosti mikrotalasna tehnologija može da bude alternativa vezi koju daju optička vlakna, pa tako mikrotalasna veza može da pokrije linkove i do 100km udaljenosti sa brzinom od 12,6 Gbps. Degradirajući faktori ovog sistema su: elektromagnetne smetnje, magla, kiša i druge atmosferske turbulencije.
- Čelijske mreže (Cellular Network) [18], [19] - Mogu da se sastoje od makroćelija i malih ćelija koje čine heterogenu mrežu HetNet, koja je jako rasprostranjena u upotrebi, i pruža korisnicima veliku brzinu prenosa. Makroćelijska bazna stanica (BS) obezbeđuje široku pokrivenost i podržava mobilnost korisnika i upotrebu različite opreme, dok, mreža malih ćelija proširuje ćelijsku povezanost na rubovima ćelija i popunjava rupe u pokrivenosti područja signalom. Primena tehnologije makro ćelija je skupa i daje malu

brzinu prenosa podataka, nedostatak mikro ćelija je što je ograničen opseg RF koji mogu da koriste.

- Bluetooth [20], [21] - Bluetooth je tehnologija bežičnog povezivanja zasnovana na RF-u, obezbeđuje brzinu od 2Mbps koristeći radio signale kratke talasne dužine u nelicenciranom frekventnom opsegu od 2,4GHz, Bluetooth troši malo energije i podržava LOS/NLOS tehnologije, loše strane su nizak nivo bezbednosti linka, mala operativna pokrivenost i neotpornost na smetnje.
- Podvodna komunikacija (UVC) [22] - UVC je kombinacija akustične i RF tehnologije za prenos podataka pod vodom, na udaljenosti do 20km, podržava LOS i NLOS komunikaciju. Negativne karakteristike UVC tehnologije su mala brzina prenosa podataka, veliko kašnjenje i osetljivost na uslove vode.

2.3. Relevantna istraživanja

Brojni istraživački radovi se bave razmatranjem problematike OWC tehnologije, u smislu frekvencijskog opsega, ekonomičnosti, bezbednosti i niske potrošnje energije. Istraživači širom sveta, za opisivanje OWC sistema, vodili su se literaturom datom u referencama [23],[24],[25]. U radu [2] dat je pregled prenosivih sistema OWC-a, sa fokusom na VLC, LiFi, LiDAR, FSO sisteme u smislu prednosti primena ovih tehnologija i oblasti primene. U radu [20] objavljeno je istraživanje koje obuhvata: različite šeme modulacije, funkcije zatamnjenja, filtriranje, izjednačavanje i oblikovanje zraka za unutrašnje VLC aplikacije. Autor u [24] vrši istraživanje u pravcu optičko bežične konvergencije, ukazujući na probleme pri spajanju dve optičke bežične mreže. Temelji tehnologije i napredak u razvoju sličnih tehnologija dati su u radu [25]. U radu [26] raspravlja se o objedinjavanju funkcije osvetljenja i umrežavanja za integrisani FSO i VLC sistem.

U radu [27] određena je vrednost BER-a, uzimajući u obzir interferenciju višestrukog pristupa (MAI) i preslušavanje SIK prijemnika. Izvršena je procena vrednosti SINR-a za vrednosti praćenog BER-a u funkciji parametara sistema kao što su: dužina koda i broj istovremenih korisnika sistema. Rezultati su pokazali da OCDMA sa više talasnih dužina (MV-OCDMA) dostiže superiorne vrednosti BER-a u odnosu na realizaciju sistema sa jednom talasnom dužinom OCDMA FSO šeme. Smanjenje moći tj. RR (power penalty) je izraženije za veće vrednosti standardne devijacije podrhtavanja snopa signala i više istovremenih korisnika

i to za vrednosti BER od 10^{-9} . Inače, vrednost RR se značajno smanjuje ako se poveća dužina koda i talasna dužina za dati broj istovremenih korisnika. Analitički model OCDMA sa više talasnih multipleksiranih talasnih dužina tzv. MV-OSDMA-VDM FSO komunikacioni sistem se koristi da proceni BER funkcionalnost i kapacitet veze u prisustvu prethodno navedenih ograničavajućih faktora za slobodan prostor [28]. Autori dekomponuju evaluaciju BER-a u dve kategorije; Q-ary optički PPM (Q-OPPM) prijemnik sa modulacijom intenziteta i prijemnik sa direktnom detekcijom (IM/DD). Dalje se istražuje FSO komunikacija zasnovana na dekodiranju IM/DD u prisustvu slabih i jakih atmosferskih turbulencija. Ispitane su osobine OCDMA FSO sistema u smislu odnosa signal-interferencija i šum (SINR), BER-a pri kombinovanim atmosferskim turbulencijama, interferencija sa više pristupa (MAI), brzina prenosa, parametri kanala, dužina koda itd. Takođe se proučavaju i različite vrste predajnika i prijemnika, poput: SIMO, MISO i MIMO preko turbulentnog kanala sa OKK direktnom detekcijom preko Rake prijemnika, kako bi se procenili nedostaci u snazi, osetljivost i poboljšanje kapaciteta prijemnika za vrednost BER-a od 10^{-9} . Na kraju, rezultatima se potvrđuje efikasnost MVOCDM-hibridne šeme analitičkog modela kao kandidata za bežičnu optičku zemaljsku komunikaciju u budućnosti. Rad [29] opisuje teorijske ograničavajuće faktore FSO kanala, šeme adaptivne modulacije, prostorni diverzitet kao i hibridni RF/FSO sistem.

2.4. Princip rada FSO (Free space optics) tehnologije

FSO podrazumeva tehnologiju optičkog prenosa u slobodnom prostoru, koja se zasniva na bežičnom prenosu signala od tačke do tačke, gde se kao prenosni medijum koriste talasi u IR i VL delu elektromagnetnog spektra. Drugim rečima, FSO je LOS tehnologija koja koristi laserski snop za bežični prenos podataka u slobodnom prostoru. FSO prijemnici sadrže teleskopska sočiva koja skupljaju svetlosni snop i prenose digitalnu informaciju do odredišta brzinama reda veličine Gbps. Primena širokog optičkog spektra omogućava prenos velike količine podataka, pa je FSO prenos alternativa radio relejnoj vezi, jer se svetlosni signal prostire kroz vazduh većom brzinom nego kroz optički kabl. Na otvorenom FSO veza funkcioniše u VL i UV delu elektromagnetnog spektra, a pod vodom i u zatvorenom prostoru u delu blizu IR i VL opsega [30].

Za razliku od RF tehnologije, koja je osetljiva na slabljenja usled višeputnog prostiranja signala, FSO sistem koji radi na visokim frekvencijama prevazilazi ovu vrstu slabljenja.

Digitalni podaci kao što su: glas, slika/video, datoteke itd. se prvo, pomoću optičkog predajnika, konvertuju u svetlosne signale, a zatim modulišu odgovarajućom šemom, dalje ovaj multipleksirani signal tako putuje kroz FSO kanal u optičkom domenu, na prijemu je fotodetektor i demultiplekser gde se signal dalje prebacuje u električni domen.

2.4.1. Prednosti i mane FSO sistema

Prenosni otvor, za NIR talasne dužine, se kreće od 700nm-1600nm, dok su talasne dužine za RF između 30mm i 3m, dakle optička talasna dužina je mnogo manja od RF talasne dužine, time je i propusni opseg FSO tehnologije mnogo širi od RF-a opsega. FSO sistemi, najčešće, kao noseće signale, koriste laserske zrake veoma uskog spektra koji pružaju veliku brzinu prenosa podataka između dve fiksne tačke na udaljenosti od nekoliko kilometara, pri čemu je prenos otporan na elektromagnetne smetnje. Za razliku od radio talasa, optički snop ne prodire kroz zidove. Zbog širokog propusnog opsega FSO sistemi imaju mnogo veću brzinu prenosa od RF sistema. Koherentnost i niska divergencija optičkog zraka omogućava instalaciju većeg broja paralelnih FSO veza. Prednosti upotrebe optičkog spektra, u odnosu na druge frekvencijske opsege su: veliki propusni opseg, dobar odnos SNR-a, lakoća povezivanja sa postojećom infrastrukturom itd. Frekvencijski opseg za talase preko 300GHz, koje koriste FSO sistemi, je nelicenciran tj. ne zahteva nikavu finansijsku nadoknadu, što znatno smanjuje cenu sistema. Ekonomičnost FSO sistema se ogleda i u nižim troškovima instalacije i održavanja. Za razliku od RF sistema, optičke komponente troše manje energije i pokazuju ultra-nisku latenciju.

Divergencija snopa je direktno proporcionalna talasnoj dužini. Kao rezultat toga, optički snop je mnogo uži nego kod RF signala, pa je i jačina primljenog signala većeg intenziteta. Zbog manje talasne dužine veličina antene je mnogo manja kod FSO sistema, ali su usmerenost i pojačanje antene bolji nego kod RF bežičnih sistema. Međutim usmeravanje sa većim talasnim dužinama je manje podložno uticaju fedinga. Zaključujemo da je izbor talasne dužine važan parametar koji utiče na performanse veze. S druge strane, ekonomski faktor, dostupnost komponenti, pitanje bezbednosti za ljudske oči, u velikoj meri utiču na izbor talasne dužine u FSO mreži. Ukratko, izbor talasne dužine je rezultat kompromisa između greške u usmeravanju i osetljivosti prijemnika. Za razliku od RF sistema optički snop se ne može detektovati analizom spektra. FSO primopredajnici su laki za postavljanje, male su mase, kompaktni su i lako nadograđivi.

Međutim, FSO komunikacija ima i nedostatke. Performanse FSO veze se intenzivno pogoršavaju usled efekta atmosferske turbulencije, jake kiše, magle, snega, oblaka. Ograničavajući faktori kao što su: disperzija zraka, sunčeva svetlost, efekat senke degradiraju sistem u smislu parametara kao što su: verovatnoća greške po bitu (BER), vrednost odnosa signal/interferencija (SINR), verovatnoća otkaza sistema. Turbulencije u atmosferi kao što su promena brzine vetra, neravnomerna temperatura, atmosferski pritisak, utiču na širenje optičkog snopa duž FSO veze u tempo-prostornom domenu. Atmosferska turbulencija izaziva fazne pomake optičkog zraka što rezultira izobličenjem signala. Scintilacija je izobličenje intenziteta širenja svetlosnih impulsa izazvano atmosferskim turbulencijama [31]. Vлага, aerosoli, varijacija temperature i pritiska stvaraju odstupanja u indeksu prelamanja, tzv. vrtlozi. Promena indeksa prelamanja vazduha, kod nekih talasnih frontova, koji imaju različitu fazu, izaziva interferenciju i varijaciju amplitude. Zbog toga primljeni optički signal nesumično fluktuiira i izaziva izobličenja. Ukoliko su dimenzije turbulentnih vrtloga veće od radijusa snopa dolazi do savijanja laserskog zraka. Na prijemu se javljaju vremenske fluktuacije intenziteta svetlosti, izazivane varijacijama u vremenu dolaska višestrukih talasnih frontova.

Odnos (error/ jitter) je još jedan parametar FSO sistema koji se definiše kao digresija između očekivanog položaja antene i njenog stvarnog položaja. Drugim rečim, mehanička neusklađenost FSO primopredajnika i mehaničke vibracije, uzrokuju grešku u sistemu za praćenje. Zbog jake usmerenosti zraka sa FSO predajnika, svaki prijemnik mora biti precizno poravnat. Neželjeni objekti u LOS vezama prekidaju komunikaciju između prijemnika i predajnika. Još jedan važan ograničavajući faktor su oblaci, tj. skupljanje kapljica vode i kristali koji se suspenduju u vazduhu. Oblaci uzrokuju slabljenje, rasipanje i apsorpciju snopa laserskog zraka koji putuje kroz vazduh, takođe i magla izaziva jedno od najvećih ograničenja u radu FSO sistema. Ukratko magla i kapljice kiše izazivaju refleksiju i prelamanje svetlosti što degradira rad FSO sistema [32].

2.4.2. Klasifikacija FSO

Zbog rasta broja bežičnih uređaja i raznih multimedijalnih aplikacija, raste i potreba za RF spektrom, međutim ovde je većina podopsega već licencirana. Ipak, tokom proteklih decenija primena FSO tehnologije je ostala ograničena na vojnu upotrebu, satelitske veze i aplikacije kratkog dometa [33], mada se razvija i uvođenje FSO sistema u zemaljsku komunikaciju [34]. Razvoj efikasnog bežičnog sistema kao što je FSO je od suštinskog značaja

za aplikacije heterogene komunikacije i to u rasponu od komunikacije između zgrada do satelitskih veza.

Uzimajući u obzir udaljenost veze i geografsku lokaciju, FSO tehnologija se može koristiti u četiri različita scenarija: atmosfera, zatvoreni, svemirski i podvodni prostor. Atmosfersko okruženje se smatra spoljašnjom zemaljskom FSO komunikacijom, komunikacija u zatvorenom prostoru podrazumeva kućno okruženje, dok svemirska FSO komunikacija podrazumeva vezu van Zemljine atmosfere. Zemaljska FSO komunikacija se odnosi na uspostavljanje veze u spoljašnjoj sredini LOS mehanizmom od tačke do tačke. FSO komunikacija je obećavajuće rešenje za pristup poslednjoj milji i za širokopojasni pristup internetu. Optičko povezivanje se često koristi za za uslugu FTTH (fiber to home), međutim zbog geografskih ograničenja većina korisnika nije povezana na ovu uslugu. Inače, ova tehnologija omogućava veliki propusni opseg na velikim udaljenostima. Što je najvažnije, integracija FSO-a sa bežičnim RF mrežama minimizira probleme kapaciteta i skalabilnosti sa većim nivoom QoS-a. Činjenica je da je spektralna efikasnost i pouzdanost RF bežičnog sistema jako oslabljena kada su dužina i broj skokova veliki.

FSO kućno umrežavanje (FSO-HN) se koristi za unutrašnje širokopojasne bežične mreže u kući, zgradi ili kancelariji. FSO-HN ima domet od nekoliko metara do nekoliko desetina metara. Hardver je obično prenosiv, jeftin, male mase i bezbedan za ljude. Više malih terminalnih ćelija povezanih preko optičke bežične veze kratkog dometa čine vezu u jednoj zgradi. Za razliku od radio signala, optička svetlost ne može da prođe kroz zidove, pa je svaka mala ćelija ograničena na određeni prostor a svi terminali su dalje povezani na kičmu velike brzine. Optički snopovi se mogu ponovo koristiti jer terminali ne stvaraju smetnje među susednim ćelijama. U poređenju sa ne-LOS vezama, LOS FSO tehnologija ima visoku propusnost i izuzetno nizak BER. Izvor difuznog svetla se obično koristi u zatvorenom prostoru za raspršivanje svetlosnih snopova u ne-LOS vezama. Usled višestrukog širenja, koje uzrokuju različiti objekti, kao što su plafon, zidovi, nameštaj, ne-LOS veza pokazuje robusnije performanse [35]. Međutim, difuzna veza ima nižu brzinu bita u poređenju sa LOS vezama i kompromis između pouzdanosti veze i kapaciteta.

FSO svemirska veza se može dalje podeliti na međuorbitalnu, međusatelitsku i vezu sa dubokim svemirom. FSO obezbeđuje međusatelitsku vezu velikog kvaliteta. Upotrebom FSO tehnologije, veza satelit-link krajnjem korisniku obezbeđuje dobar kvalitet bez obzira da li je prijemnik u pokretu (avion, vozilo u pokretu...) ili stacionaran. Ograničenje u pokrivenosti

udaljenih ćelija može se prevazići zahvaljujući satelitskoj širokopojasnoj komunikaciji zasnovanoj na FSO tehnologiji.

Na osnovu pokrivenosti, klasifikacija FSO sistema se može predstaviti na sledeći način:

- Ultra kratka udaljenost, integrisana komunikacija između čipova primopredajnika, udaljenost je nanometarska [36].
- Kratka udaljenost, komunikacija u zatvorenom prostoru vidljivim svetlom za bežične lokalne mreže (VLAN), komunikacija između pametnih vozila, (V2V) i V2X [37].
- Međugradska komunikacija, komunikacija između zgrada [38].
- Izuzetno velike udaljenosti, satelitske veze (međusatelitske, satelit-zemlja, satelit-avion) [39].

2.4.3. Primena FSO sistema

FSO sistemi su prvenstveno privukli pažnju kao rešenje uskog grla poslednje milje koja se javlja kod optičkih vlakana, FSO je i alternativa kada je upotreba optičkih vlakana neizvodljiva ili neisplativa. Neki od primera upotrebe FSO sistema su:

- Povezivanje među zgradama (npr.kampus/preduzeće/stambeni prostor). Zgrade različite namena (škole, kancelerije preduzeća) imaju potrebu za heterogenim komunikacionim saobraćajem (glasovni podaci, multimedijalni sadržaj, faks, prenos datoteka itd.). FSO tehnologija može da podrži ovakvu komunikaciju uz pružanje velikih brzina i niske cene instalacije sistema. Takođe, FSO veza može da podrži i komunikaciju geografski odvojenih objekata npr. broda i kopna.
- Video nadzor, bežični video nadzor se koristi kako u vojnim tako i u komercionalnim i javnim sistemima bezbednosti. FSO sistemi obezbeđuju veoma kvalitetni video prenos.
- Backhaul (rezervni link) za mobilne mreže. Komunikacija između ćelijskih baznih stanica podrazumeva žičanu T1/E1 vezu i mikrotalasnu bežičnu vezu. FSO je alternativna tehnologija koja mobilnoj komunikaciji može da obezbedi proširenje mobilnih usluga i veće brzine prenosa.
- Praćenje katastrofa. Postoje mnogi događaji koji se prate uživo, tako da je u realnom vremenu potrebno poslati HD signal visoke rezolucije. FSO sistem je sposoban da

zadovolji visok kvalitet prenosa između različitih čvorova do krajnjeg korisnika. Takođe, privremene FSO veze, koje su jednostavne za instalaciju, su pogodne za praćenje nemilih događaja, kao što su vanredne situacije, prirodne katastrofe, teroristički napad itd. FSO sistem se lako postavlja u oblastima gde ne postoji ili nije moguće uspostaviti žičanu mrežu.

- Bezbednost. Sajber bezbednost i uopšte računarska bezbednost je jedno od najvažnijih pitanja u danjašnjoj komunikaciji, jedan od primera za to je bezbedan transfer novca. Kvantna kriptografija pruža bezuslovnu sigurnost i uglavnom je povezana sa infrastrukturom optičkih vlakana. Kako FSO sistem ne dozvoljava mogućnost presretanja signala, tako i neželjeni korisnici ne mogu da hakuju informacije.
- Problem poslednje milje. Većina zgrada je još uvek povezana koaksijalnim ili optičkim kablovima, pa većina krajnjih korisnika nema pristup infrastrukturi optičkih vlakana (FTTH). FSO sistem je rešenje koje udaljenim krajnjim korisnicima (npr. korisnici u ruralnim područjima) može da obezbedi kvalitetnu vezu velike brzine. Takođe, u slučaju prekida veze optičkim vlaknom, FSO sistem može trenutno da obnovi vezu i obezbedi uslugu širokopojasnog interneta na udaljenim lokacijama gde konvencionalna tehnologija to ne može da postigne.
- IoT i 5G. Koncept IoT zahteva komunikaciju izvan konvencionalnih multimedijalnih uređaja, tj. zahteva razmenu informacija između ovih uređaja i spoljašnje sredine. Primena IoT zahteva visok propusni opseg, veliku brzinu prenosa, bezbednost, minimalna kašnjenja i prenos podataka bez smetnji. Implementacija 5G tehnologije u IoT i linkovi FSO sistema velike brzine proširuju područje pokrivenosti i poboljšavaju performanse sistema [40]. Drugim rečima, integracija FSO sistema sa IoT preko 5G povezivanja može zadovoljiti zahteve za realizaciju globalnog IoT-a.
- Satelitska komunikacija. Zajedno sa daljinskom detekcijom i radio astronomijom, FSO tehnologija se uspešno može upotrebiti u svemirskoj komunikaciji. FSO tehnologija omoćucava energetski efikasnu međusatelitsku vezu na velikim udaljenostima. Zraci orbitalnog ugaonog momenta (OAM) imaju sposobnost prenosa podataka vezom velikog kapaciteta i odličnih performansi i to u udaljenostima dubokog svemira.

- Backhaul mreže velikog kapaciteta. Backhaul mreža pravi most između pristupne mreže i osnovne (osovinske) mreže. Backhaul mreža mora da poseduje veliku brzinu povezivanja za prenos ogromnih količina podataka između pristupne mreže (AN) i osnovne mreže (CN) za tehnologiju 5G/B5G ili IoT. Javlja se zgušnjavanje ćelijskih mreža usled masovnog postavljanja malih ćelija, čiji je cilj povećanje kapaciteta sistema i frekvencijskog opsega. U gusto naseljenim područjima, sa velikim intenzitetom saobraćaja, vrši se ugradnja dodatne infrastrukture u postojeće pristupne mreže. Kraća udaljenost od korisničke bazne stanice, u 5G/B5G mrežama obezbeđuje manji fading (bleđenje signala) tj. veću propusnost. Visok kapacitet Backhaul-a je od suštinskog značaja za aplikacije dugog dometa, kao što je komunikacija između zgrada ili komunikacija satelit-satelit. Iako AN ili CN podržavaju brzine veličine Gbps, ako rezervna mreža nije velikog kapaciteta doći će do stvaranja uskog grla. Postojeće Backhaul mreže su podržane optičkom infrastrukturom, koaksijalnim ili bakarnim kablivima, mikrotalasnom i mmWave vezom, a nekad i satelitskim linkom. Zajedno sa mrežama sa optičkim vlaknima, FSO sistem nudi efikasno rešenje problema transporta niskog kapaciteta, posebno u spoljašnjoj Backhaul vezi na daljinu. FSO sistem Backhaul mrežama omogućava povezanost na velikim udaljenostima, na primer: pod vodom, u svemirskoj komunikaciji, komunikacija sa udaljenim ostrvom itd. U ovom slučaju FSO sistem može da obezbedi, za tehnologiju od tačke do tačke, kašnjenje manje od jedne milisekunde, sa brzinom prenosa podataka od 40Gbps. Možemo da zaključimo da FSO sistem mrežnoj platformi Backhaul može da obezbedi veliki obim saobraćaja, masovnu komunikaciju sa IoT uređajima, najmanju potrošnju energije, veću spektralnu efikasnost kao i isplativost. Za razliku od NLOS veze, FSO LOS link postiže veći kapacitet, upravo zbog odsustva kašnjenja usled višestrukog prostiranja signala i efektivne veze za napajanje. S druge strane kod NLOS veze javlja se raspršivanje svetlosnog snopa usled refleksije koju stvaraju različite prepreke.
- Komunikacija od uređaja do uređaja (D2D). Mehanizam komunikacije od uređaja do uređaja (D2D), koja može biti komunikacija od mašine do mašine (M2M), od vozila do određene infrastrukture (V2X), od više tačaka do više tačaka, od kraja do kraja, mogu se primeniti u zdravstvu, saobraćaju, industriji, tržišnim centrima itd. Ograničenja skalabilnosti RF mreže (npr. tačnost i propusnost za veliki broj skokova), lako se mogu prevazići FSO mrežama, preko postojećih bežičnih mreža velike brzine.

2.4.4. FSO u IoT, 5G i B5G

Komunikacija 5G tehnologijom omogućava ultra visoku propusnost, povezivanje pametnih uređaja, izuzetno nizak nivo kašnjenja, visok nivo enkripcije, nisku potrošnju energije, i visok kvalitet usluga [41]. U cilju povećanja mrežnog kapaciteta i kvaliteta usluga, 5G mreže se na široko primenjuju, i to u heterogenim malim ćelijama (kombinacija makroćelije, mikroćelije, pikoćelije i femtoćelije) [42]. 5G i B5G mreže zahtevaju ultra gustu HetNet implementaciju. 5G/B5G mreže imaju mogućnost prenosa podataka brzinom i do 10Gbps, broj povezanih elektronskih uređaja je deset do sto puta veća nego kod 4G mreža, što rezultira hiljadu puta većim obimom protoka podataka [1]. 5G tehnologija troši 90% manje energije nego 4G mreža. Očekuje se da će B5G mreže imati četiri puta veću spektralnu efikasnost i mnogo niže troškove postavljanja od 4G mreža. Još jedna od značajnih karakteristika 5G/B5G mreža je mogućnost prebacivanja ogromnih količina podataka, u zatvorenom prostoru, iz malih ćelija u mikroćelije [43].

FSO podržava 5G komunikaciju zajedno sa Backhaulingom velike brzine prenosa, kapaciteta i povezanosti sa IoT uređajima. U poređenju sa RF sistemima, FSO koncept zahteva mnogo manji utrošak energije [44]. IoT sistemi zahtevaju male troškove implementacije, imaju visok nivo sigurnosti, energetske efikasnosti, isplativost i povezanost sa velikim brojem pametnih uređaja, FSO tehnologije, zbog male snage LED ili LD, može da obezbedi ove uslove. Upotrebom FSO sistema, jakim šifrovanjem, može se obezbediti i visoka bezbednost sistema.

FSO u svemirskoj komunikaciji - Sa razvojem satelitskog programa kao i sa istraživanjem svemira javlja se potreba za tipovima veze kao što su: satelitska komunikacija koja podrazumeva uplink (tj. vezu zemlja-satelit), downlink (tj. veza satelit-zemlja), međusatelitska veza, kao i veza sa dubokim svemirom, upravo FSO sistemi se nameću kao rešenje ove problematike [45]. Optički talasi se šire i izobličavaju prilikom puta ka zemlji, dok su gubici mnogo veći za FSO uplink nego za downlink. Varijacije temperature, koncentracija aerosola i vazdušni pritisak utiču na širenje laserskog zraka pri prolasku kroz atmosferu. Ove gubitke možemo definisati kao apsorpciju (apsorberi mogu biti molekuli vode, CO₂) i gubitak usled rasejanja. Gubici usled apsorpcije i rasejanja (dB/km) su funkcije talasne dužine. Za FSO sisteme, gubici usled rasejanja su uočljivi za talasne dužine ispod 1μm, posebno u vidljivom ili ultraljubičastom delu spektra. Pa je izbor dimenzija optičkih prozora (npr. da li se radi o ultra kratkim IR ili kratkim IR talasnim dužinama) ključan parametar dizajna FSO sistema. Rejljevo rasejanje nastaje kada su atmosferske čestice relativno manje od optičkih talasnih dužina [45].

Čestice vazduha i magle uzrokuju Rejljevo rasejanje, dok su aerosoli, kiša, sneg i čestice magle primarni faktori za nastajanje Mijevog rasejanja. U prisustvu guste magle (vidljivost ispod 50m), gubici signala mogu biti veći od 350 dB/km [46]. U takvim uslovima, laseri velike snage koji emituju signale u opsegu trećeg optičkog prozora, pomažu da se poveća pouzdanost veze. Očigledno je da velike kapljice kiše dovode i do većeg slabljenja, jaka kiša (25mm/h) izaziva deset puta veće slabljenje od kiše slabijeg intenziteta (2,5mm/h) i to u rasponu od 1dB/km do 10dB/km za talasnu dužinu od 1500nm. U ovakvim uslovima hibridni RF/FSO sistemi pokazuju dobre performanse.

Atmosferske turbulencije koje izazivaju tzv. vrtloge različite veličine i indeksa prelamanja, stvaraju efekat lutanja zraka, i to kada je veličina vrtloga veća od radijusa snopa. Vrtlozi koji su manji od radijusa snopa izazivaju tempo-prostorne fluktuacije u zračenju na strani prijemnika [47].

Divergencija snopa je važan faktor koji utiče na performanse FSO sistema i dizajn uplink-a kod svemirske komunikacije. Tzv. greda divergencije nastaje u delu pre otvora prijemnika usled difrakcije svetlosti. Jedan deo laserske svetlosti ne biva skupljen na prijemniku pa tako uzrokuje divergencijski ili geometrijski gubitak. Ovaj gubitak, bez obzira na prečnik prijemnika, raste sa rastojanjem. U tom slučaju laserski izvor uskog snopa je poželjniji ako se koristi tehnika diverziti prijema.

Do gubitka usmerenja može doći usled male vibracije satelita, malog stresa mehaničkih ili elektronskih uređaja ili pojave jitter-a. Mala neusklađenost između prijemnika i predajnika može usloviti otkaz FSO veze, tako da je veoma važno koristiti LOS usmerenost sa uskim snopom divergencije [48]. Efekat disperzije zraka može da pomeri propagaciju putanje emitovanog snopa, što uzrokuje gubitke u prenosu. Greška u usmeravanju značajno smanjuje snagu na prijemniku i odnos SINR što dovodi do visokih vrednosti BER-a tj. otkaza FSO veze. Stoga se moraju instalirati FSO uređaji bez vibracija i pomoću kontrole propusnog opsega se može pokušati da se nadoknadi slabljenje nastalo usled treperanja snopa. Greška usmeravanja je očiglednija u oblasti niže Zemljine orbite (LEO), nego kog GEO satelita [48]. Greška usmeravanja izaziva degradaciju sistema, koja se manifestuje ispadom, posebno, u spektru vidljive talasne dužine kao i BER-om. Šum u senzorima za praćenje i mehaničke vibracije sistema uzrokuju grešku u praćenju. Tehnika za kompenzaciju greške praćenja i pokazivanja, za uplink FSO svemirske komunikacije dati su u literaturi [49].

Prisustvo gustih oblaka remeti signale, čak i potpuno blokira vezu. U zavisnosti od geolokacije ili sezone ovi poremećaji mogu trajati od nekoliko sekundi do nekoliko sati. Neprozirni oblaci mogu dovesti do velikog slabljenja, reda veličine i nekoliko desetina decibela. Zbog efekta atmosferske turbulencije, optički signal fluktuiira u fokalnoj ravni fotodetektora ili dovodi do pomeranja fokusne tačke. Ovaj efekat je poznat kao fluktuacija ugla dolaska i može se ublažiti primenom adaptivne optike ili primenom retrovizora za upravljanje brzinom snopa. Navedena ograničenja u FSO svemirskoj komunikaciji rešavaju se pravilnim dizajnom, što podrazumeva radnu talasnu dužinu, divergenciju snopa, intenzitet prenešene snage, vidno polje primopredajnika (FOV- Field of View).

Međusatelitske svemirske FSO veze, kod kojih su sateliti daleko od sloja atmosfere, ne trpe vremenska i atmosferska ograničenja. Ali, međusatelitska FSO komunikacija je suočena sa drugom vrstom problema, to je akvizicija i praćenje (AT) satelitske stanice, Doplerov pomak i pozadinsko zračenje. Zbog velikih udaljenosti, metoda koherentne detekcije je prihvatljivija u odnosu na direktnu detekciju. Za saniranje uticaja Doplerovog pomeranja pribegava se podešavanju frekvencije između emitovanih signala i lokalnog oscilatora (LO). Homodinska ili heterodinska koherentna tehnika održava energetska efikasnost veze i obezbeđuje dobru osetljivost prijemnika [50]. Za FSO linkove u dubokom svemiru, koncept detektorskih nizova pomaže u prikupljanju svetlosnih signala čak i kada postoji neusklađenost primopredajnika. Primena niza prijemnih detektora omogućuje postizanje boljih performansi, u smislu vrednosti BER-a i odnosa SINR.

2.5. FSO primopredajnik

FSO komunikaciju, uopšteno, možemo podeliti u tri faze: optički prenos kroz atmosferu koji je definisan Beer-Lambert-ovim zakonom, prostiranje kroz kanal gde se akumuliraju različiti šumovi i turbulencije i prijemni deo za obradu signala koji sadrži određene elektronske uređaje sa sopstvenim nedostacima i šumovima.

1) FSO predajnik je optički predajnik koji se sastoji od izvora svetlosti, modulatora, optičkog pojačala (optional) i mehanizma za formiranje linka. Bitovi dolaznih podataka su kodirani pre modulacije. Modulirani svetlosni snopovi se pojačavaju optičkim predpojačivačem. Zatim se laserski zraci sakupljaju i ponovo fokusiraju optikom za formiranje zraka u pred prenosu. Kao optički izvori se najčešće koristi svetlost LED ili laserske (LD) diode.

Sa razvojem tehnologije poluprovodničke rasvete, fluorescentne i lampe sa žarnom niti zamenjene su LED diodama visokog intenziteta. Prednosti koje imaju LED diode su: energetska efikasnost, duži vek trajanja, niži nivo disipacije, kao i to što se za njihovu izradu ne koriste toksični materijali [51]. LED diode omogućavaju brže prebacivanje svetlosti različitog intenziteta, što ove diode čini brzim OWC predajnikom i visokoefikasnim optičkim izvorom. S druge strane, laserski izvori su monohromatski sa jednom izlaznom talasnom dužinom. LD dioda radi kao koherentni izvor svetlosti, gde se ceo emitovani svetlosni front prostire istim pravcem u istom intervalu vremena. Usled koherentnih karakteristika LD svetlosti, signal LD diode prelazi veće udaljenosti, većom brzinom sa manje smetnji u odnosu na svetlost LED izvora.

Glavno ograničenje LED izvora je nekoherentna priroda emisije svetlosti. Zbog uskog otvora LED izvora moguća je komunikacija samo od tačke do tačke. Iako su na tržištu dostupne LED diode velike snage, čiji snop dostiže razdaljinu od nekoliko kilometara, u FSO sistemima se, najčešće, koriste poluprovodničke laserske diode upravo zbog intenzivne optičke snage. Pored toga, LED diode omogućavaju širok opseg modulacije u velikom rasponu temperature. Drugi važan faktor laserskih dioda je bezbednost po ljudske oči. S druge strane, LED diode se više koriste u zatvorenom prostoru, sa nižom brzinom prenosa podataka. VCSEL izvori se, obično, koriste za prvi prozor prenosa, i rade na 850nm talasne dužine, dok se Fabri-Perot laseri i laseri sa distribuiranom povratnom spregom (DFB) koriste za rad na trećem VDM prozoru za prenos od 1550nm talasne dužine [29]. Zbog sigurnosti po ljudske oči LD komponente su ograničene na 1550nm.

2) FSO prijemnik. Na optičkom prijemniku, optički signal se u vidu fotona prikuplja na optičkom detektoru i na fotodetektoru (PD), koji pomoću transimpedantnog kola, fotone pretvaraju u električnu struju. FSO prijemnik upravlja detektovanom električnom strujom, gde se, dalje, preko elektronskih uređaja generiše originalni signal. Optički signal koji je pretvoren u električni se zatim propušta kroz niskopropusni filter (LPF), da bi se ograničio nivo pozadinskog i termalnog šuma. U FSO sistemima se najčešće koriste PiN PD (pozitivno-unutrašnje-negativni PD) i lavinski fotodetektor (APD). PiN PD detektori imaju nisku cenu, tolerišu velike promene temperature, mogu da rade sa niskom propusnošću, koriste se u FSO sistemima sa kratkim dometom i niskim brzinama [30]. Učinak PiN PD ograničen je termičkim šumom. S druge strane APD-ovi, zahvaljujući udarnoj jonizaciji, imaju dobitak u množenju i bolji odnos SNR, samim tim su poželjniji izbor za FSO sisteme velikih brzina i udaljenosti.

Iako APD-ovi imaju superiorne performanse, jako su skupi, zahtevaju veliku potrošnju energije i lavinski dobitak je temperaturno osetljiv [29].

Uređaji koji u čvrstom stanju imaju dobru kvantnu efikasnost, se naširoko koriste u komercijalnim FSO sistemima, na talasnim dužinama od 850 i 1550nm. Si PD su pogodni za rad na kraćoj talasnoj dužini od 850nm, dok InGaAs PD podrazumevaju nisko tranzitno vreme, brz odziv na 1550nm talasne dužine. Sa upotrebom materijala od grafena, dvodimenzionalnih materijala, kvantne tačke nanočestica, fotodetektori razvijaju ultra brzine u širokom opsegu talasnih dužina [52].

U cilju poboljšanja FSO veze sa više linkova, koriste se optička pojačala (OA) [53]. Pojačalo sa vlaknima dopiranim erbijumom (EDFA) se koristi sa poluprovodničkim optičkim pojačavačem (SAO) koji radi na talasnoj dužini od 1550nm. Ipak optički pojačavač stvara spontanu emisiju buke (ASE), koja degradira performanse sistema u smislu nivoa SNR. Međutim, OA može da se nosi sa pojavom termičkog šuma i smanjuje efekat scintilacije u slučaju slabe turbulencije [54]. Na prijemniku se javljaju različiti tipovi šuma, šum tamne struje, šot šum (naziva se i kvantni šum) i termalni šum. Šum tamne struje PD-a može se zanemariti u većini praktičnih slučajeva. Šum relativnih intenziteta lasera (RIN) na prijemniku izaziva fluktuacije fotostruje, ovaj šum je rezultat nestabilnosti intenziteta LD-a. Slično šumu tamne struje, RIN izaziva zanemarljiv uticaj na SNR performanse prijemnika. Dva glavna izvora šuma su šot šum i termalni šum koji utiče na performanse sistema ukoliko se pozadinsko osvetljenje smatra zanemarljivim. Pored toga osetljivost prijemnika u APD tehnologiji zavisi od pojačanja udarne jonizacije i otpornosti opterećenja. Termalni šum je funkcija otpora opterećenja koja potiče od elektronskih kola, koja se može modelirati kao nulti srednji Gausov slučajni šum. Šot šum nastaje usled slučajnih fluktuacija električne struje koja teče u PD-u ili od pozadinskog zračenja koje se može modelovati Poisson-ovim procesom [55]. Ukoliko je broj apsorbovanih fotona relativno velik, šot šum se može približno modelovati Gausovim procesom. Što se tiče FSO sistema, raspodela šot šuma se aproksimira Gausovim modelom [56].

2.6. Pouzdanost FSO sistema

Pitanje pouzdanosti je jedno od najbitnijih pitanja svakog sistema. FSO sistemi dostižu visok nivo SINR-a kada je u pitanju komunikacija u zatvorenom ali i na otvorenom prostoru na velikim udaljenostima. Ograničavajući faktori kao što su: rasipanje, apsorpcija, varijacije u

atmosferskoj vidljivosti, prekidaju visoku brzinu prenosa podataka i pogoršavaju performanse i pouzdanost FSO sistema. Atmosferske turbulencije su glavni izvor degradacije veze. FSO prenos se mora ostaviti i u teškim vremenskim uslovima, tj. pod uticajem višeputnog fedinga, disperzije snopa i fluktuacije prijemnog signala, koja se javlja usled atmosferskih turbulencija. Loša usmerenost linka može uzrokovati širenje snopa sa divergencijom od nekoliko mrad-a. Rezultat neusmerenog snopa je gubitak veze. U optičkoj komunikaciji lako se može proceniti prijemna snaga, dok je kod FSO sistema usled atmosferskih turbulencija i nehomogenosti vazduha, to mnogo složenije. Kako je prostiranje optičkog signala podložno velikom uticaju atmosfere, može doći do gubitka signala ili faznog pomeranja/fluktuacija intenziteta signala, što smanjuje odnos SINR na prijemu, dostupnost linka i povećava vrednost BER-a na prijemu. Pojava magle značajno pogoršava vidljivost i NIR zračenje, veći procenat vlažnosti vazduha smanjuje kvalitet optičkog signala na prijemu. Efekat scintilacije je uočljiviji kod prenosa na velike daljine, što degradira sveukupnu pouzdanost sistema. S druge strane, atmosferska molekularna apsorpcija je funkcija talasne dužine. Pa je ključno pitanje za uspešno postavljanje FSO sistema izbor radne talasne dužine, na licu mesta, u skladu sa atmosferskim uslovima. Važno je uzeti u obzir kašnjenje od tačke do tačke, gubitak paketa, podrhtavanje i tačnost projektovanja i algoritama u FSO sistemima. Nekompatibilnost TCP protokola sa FSO sistemom može izazvati slabije performanse protoka, stoga je potrebno razviti prilagodljivije protokole.

Za dugoročni dizajn FSO sistema moraju se uzeti u obzir statistički podaci o atmosferskom ponašanju za konkretnu lokaciju. Nakon ovih analiza budžet veze (link budget) se može izraziti kao [57]:

$$R_{LM} = P_{TX} - S_{RX} - L_p \quad (2.1)$$

gde je P_{TX} snaga prenosa, S_{RX} osetljivost prijemnika a L_p gubitak širenja. Jednačina (2.1) daje osnovnu marginu veze (LM), kojom se izražava pouzdanost veze, LM (pouzdanost veze) se može definisati i kao [58]:

$$R_{LM} = \frac{P_{RX}}{P'_{RX}} \quad (2.2)$$

gde je P_{RX} snaga dostupna na prijemu, a P'_{RX} je snaga koja je potrebna na prijemu da bi se održao određeni nivo BER-a pri određenoj brzini prenosa. R_{LM} definiše marginu gubitaka

potrebnih za kompenzaciju efekta turbulencije, na određenoj pokrivenosti. Da bi se FSO sistem smatrao pouzdanim potrebno je da kašnjenje nije veće od pet minuta godišnje (pouzdanost veze je oko 99,99%) [59]. Primera radi, ako laser prenosi snagu $P_{RX}=30\text{nV}$, ako je osetljivost fotodetektora $S_{RX}=25\text{nV}$, gubitak neusklađenosti $L_a = 3\text{dB}$, optički gubitak $L_0 = 4\text{dB}$, onda je procenjena $R_{LM}=54\text{dB}$. Za određen nivo BER-a, nivo opsega primljene snage (P_{RX}) definiše pouzdanost veze. FSO sistem ne može da postigne željeni nivo BER-a, za minimalni SINR, kada uslov $P_{RX}>P_{Th,r}$ ili $P_{RX}<S_{Rk}$, gde $P_{Th,r}$ predstavlja vrednost zasićenja za određeni nivo P_{RX} . Dostupnost veze za prenos podataka T_a se definiše kada propusnost premašuje graničnu vrednost, pri određenoj vrednosti BER.

$$T_a = \int_0^{\alpha_a} p(\alpha_a) d\alpha_a \quad (2.3)$$

gde α_a predstavlja koeficijent atmosferskog slabljenja, pa je njena funkcija raspodele verovatnoće [60]:

$$\alpha_a = \frac{17,3}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}, \text{dB} / \text{km} \quad (2.4)$$

gde je V izmerena vidljivost za procenjenu α_a vrednost q se bira na osnovu parametra V . Za određenu lokaciju i razdaljinu T_a je parametar koji je jako koristan za procenu performansi FSO sistema. U automatizovanim FSO sistemima, za izračunavanje T_a ne uzima se u obzir greška pri podrhtavanju [61].

Pouzdanost linka se može izračunati i na osnovu jednačine:

$$R(l) = \int_{I_{th}}^{\infty} p(I) dI = 0,5 - 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln I_{th} / I_0}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (2.5)$$

gde $p(I)$ označava kumulativnu raspodelu verovatnoće zračenja, I_{th} prag intenziteta, l predstavlja udaljenost prenosa datu u metrima, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ je komplementarna funkcija greške, I_0 označava prosečan intenzitet bez turbulencija i σ je parametar varijanse. Pouzdanost veze FSO sistema varira u opsegu od 0 do 1, gde je $R(l)$ inverzno proporcijonalno udaljenosti veze. Može se smatrati da je FSO veza uspostavljena kada je pouzdanost veća od I_{th} .

U odnosu na RF, ključna prednost FSO mreže je širokopolasna funkcionalnost, koju obezbeđuje širok frekventni opseg što dalje obezbeđuje ultra-brzine. Laser koji radi u opsegu 1550nm talasne dužine, propusnog opsega 200THz ima 200 000 puta veću brzinu prenosa podataka od brzine koju ima mikrotalasna veza [62]. FSO sistemi su posebno povoljno rešenje sledeće generacije širokopolasnih bežičnih mreža, za rešavanje problema uskog grla poslednje milje. FSO primopredajnici zahtevaju napredan nivo automatizacije, u kojoj su samokonfigurisanje algoritma i samopopravka mogući.

Za održavanje visoke pouzdanosti FSO veze, u literaturi su predložena rešenja kao što su PAT tehnika prenosa [39], [63] mehanizam diverziteta [64], hibridni RF/FSO sistemi [65]. Optički signal može biti blokiran u potpunosti ili delimično privremenim preprekama kao što su: jata ptica, dronovi, bespilotne letilice, industrijski dim, grane drveća itd. Ove privremene fluktuacije mogu se prevazići upotrebom MIMO FSO šeme, gde signal blokiran objektom, bilo na Tx ili Rx strani nema nikakav značajan učinak na FSO sistem. Današnje komercijalne FSO veze se proširuju sledećim tehnikama: kombinacijom divergencije snopa, praćenjem-usklađivanjem snopa, zaključanom faznom petljom za oporavak takta (CRPLL). Velika moć laserskog zračenja ublažava atmosferske smetnje i omogućava velike brzine prenosa podataka. Međutim, laseri ekstremno velike snage, koja prevazilazi određenu graničnu vrednost, su štetni za ljudski vid pa su bezbednosni propisi jedno od najvažnijih pitanja tokom projektovanja FSO sistema. Optički sistem zahteva nisku snagu prenosa za jasno definisane uslove, dok je za obezbeđivanje željenog nivoa BER-a i QoS-a potrebna velika snaga lasera. Na vremenski diverzitet (raznolikost) FSO kanala direktno utiču: varijacija temperature, geografska lokacija, brzina vetra, nadmorska visina, vazdušni pritisak, vlažnost itd. [66]. Da bi se ublažilo prostorno izobličenje prijemnog zraka postoje brojne tehnike, kao što su: akvizicija, ukazivanje (PAT), usrednjavanje blende i korekcija talasnog fronta. PAT tehnika je neophodna za održavanje centralne stabilnosti zraka dugolinijske komunikacije, kao što je međusatelitski FSO. Prema [35], optički bežični međusatelitski prenos zahteva preciznost od 1-10 μ rad za brzinu protoka od 10Gbps. Aberacije talasnog fronta podrazumevaju varijacije optičke faze usled atmosferskih poremećaja duž bežičnog puta propagacije. Uopšteno, senzor talasnog fronta ili priključen uređaj sa kamerom, se koristi za merenje distorzije (izobličenje) talasnog fronta, dok se za kompenzaciju greške koriste deformabilno ogledalo (DM) ili elektromehanička ogledala. Sve komponente rade na osnovu procesa upravljanja zatvorenom petljom gde laserski izvor energije prenosi Gausov snop sa udaljene pozicije i dolazi do aberacije dok putuje kroz slobodni prostor. Optička sočiva (DM) akumuliraju sve dolazne zrake i DM se deli na dva snopa: reflektovani

snopovi padaju na priključen uređaj sa kamerom (CCCD) a propagirajući signali padaju na fotodetektor. DSP kontroler pokreće DM da ispravi izmerena izobličenja kroz generisanje odgovarajućih kontrolnih signala na osnovu CCCD izlaza. Integracija napredne optike u FSO komunikaciji poboljšava pouzdanost sistema eliminacijom faznih grešaka [67]. U nastavku su ilustrovane neke obećavajuće tehnike ublažavanja za rešavanje tehničkih izazova sa kojima se susreću mreže FSO-a.

Određivanje veličine otvora blende (dimenzioniranje otvora blende)

Usrednjavanje otvora prijemnika je popularna tehnika za ublažavanje fluktuacija primljenog signala. Područje otvora blende je određeno dužinom prenosa i jačinom prethodno navedenih ograničavajućih faktora. Povećanje dimenzija prijemnika pomaže da se smanji zatamnjenje kanala i brzo zatamnjenje izazvano pojavama vrtloga u snopu.

Usrednjavanje otvora blende pokazuje količinu smanjenja bledenja na platformi fizičkog sloja. Imajmo na umu da se količina pozadinskog šuma povećava sa povećanjem otvora prijemnika (blende). Dakle, izbor radijusa otvora blende treba da bude optimalan za povećanje energetske efikasnosti FSO veze.

Faktor usrednjavanja otvora, F_a na strani prijemnika može se izraziti kao:

$$F_a = \frac{\sigma_I^2(D)}{\sigma_I^2(D_0)} \quad (2.6)$$

gde je D otvor prijemnika, σ_I^2 je snaga signala, a $\sigma_I^2(D_0)$ označava variranje intenziteta signala u centru prijemnika. Za ravan talas F_a se može aproksimirati sa [57]:

$$F_a = \left[1 + 1,07 \left(\frac{kD^2}{4l} \right)^{7/6} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

gde l predstavlja udaljenost veze, k je talasni broj ($2\pi/\lambda$). Za manji otvor blende, $(\frac{kD^2}{4l}) \ll 1$, $F_a = 1.0$ i intenzitet signala se smanjuje sa povećanjem veličine otvora, odnosno za veći otvor važi $(\frac{kD^2}{4l}) \gg 1$. Stoga je usrednjavanje otvora značajan parametar za rešavanje varijacija snage jer antena većeg otvora prikuplja sve snopove signala koji padaju u nju, zato pokazuje relativno nižu scintilaciju izazvanu turbulencijom.

2.6.1. Adaptivna optika (AO)

Adaptivna optika je zasnovana na principu upravljanja zatvorenom povratnom spregom koja pomaže da se laserski snop bez izobličenja prenosi kroz atmosferu. Precizno usmeravanje zraka u smislu položaja i ugla postiže se implementacijom adaptivne optike uz pomoć upravljačkih ogledala u putanji prostiranja zraka. Međutim, elektromehanički uređaji na piezoelektrični pogon obično se koriste za upravljanje snopom, ali u tom slučaju sistem trpi zbog velike zauzetosti prostora i dužeg vremena obrade. AO sistem se sastoji od senzora talasnog fronta i korektora, i seta deformabilnih ogledala na svakoj jedinici primopredajnika za kompenzaciju faznih fluktuacija poda. Proučavanje AO korišćenjem mikro-elektromehaničkih sistema (MEMS) za FSO komunikaciju na daljinu istaknuto je u [68]. Sistem upravljanja snopom zasnovan na MEMS omogućava brzo praćenje i precizno usmeravanje između dva FSO terminala. Pored toga, AO sistemi bazirani na MEMS kontrolišu laserske zrake na uskoj skali veličina, omogućavajući integrisane električne, mehaničke i optičke sisteme. Primena AO u FSO satelitskim komunikacijama prema downlink-u istražena je u [69].

2.6.2. Relejni prenos

Osnovni cilj uvođenja relejnih čvorova u FSO sistem je da se produži link prenosa bez žrtvovanja kvaliteta signala na prijemu - QoS nivoa. Relejni prenos se aktuelizuje u slučajevima kada je veza izvor-odredište lošeg kvaliteta jer se primenom relejnog prenosa obezbeđuju poboljšane performanse sistema, smanjuje uticaj turbulencije i postiže visok nivo SINR uz postizanje višeg nivoa intenziteta primljenog signala u odnosu na šum. Takođe, relejni prenos garantuje poboljšani nivo usluge kvaliteta korisničkog iskustva pod jakim efektima bledenja senke ili gubitka putanje. Mehanizam regenerativnog relejnog prenosa takođe poboljšava pokrivenost mobilnih bežičnih sistema iskorišćavajući dodatne prednosti diverziteta. Relejni prenos eliminiše potrebu za višestrukim otvorom blende na strani predajnika ili prijemnika, jedna antena ima potencijal da postigne značajan diverzitet bez žrtvovanja QoS-a. Izbor postavljanja relejnih čvorova je važan kriterijum dizajna za postizanje ogromnog dobitka diverziteta korišćenjem kooperativnih FSO komunikacija. Proučavanje postavljanja svih optičkih releja i performansi sistema u borbi protiv ograničavajućih faktora sprovedeno je u nekoliko primeraka literature [70].

2.6.3. Modulacije u FSO sistemima

Tehnika modulacije se bira na osnovu vrste aplikacije. Razne modulacione šeme imaju karakteristične osobine, kao što su spektralna efikasnost (SE) i energetska efikasnost (EE). EE podrazumijeva maksimalnu dostižnu brzinu prenosa podataka pri ciljnom BER-u za datu snagu prenosa. Iako se nelicencirani optički opseg sastoji od ogromnog propusnog opsega, SE je ipak ključni dizajnerski parametri jer je, u praktičnom slučaju, proporcionalno vezan za brzinu elektronskih sklopnih kola u FSO sistemima. Na prijemnom kraju za optimalnu detekciju, važno je znati trenutne koeficijente stanja kanala. Nekoliko pilot nosioca se koriste u praksi za procenu stanja kanala (CSI) sa savršenom preciznošću [71]. Detekcija maksimalne verovatnoće simbol po simbol (ML) koristi se kao alternativni pristup, zasnovan na delimičnom znanju o distribuciji koeficijenata fadinga, kao i na ML detekciji zasnovanoj na statističkim koeficijentima fadinga. [72]. Zbog svoje jednostavnosti najčešće korišćena modulaciona šema u FSO sistemima je šema binarnog nivoa pod nazivom On-Off Keying (OOK). Međutim, kada se radi o ultrabrzjoj komunikaciji i kompleksnoj arhitekturi sistema, šema OKK je manje efikasna, zbog loše spektralne i energetske efikasnosti (EE). Poziciona impulsna modulacija (RRM) ili varijabilna RRM je dobro rešenje kada se radi o adresiranju EE aplikacija za komunikaciju u dubokom svemiru [73]. Za razliku od OOK-a, PPM-u nije potreban nikakav dinamički prag za optimalnu detekciju signala.

Međutim, OOK i PPM modulacione šeme su bazirane na jednom nosiocu, zato mogu biti nepouzdate u slučaju ozbiljnih oštećenja u kanalu FSO veze. Tehnike zasnovane na jednom nosiocu su nepouzdate u slučaju velikih brzina prenosa, i to, zbog velike međusimbolne interferencije (ISI) [74]. Zatim, tehnike modulacije intenziteta podnosioca (SIM) i multipleksiranja sa ortogonalnom frekvencijskom podelom (OFDM) bazirane na više nosilaca (MCSIM) su razmatrane u literaturi [75].

Pristupi bazirani na SIM-u imaju neke prednosti u odnosu na modulaciju sa jednim nosiocem kao što su ublažavanje slabljenja u kanalu, jednostavnost, isplativo rešenje i poboljšana spektralna efikasnost [76]. Dodavanje eksternog DC prednapona sa RF signalom zbog zanemarivanja impulsa nenegativne amplitude uzrokuje smanjenu energetska efikasnost.

Sa povećanjem broja podnosioca u MCSIM šemi, DC signal prednapona takođe treba da se poveća da bi se sprečila nelinearna distorzija i efekti klipinga. Dakle, tehnika MCSIM modulacije zasnovana na OFDM-u određena je odnosom vršne i prosečne snage (PAPR), što degradira energetska efikasnost [76]. Nelinearnost svetlosnih signala je takođe kritičan izazov

u MCSIM tehnici, koja dovodi do interferencije među nosiocima i širenja spektra signala što rezultira intermodulacionom distorzijom (IMD). Kao posledica toga, potreban je mali broj podnosioca za ograničavanje IMD-a, ali to sigurno smanjuje brzinu prenosa. Drugo rešenje za smanjenje IMD efekta je korišćenje odvojenog optičkog izvora za svaki nosilac, što rezultira složenošću i većim troškovima.

U poređenju sa PPM, multi-pulsni PMM (MPPM) smanjuje PAPR i povećava spektralnu efikasnost, ali ima veću složenost demodulacije. MPPM pokazuje superiorne performanse u odnosu na PPM pod vršnom snagom odašiljanja, a PPM nadmašuje MPPM pri prosečnoj snazi prenosa. U radu [77] predložena je poboljšana linearna nesimetrična transformacija za smanjenje PAPR-a u bežičnim optičkim komunikacijama baziranim na OFDM. PAPR tehnika redukcije čini signal manje ranjivim u smislu nelinearne distorzije, dakle, poboljšava performanse MSIM tehnike.

Tehnike matrice prethodnog kodovanja su predložene kako bi se poboljšale performanse PAPR, SNR, BER DC-bias optičkog OFDM (DCO-OFDM) sistema u perspektivi OWC sistema [78]. Da bi se postigla ista efikasnost propusnog opsega i poboljšana spektralna efikasnost sa tradicionalnim (DCO-OFDM), autori predlažu [79] modifikovanu asimetrično isečenu optičku OFDM metodu.

Još jedna dobro poznata tehnika modulacije je modulacija širine impulsa (PWM) koja ima poboljšanu spektralnu efikasnost, zahteva nižu vršnu snagu odašiljanja i bolje performanse inter-simbolske interferencije (ISI) u poređenju sa PPM [80]. Međutim, potreban je dodati dopunski zaštitni slot, za suzbijanje slanja uzastopnih pozitivnih impulsa tokom perioda simbola. I PPM i PWM su poznati kao sinhronizovane modulacije, jer zahtevaju sinhronizaciju slotova i simbola.

S druge strane, digitalna impulsna intervalna modulacija (DPIM) je vrsta asinhronizovane modulacione šeme koja je spektralno efikasnija od PPM i PWM ne zahteva sinhronizaciju simbola i slotova. Moguća propagacija greške tokom demodulacije na prijemniku je potencijalno ograničenje DPIM-a [81]. Prateći koncept MPPM, preklapajući PPM (OPPM) [82], diferencijalni PPM [81] i digitalna impulsna intervalna i širinska modulacija (DPIWM) [83] su predloženi za poboljšanje spektralne efikasnosti.

U OPPM-u, optički impulsi zauzimaju susedne slotove i simboli koji se završavaju impulsom mogu se iskoristiti za sinhronizaciju u DPPM-u, dok je binarna sekvenca kodirana u širinu impulsa naizmenične amplitude u DPIWM-u. Osnovna ograničenja svih ovih modulacija

su slaba energetska efikasnost, visoka složenost prijema i verovatnoća propagacione greške prilikom detekcije kodirane sekvence bita.

Inspirisani gore pomenutim problemima, modulacione šeme na više nivoa mogu se koristiti u FSO sistemima kako bi se postigla bolja SE u poređenju sa binarnim modulacijama. Na primer, optički impuls je moduliran na M nivoima u M-PAM [84], M-PSK [85] i M-QAM [86] modulacionom formatu, što zahteva laserski izvor sa različitim intenzitetom emisije. Sve ove metode modulacije M nivoa daju veći SE i EE u odnosu na modulacione šeme binarnog nivoa. Osim toga, druge šeme modulacije intenziteta na više nivoa i direktne detekcije (IM/DD) kao što su diferencijalna fazna modulacija (DPSK) [87] i amplitudno-fazna modulacija bez nosioca (CAP) [88] razmatrane su u FSO sistemima.

2.6.4. Modeliranje FSO kanala

FSO kanali su podložni atmosferskim turbulencijama i fedingu, tako da treba uzeti u obzir definiciju kapaciteta kanala pomoću ergodičkog kapaciteta i verovatnoće otkaza, zbog slučajne prirode koeficijenata fedinga kanala. Ergodičnim kapacitetom se naziva očekivani trenutni kapacitet kanala, koji se može izračunati putem međusobne količine informacija za različite koeficijente fedinga. Ako međusobna količina informacije ne dosegne brzinu protoka u FSO kanalima, specifikuje se događaj otkaza koji je poznat kao verovatnoća otkaza.

Performanse FSO veze značajno su pogoršane zbog slabljenja signala pod jakim faktorima atmosferske turbulencije. Konkretno, FSO kanal je veoma varijabilan, nepredvidiv i ranjiv zbog nehomogenosti pritiska i temperature atmosferskog sloja. Varijacija indeksa prelamanja i višestruko rasejanje duž putanje propagacije rezultiraju fluktuacijama faze i intenziteta primljenog optičkog signala. Efekat scintilacije, izazvan temperaturom i prostornim fluktuacijama intenziteta svetlosti, pogoršava performanse FSO veze čak i po vedrom vremenu. Kao posledica toga, broj grešaka po bitu se značajno povećava, posebno za FSO komunikaciju na daljinu čak i za mali uticaj gore navedenih smetnji.

Pristup margine veze (LM) je statistički parametar koji se koristi za kvantifikaciju performansi FSO prenosnog sistema. LM se može izraziti u decibelima (dB) i može se definisati kao odnos primljene optičke snage i snage potrebne za ciljnu brzinu prenosa i verovatnoću greške. Termin LM uzima u obzir sve ograničavajuće faktore povezane sa FSO linkom, uključujući parametre primopredajne stanice i modele budžeta veze koji podržavaju dizajnerska rešenja za optimalnu implementaciju u svim vremenskim uslovima na datoj lokaciji [89]. Neki

drugi faktori kao što su gubitak divergencije snopa, rasipanje svetlosti, pozadinska buka, varijacije ugla dolaznog zraka, vidljivost slobodnog prostora i blokada oblaka moraju se uzeti u obzir tokom implementacije FSO veze.

Sprovedena su brojna istraživanja kako bi se opisao kapacitet FSO kanala u uslovima turbulencije. Studija ergodičnog kapaciteta FSO kanala sprovedena je u [90] za slučajeve Gama-Gamma, Rayleigh, Nakagami-m, Malaga, Rician i log-normalnog fedinga, uzimajući u obzir AWGN model za šum prijemnika. S druge strane, verovatnoća otkaza [75], [85]–[87], [91], analiza verovatnoće grešaka po bitu [27], [65], [91], [92] i performanse propusnosti kanala [27], [84], [86], [92], [93] proučavaju se za spomenute modele fedinga u prisustvu AWGN šuma.

Neusmerene fluktuacije snopa signala u slobodnom prostoru, koje se javljaju zbog uticaja fedinga kanala izazvanog atmosferskom turbulencijom dovode do značajnog smanjenja performansi FSO sistema koje se manifestuje prijemom pogrešnih bitova. Kodovanje kanala je jedna od obećavajućih tehnika ublažavanja fedinga, u uslovima slabe i jake turbulencije. Za rešavanje atmosferske turbulencije, nekoliko tehnika smanjenja fedinga, kao što su vremensko-postorni diverziti [94], algoritmi za detekciju sekvenci podataka [95], i relejne komunikacije [96] razmatrane su u kontekstu FSO komunikacija. Međutim, većina predloženih metoda je složena i teška za implementaciju tokom sprovođenja komunikacije visoke brzine prenosa podataka.

Feding kanala FSO sistema je sličan kvazistatičkom svojstvu koje se sporo menja i CSI se može proceniti sa boljom preciznošću i poslati nazad u predajnik. FSO odašiljač tada prilagođava svoj parametar, na primer, snagu odašiljanja, nivo modulacije i brzinu koda prema trenutnom CSI. Imajmo na umu da je adaptivni prenos najprikladniji pristup za full duplex operacije povratne veze u FSO linku. Stoga su adaptivno kodiranje kanala i šema kontrole snage vrlo važni za komercijalne FSO sisteme pod praktičnim ograničenjima kako bi se zadovoljio ciljni BER i željeni ergodički kapacitet uz minimalni prekid rada. Rad [97] predložio je adaptivni prenos sa šemom kontrole snage uz pretpostavku Gama-Gamma kanala turbulencije, sa ciljem postizanja odgovarajućih vrednosti BER-a i verovatnoće otkaza.

Punkt konvolucioni (RCPC) kodovi kompatibilni sa brzinom koriste se za izvođenje adaptivnog prenosa za kontrolu brzine kodiranja kanala. Dekoder maksimalne verovatnoće zasnovan na Viterbi algoritmu i RCPC kodovima se koristi za smanjenje složenosti FSO primopredajnika. Autori su u [98] proučavali performanse FSO sistema prostorne modulacije

(FSO-SM) s obzirom na uticaj Gamma-Gamma distribucije i greške usmeravanja. Verovatnoća greške po simbolu (SER) se određuje korišćenjem konvolucionog kodiranja.

Izrazi BER-a i verovatnoće greške po paru (PEP) za konvolucione kodove i Q-ary PPM signalne šeme su detaljno ispitani u [99]. U [100], performanse BPSK OFDM-FSO u prisustvu Gamma-Gamma turbulentnog kanala istražuje se integrisanjem ispravljanja grešaka unapred (FEC) kako bi se poboljšale vrednosti verovatnoće greške. Autori su dizajnirali protokol za kontrolu grešaka i analizirali performanse protoka koristeći RCPC kod preko kanala atmosferske turbulencije za FSO burst prenos u satelitskim komunikacijama [101].

Rad novih prostorno-vremenskih rešetkastih kodova (STTC) za FSO komunikaciju koristeći IM/DD pod atmosferskim turbulencijama i neusklađenosti feding kanala istražuje se u [102]. Jednostavan pristup prenosa koji se prilagođava brzini baziran na OOK modulacijskim formatima s memorijom prikazan je u [103]. Autori su u [104], [105] analizirali QoS alokaciju kašnjenja ograničenja snage za koherentne FSO sisteme za posmatrani feding kanal atmosferske turbulencije.

Problem optimalne alokacije snage pod sigurnosnim ograničenjima za ljudski vid proučava se za adaptivne WDM-FSO sisteme u [106]. Autori su predložili adaptivnu nekodiranu politiku prenosa za snagu prenosa u zavisnosti od stanja kanala i nivoa modulacije u FSO komunikacijama u [107]. Rad [108] predlaže politiku prilagođavanja brzine kodiranja zasnovanu na vremenskim uslovima fedinga kanala pod fiksnom snagom prenosa. Da bi se poboljšale performanse FSO veze u prisustvu jake turbulencije, adaptivna modulacija s proverom pariteta niske gustoće (LDPC) razmatra se u [109]. U [110], autori su predstavili hibridnu komunikaciju iz dve deonice uz pomoć relejnog RF/FSO prenosa koristeći Alamouti kodiranje u prisustvu greške usmeravanja preko Gamma-Gamma kanala atmosferske turbulencije. Autori su istraživali pouzdanost FSO veze u zatvorenom prostoru u smislu verovatnoće greške u [111].

2.6.5. Smanjenje pozadinskog šuma

Pozadinski šum nastaje usled sunčevog zračenja, u toku dana. Pozadinski šum zračenja je funkcija talasne dužine, kada je radna talasna dužina niža od talasne dužine pozadinske buke. Prostorni filteri sa tehnikom adaptivne modulacije, koji imaju visok PAPR, mogu da ublaže ovaj šum. U ovom slučaju, bitni parametri za dizajniranje su: Doplerov pomak, ugao dolaska

signala, i širina spektra laserskog izvora. Prostorni filteri M-ari RRM su najbolji izbor za FSO sisteme, u ovom slučaju.

Diverziti tehnike se primenjuju u tri različita domena, vremenskom, frekvencijskom i prostornom, i to u cilju smanjenja atmosferskih smetnji. Umesto jednog velikog otvora blende koristi se niz višestrukih predajnika, na prijemu se generiše više kopija međusobno korelisanih signala. Diverziti tehnikom poboljšava se odnos BER-a sistema. Da bi se postigao pravi efekat diverziti tehnike, potrebno je da razmak između antena bude jednak ili veći od dužine koherentnosti na kraju predajnika ili prijemnika. Međutim, prostorna korelacija je funkcija širine snopa, divergencije snopa i varijanse lutanja zraka. Za SIMO diverziti prijem, diverziti tehnika se može sprovesti usrednjavanjem više nezavisnih laserskih zraka. Na prijemnoj strani, za trostruki diverziti koriste se tehnike: selektivnog kombinovanja (SC), kombinovanja maksimalnog odnosa (maximal ratio combining MRC) i kombinovanja signala sa jednakim udelom (equal gain combining EGC). Dobitak diverziti tehnike za MRC šemu je veći od maksimalnog nivoa SINR-a. U odnosu na dve druge navedene metode EGC je najpovoljnija, u smislu jednostavnosti i niske cene instalacije [112]. FSO MIMO je sličan RF MIMO, gde se kapacitet kanala povećava linearno skalarno sa brojem predajnih antena. Vremenski diverziti se obično koristi za kanale sa vremenski selektivnim fadingom gde se prenose ponovljeni simboli u različitom koherentnom vremenu. Ipak, vremenski diverziti se može koristiti samo uz uključivanje kodiranja ili bita preplitanja i to u skladu sa razlikom između dužine okvira podataka i vremenske koherentnosti kanala.

2.6.6. Koherentni FSO sistemi

Fluktuacije amplitude i faze prijemnog signala degradiraju sistem, tj. smanjuju SINR i remete željeni nivo BER-a. Na osnovu tehnika detekcije FSO sistemi se mogu klasifikovati na: DD FSO (direktna detekcija) i CD FSO (koherentna detekcija). Kod DD FSO šeme, intenzitet svetlosti koja dolazi sa izvora nosi informaciju, na strani prijemnika, ne postoji nikakav spoljašnji mehanizam i fotodetektor detektuje promene svih fotona. Za poboljšanje spektralne efikasnosti u koherentnim FSO sistemima, amplituda, frekvencija ili faza se mogu koristiti za kodiranje informacija (što nije slučaj kod IM/DD sistemima). Kako prijemna jedinica sadrži snop lokalnog oscilatora (LO), prijemni signal je pre detekcije fotografije pomešan sa LO generisanim optičkim poljem. Nakon toga, signali se pojačavaju i prolaze kroz filter u cilju odbacivanja pozadinske buke i smetnji [113]. Dokazano je da koherentna FSO šema ispoljava

veći nivo osetljivosti prijemnika kod IM/DD sistema. U CD-FSO sistemima se koriste brojne tehnike modulacije: M-arna kvadratura amplitudna modulacija (M-QAM), kvadraturno fazno pomeranje sa više nivoa (M-QPSK) ili pomeranje fazne polarizacije sa više nivoa (M-PolSK) [114].

Uprkos potencijalnim prednostima koherentnog FSO sistema, uglavnom se koriste DD FSO sistemi, zbog jednostavnosti i niže cene. Sa napretkom integrisanja ultra brzih jedinica digitalne obrade, koherentne FSO šeme se sve više primenjuju. Atmosferski poremećaji modifikuju emitovani signal, što dovodi do nesavršenosti talasnog fronta, kod LO na prijemnom kraju. Relevantna fazna izobličenja ozbiljno ograničavaju performanse sistema, posebno kada je otvor blende prijemnika veći od dužine koherentnosti talasnog fronta dolaznog signala. Ali, izobličenja izazvana turbulencijama, mogu se otkloniti tehnikom kompenzacije faze kroz praćenje optičkog zraka. Postoje dva različita pristupa: homodina i heterodina detekcija u koherentnim prijemnicima. Homodina tehnika prijema zahteva precizno fazno usklađivanje, tj. pravilno fazno zaključanu petlju, što ovakvu vrstu uređaja čini veoma skupim. Upravo iz ovog razloga, heterodinski prijemnik se naširoko koristi, iako prva tehnika obezbeđuje bolju osetljivost detekcije. U poslednje vreme napisano je više istraživačkih radova na temu poboljšanja spektralne efikasnosti, povećanja udaljenosti veze i kapaciteta sistema gde se koristi napredna modulacija u kontekstu koherentne komunikacije FSO sistema [115]. U referenci [116] pokazana je brzina od 160Gbps za 256 QAM OFDM, u slučaju jednomodnog vlakna od 160km (SMF) za optičku kičmu i za 4km FSO veze. Autori su u [117] predstavili 1024-QAM šemu primopredajnika sa dvostrukom polarizacijom (DP) od 200Gbps, 200Gbaud i spektralne efikasnosti (SE) 14bit/sec/Hz. Autori rada (359) su pokazali sistem brzine od 640Gbps sa brzinom simbola od 40 Gbps, SE od 15,3 bit/sec/Hz za infrastrukturu optičkog jezgra i za infrastrukturu slobodnog prostora iste razdaljine (160km SMF i 4km FSO). Međutim diverziteti tehnika u koherentnim sistemima, u uslovima različitih turbulencija ima mnoge prednosti: ublažavanje fedinga, ublažavanje šuma i ometajućih signala.

Optički ViMAX sistem prenosa, omogućava komunikaciju u slobodnom prostoru na daljinu, sa velikim prenosnim kapacitetom i velikim brzinama, kombinujući prednosti optičke i bežične tehnologije. U FSO ViMAX sistemima, OFDM deli kanal na N uskopojasnih slotova. OFDM tehnika poboljšava spektralnu efikasnost i stopu disperzije.

- Multipleksiranje podnosača (SCM)

Ako se koristi više talasnih dužina za tehniku multiplksiranja podnosioca (SCM), može se postići brzina protoka podataka od 1Tb/s do 3Tb/s-km propusnog opsega, uz smanjenje cene po prenosu bita [57]. Tehnika zasnovana na SCM-u, FSO sistemima nudi rešenje za prenos podataka poslednje milje za velike vremenske i propusne opsege svetlosnog signala. Po definiciji, N multipleksiranih podnosioca se prenosi, a Mach-Zehnder-ov modulator (MZM) se koristi za modulaciju signala optičkog nosioca. Nakon toga modulirani signal se propušta kroz FSO kanale; fotodioda je demultipleksirala dolazne signale do njihovog odredišta. Zbog koherentne električne detekcije na prijemu, pun spektar se može efikasno koristiti u SCM-FSO sistemima.

2.6.7. Hibridni FSO prenos

Svaka tehnologija zasnovana na RF i optičkim bežičnim mrežama ima neke prednosti i mane. Ograničenja FSO sistema, npr. blokiranje komunikacije usled prepreka, se mogu prevazići koegzistencijom RF i FSO mreža. Hibridne RF/FSO mreže poboljšavaju pouzdanost veze i olakšavaju balansiranje opterećenja u različitim scenarijima. Konvergencija heterogene arhitekture RF i FSO mreže, koja uključuje različite frekventne opsege, ima ključnu ulogu u obezbeđivanju višeg stepena QoS-a, i pouzdanog rada u nepovoljnim vremenskim uslovima. Primenom hibridnih tehnologija RF/FSO, teži se besprekornom radu sistema i usluge krajnjim korisnicima. Tačnije, RF sistemi obezbeđuju široku prostornu pokrivenost, a FSO velike brzine prenosa, gde ova dva sistema mogu da rade na području iste prostorne pokrivenosti bez da međusobno izazivaju smetnje. Hibridna tehnologija pruža prednosti kao što su: bolja pouzdanost veze, energetska efikasnost, dobra povezanost sa udaljenim destinacijama, minimiziranje smetnji itd. Cilj kombinovanih bežičnih sistema je postizanje boljih performansi, gde se eliminišu nedostaci pojedinačnih tehnologija. Tehničke prepreke, kao što su: efekat senki, inter-simbolička interferencija (ISI), fazno indukovana buka, interferencija višestrukog pristupa (MAI), i fading usled višestrukih putanja, smanjuju intenzitet prijemnog signala. RF mreže su rezervna putanja signala kada dođe do blokade, neusklađenosti antene ili bilo koje ozbiljnije degradacije FSO sistema. Kada se sistem povraća, veza se opet vraća na optički prenos.

RF mreža služi kao rezervna putanja i predstavlja potencijalno rešenje tokom prekida FSO mreže. Termalno širenje, jak vetar, vibracije izazvane manjim zemljotresom remete usklađenost FSO predajnika i forodetektora na prijemu [118]. Kombinovana upotreba RF

(mikro i milimetarski talasi) i FSO sistema može da otkloni ove ometajuće faktore. Iako RF sistemi razvijaju manje brzine prenosa u odnosu na FSO sisteme, u pogledi pouzdanosti veze, pokazuju bolje performanse od FSO sistema. Na RF kanale manje utiču greške pri usmeravanju, magla i atmosferske turbulencije. Sjedinjena sa FSO sistemima, RF veza zasnovana na milimetarskim talasnim dužinama od oko 60GHz ima visoku propusnost. Takođe, performanse za NLOS prenos su mnogo bolje, kao i mobilnost sistema, ipak RF tehnologija je osetljiva na elektromagnetne smetnje. Za kombinovane RF/FSO sisteme, velikog raspona, RF link se može koristiti za usmeravanje i akviziciju zraka, što bi obezbedilo veću pouzdanost sistema [29]. Može se reći da neke karakteristike RF-a ublažavaju ograničenja FSO sistema. Energetska efikasnost (bps/Watt) FSO sistema je relativno veća od RF sistema. Prebacivanje saobraćajnog opterećenja sa RF na optičke mreže minimizira ukupnu potrošnju energije. RF/FSO sistemi omogućavaju najbolju iskorišćenost spektra i pružaju najbolje performanse prenosa podataka, posebno za korisnike u zatvorenom prostoru. Mobilnost pri velikim brzinama prenosa je jedna od osnovnih prednosti ovih hibridnih sistema, na primer (V2X) za sisteme vozila u gustom saobraćaju i na širem geografskom području. FSO mreža je mreža primarne veze, dok se RF koristi kao sekundarni rezervni put koji obezbeđuje visoku pouzdanost. Bežično povezivanje preko relejnih čvorova se naziva mešovitom RF/FSO vezom.

Problem koji se javlja u hibridnim mrežama je pristup retransmisije, tj. izgubljeni paketi se ponovo prenose preko RF veze. Ovde je predložena tehnika planera, tj. propuštanja podataka optimalnim redosledom, koja efikasno rukovodi primopredajom između optičke mreže i RF-a. Funkcija prolaza (gateway) je re-emitovanje, zakazivanje i rukovanje svim dolaznim podacima iz planera paketa podataka. Ključni izazov ovde, je održavanje očekivanog QoS-a. Za upravljanje putanjom vertikalne primopredaje predlaže se Markovljev proces odlučivanja i pristup fazi logike (fuzzy-logic). Markovljeva šema odlučivanja minimizira efekat ping-ponga, tj. izbegava se redundantno prebacivanje kada dođe do blokiranja u LOS linku. Prekid optičke veze zavisi od distribucije korisnika na osnovu prostora, vremena i trajanja. U skladu sa predviđenom mobilnošću korisnika, raspoređivanje hibridnih FSO mreža može se odrediti na osnovu Markovljevog lančanog procesa. S druge strane proces fazi logike se zasniva na neizvesnosti metrike odluke. Radovi [119],[120] pokazuju sigurnost fizičkog sloja hibridnih FSO/RF sistema, gde minimalna potrošnja energije zadovoljava stepen tajnosti korisnika.

2.6.8. WiFo (WiFi-FSO) komunikacija.

WiFo je hibridni tip komunikacije tj. kombinacija RF i FSO tehnologije, tačnije, to je bežični komunikacioni sistem za zatvorene prostore, velikog kapaciteta, zasnovan na femtoćelijskoj arhitekturi, sa velikom spektralnom efikasnošću i minimalnim smetnjama [121]. WiFi se može koristiti na mestima gde u FSO sistemima dolazi do preklapanja signala. Uz prednosti visoke modulacije VCSEL-a, za WiFi je tipična RAM tehnika kodiranja za komunikaciju na kratkim udaljenostima u zatvorenom prostoru, što rezultira niskom potrošnjom energije PiN fotodioda [121]. FSO generišu nevidljivu svetlost koja je povezana velikom brzinom od 100Gbps u Ethernet mrežu koju kontroliše pristupna tačka (AR). Dok, AR upravlja simultanim prenosom podataka FSO signala i WiFi veza, WiFo omogućava gušće korišćenje izvora svetlosti gde jedan prijemnik može da uhvati sve FSO signale kao što su MISO sistemi. Ovakav sistem omogućava krajnjim korisnicima u preklopnim oblastima veću brzinu prenosa podataka.

Podvodna optička bežična komunikacija (UOVC) koja funkcioniše pomoću kombinovane tehnologije RF, akustike i optike, privlači veliku pažnju za razne namene, npr: prećenje cevi za naftu, podvodna istraživanja itd. UOVC zasnovan na RF i akustičnoj tehnologiji, ne može da podrži velike brzine prenosa na velikim udaljenostima. Akustični talas omogućava oko 20km veze sa rasponom brzina od desetina herca do stotina kiloherca [122]. Takođe RF sistemi pokazuju loše performanse i ograničeni su na kratke udaljenosti veze. Hibridna RF/akustična/optička tehnologija prevazilazi ograničenja kao što su: kašnjenje, mala pokrivenost i jako slabljenje signala.

Optičke/optičke hibridne bežične tehnologije kao što su FSO/VLC, FSO/OCC, takođe su predmet istraživanja mnogih autora. FSO/OCC hibridna veza omogućava V2X komunikaciju na daljinu, veza je stabilna a pojedinačni nedostaci svakog od sistema su eliminisani. OSS podržava komunikaciju na kratkim udaljenostima sa niskom stopom podataka. Nasuprot tome, FSO mreže obezbeđuju komunikaciju između automobila na većoj udaljenosti. Dakle, hibridni sistem zadovoljava potrebe korisnika i povećava pouzdanost veze. Međutim sistem nije otporan na atmosferske uslove na otvorenom [123].

Da bi se izmerila efikasnost bilo kog sistema, analiza performansi predstavlja najznačajniju metriku. Procena metrike učinka može se izvršiti na različite načine: analitičkom evaluacijom, numeričkim metodama, simulacijom u određenom okruženju i eksperimentalnom verifikacijom. U radovima se koriste razne metode: analiza protoka, BER, spektralna

efikasnost, verovatnoća greške simbola, analiza stepena zaštite podataka, verovatnoća otkaza, ergodični kapacitet, SINR i energetska efikasnost prijemnog signala, kapacitet sistema i pouzdanost.

2.6.9. Radio preko FSO sistema (RoFSO)

Radio preko FSO sistema (RoFSO) je zanimljiva tehnologija, pre svega jer ovakav sistem ima mogućnost velikog prenosa podataka uz nisku potrošnju energije. Koncept RoFSO je sistem tj. radio preko vlakana (RoF) i FSO sistema, gde se optički signal moduliše kao RF pre prenosa na prijemnik. Može se reći da RoFSO tehnika omogućava istovremeni prenos podataka širokopojasnih RF signala, dvosmernom putanjom preko FSO veze. Tehnika modulacije RF podnosiča na optički nosač, poznata je kao RoF. Na mestima gde je instalacija optičkog kablova ograničena, RoFSO je tehnologija koja može da pruži potrebnu uslugu, tj. da prevaziđe problem poslednje milje za širokopojasne usluge [124]. Da bi se zadovoljili zahtevi korisnika 5G i B5G mreža, telekom operateri su prinuđeni da instaliraju veći broj baznih stanica, što bi imalo za cilj izbegavanje spektralnog zagušenja u nižim RF frekvencijskim opsezima. Ipak, ovakav pristup dovodi do povećavanja cene i složenosti sistema. Sa druge strane, RoFSO sistem nudi veću pouzdanost, fleksibilnost primene, male gubitke, otpornost na elektromagnetne smetnje, visok propusni opseg i ekonomičnost [125].

Princip RoFSO-a je sličan WDM tehnici. Centralne bazne stanice, kroz slobodan prostor, distribuiraju optičke signale ka više udaljenih stanica. Mach-Zehnder modulator (MZM) se koristi za modulaciju optičkog signala u funkciji RF signala, i to kombinovanjem fazno odloženih optičkih zraka. U MZU-u, razdelniku signala, se razdvajaju upadni laserski svetlosni talasi na dva puta, čime se realizuje linearni optički efekat (EO), koji kada se primeni električno polje dovodi do prelamanja u optičkoj sredini. Podešavanjem električnog polja tj. RF ulaznih signala, fazno kašnjenje donjeg i gornjeg puta se može kontrolisati, u tom slučaju snopovi se kombinuju na izlazu, bilo to konstruktivno ili destruktivno. Mehanizam EO menja indeks prelamanja optičkog medijuma pa se MZM može koristiti za amplitudnu, faznu i frekvencijsku modulaciju.

2.6.10. Višekorisnička FSO komunikacija

Kada više korisnika emituje različite signale, dolazi do njihovog mešanja u medijumu bežičnog prostora. Tehnika BSS razdvajanja izvora (BSS- Blind source separation), koristi se za izdvajanje originalnih informacija iz nadolazećih mešovitih signala. Problem ove vrste se javlja kod mnogih aplikacija, kao što su: analiza biomedicinskih podataka, identifikacija govornih signala, komunikacija zasnovana na mašinskom učenju itd. [126]. Kako su korisnici nasumično raspoređeni u prostoru, fading pojedinačnih kanala je nezavisan. Diverzitet tehnika više antena može značajno da poboljša performanse bežičnog prenosa FSO sistema. Višekorisnička diverzitet tehnika nudi neka prijemčivija rešenja za diverzitet antena, takođe je i struktura sistema jednostavnija, jer jedan prijemnik zahteva jednu antenu. Uvođenjem brojnih pristupnih tačaka u FSO vezu dugog dometa, i to preko RF veze kratkog dometa, pojačava se prijemni signal, daljina i pouzdanost prenosa podataka. U radu [87] predstavljen je RF/FSO sistem za više korisnika sa više skokova, ovakav sistem zahteva nižu potrošnju energije, ima malo kašnjenje i nije složen. Kada CSI (informacija o stanju kanala) nije poznata koristi se pojačalo sa fiksnim pojačanjem i pojačalo sa pojačanjem i prenošenjem unapred, kada je CSI poznata koristi se adaptivno pojačanje. U radu [127] proučavan je višekorisnički diverzitet RF/FSO sistema za MISO (point-to-multipoint) tehnologiju, koji se sastoji od hibridnih pristupnih tačaka, sve to sa ciljem da se BER svede na minimum. Takođe, da bi se ispitala verovatnoća otkaza i energetska efikasnost, razmatra se višekorisnička mešovita RF/FSO metoda dvosmernog releja (TVR) [128]. U odnosu na prostorno multipleksiranje, višekorisnički MIMO prenos je bolje rešenje jer značajno poboljšava kapacitet bežičnih komunikacionih sistema [129]. Neophodno je, periodično, osluškivati optički spektar, kako bi se u slučaju višekorisničkog pristupa izbegle smetnje i zauzetost kanala. Senzor spektra ima značajnu ulogu za višekorisničku FSO komunikaciju, jer omogućava korisniku da prati raspoloživi frekvencijski spektar u svom radnom opsegu [130]. U [131] opsežno je prikazana metoda detekcije energije, na optičkim uređajima, za FSO komunikaciju eksponencijalno distribuiranog kanala.

2.6.11. MIMO FSO sistemi

Diverzitet tehnike, kao što je tehnika prostornog diverziteta, gde se višestrukim snopovima na predajniku ili višestrukim otvorima na prijemniku, mogu značajno poboljšati karakteristike FSO sistema, svakako su predmet proučavanja. Tehnika prostornog diverziteta

pomaže da se poboljša pouzdanost FSO sistema i to uvođenjem inherentne redundanse signala [132]. Možemo napomenuti, da feding izazvan turbulencijama značajno pogoršava SISO-FSO (veza između jednog ulaza i jednog izlaza) [133]. Da bi se postigao željeni QoS koristi se dodatna snaga. Ipak, ovakav pristup nije praktičan zbog nedostataka u bezbednosti i niže pouzdanosti. Tipičan, konvencionalan Gausov svetlosni signal podlozan je: efektu lutanja snopa, fluktuacijama snage i izobličenju talasnog oblika usled neželjenih atmosferskih turbulencija. Takođe, neusmerenost između prijemnika i predajnika uzrokuje značajan gubitak snage. Pored nekoliko načina za ublažavanje ovih degradacija signala, otvor blende je jedna potencijalna tehnika za poboljšanje performansi sistema. Ova tehnika je takva da se na strani prijemnika ugrađuje šire sočivo čime se ublažava efekat fedinga, usrednjavanjem fluktuacija intenziteta. Tehnika je efikasna u uslovima umerenih do jakih atmosferskih turbulencija, kada je otvor prijemnika veći od dužine korelacije fedinga $\sqrt{\lambda l}$, gde je l razdaljina prenosa a λ talasna dužina [29]. Korišćenje više malih otvora, umesto jednog velikog otvora na prijemniku, je način da se smanji feding. Više malih otvora je pogodno rešenje u uslovima jakih turbulencija, ali je implementacija ovog rešenja malo složenija. Za SIMO (jedan ulaz više izlaza) sistem, koristi se EGC (kombinovanje jednakog pojačanja) metoda, koja daje inferiorne rezultate u odnosu na metodu MRC (kombinovanje maksimalnog odnosa) [129]. S druge strane, FSO šema sa više ulaza i jednim izlazom (MISO) na kraju predajnika, uglavnom se koristi za prenos istog signala na odvojenim snopovima, što se naziva ponovljeno kodiranje (RC).

Slično RF sistemima, MIMO tehnika je popularna za rešavanje višeputnog fedinga izazvanog turbulencijama [110]. U ovakvom scenariju FSO primopredajnik opslužuje istovremeno više krajnjih korisnika na istom frekvencijskom opsegu, gde je uz učešće više kolociranih antena učinak multipleksiranja bolji [129]. U cilju sprečavanja međukorisničke interferencije, proučava se nekoliko tehnika, jedna od njih je i modulacija intenziteta/direktne detekcije (IM/DD), koja je implementirana u MIMO-FSO sistem, gde se IM koristi za prenos signala a DD se koristi na prijemniku. Prema [129], nelinearne šeme prethodnog kodiranja daju bolje rezultate u odnosu na metod prethodnog linearnog kodiranja. Ipak, metode linearnog prethodnog kodiranja kao što su nulto formiranje snopa (ZFBF) [134] i nasumično jedinstveno formiranje snopa (RUB) [135] su popularne zbog svoje jednostavne implementacije. U ZFBF-u matrica prethodnog kodiranja je modelirana pseudo inverzna matrica odabranih korisnika, dok je u RUB-u prethodno kodiranje matrice dizajnirano na osnovu kvaliteta kanala nasumično odabranih korisnika. U referenci [136] proučavan je ortogonalni prostorno-vremenski blok kod OSTBC-a i kod ponavljanja (RC) u uslovima logaritamsko normalnog feding kanala. Međutim,

kada je ogroman broj heterogenih uređaja povezan u 5G, log-normalni atmosferski model kanala nije zadovoljavajući [31]. Postoji veliki broj radova fokusiranih na MIMO-OSTBC FSO aplikacijama, koje omogućavaju veći diverzitet i širok spektar primene FSO uređaja [137]. RC šema je proučavana u [138] a upotreba ponovnog kodiranja u MIMO FSO u [139].

MIMO šema zasnovana na OSTBC se koristi kao uspešna za rešavanje vremenske neusklađenosti asinhronih MIMO FSO kanala. Autori su u [140] predstavili BER performanse za multihop hibridni RF/FSO sistem, gde se predlaže korišćenje M-arne impulsne modulacije položaja (MPPM) i MIMO tehnike u Gamma-Gamma turbulentnom kanalu. U [141] prvi put je prikazana MIMO-FSO veza sa tehnikom prijema sa jednim pojačanjem za Gamma-Gamma atmosferski turbulentni kanal. U [142] prikazan je zadovoljavajući BER za 10 Gb/sKPSK FSO veze za MIMO prostornu tehniku.

2.6.12. FSO prenos u TCP sloju

Mnogi radovi su fokusirani na ponovni prenos signala tzv. reruting, na dizajn unakrsnog sloja, gde je sloj za kontrolu prenosa u kombinaciji sa fizičkim slojem [143].

Ponovni prenos (Re- transmission). Zahtev za automatsko ponavljanje (ARK) je protokol koji se koristi u svrhu pouzdanog prenosa podataka. Prema ovom protokolu prenos podataka se vrši u setu paketa određene dužine i okvira. Paket se ponovo prenosi kada, posle određenog vremenskog perioda, sa prijemne strane nema potvrde o prijemu podataka, proces se nastavlja sve dok se, na strani predajnika, ne primi pozitivna potvrda. Kao rezultat N-ARK (kreni - vrati se - zaustavi - sačekaj) šeme dolazi do degradacije propusnog opsega, velikog kašnjenja i veće potrošnje energije. Druga tehnika je selektivno ponavljanje ARK (SR-ARK), gde se paketi više puta šalju sa predajnika, bez čekanja bilo koje potvrde od strane prijemnika, bilo na nivou veze ili na transportnom sloju. U [143] proučava se i hibridni ARK (H-ARK), koji kombinuje FEC kodiranje i mehanizam kontrole greške. Dalje, metoda kooperativne raznolikosti ARK (C-ARK) daje dobre performanse u smislu turbulencija izazvanih fadinom kod FSO sistema. Modifikovani C-ARK (MCARK) daje bolje performanse u smislu energetske efikasnosti i kašnjenja. Rateless Round Robin algoritam ima praktičnu primenu u FSO sistemima i koristi se za kontrolu greške u uslovima jakih atmosferskih turbulencija [144].

Preusmeravanje (Re-routing). Tokom nepovoljnih vremenskih uslova, preusmeravanje putanje podataka između optičke veze ili RF veze, povećava pouzdanost FSO komunikacije. U [145] demonstrirana je autonomna dinamička rekonfiguracija putanje, uključujući mehanizme

kontrole topologije i algoritme za preusmeravanje snopa za hibridne RF/FSO veze. Predloženi metod značajno unapređuje sistem ali i podiže cenu realizacije. Uobičajeni protokol za rutiranje je tzv. proaktivno rutiranje, kod ovog pristupa sve moguće rute se izračunavaju i čuvaju u tabeli rutiranja, ipak ova šema nije prikladna za mreže velikih razmera. Drugi protokol za rutiranje je tzv. reaktivno rutiranje, koji u poređenju sa prethodnim manje opterećuje mrežu. Ova šema izračunava nove putanje na osnovu zahteva u realnom vremenu tokom kvarova postojeće rute, što ipak uzrokuje produženo kašnjenje podataka. Pa tako, hibridna šema rutiranja, koja se sastoji od ova dva protokola, koristi se unutar svakog tj. između različitih klastera [145].

QoS kontrola. QoS se može definisati u kontekstu: propusnosti, kašnjenja, gubitka signala, spektralne efikasnosti i energetske efikasnosti. Da bi se postigla pouzdana komunikacija između dva FSO čvora sistem mora da ispuni zahteve QoS-a. Primarni izazovi QoS-a u FSO sistemima su kašnjenja paketa podataka. U [146] predložen je bafer od 10 Gbps koji bi minimizirao stopu odbijenih paketa u atmosferskim uslovim, za hibridnu RF/FSO mrežu. Prema [146] baferska šema zasnovana na QoS-u, obezbeđuje 8 dB manji marginalni feding. Stroga kontrola greške i politika ispravnog kanala pružaju zadovoljavajući nivo QoS-a.

2.7. FSO sistemi sledeće generacije

Poslednjih godina, FSO sistemi, kao alternativna bežična komunikaciona tehnologija, zavređuju veliku pažnju, jer zadovoljavaju potrebe prenosa podataka na isplativ način. Pored toga, FSO tehnologija se bavi problemima smetnji i pouzdanog povezivanje sa visokim nivoom bezbednosti preko postojeće RF infrastrukture. FSO međukanalne smetnje mogu se ograničiti kontrolom širine optičkog snopa na predajnoj stanici. Iskorišćavanjem koegzistencije RoFSO, OVC/FSO ili RF/FSO kompenzuju se slabosti svake pojedinačne tehnologije. Heterogene strukture FSO sistema (RF, Coak, FSO, optičko vlakno) obezbeđuju ekstremni kapacitet bežičnih usluga, kako na zemlji tako i u svemiru [57]. Optoelektronski uređaji, koji se koriste za infrastrukturu brzih optičkih vlakana kao što su, na primer: optički izvor od 100 Gb/s, Maks-Zenderov modulator (MZM), multipleksiranje talasnih dužina (VDM), fotodetektor itd. takođe se mogu koristiti u FSO sistemima. Dizajn koji podrazumeva integraciju konvencionalnih signala visoke brzine prenosa podataka u FSO sisteme, omogućava: prenos zemaljskih digitalnih HD TV signala, WLAN, obavljanje 5G komunikacionih protokola i IoT/IoE bežične usluge.

Savršena procena FSO kanala je izazovan zadatak jer uključuje visoke troškove i potrošnju energije. To nije prikladan izbor u sistemu celularnih komunikacija, pošto pilot prenos pogoršava brzinu prenosa podataka. Inspirisani ovim problemima, autori [147] su predložili procenu kanala niske cene i niske složenosti zasnovanu na mašinskom učenju (deep learning) za FSO sistem. Iako slepa procena kanala ne zahteva pilot prenos, osim toga, nudi nižu složenost, ipak ovaj pristup nije realističan zbog uslova fiksnog kanala. Nedavno je koncept mašinskog učenja [148] naveo na istraživanje praćenja optičkih performansi, što je veoma korisno kada je sistemski model složen. S druge strane, mašinsko učenje bi moglo da reši složene probleme kada ulaz nije dovoljan za izračunavanje i obezbeđuje alate za dinamičku i statističku obradu signala, za generisanje savršenog modela verovatnoće kanala za oštećenja primljenih podataka. Algoritmi duboke neuronske mreže (DNN) [149] mogu se koristiti u simulaciji visokog nivoa za analizu ulaznih podataka, nudeći brz odgovor. DNN algoritmi se koriste za: identifikaciju najbolje modulacione šeme, upravljanje optičkim pojačavačima, paradigme rutiranja i procenu kvaliteta prenetih signala.

Iz gore pomenute diskusije, mašinsko učenje (ML) za buduće generacije FSO mreža postaje aktuelna tema. Nekoliko istraživanja je sprovedeno u FSO komunikaciji zasnovanoj na ML-u, kao što je svrha detekcije [150], korekcija grešaka za naprednu optiku [67] i savršen dizajn demodulatora za ugaone optičke zrake [151].

2.8. Primena bežičnog optičkog prenosa u 5G tehnologijama

Sa porastom upotrebe raznih vrsta multimedijalnih aplikacija, postojeći RF sistemi nisu u stanju da ispune sve potrebe IoT-a, 5G i drugih naprednijih komunikacionih sistema. Bežične tehnologije, različitog tipa, imaju niz poželjnih karakteristika ali i određena ograničenja. Opšte je poznato da RF i optičke bežične tehnologije (npr. FSO) imaju recipročne karakteristike. Ključne prednosti RF tehnologije su: mobilnost, prenos se vrši pod LOS/NLOS uslovima, prostorna pokrivenost je široka, a ograničavajući faktori su: nedostatak propusnog opsega, elektromagnetne smetnje i manji propusni učinak. S druge strane, FSO sistemi, među svim ostalim OWC tehnologijama, imaju prednost ogromnog propusnog opsega i velike dužine pokrivenosti. Za razliku od RF signala, optički snop ne može da se detektuje analizatorima spektra, takođe laserski zraci ne mogu da prođu kroz zidove. Inače, FSO primopredajnici su laki za postavljanje, lagani po težini, kompaktni i lako proširivi. Ipak, FSO tehnologija ima

ograničavajuće faktore, kao što su: magla, jaka kiša, guste snežne padavine, gusti oblaci, greške u usmeravanju, efekat scintilacije i atmosferska molekularna apsorpcija. Različiti aspekti upotrebe FSO sistema su: svemirska komunikacija, sajber bezbednost, rešenje problema poslednje milje. Navedeni unapređeni optički izvori su npr. monohromatski LASER predajnik na bazi čvrstog stanja, kao i različiti fotodetektor. Nasuprot LED diodama, koherentnost laserskih dioda (LD) omogućava brz prenos podataka sa manje smetnji. Za kraće razdaljine PIN fotodioda (PD) je prihvatljivije rešenje, dok je za veću udaljenost veze bolje rešenje Avalanche PD (APD), jer zbog poboljšanog nivoa osvetljenosti prijemnika ima bolje performanse. Ciljevi FSO sistema su različiti, shodno tome, predloženi su brojni pristupi za rešavanje pitanja pouzdanosti. Pokazivanje, akvizicija i tehnika praćenja (RAT) za održavanje LOS usmerenosti između dve krajnje tačke, usavršavanje modulacionih tehnika [76]-[80], razvoj tehnika za kodiranje kanala različitih optičkih bežičnih veza [103]-[111], tehnika za smanjenje pozadinske buke, mehanizam prostornih diverzitija, razvoj novih koherentnih FSO sistema, razvoj adaptivne optika [68]-[69] za smanjenje fluktuacije talasnog fronta, usavršavanje relejnog prenosa [70] za postizanje visokog pojačanja kanala, razvoj hibridnih FSO sistema za prevzilaženje ograničenja jedne tehnologije [119],[120], predstavljaju osnovne pravce istraživanja iz ove oblasti. Ključna pitanja koja treba razrešiti kako bi se postigla uspešna implementacija FSO sistema su: ublažavanje smetnji [152], automatska korekcija grešaka na prijemu [153], poboljšanje propusnosti [85] energetska efikasnost za 5G, B5G, IoT aplikacije [154]. Dalje, problemi dizajna FSO sistema za kvantne THz komunikacije [155], multi-hop, višekorisničke i kooperativne komunikacije zasnovane na relejnom prenosu [156], VDM FSO komunikacije [157], adaptivni optički mehanizam u podvodnim bežičnim komunikacijama, pitanja horizontalnog i vertikalnog hendovera u heterogenim mrežama, bezbednost fizičkog sloja, takođe predstavljaju značajne teme za istraživanje. Diskutovana su i pitanja umrežavanja FSO sistema [158]. Radio preko FSO tehnologije (RoFSO) je predstavljen u perspektivi 5G i drugih komunikacija [124]. Sveobuhvatna MIMO studija u cilju postizanja robusnih performansi FSO sistema se proučava u [137]-[140]. Istraživanja su, takođe, fokusirana na moguće inkorporiranje FSO mreža u tehnologije sledeće generacije, kao: mašinsko učenje, duboke neuronske mreže, efikasni algoritmi rutiranja, metode kontrole QoS-a.

Postojeći RF sistem nije u stanju da podrži velike brzine prenosa podataka koje zahteva 5G i B5G mreža. FSO sistem sa ultra-pojasnim frekventnim opsegom, bez licence, može da bude održivo rešenje. FSO komunikacija se obično odvija sa uskim usmerenim snopom, u uslovima LOS propagacije za velike razdaljine. Brzina podataka od 40GB/s za FSO

komunikaciju već je postignuta. FSO sistem može da pokrije udaljenosti od nekoliko nanometara (implementacija u interintegriranim kolima) do 10000 kilometara (od zemaljske baze do satelitske FSO tačke) [57]. FSO sistem ima mogućnost da podrži porast broja pametnih telefona, veliku količinu podataka koji se skladište u oblaku, IoT/IoE uređaje, veštačku inteligenciju itd. Ipak, razvoj robusne infrastrukture predstavlja i dalje veliki izazov. Jedan od problema je i efikasno postavljanje FSO sistema. U ovom odeljku je stavljen akcenat na istraživanje problema vezanih za sve aspekte primene FSO sistema.

2.8.1. 5G/B5G/ i IoT/IoE rešenje

FSO je najnovija tehnologija koja podržava mobilne mreže sledeće generacije i veliku međupovezanost IoT uređaja. Primena LD dioda u projektovanju FSO sistema rezultira velikim interćelijskim smetnjama u 5G/B5G/ i IoT/IoE mrežama. Pored toga, različite tehnike modulacije LD-a mogu da izazovu treperenje (fluktuaciju modulisanog signala). CoMP (ćelijska mreža sa više koordiniranih tačaka) smanjuje interćelijske smetnje osiguravajući maksimalnu propusnost [154]. Opšte je prihvaćeno da se povećavanjem broja raspoređenih OWC čvorova povećava interćelijska interferencija (ICI). Tehnike ublažavanja ICI u OWC domenu su sprovedene na osnovu poznatog pristupa koji se koristi u RF tehnologiji [152]. Problem uskog grla poslednje milje nastaje jer mobilne mreže ne mogu da se nose sa velikim brzinama i protokom podataka koji korisnici zahtevaju. Zbog velikog broja uređaja za prenos podataka u mreži, javlja se potreba da pristupna mreža ima veliku propusnost. Takođe, potrebno je obezbediti precizno prenošenje korisničkih podataka preko karakterističnih backhaul mreža. Neke od budućih FSO aplikacija obuhvataju i pozadinsku i frontalnu komunikaciju na nivou transportne i pristupne mreže. Troškovi i pouzdanost prilagođavanja FSO sistema mobilnoj mreži backhauling su jedno od važnijih pitanja na koje je potrebno dati odgovor. Inače, umrežavanje zasnovano na mašinskom učenju je tehnologija na kojoj će se zasnivati ćelijske mreže sledeće generacije. Danas je sve veća potražnja za tehnologijom veštačkog upravljanja i daljinskog odlučivanja.

Masovna upotreba IoT uređaja stvara potrebu za međusobnim prožimanjem različitih tehnologija, kao i potrebu za hibridnim povezivanjem. Na primer, brojnim aplikacijama je potrebna integracija raznovrsnih tehnologija, kao što su: RFID, bežične senzorske mreže (WSN), WiFi i ZigBee povezivanje na jednu ili na neku hibridnu mrežu. Ovakvim potrebama konvencionalni RF spektar biva veoma opterećen. Rešenje ovog problema je hibridni FSO

sistem, jer ovaj tip OWC tehnologije ne ometa postojeći sistem zasnovan na RF delu spektra, već koristi deo elektromagnetnog zračenja u vidljivom delu spektra, koji ima hiljadu puta veći propusni opseg nego RF domen [159].

2.8.2. Relejne FSO mreže

Performanse zemaljske FSO veze mogu biti ozbiljno degradirane usled neusklađenosti snopa, slabljenja i atmosferskih turbulencija. Relejne FSO mreže mogu da se nose sa ovim izazovima, jer se podaci prenose do srednjeg relejnog čvora čime se izbegava direktna veza [93]. Da bi se održala veza sa kraja na kraj potrebna je velika snaga prenosa. Potrebna dodatna snaga može uticati na nivo bezbednosti. Dakle, optimalna alokacija (dodavanje) snage u hibridnu RF/FSO mrežu je ključno pitanje projektovanja optičke bežične mreže potpomognute relejem. Heterogene mreže zasnovane na baferu sa relejem za dronove (UAV), sa fiksnim i pokretnim relejnim stanicama prikazana su u [160]. Multi hop prenos i kooperativni diverziteti releji dati su u [30]. Tehnikom prenosa sa više skokova proširuje se prostorna pokrivenost, signal se prenosi od relejnog čvora do odredišnog čvora. Kod paralelnog relejnog pristupa, iste informacije se prenose i prijemnom i relejnom čvoru, gde relejni čvor opet prenosi informaciju odredišnom čvoru. Pitanja relejnog prenosa obrađena su u [152]-[156]. Uvođenjem optičkih releja izbegava se potreba za optičko-električno-optičkom (OEO) konverzijom na svakom relejnom čvoru. Upotrebom poluprovodničkih pojačavača zasićenja (SOA), FSO sistemi imaju mogućnost da eliminišu scintilaciju, atmosferske turbulencije, čak i bez informacije o stanju kanala (SCI) [161]. Ipak relejno povezivanje je tehnologija koja se mnogo više vezuje za RF nego za FSO način prenosa.

2.8.3. WDM FSO veza

Integracija FSO i tehnike multipleksiranja po talasnim dužinama (WDM) ima za cilj proširenje kapaciteta FSO veze. Uvođenjem guste WDM (DWDM), FSO sistem može biti znatno poboljšan. 320 Gbps LOS/Long WDM FSO veza je implementirana pomoću OOK modulacije [162], a FSO veza od 200 Gb/s je prikazana u [163]. Za analizu verovatnoće otkaza WDM FSO veze uzima se u obzir međukanalno preslušavanje i turbulencija. Ipak, optički CDMA se više uzima u obzir za FSO mreže naredne generacije kao podrška optičkim mrežama u FTTH tehnologiji. Radovi [157] posvećeni su OCDMA-WDM optičkim mrežama u kontekstu FSO tehnologije, uzimajući u obzir greške pokazivanja korišćenjem prijemnog

diverziteta za povećanje kapaciteta kanala i, isto tako, uzimajući u obzir ukupne performanse kanala. OCDMA sa više talasnih dužina (MW) je atraktivno rešenje za poboljšanje kapaciteta kanala putem smanjenja interferencije višestrukog pristupa (MAI) i preslušavanja. Tehnologija kombinovanja WDM-OCDMA, u odnosu na konvencionalnu WDM tehnologiju, podržava postojanje ogromnog broja istovremenih korisnika kao i dinamičko dodavanje/ispuštanje pristupne mreže sledeće generacije. Proučavanje hibrida DVD-MIMI FSO [164] se sprovodi u cilju povećanja pokrivenosti sa minimalnim BER-om i minimalnom verovatnoćom otkaza, sve to u teškim vremenskim uslovima. ⁴⁶ Ipak, potrebno je još istraživanja da bi se došlo do ekonomičnosti i jednostavnije integracije FSO WDM sistema sa već postojećom infrastrukturom.

2.8.4. Karakterizacija kanala

Tokom proteklih decenija, u cilju kvantifikacije FSO sistema, predloženi su različiti modeli kanala: Log-normal, Lognormal-Rician, Gamma-Gamma [35]. Na performanse FSO kanala u velikoj meri utiču atmosferske turbulencije: rasejanje, scintilacija, apsorpcija vazduha, gubitak slobodnog prostora i refleksija. Osim toga oluja, magla, jaka kiša kao i prašina mogu ozbiljno da degradiraju vezu između prijemnika i predajnika. Stoga, pitanje ublažavanja efekta atmosferskih turbulencija, kao i pitanje statističkog modelovanja uticaja atmosferskih turbulencija, pokretljivosti prepreka i greške pokazivanja na prijemni signal, nije nimalo jednostavno. Alokacija (dodavanje) snage i performanse veze u velikoj meri zavise od atmosferskih gubitaka. Jedna od opcija je NLOS komunikacija u UV spektralnom domenu. Pitanja za istraživanja u budućnosti su i geometrijska konfiguracija primopredajnika, atmosferski uslovi i efektivno modeliranje kanala. Modeliranje kanala komunikacije optičkog rasejanja (OSC) je komplikovanije od modeliranja LOS FSO veze, upravo jer duži domet veze zahteva složenije modelovanje usled slabljenja i rasejanja. Primena MIMO-a, iako zahteva složeniji hardver, je jedno od pitanja kojim se bave istraživački radovi.

2.8.5. Pozicioniranje, akvizicija i praćenje (PAT-Pointing, Acquisition, Tracking)

Uopšteno govoreći, veza FSO sistema je širokopojasna i usmerena, od tačke do tačke i čini liniju između čvora za slanje i odredišta. RAT tehnika se obično koristi i u statičnim i u mobilnim FSO sistemima, kada primopredajnik koristi uske snopove i divergencija takvog snopa je manja od nekoliko mikro radijana (μrad) [39]. Ovakvim ultra uskim snopom postižu

se velike brzine prenosa podataka, dug domet, smetnje su manje a energetska efikasnost FSO sistema je veća. Ipak FSO sistem sa uskim spektralnim snopom, između dve tačke, je komplikovaniji za izgradnju. Pravac prenosa LOS veze mora da bude precizan da bi se povezanost između krajnjih korisnika održala. Za konkretan učinak RAT mehanizma, potrebno je razviti integrisanu i fleksibilnu hardversku arhitekturu.

Kod mehanizma pokazivanja, FSO čvor počinje da razmenjuje informacije sa potencijalnim čvorovima koji postoje u slobodnom prostoru mmWave mreža [165]. Dakle, sinhronizacija između čvorova je veoma bitno pitanje dizajna mreže, koje je povezano sa mehanizmom pokazivanja. Akvizicija je mehanizam povezan sa tehnikom modulacija-demodulacija. Otvor FSO prijemnika je dizajniran tako da može da prihvati više optičkih zraka, nakon toga prijemnik odlučuje o mehanizmu dekodiranja. Fizička arhitektura mora da bude takva da su dimenzije otvora prijemnika prilagođene uglu divergencije zraka emitovanog iz lasera [166]. Ovakvom tehnikom značajno se smanjuje verovatnoća otkaza rada sistema, povećava se brzina i efikasnost. Mehanizam praćenja povezan je sa svojstvom uskog spektralnog snopa. Performanse veze u velikoj meri zavise od poravnanja snopa između prijemnika i predajnika i oblika sočiva. Mehanizam praćenja kod mobilnih primopredajnika, usled neusklađenosti optičkih zraka, ima manji raspoloživi kapacitet i veću verovatnoću otkaza. S druge strane visoka preciznost usmeravanja je održiva kod stacionarnih primopredajnika.

Inteligentni transportni sistemi, kao što su V2V, V2I, Vehicle-to-everything (V2X) zahtevaju da se LOS komunikacija sa vozilom konstantno održava [167]. Optička bežična tehnologija je primenljiva u upravljanju saobraćajem. Ovakva primena je jako izazovna sa aspekta akvizicije i praćenja, naročito u gusto urbanizovanim sredinama. Velike brzine kretanja automobila ili vozova, pred FSO sistem stavljaју zahtevnu realizaciju u oblasti V2X (Vehicle to everything) komunikacije. Agilni RAT sistem je u stanju da isprati velike brzine kretanja vozila u V2X sistemu [168]. Efikasan RAT model mora da obezbedi višesmernu pokrivenost kao i ublažavanje vibracija. Ovako direktivnim mehanizmima za mobilnu FSO komunikaciju, gde je unapred poznato kretanje objekta, smanjuje se vreme primopredaje. Nedostatak ove tehnologije je greška koja nastaje usled neusklađenosti stvarne i očekivane brzine vozila, pa je kao podrška potrebna GPS ili neka druga tehnika praćenja. Kod RAT tehnike, vremenska sinhronizacija je jedno od ključnih pitanja. Kao rešenje ovog pitanja, primopredajnici imaju mogućnost razmene kontrolnih podataka: o lokaciji, mobilnosti i vremenu potrebnom za sinhronizovano poravnanje.

2.8.6. Podvodna komunikacija (UWC)

UWC tehnologija ima veliku primenu, pre svega za istraživanje, detekciju i nadzor objekata na moru, jedan od primera su naftovodi. Prednost UWC tehnologije su velike brzine prenosa podataka i velika oblast pokrivenosti. Jedno od važnih pitanja, ovde, je tehnika adaptivne modulacije i kodiranja (AMC). Štaviše, adaptivni mehanizam za prebacivanje između akustičnog i optičkog režima, za hibridne optičko/akustične veze u podvodnom okruženju ima veliku primenu.

2.8.7. FSO umrežavanje

5G/B5G je tehnologija sastavljena od gustih heterogenih mreža (kombinacije makroćelija-pikoćelija, makroćelija-femtoćelija, makroćelija-mikroćelija), čime se povećava transportni kapacitet podataka. Male ćelije guste heterogene mreže (HetNet) generišu jako česta prebacivanja između optičkih i RF mreža, što može da dovede do mnogih nepotrebnih primopredaja [169]. Posledica toga je da je kontrola neželjenih primopredaja i ping-pong efekat jedno od važnih pitanja za pravilno funkcionisanje sistema. Hibridna FSO mreža zahteva podršku dva različita tipa (heterogenih) prijemnika, kako se osobine RF i optičkog primopredajnika razlikuju, obe mreže moraju biti aktivne istovremeno. Usled kombinovanja dve različite arhitekture na istoj platformi, istovremeni prenos podataka preko različitih sistema je jedno od bitnijih pitanja. S druge strane, svojstva fizičkog sloja i sloja veze, hibridnih RF i optičkih mreža, imaju važnu ulogu za mobilnost sistema. Važno je omogućiti horizontalno i vertikalno prebacivanje, čime se omogućava neograničena mobilnost korisnika. Na primer, korisnik može neprimetno sa se kreće u LiFi ćeliji (horizontalno prebacivanje) ili među LiFi i WiFi mrežama (vertikalno prebacivanje) u okviru hibridnog LiFi-WiFi sistema. Vreme potrebno za proces prebacivanja treba da bude dovoljno kratko da bi se ispunila specifikacija 5G/B5G mreža. Vreme potrebno za razmenu informacija između korisničkog uređaja i centralne stanice zavisi od algoritma [170].

2.8.8. Bezbednost fizičkog sloja

Prema [171], bežične optičke komunikacije, kao što je FSO su na fizičkom sloju ranjive na sajber napade. Spoljašnje prisluškivanje FSO komunikacije otvara pitanje bezbednosti i privatnosti ovog sistema. Autori u [172] analiziraju (SOP) verovatnoću otkaza tajnosti

komunikacije, uzimajući u obzir spoljašnje prisluškivanje, koje je usmereno na fizički sloj. Kako kod optičkog zraka dolazi do pulsog širenja, spoljašnje prisluškivanje dovodi do većeg struka snopa u poređenju na veličinu prijemnika. U [173] analizirana je bezbednost fizičkog sloja FSO sistema za MISO (višestruki antenski terminali na predaji, jedna antena na prijemu), MIMO i kooperativne sisteme. Analiza SOP-a preko Malaga kanala turbulencije data je u [174]. Sigurnost fizičkog sloja, sa aspekta distorzije kanala, za hibridne RF/FSO relejne mreže data je u [175]. Analiza srednjeg kapaciteta tajnosti (ASC) za aktivno prisluškivanje RF/FSO mreže zasnovano na dekodiranju i prosleđivanju (DF), proučava se u [176]. Performanse ASC-a za Malaga turbulenciju razmatrane su u [177].

2.8.9. Softverski definisana mrežna (SDN) kontrola

SDN (Software Defined Networking) efikasno kontroliše i upravljanje hibridnim optičkim mrežama. Međutim, nekim od OWC aplikacija koje zahtevaju: preusmeravanje saobraćaja, upravljanje greškama kao i bezbednosnim problemima, upravlja prvi sloj aplikacije SDN sistema [178]. Ali, aktivnosti kao što su: ažuriranje kontrole toka, odabir mreže i druga suštinska kontrolna pitanja, izvršavaju se na kontrolnom sloju [179]. SDN tehnologija se ugrađuje u FSO sistem u cilju minimalizacije potrošnje energije i to kroz kontrolu saobraćaja podataka. Virtualizacija mrežnih funkcija i pristup aplikaciji u realnom vremenu SDN sistema je jedno od novih istraživačkih pitanja.

Proširivanje optičkog spektra izvan UV opsega ima za cilj postizanje velike snage prenosa i snižavanje cene izvora svetlosti. Sistemi za unutrašnje pozicioniranje koji imaju RF podršku pate od višeputnog fedinga i gubitka pozicioniranja [180]. Da bi se smanjio gubitak podataka, bitan je izbor optimalnog predajnika između više čvorova i minimalizacija kašnjenja što bi rezultovalo besprekornim prenosom podataka.

Dizajniranje optičkih bežičnih sistema nailazi na niz izazova, kao što su energetska ograničenje prenosivih uređaja i ograničenja uskog snopa za mobilne uređaje. Dakle, mobilnost uzlazne veze je otvoreno istraživačko pitanje. Nekoliko istraživačkih radova sprovedeno je na temu RF/optička hibridna bežična mreža iz perspektive fizičkog sloja dok se jedva fokusiraju na metriku nivoa veze [158].

3. BEŽIČNI OPTIČKI SISTEMI PRENOSA U PRISUSTVU TURBULENCIJE

U ovom poglavlju dat je prikaz optičke bežične komunikacije, gde se frekvencija nosioca bira iz mnogo višeg optičkog spektra, obično reda veličine 10¹⁴ Hz. U poređenju sa konvencionalnim RF sistemima, FSO sistemi nude nekoliko značajnih prednosti, koje su posledica kratkih talasnih dužina (visokih frekvencija). Prednosti ovih sistema su sledeće:

- Manje dimenzije prijemne antena;
- Manja veličina i težina komponenti;
- Koncentracija snage u veoma uskom snopu (bezbedniji kanal);
- Potencijalno povećanje modulacionog opsega.

Posebno je važna poslednja navedena stavka, upravo zbog količine informacija koju prenosi komunikacioni sistem a što je direktno povezano sa propusnim opsegom modulisanog nosioca. Dakle, povišenje frekvencije nosioca do oblasti optičkog spektra ima potencijal da značajno poveća informacioni kapacitet sistema (veća brzina prenosa podataka). Aplikacije čije bi performanse poboljšala FSO komunikacija su one sa kriterijumima visokih performansi, i koje rade u okruženju gde nije moguće uspostaviti fizički vezu optičkim kablom npr. između zgrada ili u slučaju svemirskih veza.

Ipak, treba napomenuti, da iako FSO sistemi nude određene prednosti u odnosu na RF sisteme, usled kratkih talasnih dužina javljaju se i određeni nedostaci, na primer:

- Jaka usmerenost emitovanog zraka otežava akviziciju i usmeravanje.
- Dizajn optičkih komponenti zahteva sopstvenu tehnologiju, drugačiju nego što je to slučaj kod RF sistema.
- Na performanse FSO sistema utiču atmosferske turbulencije, magla, jaka kiša, sneg.

Uticaj atmosferskih turbulencija je možda najozbiljniji nedostatak FSO sistema, jer ograničava radnu dostupnost i/ili uzrokuje izobličenje talasa nosioca što nije slučaj kod RF

sistema. Gubici snage povezani sa zračenjem laserskog zraka u vidljivom i IC delu spektra mogu biti uzrokovani apsorpcijom i rasejanjem gasova i čestica u atmosferi. Pored toga, optička apsorpcija koja je rezultat malih temperaturnih varijacija u atmosferi, dovodi do daljih gubitaka snage usled širenja radijusa snopa, što dalje uzrokuje vremenske i prostorne fluktuacije laserskog zraka poznate kao scintilacija. Male greške usmeravanja mogu lako da dovedu do efekta bledenja usled Gausovog opadanja u profilu srednjeg zračenja u kombinaciji sa velikom scintilacijom van ose.

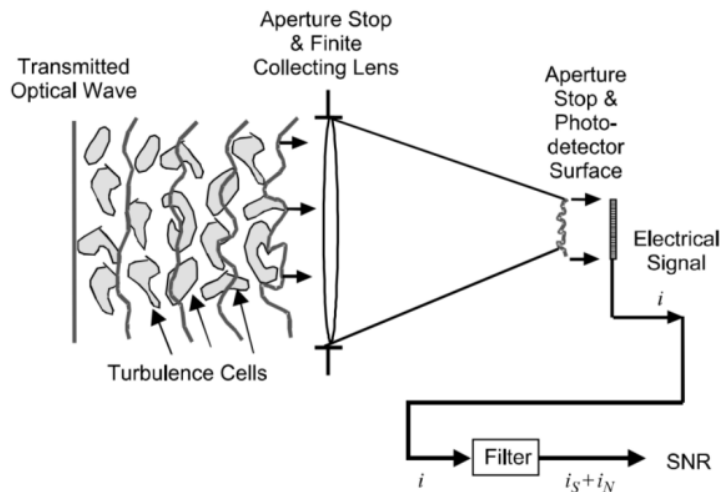
FSO sistemi se sastoje od tri osnovna podsistema: predajnika, kanala i prijemnika. Predajnik se sastoji od enkodera i modulatora koji pripremaju informacije koje se šalju na optički signal. Prenosni medijum između sabirnog sočiva predajnika i prijemnika naziva se kanal. Za problematiku kojom se mi bavimo, kanal je deo atmosfere i predstavlja ograničavajući faktor u performansama FSO sistema. Cilj prijemnika je da prikupi preneseno optičko polje i obradi ga tako da se rekonstruiše poslata informacija. Tipičan optički prijemnik se sastoji od prednjeg prijemnog sočiva koje fokusira svetlost na optički detektor gde se optičko polje pretvara u električni signal.

Optički prijemnici su u opštem smislu podeljeni na dva tipa: prijemnike sa direktnom (ili snagom) detekcije, koji detektuju samo amplitudu talasa i koherentne prijemnike koji detektuju sam talas (tj. amplitudu, fazu i polarizaciju). Detektor obično prati postdetekcioni procesor koji pojačava, obrađuje i na kraju obnavlja informacije sa izlaza detektora.

3.1. Optički prijemnici sa direktnom detekcijom

Najjednostavniji tip optičkog prijemnika za implementaciju je prijemnik za detekciju snage, koji se takođe naziva prijemnik za direktnu (ili nekoherentnu) detekciju. Zato što registruje samo trenutnu snagu primljenog polja, prijemnik sa direktnom detekcijom se koristi u aplikacijama u slučaju kada se za detekciju ne koristi faza optičkog polja.

Kod tipičnog FSO sistema sa direktnom detekcijom, željena informacija se moduliše intenzitetom na optičko polje zraka i prenosi kroz atmosferski kanal do prijemnika. Sočivo prijemnika sakuplja deo prenesenog optičkog polja, koje se zatim fokusira na površinu fotodetektora, kao što je prikazano na slici 3.1. Svrha fotodetektora je da pretvori fokusirano optičko polje u električni signal za obradu.



Slika 3.1. Sistem direktne detekcije za digitalni signal. Nivo „1“ je odgovarajući nivo signala za uključeni impuls, a nivo „0“ je isključen impuls. Nivo signala iznad praga kada je impuls isključen je lažni alarm, a nivo signala ispod praga je kada je impuls uključen.

Ipak, napomenimo da se, nažalost, optičko polje uvek detektuje u prisustvu stranih izvora i šuma, što je slučaj u celom prijemniku. Na primer, pozadinsko zračenje (sunce, zračenje crnog tela itd.) prijemno sočivo takođe sakuplja i fokusira se na površinu za detekciju fotografija zajedno sa prenesenim optičkim poljem. Pozadinsko zračenje koje je na talasnim dužinama različitim od željenog signala može se eliminisati optičkim filtriranjem. Ovi optički filteri propuštaju određene talasne dužine koje određuju fotodetektovano optičko polje. Pozadinsko zračenje na istoj talasnoj dužini kao i signal (ili unutar propusnog opsega optičkog filtera) se obično tretira kao aditivno polje šuma za željeno optičko polje. Drugi izvor buke je sam proces fotodetekcije koji proizvodi unutrašnje smetnje, koje se nazivaju šum detektora ili šum snimanja. Elektronski termalni šum se stvara u elektronici za obradu nakon fotodetekcije. Svi izvori električne buke se tretiraju kao aditivni degradirajući signali.

3.2. Detekcija praga u odsustvu turbulencija

Potreba da se utvrdi prisustvo digitalnog signala u sistemima sa aditivnim šumom je fundamentalna za komunikacioni sistem. Postoji nekoliko tehnika za detekciju signala, koje se

obično oslanjaju na neku vrstu detekcije zasnovane na pragu (slika 3.2). Samo kada izlaz detektora premaši postavljenu graničnu vrednost praga, kažemo da je signal prisutan. Lažni alarmi nastaju kada sam šum premašuje graničnu vrednost i stoga se tumači kao signal. Međutim, ako signal impulsa šuma ne premašuje prag, dolazi do nemogućnosti detekcija. Koncepti detekcije praga su ilustrovani na slici 3.3. Pojava lažnih alarma i nemogućnosti detekcije su zasnovani na posmatranoj veličini odnosa signa-šum (SNR).

Može se primetiti da detektor na slici 3.1 prati filter širine V , gde je propusni opseg izabran tako da odgovara frekventnom širenju dolaznog digitalnog impulsa signala. Protok struje na izlazu filtera, indukovano upadnim optičkim talasom je :

$$i = i_s + i_N \quad (3.1)$$

gde je i_N šum detektora, a i_s je struja signala definisana sa:

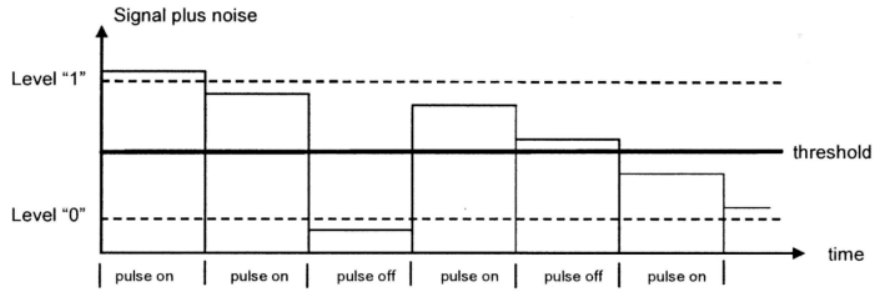
$$i_s = \frac{\eta e P_s}{h\nu} \quad (3.2)$$

P_s je snaga signala u vatima, η je kvantna efikasnost detektora u elektronima - fotonima (izražena kao konstanta u oblasti detekcije), e je električni naboj u kulonima, h je Plankova konstanta ($h=6,63 \cdot 10^{-34}$ džul sekundi), a ν je optička frekvencija u hercima. Pretpostavljamo da struja nasumične buke i_N na izlazu iz filtra ima nultu srednju vrednost, tako da je ukupna snaga buke definisana sa:

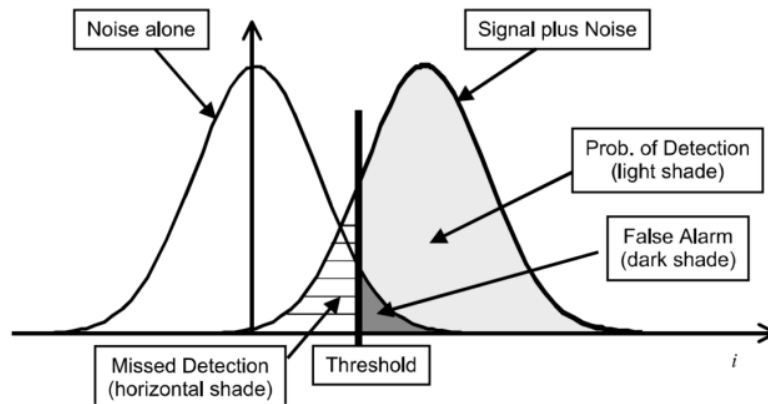
$$\sigma_N^2 = \langle i^2 \rangle - \langle i \rangle^2 = \langle i_N^2 \rangle \quad (3.3)$$

gde je srednja kvadratna vrednost šuma (kada se zanemari pozadinsko svetlo i drugi izvori buke):

$$\langle i_N^2 \rangle = 2eBi_s = \frac{2\eta e^2 B P_s}{h\nu} \quad (3.4)$$



Slika 3.2. Podešavanje praga za digitalni signal. Nivo „1“ odgovara signalu uključenog impulsa, a nivo „0“ je za isključen impuls. Nivo signala iznad praga kada je impuls isključen je lažni alarm, a nivo signala ispod praga kada je impuls uključen je nemogućnost detekcije.



Slika 3.3. Verovatnoća detekcije i lažnog alarma

Zaključujemo da je snaga struje detektora proporcionalna struji (ili snazi) signala. Izlazni SNR (u odsustvu optičke turbulencije) definišemo odnosom struje signala detektora i srednje kvadratne struje šuma (rms) σ_N , što daje:

$$SNR_0 = \frac{i_s}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{\eta P_s}{2h\nu B}} \quad (3.5)$$

Pošto smo zanemarili pozadinsko osvetljenje, struju curenja i termalni šum, SNR u izrazu (3.5) se naziva ograničenim šumom (fotonskim šumom).

Kada su nivoi signala niski u režimu brojanja fotona, uobičajeno je da se koristi Puasonova statistika za opisivanje slučajnog šuma kada su drugi izvori šuma zanemarljivi.

Ovde ćemo pretpostaviti da je srednji broj fotona dovoljno velik da se Gausova statistika može primeniti za sve izvore šuma. Pa SNR možemo izraziti kao:

$$SNR_0 = \frac{i_s}{\sigma_N} \quad (3.6)$$

A, funkcija gustine verovatnoće amplitude (PDF) za slučajni šum je opisana Gausovom distribucijom nulte srednje vrednosti:

$$p_n(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp\left(-\frac{i^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (3.7)$$

Ukupna izlazna struja i koja izlazi iz filtra sadrži i signal i šum i ima srednju vrednost i_s , pa je ukupna struja modelovana Gausovom PDF funkcijom čija srednja vrednost nije nula.

$$p_{s+n}(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp\left[-\frac{(i-i_s)^2}{2\sigma_N^2}\right] \quad (3.8)$$

Verovatnoća detekcije i verovatnoća lažnog alarma date su, respektivno, sa:

$$P_{rd} = \int_{i_T}^{\infty} p_{s+n}(i) di = \operatorname{erfc}\left(\frac{i_T - i_s}{\sqrt{2}\sigma_N}\right) \quad (3.9)$$

$$P_{r_{fa}} = \int_{i_T}^{\infty} p_n(i) di = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{i_T}{\sqrt{2}\sigma_N}\right) \quad (3.10)$$

gde je $\operatorname{erfc}(x)$ komplementarna funkcija greške.

SNR je uobičajeni pokazatelj performansi sistema, ipak u digitalnoj komunikaciji bolji uvid u karakteristike sistema daje verovatnoća greške, koja se naziva još i verovatnoća greške po bitu (BER), a zavisi od SNR-a. Najosnovniji oblik impulsne modulacije u digitalnim komunikacijama je *on-off-keying* (OOK). Svaki bitni simbol se prenosi pulsiranjem izvora ili uključivanjem ili isključivanjem pulsiranja tokom trajanja svakog bita. Usled slučajnog šuma, preneti bit 0 može biti pogrešno detektovan kao bit 1, što označavamo sa $\Pr(1|0)$, dok ako se

bit 1 pogrešno prenese sa bitom 0, označava se kao $\Pr(0|1)$. Ako pretpostavimo da će svaki simbol biti poslat sa jednakom verovatnoćom, BER izračunavamo pomoću:

$$\Pr(E) = \frac{1}{2} \Pr(1|0) + \frac{1}{2} \Pr(0|1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\operatorname{SNR}_0}{2\sqrt{2}} \right) \quad (3.11)$$

gde je SNR_0 definisan izrazom (3.6), i pretpostavljeno je da je $i_T = 0.5i_s$. Ovde je $\Pr(1|0)$ označava verovatnoću lažnih alarma, a $\Pr(0|1)$ označava verovatnoću neostvarene detekcije definisane sa $1 - \Pr_d$.

Verovatnoću promašaja (neostvarene detekcije) ispod posmatranog praga definišemo sa $\Pr_{\text{fade}} = 1 - \Pr_d$, gde je $\Pr_d$ verovatnoća detekcije (3.9). Verovatnoća neostvarene detekcije daje procenu koliko je verovatno da će izlazna struja i iz detektora pasti ispod propisanog praga i_T . Povezane veličine od interesa su: učestalost prenapona i učestalost zatamnjenja izlazne struje, koje su identične sa učestalošću pozitivnih i negativnih prelaza nivoa praga, odnosno nagiba struje i .

Rajs je, za stacionarni proces pokazao da je učestalost i pozitivnih i negativnih prelazaka granične vrednosti i_T izlazne struje data očekivanim brojem prelazaka u sekundi definisana sa:

$$\langle n(i_T) \rangle = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |i'| p_{s+n}(i_T, i') di' \quad (3.12)$$

gde je $p_{s+n}(i, i')$ združena PDF funkcija izlazne struje i i njenog vremenskog izvoda i' . Rajs je takođe pokazao da su vremenski derivati slučajnog procesa i sam proces nepovezani, ali ne i nužno nezavisni. Međutim, vremenski derivat Gausovog procesa je još jedan Gausov proces i zato je statistički nezavisan od prvobitnog procesa.

Izlazna struja sistema direktne detekcije ima Gausovu raspodelu (3.8), i združeni PDF struje i i njenog vremenskog izvoda i' , pa je produkt Gausove marginalne raspodele.

$$p_{s+n}(i, i') = p_i(i) p_{i'}(i') = \frac{1}{\sqrt{2\pi b_0}} \exp \left[-\frac{(i - i_s)^2}{2b_0} \right] \frac{1}{\sqrt{1\pi b_0}} \exp \left(-\frac{i'^2}{2b_2} \right) \quad (3.13)$$

gde je:

$$b_0 = \sigma_N^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_N(\omega) d\omega \quad \text{i} \quad b_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \omega^2 S_N(\omega) d\omega \quad (3.14)$$

Veličina $S_N(\omega)$ u (3.14) označava spektar snage struje šuma, a ω predstavlja ugaonu frekvenciju.

Ovde je sa $b_0 = \sigma_N^2$ označena snaga šuma, a srodna veličina b_2 je autokorekciona funkcija vremenskog izvoda. Na osnovu (3.12) i (3.13) dobija se:

$$\langle n(i_T) \rangle = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{b_2}{b_0}} \exp\left[-\frac{(i_T - i_S)^2}{2b_0}\right] = v_0 \exp\left[-\frac{(i_T - i_S)^2}{2\sigma_N^2}\right] \quad (3.15)$$

gde je $v_0 = \sqrt{b_2/b_0}/2\pi$ tzv. kvazi frekvencija, odnosno frekvencija slabljenja, kada je $i_T = i_S$, tako da v_0 daje meru efikasnog propusnog opsega i .

Kada je struja signala $i_S = 0$ očekivani broj promašaja se svodi na veličinu verovatnoće pojave lažnih alarma (FAR).

$$FAR = \frac{B}{2\sqrt{3}} \exp\left(-\frac{i_T^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (3.16)$$

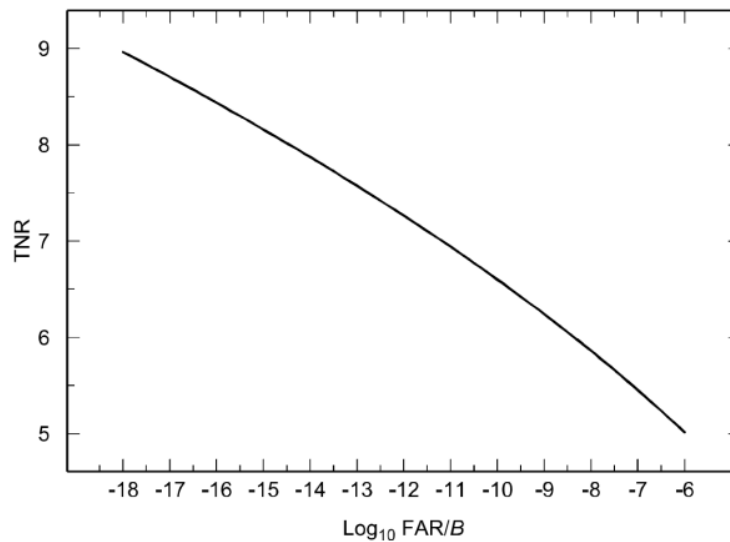
Napomenimo da verovatnoća pojave lažnih alarma (3.10) i FAR (3.16) zavise od odnosa praga i buke (TNR) definisanog kao:

$$TNR = \frac{i_T}{\sigma_N} \quad (3.17)$$

Obično se željeni FAR (3.16) ili verovatnoća lažnog alarma (3.10), navodi u specifikacijama FSO komunikacionih sistema, kako bi se predefinisao određeni nivo performansi. TNR je funkcija FAR-a data pomoću:

$$TNR = \sqrt{2 \ln\left(\frac{B}{2\sqrt{3}FAR}\right)} \quad (3.18)$$

Ako je predefinisana vrednost verovatnoće lažnog alarma, onda jednačina (3.10) predstavlja TNR kao funkciju Pr_{fa} . Na slici 3.4 TNR (3.18) dat je kao funkcija FAR/B. Ako odredimo $FAR/B=10^{-12}$, iz (3.18) sledi da je $TNR=7,26$.



Slika 3.4. Odnos praga signala i šuma (TNR) kao funkcija FAR/B

3.3. Statistika smetnji u optičkom kanalu

Oblasti primene FSO sistema su brojne, primer za to je i upotreba u vojne svrhe, ipak scintilacija izazvana prostiranjem zraka kroz atmosferu znatno degradira performanse sistema. Konkretno, scintilacija može dovesti do gubitka snage na prijemniku i na kraju do slabljenja prijemnog signala ispod propisanog praga. Pouzdanost FSO sistema može se dobiti iz funkcije gustine verovatnoće (PDF) za nasumično oslabljeni signal zračenja. Na osnovu ovakvog PDF modela može da se izračuna verovatnoća pojave slabljenja signala (verovatnoća neuspešnih detekcija), očekivani broj slabljenja signala ispod propisanog praga kao i prosečno vreme u kome signal ostaje ispod praga a koje se naziva srednje vreme slabljenja.

Ako pretpostavimo da su u modelu raspodele faktori rasejanja od velikih prepreka X i rasejanja od malih prepreka Y , prilikom formiranja normalizovanog modela rasejanja I , $I=XY$, statistički nezavisni i da je svaki od njih predstavljen pomoću Gamma raspodele, tj.:

7

$$p_X(X) = \frac{\alpha (\alpha X)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha X) \quad X > 0$$

$$p_Y(Y) = \frac{\beta (\beta Y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta Y) \quad Y > 0 \quad (3.19)$$

gde su α i β pozitivni parametri direktno povezani sa scintilacijama velikih i malih razmera optičkog talasa definisani pomoću:

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_X^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln X}^2) - 1}$$

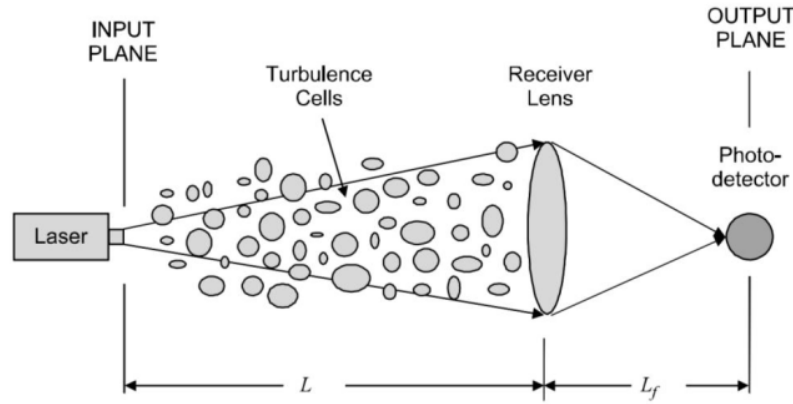
$$\beta = \frac{1}{\sigma_Y^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln Y}^2) - 1} \quad (3.20)$$

Na taj način, PDF za kompozitni model rasejanja (3.19) se modeluje pomoću Gamma-Gamma raspodele.

Za slučaj konačne dimenzije otvora prijemnika (slika 3.5), uobičajeno je da pretpostavljamo da je PDF model rasejanja u ravni fotodetektora na rastojanju $L+L_f$ od predajnika istog tipa kao i ona u ravni zenice na udaljenosti L od predajnika. Tako možemo zaključiti da se fluktuacije snage u slučaju prijema signala kod velikog otvora sočiva prijemnika i rasejanje u ravni talasnog fronta mogu modelovati preko iste PDF funkcije. U sledećoj analizi ćemo pretpostaviti da je zračenje u ravni talasnog fronta, uzimajući u obzir promenu srednjeg zračenja i fluktuacije snage (varijansa fluksa).

Na osnovu gore rečenog zaključujemo da je primarna PDF pod svim uslovima fluktuacije u ravni fotodetektora modelovana pomoću Gamma-Gamma PDF-a.

$$p_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)I} \left(\frac{I}{\langle I(0, L+L_f) \rangle} \right)^{(\alpha+\beta)/2} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\langle I(0, L+L_f) \rangle}} \right) \quad (3.21)$$



Slika 3.5. Geometrija širenja Gausovog snopa na rastojalju L levo od tankog Gausovog sočiva stvarne žižne daljine F_G i efektivnog radijusa prenosa W_G .

Ovde uzimamo opštu vrednost za srednju vrednost rasejanja, $\langle I(0, L+L_f) \rangle \neq 1$ a $K_v(x)$ predstavlja modifikovanu Beselova funkciju drugog reda. Kod pisanja ovog izraza zanemarimo svaku moguću grešku usmeravanja. Inače, PDF model rasejanja koji se najčešće koristi za slučaj slabih fluktuacija zračenja je logaritamski model.

$$pI(I) = \frac{1}{I\sigma_I(0, L+L_f)\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{\left[\ln \left(\frac{I}{\langle I(0, L+L_f) \rangle} \right) + \left(\frac{1}{2} \right) \sigma_I^2(0, L+L_f) \right]^2}{2\sigma_I^2(0, L+L_f)} \right\} \quad I > 0 \quad (3.22)$$

gde je $\sigma_I^2(0, L+L_f) = \sigma_I^2(D_G)$ varijansa fluksa u ravni detektora koja pokazuje zavisnost od prečnika prijemnika D_G .

U ovom slučaju kada je odnos signal-šum (SNR), na izlazu detektora, dovoljno visok da statistika fedinga može biti u potpunosti zasnovana na statistici zračenja prijemnog signala, ne moramo da pravimo razliku između sistema prijemnika sa direktnom detekcijom i sa koherentnom detekcijom.

Na osnovu PDF modela za fluktuacije snage zračenja $PI(I)$, verovatnoća pojave slabljenja signala (probabilitu of fade), se definiše kao procenat vremena u kome je snaga

zračenja talasa ispod neke propisane granične vrednosti I_T . Može se reći da je verovatnoća pojave slabljenja signala, kao funkcija nivoa praga, definisana kumulativnom verovatnoćom

$$P(I \leq I_T) = \int_0^{I_T} p_I(I) dI \quad (3.23)$$

Za lognormalni model PDF (3.22), rezultujuća verovatnoća pojave slabljenja signala se može predstaviti u obliku:

$$\Pr(I \leq I_T) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \right) \sigma_I^2 (0, L + L_f) - 0.23 F_T}{\sqrt{2} \sigma_I (0, L + L_f)} \right] \right\} \quad (3.24)$$

gde $\operatorname{erf}(x)$ predstavlja funkciju greške. Da bi smo došli do ovog izraza uveli smo parametar praga slabljenja:

$$F_T = 10 \log_{10} \left(\frac{\langle I(0, L + L_f) \rangle}{I_T} \right) [dB] \quad (3.25)$$

Parametar slabljenja F_T dat je u (dB), i predstavlja nivo decibela ispod srednjeg zračenja na osi ako je postavljeni prag I_T .

Za Gamma-Gamma raspodelu (3.21), odgovarajuća kumulativna raspodela je (3.12).

$$\Pr(I \leq I_T) = \frac{\pi}{\sin[\pi(\alpha - \beta)] \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{(\alpha\beta)^\beta}{\beta \Gamma(\beta - \alpha + 1)} \exp(-0.23 F_T \beta) \times {}_1F_2[\beta; \beta + 1, \beta - \alpha + 1; \alpha\beta \exp(-0.23 F_T)] - \frac{(\alpha\beta)^\alpha}{\alpha \Gamma(\alpha - \beta + 1)} \exp(-0.23 F_T \alpha) \times {}_1F_2[\alpha; \alpha + 1, \alpha - \beta + 1; \alpha\beta \exp(0.23 F_T)] \right\} \quad (3.26)$$

gde ${}_1F_2$ predstavlja generalizovanu hipergeometrijsku funkciju. Iako je (3.26) tačan rezultat, softver može dovesti do greške u izračunavanju generalizovane hipergeometrijske funkcije za određene argumente (posebno za velike vrednosti argumenata). Da bi se izbegla ova mogućnost, bolje je, u nekim slučajevima, PDF numerički integrisati u jednačinu (3.21).

Na slikama 3.6-3.8 pokazana je verovatnoća slabljenja signala, povezana sa Gausovim snopom, kao funkcija parametra praga slabljenja FT. Rezultati su predstavljeni i za lognormalni model i za Gamma-Gamma PDF model, korišćen je Kolmogorov power-low spektar. Verovatnoće slabljenja su razmatrane na usmerenom prijemniku ($D_G \cong 0$), kao i na prijemniku sa velikim otvorom blende DG=4cm, gde je razmatran i efekat usrednjavanja. U našem slučaju pretpostavlja se da je scintilacija izazvana lutanjem zraka zanemarljiva. Parametri α i β za Gamma-Gamma PDF definisani su opštim jednačinama (3.20). Kada se uzme u obzir efekat usrednjavanja otvora blende, parametri su izraženi pomoću:

$$\alpha = \frac{1}{\exp[\sigma_{\ln X}^2(D_G)] - 1},$$

$$\beta = \frac{1}{\exp[\sigma_{\ln Y}^2(D_G)] - 1}, \quad (3.27)$$

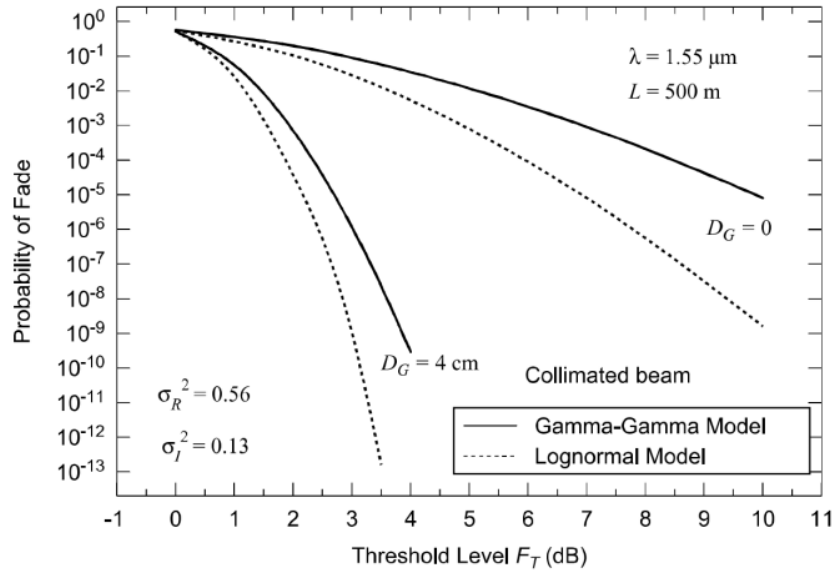
Varijansa fluksa fluktuacija označena je sa:

$$\sigma_I^2(0, L + L_f) = \exp[\sigma_{\ln X}^2(D_G) + \sigma_{\ln Y}^2(D_G)] - 1 \quad (3.28)$$

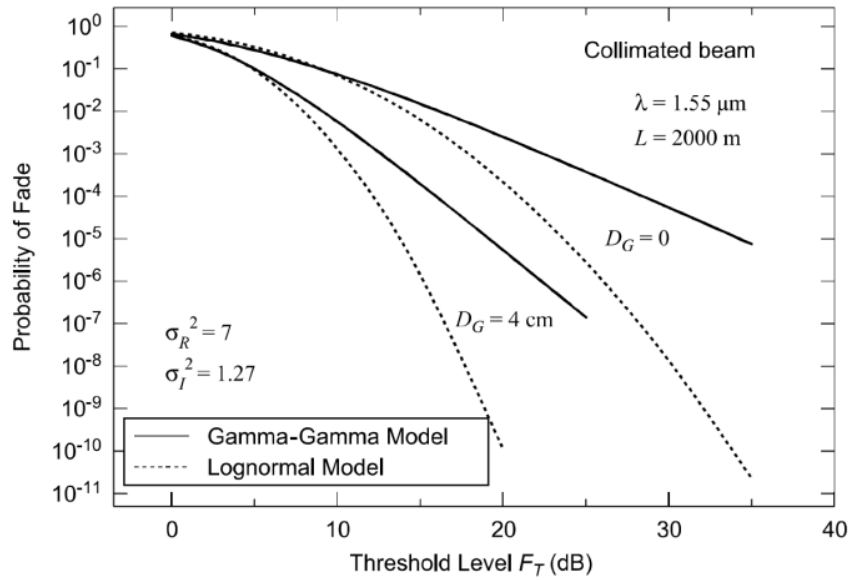
gde su rasejanja od prepreka većih dimenzija i rasejanja od prepreka manjih dimenzija kod log-zračenja definisana pomoću:

$$\sigma_{\ln X}^2(D_G) = \frac{0.49 \left(\frac{\Omega_G - \Lambda_1}{\Omega_G + \Lambda_1} \right)^2 \sigma_B^2}{\left[1 + \frac{0.4(2 - \bar{\Theta})(\sigma_B / \sigma_R)^{12/7}}{(\Omega_G + \Lambda_1) \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \bar{\Theta}_1 + \frac{1}{5} \bar{\Theta}_1^2 \right)} + 0.56(1 + \Theta_1) \sigma_B^{12/5} \right]^{7/6}} \quad (3.29)$$

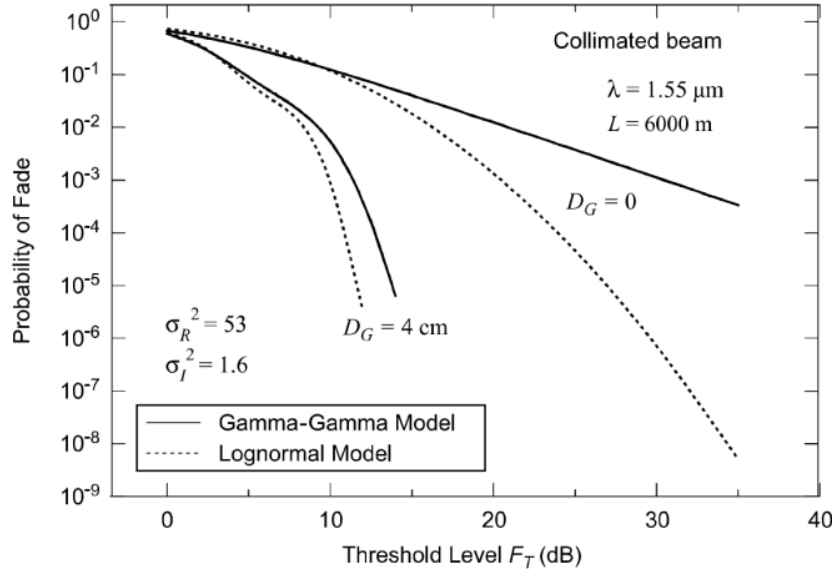
$$\sigma_{\ln Y}^2(D_G) = \frac{0.51 \sigma_B^2 (\Omega_G + \Lambda_1) (1 + 0.69 \sigma_B^{12/5})^{-5/6}}{\Omega_G + \Lambda_1 + 1.20 (\sigma_R / \sigma_B)^{12/5} + 0.83 \sigma_R^{12/5}} \quad (3.30)$$



Slika 3.6. Verovatnoća slabljenja signala kao funkcija ispod nivoa praga u uslovima slabe fluktuacije zračenja $\sigma_R^2 < 1$, pretpostavlja se da su unutrašnji i spoljašnji opsezi $l_0=0$, $L_0=\infty$, a D_G je prečnik otvora prijemnika.



Slika 3.7. Isto kao i slika 3.6. osim umerenih uslova fluktuacija zračenja $\sigma_R^2 > 1$.



Slika 3.8. Ista kao i slika 3.6. osim jakih uslova fluktuacije zračenja $\sigma_R^2 \gg 1$

Parametri snopa signala dati su u (3.29) i (3.30). σ_R^2 predstavlja Rytov-ovu varijansu za ravan talas, a σ_V^2 je Rytov-ova varijansa Gausovog snopa. Osim za veliki otvor blende, poslednji parametar se može aproksimirati izrazom:

$$\sigma_B^2 \cong 3.86\sigma_R^2 \left\{ 0.40 \left[(1 + 2\Theta_1)^2 + 4\Lambda_1^2 \right]^{5/12} \times \cos \left[\frac{5}{6} \tan^{-1} \frac{1 + 2\Theta_1}{2\Lambda_1} \right] - \frac{11}{16} \Lambda_1^{5/6} \right\} \quad (3.31)$$

Da bismo došli do rezultata na slikama 3.6-3.8, korišćene su različite dužine putanje L , za razmatrane vrednosti $C_n^2 = 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, $l_0=0$, $L_0 \infty$, $W_0=1 \text{ cm}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$. Pretpostavljana dužina puta na slici 3.6 je $L=500 \text{ m}$, što vodi do $\sigma_R^2=0.56$ i $\sigma_I^2=0.13$, i to u ravni fokusa prijemnika. Ove vrednosti su karakteristične za uslove slabih fluktuacija. Inače, za datu vrednost praga slabljenja, Lognormal model predviđa niže (optimističnije) verovatnoće slabljenja F_T , i to u poređenju sa Gamma-Gamma modelom. Za oba modela, prijemnik sa velikim otvorom blende pokazuje značajna poboljšanja u smislu predviđene verovatnoće slabljenja. Režim fokusiranja prikazan je na slici 3.7 na kojoj je $L=2000 \text{ m}$. Rezultujuća Rytov-ova varijansa u ravni zenice i indeks scintilacije su $\sigma_R^2=1.7$, $\sigma_I^2=1.27$, Lognormal model je na ovoj slici prikazan radi poređenja. Verovatnoća slabljenja je 10^{-6} , kod Gamma-Gamma modela i otvora prijemnika $D_G=4 \text{ cm}$ postiže se stanje slabih fluktuacija, slika 3.6, i to kada je $F_T \cong 23 \text{ dB}$ ispod srednje

vrednosti zračenja. Režim zasićenja je predstavljen na slici 3.8 gde je $L=6000\text{m}$. Indeksi Rayatov-ljeve varijanse i scintilacije dati su: $\sigma_R^2=53$ i $\sigma_I^2=1.6$, respektivno. Da bi se kompenzovala scintilacija, potrebno je veće fokusiranje otvora (veći otvor), za uslove jake turbulencije ($\sigma_R^2 \gg 1$). Međutim na slici 3.8 se vidi da se verovatnoća slabljenja 10^{-6} može postići sa $j F_T \cong 15\text{dB}$ ispod srednje vrednosti zračenja. Ovi rezultati se lako mogu proširiti na opšte slučajeve.

Broj negativnih (ili pozitivnih) prelaza propisanog praga karakteriše očekivani broj slabljenja signala u jedinici vremena $\langle n(I_T) \rangle$. Opšta definicija očekivanog broja slabljenja signala, data u jednačini (3.12), je primenljiva i u ovom slučaju. Kada posmatramo Lognormalni model raspodele, počinje se od združenog PDF-a (3.13) za Gausovu raspodelu i vrši se transformacija:

$$i = \frac{1}{2} \ln \frac{I}{\langle I \rangle}, \quad I' = \frac{I}{\langle I \rangle} \quad (3.32)$$

Odavde se izvodi Jakobian-ova transformacija $J=I/(4I')$. Kao posledica toga, združena PDF zračenja i njenog vremenskog izvoda dati su pomoću:

$$p_{I,I'}(I, I') = p_I(I) p_{I'}(I'|I) \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_I} \exp \left\{ -\frac{[\ln(I/\langle I \rangle) + (1/2)\sigma_I^2]^2}{2\sigma_I^2} \right\} \times \frac{1}{2I\sqrt{2\pi}b_2} \exp \left(-\frac{I'^2}{8b_2I^2} \right) \quad (3.33)$$

Ovde uzimamo u obzir $\sigma_I^2 \cong 4, \sigma_{I'}^2 = 4b_0$, $\langle i \rangle = -\sigma_I^2$, da je validno u uslovima slabih fluktuacija. Koristeći (3.33) u (3.12) dobijamo očekivani broj slabljenja:

$$\langle n(I_T) \rangle = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |I'| p_I(I_T, I') dI' = v_0 \exp \left[-\frac{((1/2)\sigma_I^2 - 0.23F_T)^2}{2\sigma_I^2} \right] \quad (3.34)$$

gde je v_0 kvazi frekvencija data kao:

$$v_0 = \frac{\sqrt{b_2}}{\pi \sigma_I} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_I''(0)}{B(0)}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.35)$$

Za Gamma-Gamma distribuciju združeni PDF dat je u formi $p_{I,I'}(I,I')=p_I(I)p_{I'}(I')(I'/I)$. Zaključujemo da raspodele zračenja i njihovi vremenski izvodi nisu statistički zavisni ni za Lognormal ni za Gamma-Gamma raspodelu. Međutim za Gamma-Gamma model, oblik uslovnog PDF-a za I' je nepoznat, ali se smatra da nije Gausov. Ipak zasnovano na fizičkom iskustvu može se podrazumevati da je približno Gausov PDF sa nultom srednjom vrednošću kada je $\alpha \rightarrow \infty$ i $\beta \rightarrow \infty$ (3.9). U ovom slučaju je:

$$p_{I,I'}(I,I') \cong \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right)^{(\alpha+\beta)/2} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\langle I \rangle}}\right) \times \frac{1}{2\sqrt{2\pi bI}} \exp\left(\frac{-I'^2}{8bI}\right) \quad (3.36)$$

Odakle zaključujemo da je:

$$\langle n(I_T) \rangle = \frac{2\sqrt{2\pi\alpha\beta}v_0\sigma_I}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta I_T}{\langle I \rangle}\right)^{(\alpha+\beta-1)/2} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I_T}{\langle I \rangle}}\right) \quad (3.37)$$

Ovde je $b = -\langle I \rangle B_I'' I(0)/4$, a kvazi frekvencija je:

$$v_0 = \frac{1}{\pi\sigma_I} \sqrt{\frac{b}{\langle I \rangle}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\frac{B_I''(0)}{B_I(0)}} \quad (3.38)$$

Zaključimo da kvazi frekvencija v_0 predstavlja standardnu devijaciju normalizovanog vremenskog spektra zračenja (izraženog pomoću PDF-a). Na kraju maksimalna širina spektra se može proceniti na odprilike $3 v_0$.

4. BEŽIČNI OPTIČKI KOMUNIKACIONI SISTEMI

U ovom poglavlju biće analizirane performanse bežičnog optičkog telekomunikacionog sistema primenom generalnih modela turbulencije u kanalu. Da bi se došlo do novog analitičkog modela kanala sa turbulencijom za opisivanje karakteristika FSO sistema biće izvedeni izrazi u zatvorenom obliku za funkciju gustine verovatnoće raspodele (PDF) amplitude signala u kanalu sa turbulencijom. Grafički će biti predstavljeni rezultati za ABER za razne modulacione formate. Biće predstavljeni izrazi na osnovu kojih je moguće odrediti performanse sistema čiji prijemnici koriste MRC i SC diverziti tehnike kombinovanja kako bi se smanjio uticaj turbulencije u optičkom kanalu i greške pozicioniranja na performanse sistema. Analiza efikasnosti prenosa i kvaliteta signala na prijemu biće izvršena za slučajeve primene odgovarajućih modulacionih formata pri prenosu.

4.1. Analiza performansi FSO sistema zasnovana na novom Gamma-Chi-kvadrat PDF modelu scintilacije

Jedno od glavnih pitanja u procesu analize performansi bežičnog optičkog prenosa (FSO) je uvođenje analitički trakabilnog modela funkcije gustine verovatnoće (PDF) za slučajnu promenljivu amplitude signala koji fluktuiira usled dejstva atmosferski indukovanih turbulencija. Do sada je u literaturi predloženo mnogo različitih modela FSO kanala za modeliranje uticaja različitih nivoa turbulencije: Longnormal-Rician model [181], K model [182], I-K model [183], Gamma-Gamma model [184], model Malaga [185], dvostruki Weibull model [186], dvostruki generalizovan Gamma model [184]. Svi ovi modeli daju rezultate koji se poklapaju sa merenjima za širok spektar uslova turbulencija, s obzirom da se svi formiraju uzimajući u obzir uticaj vrtložnih turbulencija velikih i malih rasejanja (large-scale, small-scale). U [187], [188] pokazno je kako se za Longnormal-Rician raspodelu poklapaju podaci

dobijeni na osnovu simulacije sa eksperimentalnim podacima. Ipak, u [188] izrazi za PDF i CDF Lognormal-Rician modela su aproksimirani, jer se njihovi oblici ne mogu analitički izraziti u zatvorenim oblicima. U [189]-[194] je predstavljen Rician (Chi-square) model, kao veoma efikasan model za modelovanje širokog spektra vrtložnih turbulencija (eddy effect). U skladu sa predhodno rečenim, predložen je analitički Gamma-Chi-square (Gamma-Rician) PDF kompozitni model, koji je dobijen kao kombinacija Gamma modela i Chi-square (Rician) modela. Na osnovu analiziranih rezultata [188], [189], [195], [196], [197] zaključuje se da je Gamma model pouzdan za analizu malih rasejanja (small-scale) pod uticajem vrtložne turbulencije, dok se Chi-square (Rician) model pokazao kao efikasan za opisivanje efekata velikih rasejanja (large-scale) izazvanih vrtložnom turbulencijom. Dalje je ovaj PDF model generalizovan, pa su u obzir uzeti efekti usled pogoršanja performansi sistema zbog neusklađenosti indukovanog fadinga, i to kroz uvođenje modela greške usmeravanja u novodobijenu Gamma-Chi-square raspodelu, slično kao u [198]-[201]. Da bi se izvršila sveobuhvatna analiza performansi FSO prenosa za slučaj upotrebe OOK (on-off keying) modulacionog formata za dati novouvedeni model kanala, posmatraćemo vrednosti srednje verovatnoće greške po bitu (ABER) i analizirati ih u funkciji parametara snage prenosnog sistema. Za oba slučaja, u prisustvu atmosferskih turbulencija, sa i bez greške pozicioniranja, ABER izrazi na prijemnoj strani biće predstavljeni u analitički zatvorenom obliku. Analitički dobijeni rezultati će biti verifikovani sa rezultatima dobijenim na osnovu Monte Carlo simulacije

4.1.1. Model atmosferske turbulencije

Već smo napomenuli dobro poznati pristup u teoriji scintilacije [195] gde se intenzitet zračenja primljenog optičkog talasa dobija kao proizvod intenziteta zračenja koja se javljaju u kanalu usled efekata vrtložnih turbulencija velikih i malih razmera rasejanja, tj. $I_a = I_x I_y$, uz pretpostavku da su I_x i I_y statistički nezavisni slučajni procesi. Uglavnom, na bežični optički signal utiče varijacija indeksa prelamanja što dovodi do interakcije optičkog signala i vrtložnih turbulencija, što dalje rezultira faznim i amplitudskim fluktuacijama prijemnog signala [185], [195], [202]. U skladu sa teorijom, pretpostavićemo da u Gamma-Chi-square kanalu deluju simultano fluktuacije malih i velikih razmera. .

Chi-square model raspodele amplitude optičkog signala dat je sledećim izrazom [189], [203] :

$$f_{I_x}(I_x) = \frac{1+K}{\Omega_p} e^{-K \frac{(1+K)I_x}{\Omega_p}} I_0 \left(2 \sqrt{\frac{K(1+K)}{\Omega_p}} I_x \right), \quad I_x > 0 \quad (4.1)$$

gde I_x predstavlja amplitudu optičkog signala, parametar K definiše odnos snage LOS (Line-of-sight) komponente i rasejanih komponenti zračenja [189], Ω_r označava ukupnu prijemnu snagu signala, dok je I_v (*) modifikovana Bassel-ova finkcija v -tog reda prve vrste [204, Eq.8.431].

Gamma model raspodele amplitude optičkog signala dat je sledećim izrazom [195]:

$$f_{I_y}(I_y) = \frac{\alpha (a I_y)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-a I_y}, \quad I_y > 0, \alpha > 0 \quad (4.2)$$

gde I_y predstavlja amplitudu optičkog signala, $G(*)$ predstavlja Gamma funkciju [204, Eq.8.310]. Parametar a je parametar atmosferske turbulencije koji predstavlja efektivni broj vrtloga malih razmera u okruženju rasejanja. Ovo je parametar atmosferske turbulencije koji se za širenje ravnih talasa u slučaju nulte unutrašnje skala može izraziti kao [195], [201]:

$$\alpha = \left[e^{\frac{0.49 \sigma_R^2}{(1+1.11 \sigma_R^{12/5})^{7/6}}} - 1 \right]^{-1} \quad (4.3)$$

gde σ_R^2 predstavlja Ritov-u varijansu koja se koristi za određivanje intenziteta optičkog signala u slučaju atmosfernih turbulencija, a definisana je kao:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (4.4)$$

Parametar C_n^2 označava indeks prelamanja optičkog signala koji se koristi kao mera turbulencije snage. Za horizontalnu putanju propagacije, parametar se smatra konstantnim sa srednjim vrednostima od 10^{-17} do $10^{-13} \text{ m}^{2/3}$, u zavisnosti od toga da li posmatramo optičke kanale sa slabom ili jakim turbulencijom. Parametar k predstavlja optički talasni broj, definisan kao $k=2\pi/\lambda$, gde λ označava talasnu dužinu, L predstavlja rastojanje između predajnika i prijemnika, odnosno dužinu prostiranja optičkog signala.

Koristeći relaciju $I_a = I_x I_y$, PDF za model atmosferske turbulencije se može dobiti kao:

$$f_{I_a}(I_a) = \int_0^{\infty} f_{I_x}(I_a|I_y) f_{I_y}(I_y) dI_y \quad (4.5)$$

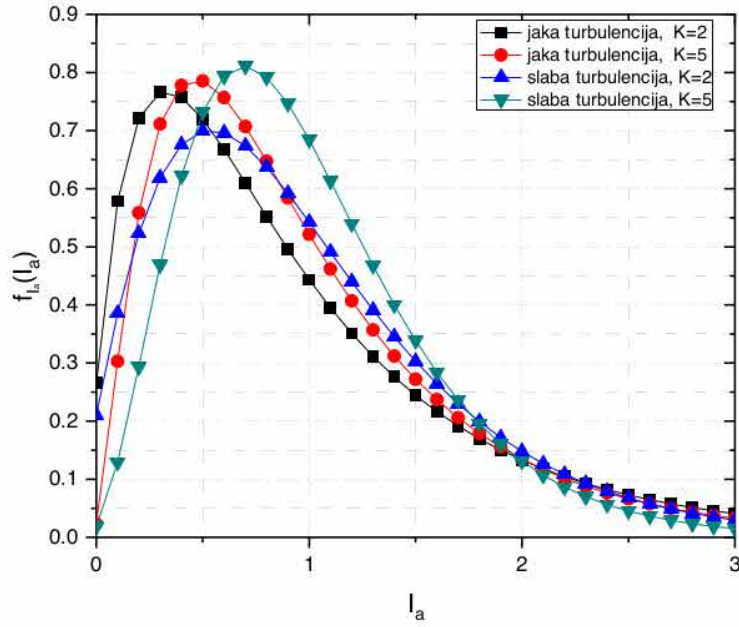
Zamenom jednačina (4.1) i (4.2) u jednačinu (4.5) i predstavljanjem modifikovane Bassel-ove funkcije prvog reda I_v^* u jednačini (4.1) u obliku beskonačnog reda [204, Eq.8.445], kao i korišćenjem rešenja rezultujućeg integrala datog u [204, Eq.3.478.4], dobićemo izraz zatvorenog oblika za PDF model za Gamma-Chi-square raspodelu u obliku [207]:

$$f_{I_a}(I_a) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2K^m e^{-K}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(m+1)m!} \left(\frac{\alpha(1+K)}{\Omega_p} \right)^{\frac{\alpha+m+1}{2}} I_a^{\frac{\alpha+m-1}{2}} K_{\alpha-m-1} \left(2\sqrt{\frac{\alpha(1+K)}{\Omega_p}} I_a \right) \quad (4.6)$$

gde K_v^* predstavlja modifikovanu Bassel-ovu funkciju v -tog reda, druge vrste [204, Eq.8.432].

Trenutni odnos signal-šum (SNR) u kanalu se može izvesti na sledeći način u funkciji matematičkog očekivanja posmatranog PDF [203], [204]:

$$\gamma_a = \frac{\mu_a}{E^2[I_a]} I_a^2 = \frac{\mu_a}{\Omega_p^2} I_a^2 \quad (4.7)$$



Slika 4.1. PDF za Gamma-Chi-square model optičkog kanala posmatran za slučajeve slabe i jake turbulencije

Na sličan način se u funkciji matematičkog očekivanja dobijenog izraza za PDF može predstaviti parametar μ_a , koji predstavlja trenutnu vrednost električnog odnosa SNR:

$$\mu_a = \frac{(2P_T R)^2}{2\sigma_N^2} E^2[I_a] = \frac{(2P_T R \Omega_p)^2}{2\sigma_N^2} \quad (4.8)$$

gde P_T predstavlja prosečnu prenešenu optičku snagu, parametar R označava odziv detektora, a σ_N predstavlja varijansu AWGN šuma u kanalu.

Korišćenjem jednačina (4.6) i (4.7) i primenom nekih matematičkih manipulacija može se izraziti PDF za trenutni SNR u obliku [207]:

$$f_{\gamma_a}(\gamma_a) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{K^m e^{-K}}{\Gamma(\alpha) \Gamma(m+1) m!} \left(\frac{\alpha(1+K)}{\sqrt{\mu_a}} \right)^{\frac{\alpha+m+1}{2}} \gamma_a^{\frac{\alpha+m-3}{4}} K^{\alpha-m-1} \left(2\sqrt{\alpha(1+K)} \sqrt{\frac{\gamma_a}{\mu_a}} \right) \quad (4.9)$$

Slika 4.1 prikazuje PDF za novoizvedeni model zračenja, i to za različite vrednosti faktora K (za jaku i slabu turbulenciju).

4.1.2. Model greške pozicioniranja

Pored atmosferskih turbulencija, greška pozicioniranja je još jedan faktor koji može da utiče na slabljenje signala u FSO sistemu, i to usled neusklađenosti usmerenja između predajnog lasera i prijemnog detektora. Non-zero Boresight model PDF optičkog signala opisuje grešku pozicioniranja za koju se smatra da uključuje radijus optičkog zraka na određenoj udaljenosti od predajnika, poluprečnik otvora kružnog detektora i varijansu podrhtavanja i predstavljen je u obliku [198], [200], [205], [206]:

$$f_{I_p}(I_p) = \frac{\xi^2}{A_0^{\xi^2}} I_p^{\xi^2-1}, \quad 0 \leq I_p \leq A_0 \quad (4.10)$$

Parametar $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$ predstavlja maksimalan udeo usmerene snage, gde je $\text{erf}(\cdot)$ funkcija greške [204, Eq.8.250], parametar $v = \sqrt{\pi} a / (\sqrt{2} w_L)$ i gde a predstavlja poluprečnik otvora kružnog detektora, dok je w_L radijus optičkog zraka na rastojanju L od predajnika. Parametar $\xi = w_{Leq} / (2\sigma_s)$ predstavlja odnos ekvivalentnog poluprečnika snopa na prijemniku w_{Leq} , i standardnog pokazivanja greške pomeranja pri devijaciji (jitter) na prijemniku σ_s , gde je $w_{Leq}^2 = w_L^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2 \exp(-v^2)]$.

Koristeći isti postupak kao u [198], i koristeći relaciju $I = I_a I_p$ za ovaj model greške pozicioniranja nova PDF se može dobiti na osnovu:

$$f_I(I) = \int_{I/A_0}^{\infty} f_{I_p}(I/I_a) f_{I_a}(I_a) dI_a \quad (4.11)$$

Zamenom jednačina (4.6) i (4.10) u jednačinu (4.11) i predstavljanjem modifikovane Bassel-ove funkcije drugog reda $K_v(\cdot)$ preko Meijer G funkcije kao u [204, Eq.9.34.3], kao i korišćenjem rešenja rezultujućeg integrala datog u [208, Eq.07.34.21.0082.01], dobija se izraz za PDF za Gamma-Chi-square model sa greškom pozicioniranja u obliku [207]:

$$f_I(I) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\xi^2 \alpha (1+K)}{A_0 \Omega_p \Gamma(\alpha) \Gamma(m+1) m!} e^{-K} G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha (1+K)}{A_0 \Omega_p} I \left| \begin{matrix} \xi^2 \\ \xi^2 - 1, \alpha - 1, m \end{matrix} \right. \right] \quad (4.12)$$

U tabeli 4.1 je dat broj članova sume koje treba sabrati da bi se postigla željena tačnost izraza. Proračun je izvršen za parametre: $\Omega_r=1$, $\xi=1.25$, $A=0.0197921$, $t=0.1$. Kao što se vidi u tabeli, povećanje faktora K povećava broj članova sume koje treba sabrati da bi se postigla tačnost na 5-toj značajnoj cifri.

Atmosferske turbulencije	K faktor		
	K=2	K=4	K=6
$\alpha=4$ (jaka)	10	15	20
$\alpha=7$ (srednja)	10	18	20
$\alpha=19$ (slaba)	15	20	30

Tabela 4.1. Broj članova sume koje treba sabrati u izrazu za PDF u jednačini (4.12) da bi se postigla tačnost na 5-toj značajnoj cifri.

Korišćenjem jednačine (4.12) nakon nekih matematičkih manipulacija izraz za PDF trenutnog SNR-a u prisustvu greške pozicioniranja se može predstaviti u obliku [207]:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\xi^2 K^m e^{-K}}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(m+1)m!\gamma} G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\xi^2 \alpha (1+K)}{\xi^2 + 1} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \middle| \begin{matrix} \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, m+1 \end{matrix} \right] \quad (4.13)$$

Srednja verovatnoća greške po bitu, ABER, u funkciji SNR-a za optički signal na prijemniku koji se prenosi FSO sistemom sa OOK modulacionom šemom, može se izračunati na osnovu [209], [210]:

$$P_e = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2} \right) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (4.14)$$

gde je sa $\operatorname{erfc}(\cdot)$ označena komplementarna funkcija greške [204, Eq.8.250.4] a $f_{\gamma}(\gamma)$ predstavlja PDF za trenutni SNR prijemnog signala.

Zamenom jednačine (4.12) u jednačinu (4.14), a zatim predstavljanjem $\operatorname{erfc}(\cdot)$ pomoću Meijer G funkcije kao u [211, Eq.06.27.26.0003.01] i modifikovane Bessel-ove funkcije druge

vrste $K_v(*)$ preko Meijer G funkcije kao u [204, Eq.9.34.3] dobijamo izraz ABER za atmosferske turbulencije Gamma-Chi-square kanalnog modela kao funkciju prosečne optičke snage prenosa R_T , u obliku:

$$P_e(P_T) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{15^{m-2} K^m e^{-K}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(m+1) m!} G_{2,5}^{4,2} \left[\frac{\alpha^2 (1+K)^2 \sigma_N^2}{8 P_T^2 R^2 \Omega_P^2} \middle| \frac{1}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{m+1}{2}, \frac{m+2}{2}, 0 \right] \quad (4.15)$$

Zamenom jednačine (4.13) u jednačinu (4.14) i predstavljanjem $\text{erfc}(*)$ Meijer G funkcijom kao u [211, Eq.06.27.26.0003.01], kao i korišćenjem rešenja dobijenog integralom prema [208, Eq.07.34.21.0013.01], izvodimo ABER izraz za grešku pozicioniranja za Gamma-Chi-square kanalni model u funkciji prosečne prenete optičke snage R_t , u obliku :

$$P_e(P_T) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2^{\alpha+m-3} \xi^2 K^m e^{-K}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(m+1) m!} \times \\ \times G_{3,6}^{5,2} \left[\frac{\alpha^2 (1+K)^2 \sigma_N^2}{8 P_T^2 R^2 A_0^2 \Omega_P^2} \middle| 1, \frac{1}{2}, \frac{\xi^2 + 2}{2}, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{m+1}{2}, \frac{m+2}{2}, 0 \right] \quad (4.16)$$

4.2. Analiza performansi FSO sistema zasnovana na novom osenčanom Chi-kvadrat PDF modelu scintilacije

U ovom poglavlju ćemo staviti akcenat na modelovanje efekata vrtložnih turbulencija malih razmera rasejanja, I_y , modelujući ovaj slučajni proces pomoću gustine raspodele verovatnoće turbulencije koji je predložen u radu [212]:

$$f_{I_y}(I_y) = \left(\frac{47}{g\beta + \Omega} \right)^{\beta} \frac{1}{g} e^{-\frac{I_y}{g}} {}_1F_1 \left(\beta, 1, \frac{\Omega' I_y}{g(g\beta + \Omega')} \right), \quad I_y > 0 \quad (4.17)$$

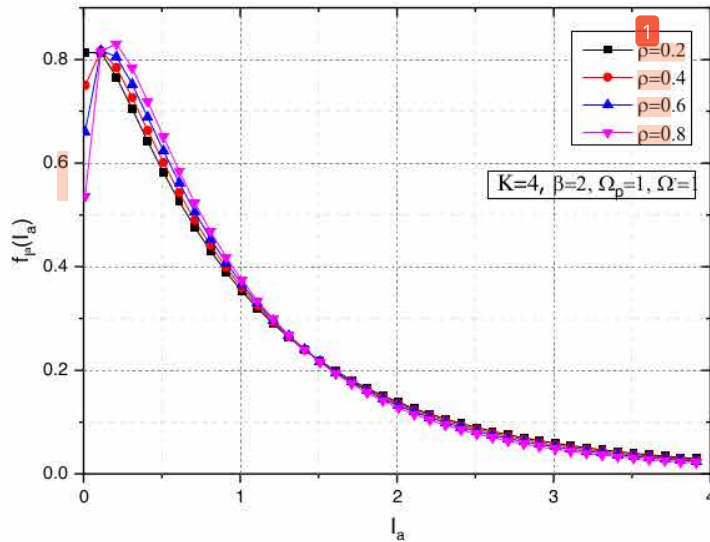
gde parametar β označava intenzitet turbulencije u kanalu, parametar g ($g=2b_0(1-\rho)$) označava ukupnu snagu rasejanih komponenti signala, parametar b_0 označava srednju snagu rasejanih komponenti signala, dok parametar ρ , ($0 \leq \rho \leq 1$), označava snagu rasejanih komponenti signala

spregnutih sa LOS komponentom signala. Parametar Ω' ($\Omega' = \Omega + 2b_0\rho + 2\sqrt{2b_0\rho\Omega} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$), označava srednju snagu optičkog signala, gde parametar Ω predstavlja udeo srednje snage LOS komponente signala, dok φ_A i φ_B označavaju determinističke faze signala LOS komponente i komponente signala koja je spregnuta sa LOS komponentom.

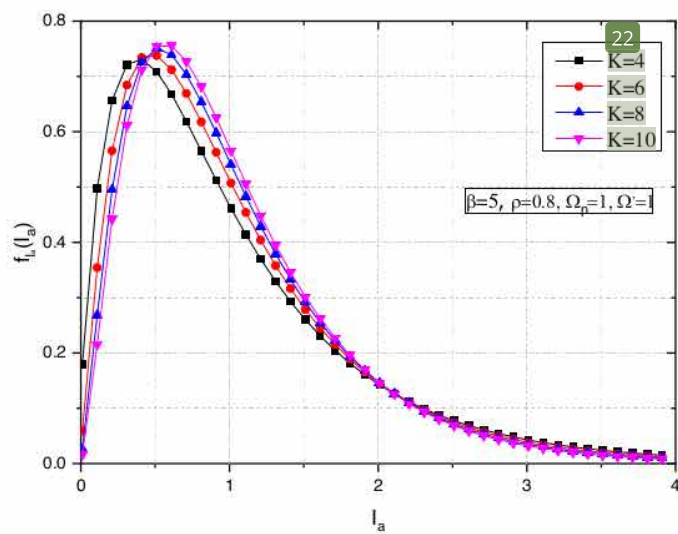
Nakon zamene jednačina (4.17) i (4.1) u (4.5) i predstavljanjem modifikovane Bassel-ove funkcije prvog reda $I_\nu(*)$ u jednačini (4.1) u obliku beskonačnog reda [204, Eq.8.445], kao i korišćenjem rešenja rezultujućeg integrala datog u [204, Eq.3.478.4], dobićemo izraz zatvorenog oblika za PDF model za osenčanu Chi-kvadrat raspodelu u obliku:

$$f_{I_a}(I_a) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{2(1+K)^{\frac{p+q}{2}+1} K^p e^{-K} g^{\frac{\beta+p+q}{2}-1} \beta^\beta (\Omega')^q (\beta)_q I_a^{\frac{q+p}{2}} K^{(q-p)} \left(2\sqrt{\frac{(1+K)}{\Omega_p g}} I_a \right)}{\Gamma(p+1) p! (q!)^2 \Omega_p^{\frac{\beta+p+q}{2}} (g\beta + \Omega')^{\beta+q}} \quad (4.18)$$

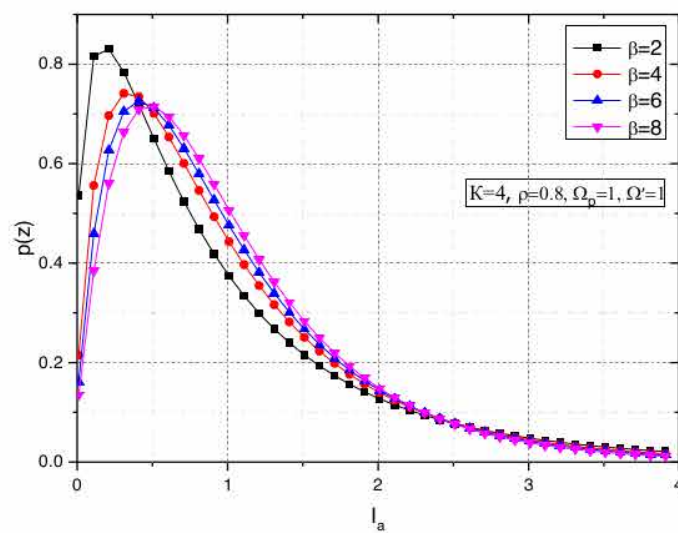
Ovaj rezultat predstavlja značajan doprinos disertaciji jer ovakav model raspodele turbulencije u kanalu do sada nije razmatran u literaturi, a predstavlja generalni model koji se postavljanjem odgovarajućih vrednosti parametara može svesti na dosada poznate modele raspodele. Na graficima 4.2, 4.3 i 4.4 prikazane su PDF vrednosti intenziteta signala koji se prenosi kroz osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za različite vrednosti parametara sistema.



Slika 4.2. PDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala



Slika 4.3. PDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve različitih intenziteta signala

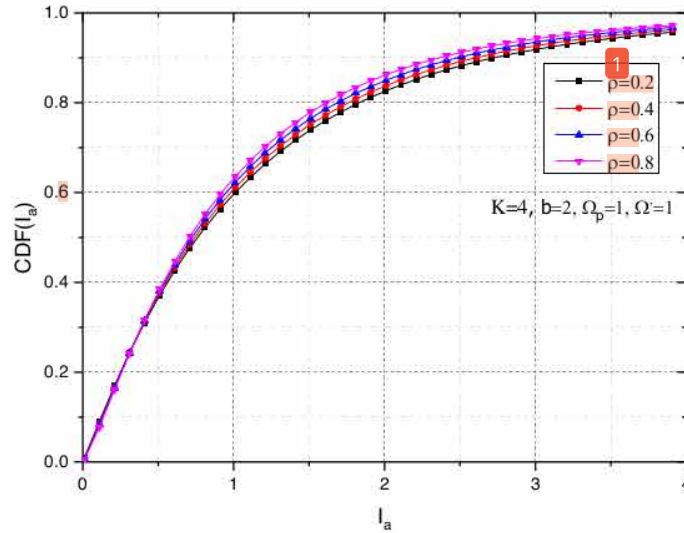


Slika 4.4. PDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve slabe i jake turbulencije

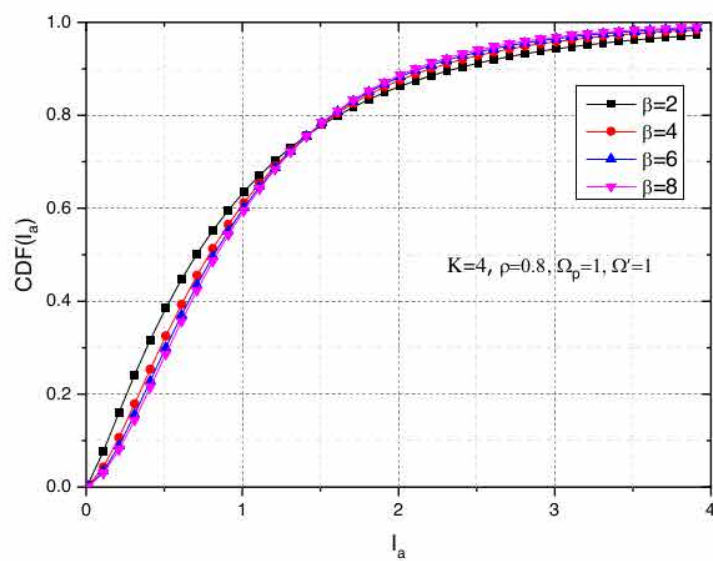
Na osnovu izvedene jednačine (4.18) moguće je odrediti sledeću značajnu meru performansi za izvedeni model optičkog kanala - kumulativnu funkciju verovatnoće, CDF (Cumulative distribution function), u zatvorenom obliku predstavljanom pomoću dve beskonačne sume:

$$F_{I_a}(I_a) = \int_0^{I_a} f_{I_a}(t) dt = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(1+K)^{\frac{p+q}{2}} K^p e^{-\frac{K}{2}} g^{\frac{p+q-1}{2}} (\Omega')^q \beta^{\frac{p+q-1}{2}} (\beta)^q}{\Gamma(p+1) p! (q!)^2 \Omega_p^{\frac{p+q+1}{2}} (g\beta + \Omega)^{\frac{p+q}{2}}} I_a^{\frac{p+q+1}{2}} G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{(1+K)}{\Omega_p g} I_a, -1, -\frac{p+q}{2}, \frac{q-p}{2}, \frac{p-q}{2} \right] \quad (4.19)$$

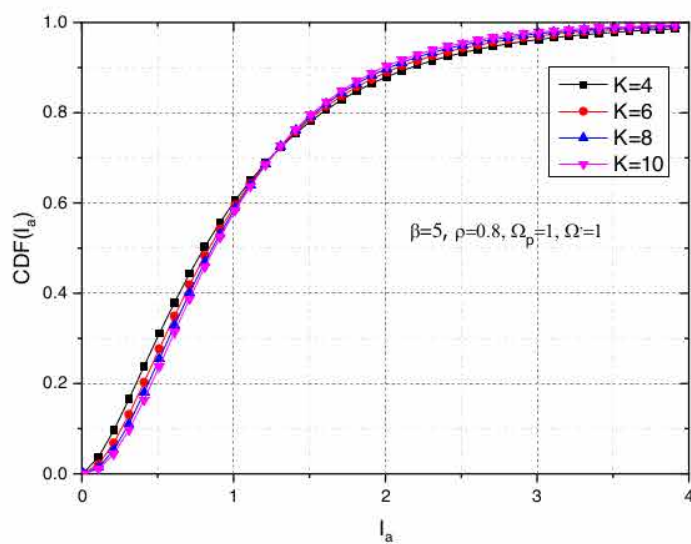
Na graficima 4.5, i 4.6 prikazane su CDF vrednosti intenziteta signala koji se prenosi kroz osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za različite vrednosti parametara sistema.



Slika 4.5. CDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala



Slika 4.6. CDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve slabe i jake turbulencije



Slika 4.7. CDF za osenčani Chi-kvadrat model optičkog kanala posmatran za slučajeve različitih intenziteta signala

³ Srednja verovatnoća greške po bitu, ABER, u funkciji SNR-a za optički signal na prijemniku koji se prenosi FSO sistemom sa OOK modulacionom šemom, kroz osenčani Chi-kvadrat model, može se izračunati nakon zamene (4.19) u (4.14), a zatim predstavljanjem $\text{erfc}(\cdot)$ pomoću Meijer G funkcije kao u [211, Eq.06.27.26.0003.01] i korišćenjem relacije [211, Eq.07.34.21.0012.011] u obliku:

$$P_e(P_T) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(1+K)^{\frac{p+q}{2}+1} K^p e^{-K} g^{\frac{p+q}{2}-1} \beta^{\frac{p+q}{2}} (\Omega)^q (\beta)_q \Omega_p^{\frac{p+q}{2}}}{4\sqrt{\pi} \Gamma(p+1) p! (q!)^2 \Omega_p^{\frac{p+q}{2}+1} (g\beta + \Omega)^{\beta+q}} H_{3,2}^{2,2} \left[\left(\frac{P_T \Omega_p g}{\sigma(1+K)} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \begin{matrix} (1,1), \left(-\frac{3p}{2}, -\frac{q}{2}, 2 \right) \\ (0,1), \left(\frac{1}{2}, 1 \right), \left(-\frac{3q}{2}, -\frac{p}{2}, 2 \right) \end{matrix} \right. \right] \quad (4.20)$$

gde:

$$H_{p,q}^{m,n} \left[\begin{matrix} (a_1, A_1), \dots, (a_p, A_p) \\ (b_1, B_1), \dots, (b_q, B_q) \end{matrix} \right]$$

predstavlja Fox H funkciju.

Koristeći isti postupak kao u [189], i koristeći relaciju $I = I_a I_p$ za posmatrani Zero-boresight model greške pozicioniranja, nova PDF se može dobiti zamenom (4.18) u (4.11), nakon predstavljanja modifikovane Bassel-ove funkcije drugog reda $K_v(\cdot)$ preko Meijer G funkcije kao u [204, Eq.9.34.3], kao i korišćenja rešenja rezultujućeg integrala datog u [208, Eq.07.34.21.0082.01]:

$$f_I(I) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(1+K)^{\frac{p+q}{2}+1} K^p e^{-K} g^{\frac{p+q}{2}-1} \beta^{\frac{p+q}{2}} (\Omega)^q \beta^{\frac{p+q}{2}} (\beta)_q A_0^{\frac{p+q}{2}+2}}{\Gamma(p+1) p! (q!)^2 \Omega_p^{\frac{p+q}{2}+1} (g\beta + \Omega)^{\beta+q}} I^{\frac{p+q}{2}+1} G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{(1+K)}{A_0 \Omega_p g} I \left| \begin{matrix} \varepsilon^2 - 1 - \frac{p+q}{2} \\ \varepsilon^2 - 1 - \frac{p+q}{2}, \frac{q-p}{2}, \frac{p-q}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (4.21)$$

Rezultat (4.21) takođe predstavlja značajan doprinos disertacije jer predstavlja generalni model raspodele amplitude optičkog kanala u prisustvu turbulencije i efekta pozicioniranja.

³ Srednja verovatnoća greške po bitu, ABER, u funkciji SNR-a za optički signal na prijemniku koji se prenosi FSO sistemom sa OOK modulacionom šemom, kroz osenčani Chi-kvadrat model, u prisustvu greške pozicioniranja, može se izračunati nakon zamene (4.21) u (4.14), a zatim predstavljanjem $\text{erfc}(\cdot)$ pomoću Meijer G funkcije kao u [211, Eq.06.27.26.0003.01] i korišćenjem relacije [211, Eq.07.34.21.0012.011] u obliku:

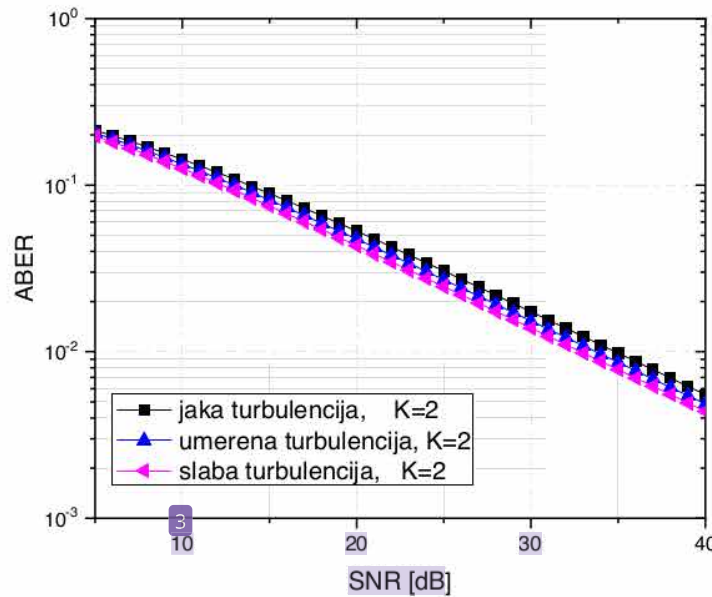
$$P_e(P_T) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{\xi^2 K^p e^{-K} g^{\beta+1} \beta^{\beta} (\Omega')^q (\beta)_q \Omega_p}{4\sqrt{\pi} \Gamma(p+1) p! (q!)^2 (g\beta + \Omega)^{\beta+q}} H_{2,5}^{5,1} \left[\left(\frac{P_T \Omega_p g A_b}{\sigma(1+K)} \right)^2 \middle| \begin{matrix} (1,1), (-\xi, 2) \\ (0,1), \left(\frac{1}{2}, 1\right), (-\xi, 2), \left(-\frac{3p}{2} - \frac{q}{2}, 2\right), \left(-\frac{3q}{2} - \frac{p}{2}, 2\right) \end{matrix} \right] \quad (4.22)$$

4.3. Analiza dobijenih performansi sistema

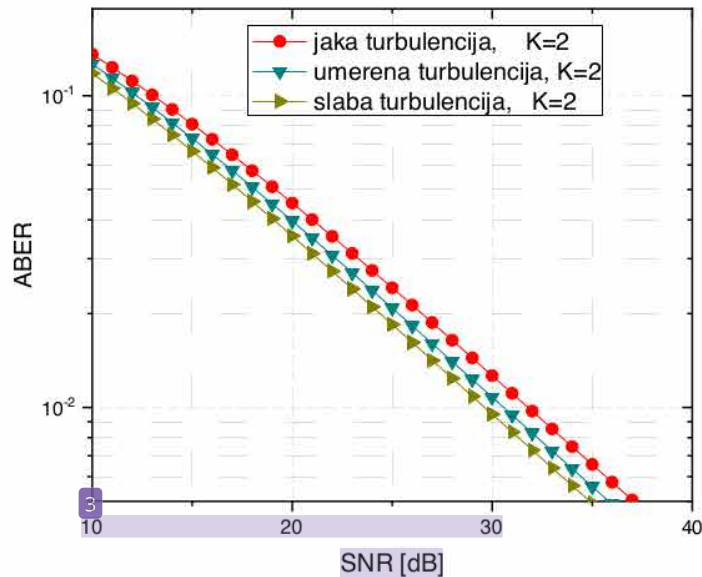
Za numerički proračun uzet je FSO sistem čija je radna talasna dužina $\lambda=1550\text{nm}$ i na udaljenosti između predajnika i prijemnika $L=1\text{km}$. Razmatrane su tri tipa atmosferskih turbulencija: slaba, umerena i jaka, sa indeksima refleksije $C_n^2=6 \cdot 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$, $C_n^2=2 \cdot 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ i $C_n^2=1,2 \cdot 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, respektivno. Ukupna snaga prijemnog signala je $\Omega_r=1$, dok je odziv detektora $R=1\text{A/V}$ i varijansa šuma $\sigma_N=10^{-7} \text{A/Hz}$. Razmatrani su: poluprečnik otvora kružnog detektora $a=0,05\text{m}$, radijus optičkog snopa na rastojanju L od predajnika $w_L=0,5\text{m}$, greška pokazivanja pomeraja standardne devijacije (jitter) na prijemniku je $\sigma_s=0,2\text{m}$.

Prvo su analizirane performanse optičkog signala koji se prenosi u kanalu gde je prisutan uticaj Gamma-Chi-square turbulencije u prisustvu i odsustvu greške pozicioniranja.

Na slici 4.8 i 4.9 prikazane su vrednosti ABER kao funkcija srednjeg električnog SNR, za različite nivoe atmosferskih turbulencija, različite vrednosti faktora K i OOK modulacionu šemu izražene jednačinama (4.9) i (4.13).



Slika 4.8. ABER za model Gamma-Chi-square atmosferskog turbulentnog kanala kao funkcija srednjeg električnog SNR-a

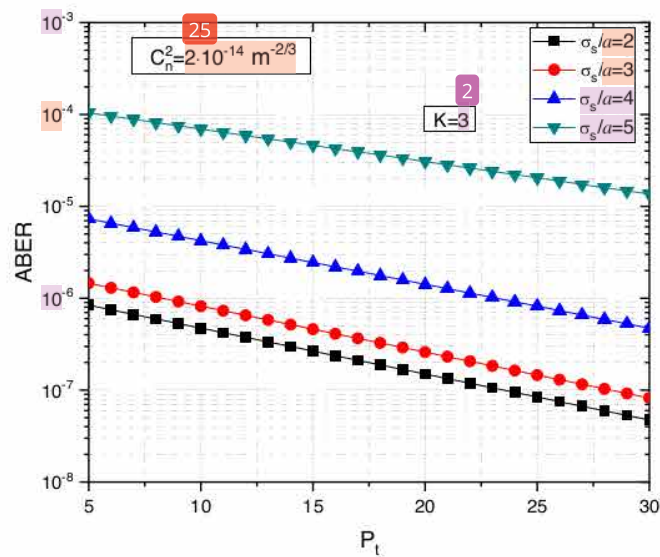


Slika 4.9. ABER za Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja kao funkcije srednjeg električnog SNR-a

ABER promena je približno linearna u oba slučaja. Kao što se i očekivalo za jaču turbulenciju i niže vrednosti faktora K , dobijaju se veće vrednosti ABER. I u slučaju modela atmosferske turbulencije i za model greške pokazivanja ABER opada značajno brže za veće vrednosti faktora K . U cilju verifikacije dobijenih rezultata, urađena je Monte Carlo simulacija za ABER, pokazano je da se ovi rezultati odlično uklapaju u vrednosti dobijene iz analitičkih izraza. Kao što se može videti na slikama 4.8 i 4.9, ABER vrednosti dobijene korišćenjem izvedenih izraza i njima odgovarajuće vrednosti dobijene simulacijama Monte Carlo imaju odlična poklapanja.

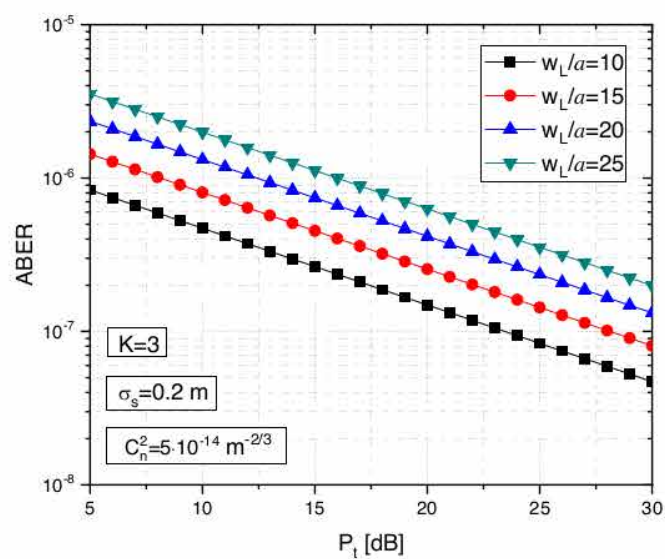
Slika 4.10 pokazuje ponašanje ABER za model Gamma-Chi-square atmosferskog turbulentnog kanala, uz primenu OOK modulacione šeme u funkciji srednje optičke snage na predaji P_t , za različite vrednosti nominalizovane standardne devijacije treperanja na prijemniku σ_s . Sa slike 4.10 se može uočiti da su za veće vrednosti normalizovane standardne devijacije treperanja (jitter), σ_s , dobijene ABER vrednosti veće. Pogrešno pozicioniranje predajnika i

prijemnika se manifestuje većim vrednostima standardne devijacije treperanje (jitter) σ_s , što dovodi do degradacije performansi sistema.

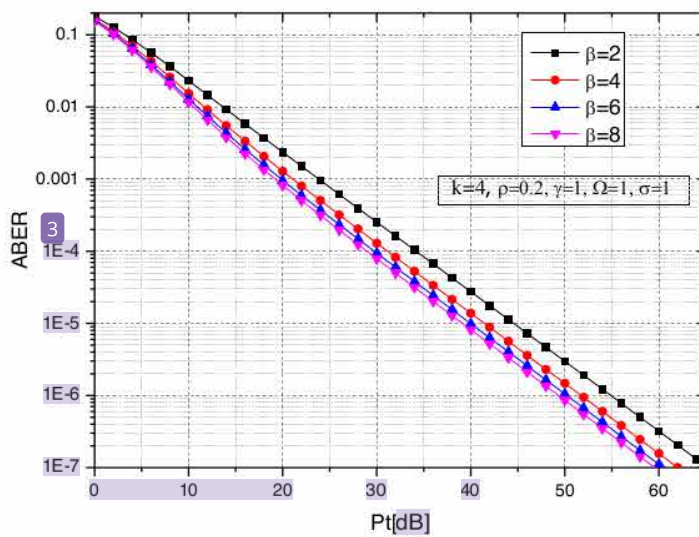


Slika 4.10. ABER za Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja u slučaju različitih vrednosti standardne devijacije treperenja (jitter)

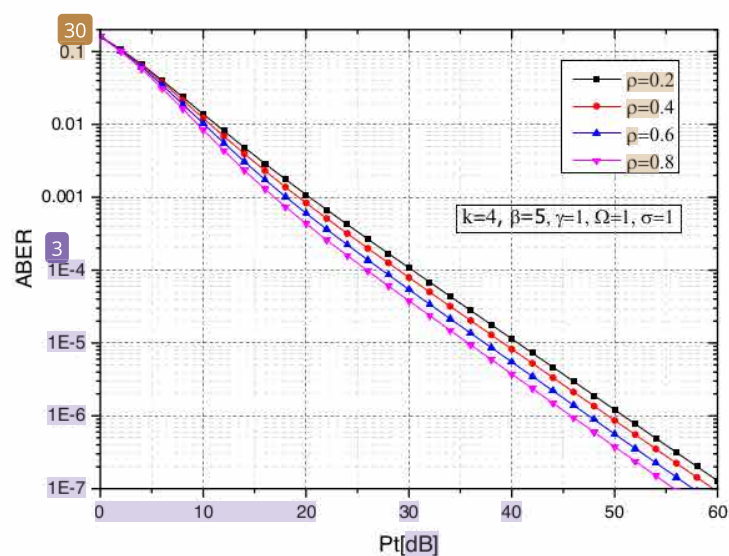
Slika 4.11 prikazuje ponašanje ABER za model Gamma-Chi-square kanala, uz primenu OKK modulacione šeme kao funkciju srednje optičke snage na predaji, P_t , na rastojanju L od predajnika. Kako radijus optičkog zraka ω_L zavisi od rastojanja L od predajnika, zaključujemo da veća vrednost ovog parametra u velikoj meri utiče na pogoršanje ABER, a time i na performanse sistema. Slika 4.11 pokazuje da se ABER povećava sa povećavanjem normalizovanog radijus optičkog zraka ω_L .



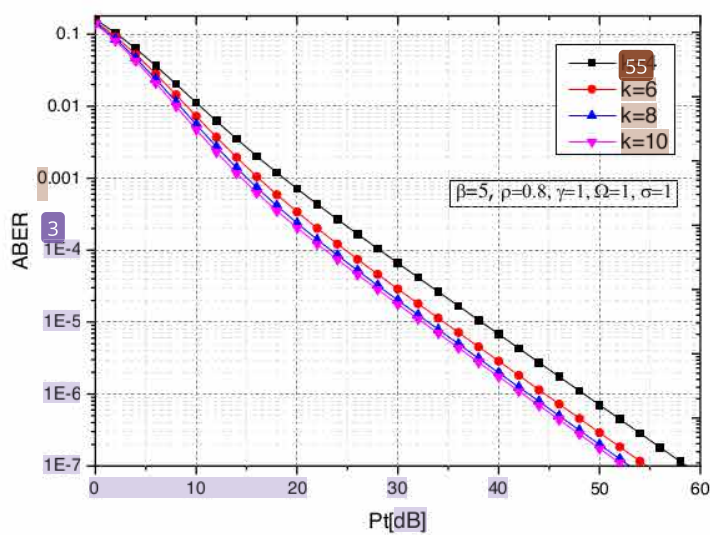
Slika 4.11. ABER za Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite vrednosti normalizovanog radijusa optičkog zraka



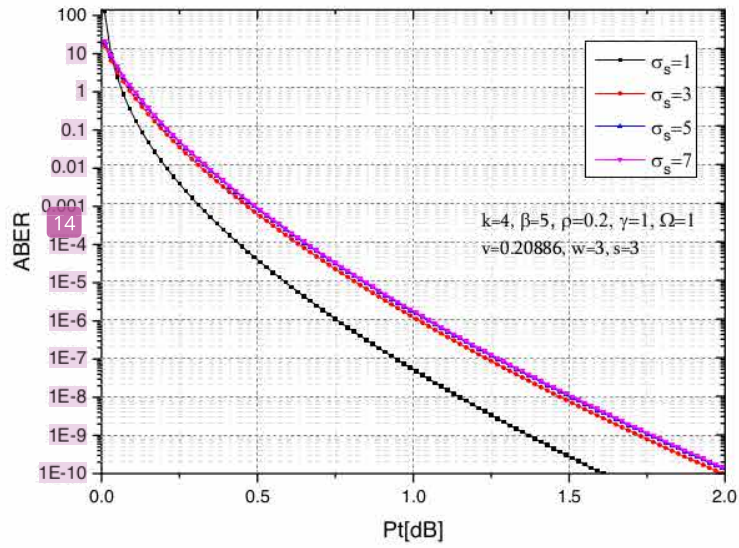
Slika 4.12. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model za slučajeve slabe i jake turbulencije



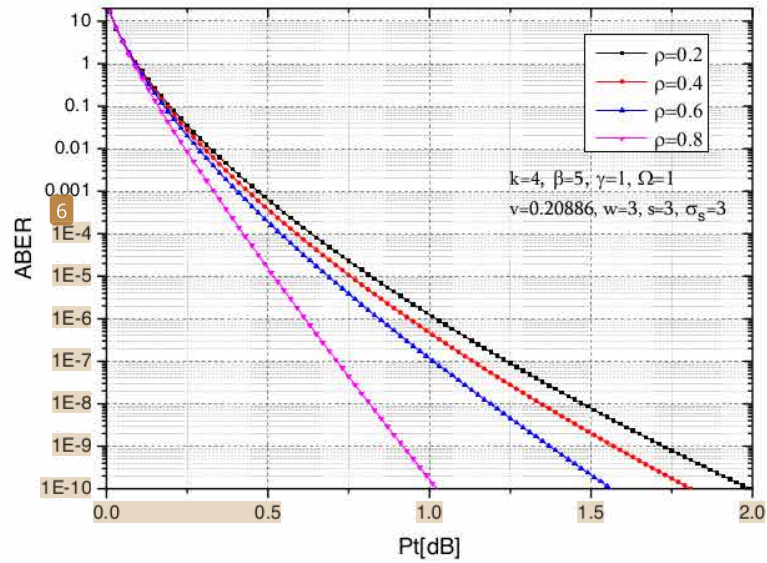
Slika 4.13. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala



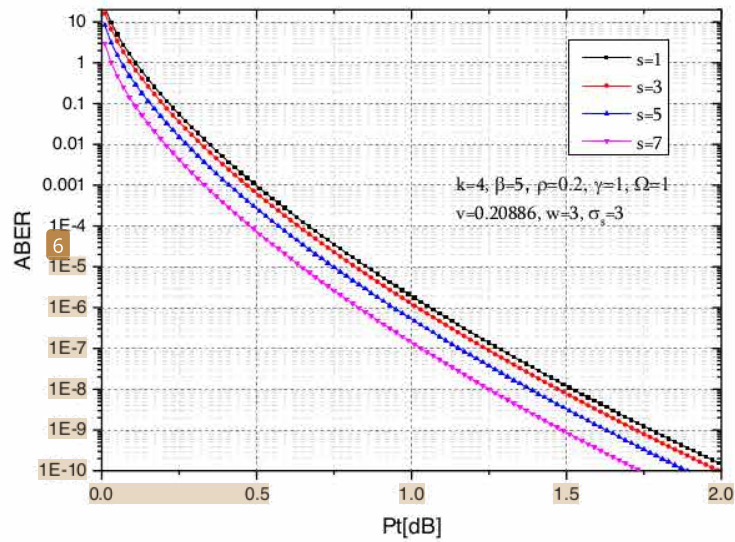
Slika 4.14. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model za slučajeve različitih intenziteta optičkih signala



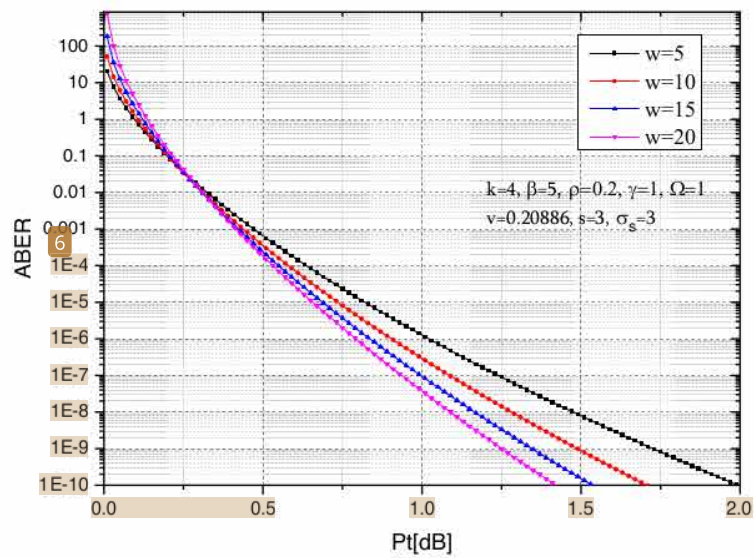
Slika 4.15. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za slučajeve različitih vrednosti standardne devijacije treperenja



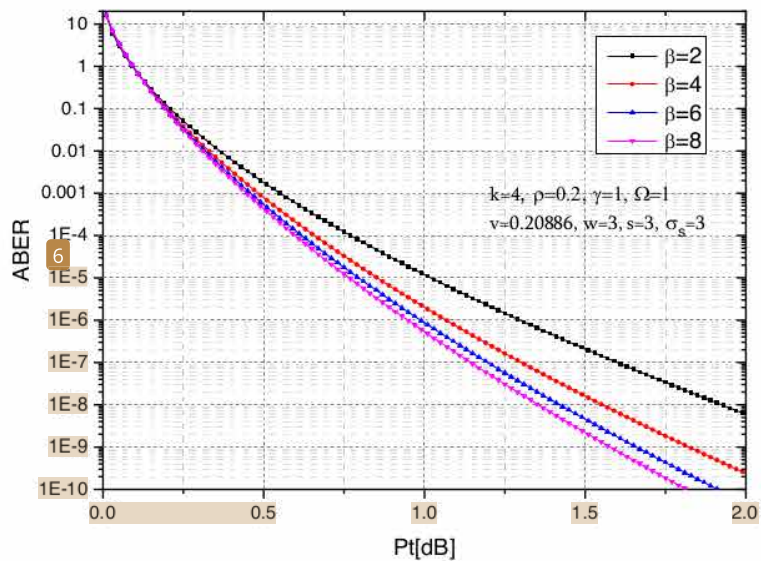
Slika 4.16. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite slučajeve stepena spregnutosti rasejanih komponenti sa LOS komponentom signala



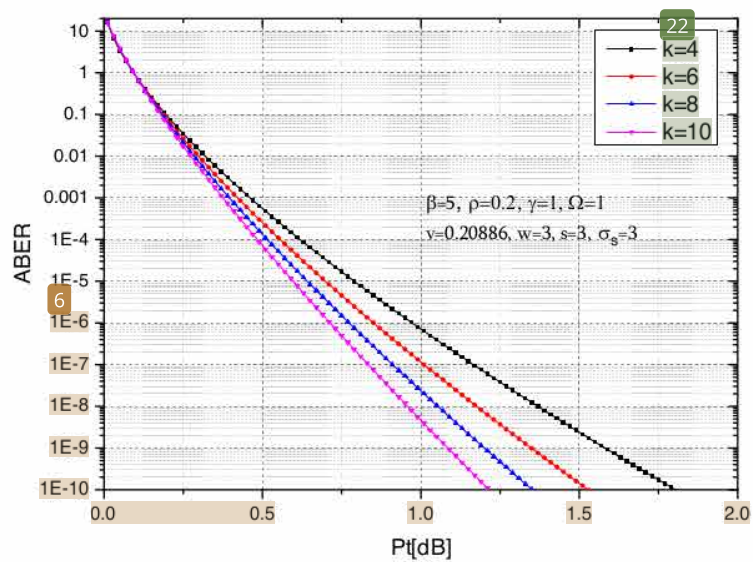
Slika 4.17. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite vrednosti parametra neusmerenosti optičkog zraka s



Slika 4.18. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za različite vrednosti normalizovanog radijusa optičkog zraka



Slika 4.19. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za slučajeve slabe i jake turbulencije



Slika 4.20. ABER za osenčani Gamma-Chi-square model u prisustvu greške pozicioniranja za slučajeve različitih intenziteta optičkih signala

Na slikama 4.12 - 4.20 razmatrane su vrednosti ABER za prenos OOK modulacionim formatom kroz osenčani Gamma-Chi-square model kanala za slučajeve prisustva i odsustva greške pozicioniranja na prijemu. Može se uočiti da su za veće vrednosti normalizovane standardne devijacije treperanja (jitter), σ_s , dobijene ABER vrednosti veće. Pogrešno pozicioniranje predajnika i prijemnika se manifestuje većim vrednostima standardne devijacije treperanja (jitter) σ_s , što dovodi do degradacije performansi sistema. Takođe povećanje vrednosti parametra neusmerenosti optičkog zraka s , dovodi do degradacije performansi sistema i povećanja vrednosti ABER. Radijus optičkog zraka ω_L koji predstavlja funkciju dužine optičkog linka L , pa se sa njegovim povećanjem povećavaju vrednosti ABER datog linka. Takođe je vidljivo sa slike da se bolje performanse sistema dobijaju u oblastima parametra β koje odgovaraju nižim nivoima turbulencije u osenčanom Gamma-Chi-square kanalu, odnosno nižim vrednostima indeksa refrakcije. Ukoliko je dominantna, LOS komponenta optičkog signala izaženija, postiže se manji nivo greške na prijemu, kao i za slučaj kada je stepen spregnutosti rasejanih komponenti sa dominantnom LOS komponentom veći.

4.4. Primena prostornih diverziti tehnika za unapređenje performansi FSO prenosa

Jedan od najefikasnijih načina za unapređenje performansi FSO prenosa jeste primena prostornih diverziti kombinovanja tehnika na prijemu. Najznačajnije prostorne tehnike diverziti prijema su selektivno kombinovanje (SC-Selection Combining) i kombinovanje sa maksimalnim odnosom (MRC-Maximal Ratio Combining). Kod SC tehnike diverziti prijemnik odabira i na izlaz vodi granu sa najvećom trenutnom vrednoću SNR posmatranog signala:

$$\gamma = \gamma_{out} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) \quad (4.23)$$

Izraz za PDF za SNR proces na izlazu SC prijemnika se može odrediti na osnovu izraza za PDF za SNR optičkih signala ulaznih grana pomoću:

$$\begin{aligned}
f_{\Gamma}(\gamma) = & \int_{\gamma_1}^{\gamma} \int_{\gamma_2}^{\gamma} \int_{\gamma_3}^{\gamma} f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) d\gamma_2 d\gamma_3 \dots d\gamma_N + \\
& \int_{\gamma_1}^{\gamma} \int_{\gamma_2}^{\gamma} \int_{\gamma_3}^{\gamma} f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) d\gamma_1 d\gamma_3 \dots d\gamma_N + \\
& \dots \\
& \int_{\gamma_1}^{\gamma} \int_{\gamma_2}^{\gamma} \int_{\gamma_3}^{\gamma} f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_{N-1};
\end{aligned} \tag{4.24}$$

gde $f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N)$ predstavlja združenu funkciju gustine verovatnoće (JPDF) vrednosti SNR sa ulaznih grana. Ukoliko vrednosti SNR na pojedinačnim granama nisu korelisane, tada se prethodna relacija može napisati u obliku

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \sum_{i=1}^n f_{\Gamma_i}(\gamma) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{\Gamma_j}(\gamma); \quad F_{\Gamma_i}(\gamma_i) = \int_0^{\gamma_i} f_{\Gamma_i}(t_i) dt_i; \tag{4.25}$$

CDF odnosa SNR na prijemu sa SC tehnikom se može odrediti na sonovu izraza:

$$F_{\Gamma}(\gamma) = \int_{\gamma_1}^{\gamma} \int_{\gamma_2}^{\gamma} \dots \int_{\gamma_n}^{\gamma} f_{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_n; \tag{4.26}$$

odnosno za nekorelisane signale na prijemnim granama pomoću:

$$F_{\Gamma}(\gamma) = \prod_{i=1}^N F_{\Gamma_i}(\gamma); \tag{4.27}$$

Dodatno smanjenje uticaja turbulencije u kanalu je moguće postići upotrebom MRC tehnike kombinovanja, prilikom kojeg se svi optički signali dovode u fazu u cilju eliminisanja fluktuacija faza do kojih dolazi usled rasejanja signala, pa se na taj način maksimizuje vrednost sumiranog SNR na prijemu.

Vrednost sumiranog SNR na izlazu MRS kombinera se može odrediti pomoću relacije:

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^M R_i^2}; \quad (4.28)$$

Izraz za PDF za SNR proces na izlazu MRC prijemnika se može odrediti na osnovu izraza za PDF za SNR optičkih signala ulaznih grana pomoću:

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \int_0^{\gamma} \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \gamma_N^2}} L \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=3}^N \gamma_i^2}} \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=2}^N \gamma_i^2}} f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N} \left(\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=2}^N \gamma_i^2}, \gamma_2, \dots, \gamma_N \right) d\gamma_2 \dots d\gamma_N; \quad (4.29)$$

gde $f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N)$ predstavlja združenu funkciju gustine verovatnoće (JPDF) vrednosti SNR sa ulaznih grana. Ukoliko vrednosti SNR na pojedinačnim granama nisu korelisane, tada se prethodna relacija može napisati u obliku:

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \int_0^{\gamma} \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \gamma_N^2}} L \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=3}^N \gamma_i^2}} \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=2}^N \gamma_i^2}} f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N} \left(\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=2}^N \gamma_i^2} \right) \prod_{i=2}^N f_{\Gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_2 \dots d\gamma_N; \quad (4.30)$$

Odgovarajući CDF odnosa SNR na prijemu sa MRC tehnikom se može odrediti na osnovu izraza:

$$F_{\Gamma}(r) = \int_0^{\gamma} \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \gamma_N^2}} L \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=3}^N \gamma_i^2}} \int_0^{\sqrt{\gamma^2 - \sum_{i=2}^N \gamma_i^2}} f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_N; \quad (4.31)$$

Zamenom odgovarajućih izraza predstavljenih u ovoj glavi disertacije (4.9), (4.11), (4.18), (4.19), (4.21) u izraze (4.24)-(4.31) a zatim novodobijenih izraza u (4.14) može se izvršiti komparativna analiza poboljšanja performansi vrednosti ABER pri prenosu optičkih signala OOK modulacionim formatom kroz kanale sa Gamma-Chi-square scintilacijom i osenčanom Gamma-Chi-square scintilacijom u prisustvu i odsustvu greške pozicioniranja za slučajevne primene predloženih SC i MRC diverziteti tehnika kombinovanja optičkih signala.

5. HIBRIDNA RF/FSO KOMUNIKACIJA

5.1. Osnovne pretpostavke

Optički noseći signal se koristi za bežični prenos informacija u optičkoj komunikaciji kroz slobodan prostor. FSO sistemi imaju prednosti koje se ogledaju u mogućnosti da postignu velike brzine prenosa podataka, ekonomičnost i bezbednost prenosa na visokom nivou. Ipak FSO sistemi su podložni atmosferskim turbulencijama. Scintilacija koju izazivaju atmosferske turbulencije prouzrokuje nasumične fluktuacije laserskog zraka na prijemnoj strani [213]. Mnogobrojna istraživanja su pokazala da se efekat scintilacije može smanjiti upotrebom višestrukih izvora signala (lasera) i višestrukih otvora blende, čime se stvara višestruki izlaz sa više ulaza, MIMO kanal. [215], [216].

Najveće degradacije sistema izazivaju oblaci i gusta magla, npr. gusta magla može da izazove slabljenje reda veličine stotine decibela po kilometru [216]. Jedan od načina za prevazilaženje ovog problema je uvođenje radio frekvencijske (RF) veze, čime se stvaraju hibridni FSO/RF komunikacioni sistemi [217], [218]. U slučaju kada je FSO komunikacija prekinuta oblakom ili maglom, prenos informacija preuzima RF sistem, ovde se najčešće koriste milimetarske talasne dužine. Na ovim talasnim dužinama RF veza je takođe podložna uticaju scintilacije izazavane kišom, ali je otpornija na maglu [219]. Ova dva kanala su komplementarna: FSO signal je oslabljen maglom dok RF nije; A RF signal je oslabljen kišom dok FSO nije. Međutim na oba sistema utiče scintilacija.

Glavna svrha RF veze je da deluje kao rezervna komunikacija kada je FSO veza prekinuta. U radu [220] predložena je hibridna šema kodiranja kanala FSO i RF gde se brzina prilagođava uslovima kanala. U [221] su takođe predložene šeme kodiranja na više nivoa za hibridni kanal.

Tema ovog poglavlja je predlaganje modela kanala za hibridnu FSO/RF komunikaciju, zasnovanog na poznatom simultanom kanalu [222] koji uzima u obzir razlike u brzini signalizacije i efekat atmosferskog slabljenja koji je prisutan u FSO i RF linkovima. Kako su efekti slabljenja spori u odnosu na uobičajene brzine prenosa podataka, svaki kanal biva zasnovan na modelu block-fading kanala. U [213] i [214] je korišćenjem block-fading kanala ispitana verovatnoća otkaza FSO kanala sa više ulaza i više izlaza (MIMO), pod pretpostavkom da se koristi modulacija impulsne pozicije (PPM) za nekoliko poznatih distribucija scintilacije tj. za Lognormal-nu, Exponential-nu, Gamma-Gamma, Lognormal-Rice, I-K distribuciju scintilacije [213]. Posebno je ispitana eksponenta otkaza (*outage exponent*) koja opisuje nagib krive verovatnoće ispada u visokom asimptotičkom režimu rada. Analiza se dalje proširuje uključivanjem RF veze za kreiranje hibridnog FSO/RF kanala. Poruka koja se prenosi se paralelno kodira bitovima koji se istovremeno šalju i preko FSO i RF kanala. Prvo se ispituje slučaj kada je savršen CSI poznat na prijemniku (CSIR slučaj), a onda razmatramo i primer kada je CSI poznat i na predajniku (CSIT slučaj), alokacija snage se koristi kao način za rešavanje problema ograničenja snage. U slučaju kada CSI nije dostupan na predajniku koristi se eksponenta otkaza (*outage exponent*) za opšte raspodele u svakom od kanala. Međutim kada CSI nije dostupan na predajniku upotrebljava se algoritam optimalne alokacije snage, koji odgovara i (pojedinačnom) i (ukupnom) maksimumu ograničenja snage. Za FSO kanal sa fiksnim jednako verovatnim ulaznim raspodelama, rešenje se ogleda u nekonveksnoj optimizaciji, međutim, ona ima previsoku složenost kada je u pitanju praktična implementacija u praktičnim sistemima. Da bi se ovo prevazišlo u [223] je predloženo manje složeno suboptimalno rešenje, pa se u ovom poglavlju razmatra alternativni pristup. Umesto da se sprovodi jednako verovatna signalizacija, razmatramo druge dve alternativne strategije signalizacije: deljenje vremena i signalizacija sa optimalnom distribucijom ulaza. Sa ovakvim pristupom, problem alokacije snage postaje konveksan pa stoga daje popravljiva rešenja. Dalje izračunavamo eksponent otkaza sa CSIT-om, pokazujući to za bilo koji konačan odnos vršne i prosečne snage, ovaj eksponent je dat istim eksponentom kao i za slučaj bez CSIT-a. Međutim, što je ograničenje vršne snage veće, prenos postaje sve pouzdaniji, a na kraju se potpuno uklanja mogućnost otkaza.

Dalje, u odeljku 5.2 predstavljen je model kanala sa pretpostavkama koje se odnose na naš model kanala. U ovom poglavlju slučajne varijable i njihove realizacije su označene velikim i malim slovima, npr. ako je X slučajna promenljiva, onda se njen slučajni uzorak ili realizacija označava sa x . Gustina verovatnoće i kumulativna raspodela slučajne promenljive X označene

su sa f_X i F_X , respektivno. Uslovi gustine su označeni sa $f_{Y|X}(y|x)$, gde se, da bi se istakla njihova važnost eksplicitno navode određeni parametri, npr. gustina $f_X(x;\theta)$ je parametrizovana sa θ . Operator očekivanja slučajne promenljive označen je sa E , ove oznake se prenose na slučajne vektore, gde su vektori označeni podebljanim slovima.

5.1.1. Modelovanje kanala

Hibridni komunikacioni sistem koji je razmatran u ovom poglavlju ilustrovan je na slici 5.1. Prvo, sekvenca binarnih poruka se zajednički kodira u paralelni FSO i RF tok bitova. Svaki tok bitova je modulisan u skladu sa diskretnom modulacionom šemom, konvertovan u svoju odgovarajuću noseću frekvenciju i istovremeno prenet kroz atmosferski kanal sve do hibridnog prijemnika. Hibridni prijemnik istovremeno konvertuje, naniže, svaki signal nosioca, takođe, demoduliše i zajednički dekodira primljene sekvence za vraćanje originalne poruke. Pre nego što se upustimo u informaciono-teorijsko proučavanje, bitno je da se obuhvate i definišu svi osnovni parametri hibridnog sistema. U praksi FSO veza radi na frekvencijama u opsegu tera herca (THz), dok RF mreže rade na milimetarskim talasnim dužinama tj. giga hercima (GHz). Kao posledica ovih veoma različitih frekvencija nosioca, javljaju se određene fizičke karakteristike koje će biti objašnjene u nastavku.

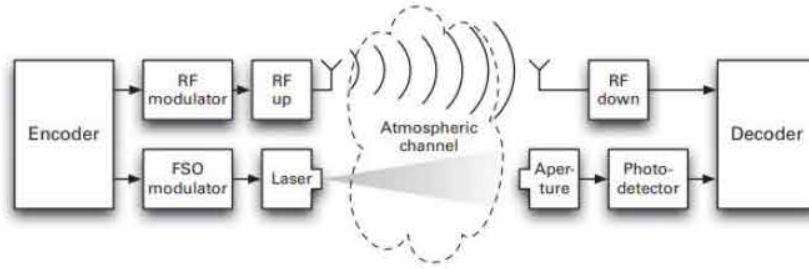
Kako je noseća frekvencija FSO sistema mnogo veća od frekvencije RF sistema, ona može da podrži veću stopu signalizacije. Ova karakteristika je obuhvaćena definicijom hibridnog simbola (hybrid symbol), koji se sastoji od N FSO simbola i jednog paralelnog RF simbola. Formalnije hibridnu formaciju definišemo na sledeći način.

Neka χ_{rf} i χ_{fso} označavaju diskretnu RF i FSO konstalaciju, respektivno, gde je $|\chi_{rf}| = M = 2^m$ i $|\chi_{fso}| = Q = 2^q$. Hibridna simbolna konstalacija je definisana kao:

$$\chi @ \chi_{fso}^N \times \chi_{rf}, \quad (5.1)$$

gde je N pozitivan broj, ukupna veličina hibridne konstalacije je $|\chi| = 2^{Nq+m}$. Odnos između FSO bitova i ukupnog broja bitova je definisan kao:

$$\delta @ \frac{Nq}{Nq + m} \quad (5.2)$$



Slika 5.1. Hibridni FSO/RF sistem

Praktični RF sistemi, obično, moduliraju informacijski signal koristeći amplitudu i fazu nosioca. Na prijemu se koristi heterodina operacija za konverziju frekvencija na dole za osnovni opseg i obnavljanje faznih i kvadrature komponenti [224]. Zato za RF vezu pretpostavljamo da je $\chi_{rf} \in \mathcal{X}_{rf}$ neka pogodna diskretna kompleksna konstalacija. Phase-Shift-Keying (PSK) ili Quadrature Amplitude Modulation (QAM) modulacije, kao i simboli su nacrtani nezavisno i jednako su verovatni u ovoj konstalaciji. Pored toga χ_{rf} je normalizovan tako da ima jediničnu prosečnu energiju:

$$\frac{1}{M} \sum_{x \in \mathcal{X}_{rf}} |x|^2 = 1$$

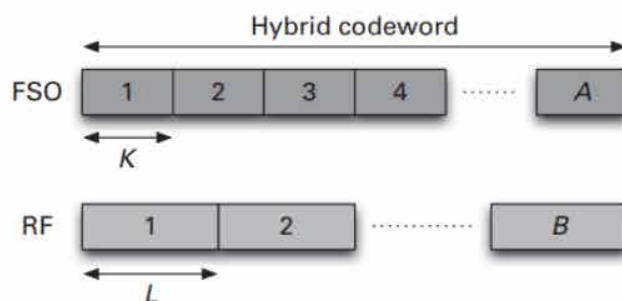
Iako je moguće modulisati amplitudu i fazu optičkog nosača, ipak, to bi zahtevalo da se odgovarajuća heterodin/homodina operacija izvrši optički pre fotodetekcije [225]. Ovaj postupak zahteva komplikovanu prijemnu optiku za implementaciju heterodina i za održavanje koherentnosti sa optičkim nosačem. Većina praktičnih FSO sistema koriste jednostavniju modulaciju intenziteta i direktnu detekciju (IM/DD), odnosno moduliše se samo snaga optičkog nosača. Radi jednostavnosti mi pretpostavljamo da je IM/DD takva modulacija, da je FSO simbol podeljen na J vremenskih intervala, gde se u svakom vremenskom slotu prenosi određena količina optičke energije. Ova generalna šema konstalacije pokriva specijalne slučajeve na primer za $J=1$, Q -ary Pulse Amplitude Modulation (PAM), ili $J=Q$, Q -ary Pulse Position Modulation (PPM). Kao i kod RF veze pretpostavljamo da su FSO simboli nacrtani iz χ_{fso} . Međutim, za razliku od slučaja RF veze, optimizacija verovatnoće ulaznih konstalacionih simbola biće od koristi kako u smanjenju složenosti raspodele moći tako i u poboljšanju performansi otkaza sistema. Za sve $x = (x[1], \dots, x[J]) \in \chi_{fso}$ gde $f(x)$ označava diskretnu

ulaznu raspodelu verovatnoće, pretpostavljamo da je normalizovana i ima jediničnu energiju tj.

$$\sum_{x \in \mathcal{X}} f_X(x) \sum_{j=1}^J x[j] = 1.$$

Postoji nekoliko bitnih razlika u tome kako će atmosfera uticati na ova dva nosača. Slabljenje, koje je indukovano scintilacijom, utiče na oba nosioca ali sa različitim vremenom koherentnosti. Kod optičkog nosača, obično, je vreme koherentnosti mnogo kraće (10s msec), dok je kod RF nosioca ono oko 100s msec. [213], [119]. Na svaki od nosioca utiču i čestice u skladu sa njihovim talasnim dužinama. Na optičke talasne dužine negativno utiču čestice magle, oblaka i aerosoli, dok na RF milimetarske talasne dužine utiču kapljice kiše [219].

Treba napomenuti da su gore navedeni efekti bleđenja, i za FSO i za RF kanale, spori u poređenju sa njihovim tipičnim vremenima signalizacije. U teoriji, tj. literaturi kanali sa sporim fedingom (slow feding) su pojednostavljeno modelovani kanalima sa blok fedingom (block feding) [226]. Ovako definisano, svaka preneti kodna reč je podeljena na konačan broj blokova, od kojih svaki ima jednak broj korišćenja kanala (ili simbola).



Slika 5.2. Hibridna kodna reč

Simboli unutar bloka su izloženi istoj količini fedinga, koja je predstavljena na slici od bloka do bloka. Kako je scintilacija sporo promenljive prirode, block-feding model je prikladan i za FSO i za RF kanale, tj. modelira se celokupan hibridni kanal kao paralelni kanal feding blokova. Međutim ostaje i da se modelira razlika u koherentnom vremenu između ova dva kanala. Da bismo uhvatili ovaj važan efekat, kao što je prikazano na slici 5.2, predstavimo FSO i RF hibridne kodne reči fedinga kao A i B, respektivno. Jasno je da je $A \geq B$, jer je feding na FSO linku obično brži nego na RF linku. Pretpostavimo da je FSO komponenta K hibridnih simbola pod uticajem istih realizacija FSO fedinga. Slično, na RF komponentu L hibridnih simbola utiče ista realizacija RF fedinga. Inače, ukupan broj hibridnih simbola mora biti

konzistentan između dva kanala, onda postoji potreba da je $AK=BL$. U skladu sa ovim pretpostavkama, paralelne FSO i RF kanale blok-fedinga zapisujemo na sledeći način.

Za FSO vezu, primljeni signal optičkog zračenja zapisujemo kao:

$$r_{a[k,n]} = \rho h_a \frac{p_a}{N} x_a[k,n] + \lambda \quad (5.3)$$

gde je: $r_a[k,n] = (r_a[k,n,1], \dots, r_a[k,n,J]) \in \mathbb{R}^J$ dok J vektor označava primljenu optičku snagu u svakom od J vremenskih slotova FSO simbola $n=1, \dots, N$, hibridnih simbola $k=1, \dots, K$, u bloku $a=1, \dots, A$; $x_a[k,n] = (x_a[k,n,1], \dots, x_a[k,n,J]) \in \mathbb{R}^J$ označava n -ti preneseni FSO vektor hibridnog simbola k u bloku a ; ρ je model dugoročnog fedinga; $h_a > 0$ predstavlja feding u bloku usled scintilacije i izvučen je iz neke proizvoljne sredine $f_H(h)$; p_a označava snagu dodeljenu bloku; $\lambda \geq 0$ modelira pozadinsko zračenje/tamna struja (pretpostavlja se da je ovo konstanta). U (5.3) faktor $1/N$ obezbeđuje da FSO i RF komponente hibridnog simbola imaju istu energiju.

Na sličan način za RF kanal označavamo l -ti primljeni simbol bloka b kao:

$$\hat{y}_b[l] = \sqrt{\hat{\rho} \hat{h} \hat{p}_b} \hat{x}_b[l] + \hat{\sigma} \hat{z}_b[l] \quad (5.4)$$

za $l=1, \dots, L$ i za $b=1, \dots, B$, gde $\hat{x}_b[l] \in \mathbb{R}^J$ označava preneseni simbol, $\hat{\rho}$ modelira dugoročne efekte fedinga, $h_b > 0$ označava scintilaciju bloka b ; izvučeno iz neke proizvoljne gustine $f_H(\hat{h})$ sa nenegativnim osloncem; $\hat{p}_b$ označava snagu dodeljenu bloku b ; $\hat{z}_b[l] \sim N_{\mathbb{C}}(0,1)$ modeluje nultu srednju vrednost, jediničnu varijansu kompleksnog gausovog belog šuma (AVGN); $\hat{\sigma}^2$ označava snagu RF šuma. Pretpostavljamo da su h_a i $\hat{h}_b$ nezavisni. Za razliku od RF kanala, u FSO kanalu prijemni signal se menja pa umesto p_a imamo $\sqrt{p_a}$.

Parametri $0 < \rho, \hat{\rho} < 1$ u (5.3) i (5.4) modeluju razlike relativne snage dva paralelna kanala, npr. odražavaju dugotrajne efekte bledenja usled kiše ili magle, ali i parametre kao što su pojačanje otvora/antene i propagaciju gubitaka. Kada je $\rho > \hat{\rho}$ FSO kanal je mnogo jači od RF kanala, npr. modeliranje efekta jakog slabljenja u slučaju magle i oblaka. Iako u praksi

ρ i $\hat{\rho}$ nasumično variraju sa vremenom, pretpostavljamo da ostaju nepromenjene tokom mnogih kodnih reči i zato se smatraju fiksnim konstantama. Zato ovi parametri neće uticati na asimptotičnu analizu ispada.

5.1.2. Informacije o stanju kanala i estimacija kanala

U bežičnim optičkim komunikacijama, efikasno prilagođavanje snage, ne samo da produžava radni vek baterije kod prenosivih realizacija već smanjuje i opterećenje poluprovodničkog lasera, čime se produžava i njegov radni vek. Međutim, da bismo prilagodili snagu, moramo poznavati fading na predajniku, koji se obično naziva informacija o stanju kanala (CSI). Kako je slabljenje sporo, CSI se može proceniti na prijemniku pa se prenosi na predajnik preko povratne veze.

U ovom poglavlju razmatramo dva scenarija informacije o stanju kanala (CSI). U prvom slučaju pretpostavljamo da prijemnik ima savršen CSI i da predajnik ravnomerno dodeljuje snagu preko svih blokova (CSIR slučaj). Drugi slučaj je CSIT, ovde je savršen CSI takođe poznat na predajniku, tj. predajnik savršeno poznaje $h_1, \dots, h_A$, i $h_1, \dots, h_B$. Zatim, predajnik vrši dodelu snage kako bi se smanjila verovatnoća ispada usled ograničenja struje. Ipak, ova pretpostavka je nemoguća u praksi jer predajnik ima pristup samo prethodnim procenama slabljenja, koji takođe sadrži greške u proceni na prijemniku (nesavršeni CSI) [227]. Ipak, pretpostavka CSI-a na predajniku služi kao važno merilo performansi sistema.

Snaga prenosa za oba kanala se na kraju crpi iz istog resursa snage. Tako da pretpostavljamo da je dugoročna prosečna snaga koja je potrebna hibridnom sistemu ograničena prema:

$$E[\langle p \rangle] + E\left[\left\langle \hat{p} \right\rangle\right] \leq P_{av} \quad (5.5)$$

gde je:

$$\langle p \rangle = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A p_a \quad \text{ i } \quad \left\langle \hat{p} \right\rangle = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{p}_b$$

Praktični komutacioni sistemi imaju ograničenja kratkotočne snage koju mogu preneti. Pošto FSO i RF veze imaju različita kratkoročna (ili vršna) ograničenja snage, pretpostavljamo da sveki od ovih sistema podleže sopstvenim kratkoročnim ograničenjima snage, pa je:

$$\langle p \rangle \leq \alpha_{fso} P_{av} \text{ i } \langle \hat{p} \rangle \leq \alpha_{rf} P_{av} \quad (5.6)$$

gde α_{fso} i α_{rf} označavaju odnos vršne i prosečne snage (PAPR) za FSO i RF kanale, respektivno.

5.2. Hibridni FSO/RF komunikacioni sistem sa diverziti prijemom

U sistemima mobilnih komunikacija, upravo zbog ograničenja samog mobilnog uređaja, najveći deo obrade signala mora da se obavi na baznoj stanici. Tehnika višestrukog prijema, na baznoj stanici, gde se kombinuje više različitih prijemnih signala, zaista pomaže u boljoj rekonstrukciji originalnog signala. U ovom delu biće predstavljen jedan hibridni FSO/RF sistem koji koristi tehniku višestrukog prijema, sa jednim skokom u uslovima zasićene atmosferske turbulencije. Takođe je izveden i izraz u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza ovakvog sistema. Rezultati ukazuju na značajna poboljšanja u odnosu na performanse uobičajenih FSO i RF sistema, pa iako ova predložena hibridna struktura zahteva složeni prijemnik, njome se dobijaju značajna poboljšanja koja bitno utiču na performanse komunikacionog sistema.

Poslednjih decenija, zahtevi za velikim brzinama prenosa podataka uticali su i na važnost FSO komunikacionih sistema, kao glavnog konkurenta tradicionalnom komunikacionom sistemu. Razlog tome je veća propusnost i kapacitet FSO sistema u odnosu na RF komunikacione sisteme. Što se tiče ekonomičnosti RF sistem je prihvatljiviji, ali je činjenica da ima nižu brzinu prenosa podataka u odnosu na FSO sisteme. Međutim FSO sistem je i ekonomičan i ima velike brzine prenosa podataka [228].

Diverziti kombinovanje je efikasna i dosta korišćena tehnika za poboljšavanje performansi komunikacionih sistema. U mobilnim komunikacionim sistemima, diverziti kombinovanje na prijemu (*receive diversity*) je jako praktična tehnika, zato što predajnik (mobilni telefon) ima mnogo ograničenja, kako u smislu potrošnje energije tako i u smislu složenosti obrade. Na prijemnoj strani (bazna stanica), diverziti tehnikom se prikupljaju

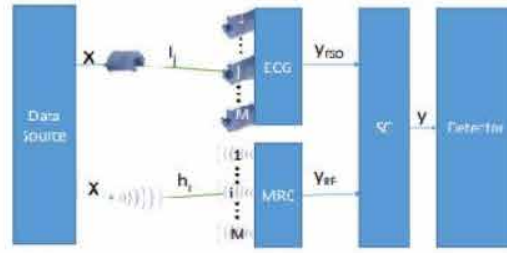
različite kopije emitovanog signala, koji se susteću usled različitosti u fedingu kanala. Kombinacija ovih kopija zaista može da pomogne u boljoj rekonstrukciji poslatog signala [229]. Neki od dobro poznatih kombinera su Kombiner maksimalnog odnosa (MRC), Kombiner jednakog pojačanja (EGC) i Selektivni kombiner (SC).

Takozvani hibridni FSO/RF sistemi mogu imati strukturu: pojedinačnog prebacivanja (single hop) [230], dualnog prebacivanja (dual hop) [231] i višestrukog prebacivanja (multi hop) [232]. Struktura jednog skoka je poželjna za kratke domete, gde se podaci prenose preko dve paralelna FSO i RF veze [233] ili korišćenjem prekidača [234]. Tehnika prekidača zahteva stalno uključivanje, dok kod simultanog prenosa ovaj problem ne postoji, takođe ne zahteva ni povratnu informaciju.

U ovom delu rada je prikazan novi hibridni FSO/RF sa jednim prebacivanjem i paralelnim simultanim prenosom. Ovo je jedan od retkih slučajeva gde se za hibridni FSO/RF komunikacioni sistem koristi diverziti tehnika sa jednim prebacivanjem. U ovom delu hibridni FSO/RF sistem sa jednim skokom je ispitivan u uslovima zasićene atmosferske turbulencije. Ovde je uzeta u obzir RF veza sa Rejljevom fadingom i FSO link pod uticajem atmosferske turbulencije modelovane u prethodnom poglavlju, pa je za takav sistem izveden izraz zatvorenog tipa za verovatnoću otkaza.

U FSO i RF vezama korišćene su ECG i MRC šeme, respektivno. Razlog ovakvoj selekciji je to što se za FSO vezu ne može razviti nikakav zatvoreni oblik za funkciju verovatnoće gustine (PDF) i funkciju kumulativne distribucije (CDF), kada je u pitanju MRC šema za FSO link sa diverziti prijemom i negativnom eksponencijalnom distribucijom. Takođe, ni za RF link sa diverziti prijemom i Rejljevom raspodelom, za CDF i ECG šemu ne može se izvesti izraz zatvorenog oblika za PDF. Upravo zato, nisu izabrani isti kombineri za FSO i RF komunikacioni sistem.

U FSO sistemu se koriste modulacija intenziteta i direktna detekcija (IM/DD). Kombinacija ova dva sistema, FSO i RF ima velike prednosti, kao što su pouzdanost, sigurnost, brzina prenosa. U poređenju sa drugim tehnikama, koje se mogu koristiti u FSO/RF sistemima, višestruka diverziti prijemna tehnika omogućava da se na prijemnoj strani, upotrebom različitih prijemnih kopija signala, odabere najjači signal, čime se i performanse sistema poboljšavaju.



Slika 5.3. Model FSO/RF sistema

5.2.1. Model sistema

45

Kao što je prikazano na slici 5.3 dve kopije originalnog signala istovremeno se prenose kroz paralelne FSO i RF veze. Emitovani signali se množe sa intenzitetom atmosferske turbulencije i koeficijentom fedinga i dodaje se šum prijemnika. MRC na RF prijemniku i EGC na FSO prijemniku kombinuju prijemne signale. Između izlaznih signala sa MRC-a i EGC-a, za detekciju se koriste signali sa maksimalnim odnosom signal/šum (SNR).

SNR na ulazu svakog od MRC i EGC kombinera, a time i SNR na ulazu SC kombinera, će biti u nastavku izračunati.

- FSO veza

Na izlazu iz EGC kombinera imamo:

$$y_{FSO} = \sum_{i=1}^M y_i = \eta \sum_{i=1}^M I_i x + \sum_{i=1}^M e_i \quad (5.7)$$

pa je SNR na izlazu iz EGC-a:

$$y_{FSO} = \frac{\eta^2 E[x^2] \left(\sum_{i=1}^M I_i \right)^2}{M \sigma^2} = \frac{\bar{y}_1 \left(\sum_{i=1}^M I_i \right)^2}{M} \quad (5.8)$$

gde je M broj FSO prijemnika. $\bar{y}_{FSO} = \eta^2 E[x^2] / \sigma^2$ je prosečan SNR na ulazu EGC-a a $E[x^2]$ je energija prenešenog signala.

SNR u svakoj grani MRC-a se izračunava na sledeći način:

$$y_i = \frac{E[|h_i x|^2]}{\sigma^2} = \frac{E[x^2] r_i^2}{\sigma^2} = \bar{y}_i r_i^2 \quad (5.9)$$

gde $\bar{y}_i = \frac{E[x^2]}{\sigma^2}$ označava srednju vrednost SNR na ulazu i -tog RF prjemnika a M predstavlja broj RF resivera. SNR na izlazu MRC-a je [235]:

$$y_{RF} = \frac{E[x^2] \sum_{i=1}^M r_i^2}{\sigma^2} = \sum_{i=1}^M y_i \quad (5.10)$$

PDF amplitude RF signala su date pomoću:

$$f_i(y) = \frac{1}{\bar{y}_{RF}} e^{-\frac{y}{\bar{y}_{RF}}} \quad (5.11)$$

dok se odgovarajuće MGF signala RF-a mogu izraziti pomoću:

$$M_{y_i}(s) = \int_0^\infty \frac{1}{\bar{y}_{RF}} e^{-\frac{y}{\bar{y}_{RF}} e^{-sy}} dy = \frac{\frac{1}{\bar{y}_{RF}}}{s + \frac{1}{\bar{y}_{RF}}} \quad (5.12)$$

gde važi:

$$M_{\sum_{i=1}^M y_i}(s) = \left(M_{y_i}(s) \right)^M = \frac{\frac{1}{\bar{y}_{RF}^M}}{\left(s + \frac{1}{\bar{y}_{RF}} \right)^M} \quad (5.13)$$

U nastavku su predstavljeni izrazi zatvorenog oblika, pojedinačno, za verovatnoću otkaza FSO i RF veze. Množenjem pojedinačnih verovatnoća otkaza FSO i RF veze dobijamo verovatnoću otkaza predloženog sistema. Do otkaza sistema dolazi kada ulazni SNR padne ispod praga, tj. $y \leq y_{th}$. Prema ovoj definiciji verovatnoća otkaza je:

$$P_{out}(y_{th}) = \Pr(y \leq y_{th}) \quad (5.14)$$

Ako uzmemo u obzir sliku 5.3, između izlaznih signala MRC-a i EGC-a, signal sa maksimalnim SNR-om bira SC, i to:

$$y = \max(y_1, y_2) \quad (5.15)$$

uz pretpostavku nezavisnih FSO i RF linkova (5.15) se može napisati kao :

$$\begin{aligned} P_{out}(y_{th}) &= \Pr(y \leq y_{th}) = \Pr(\max(y_{FSO}, y_{RF}) \leq y_{th}) = \\ &= \Pr(y_{FSO} \leq y_{th}, y_{RF} \leq y_{th}) = P_{out}(y_{FSO} \leq y_{th}) P_{out}(y_{RF} \leq y_{th}) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Nakon zamene izvedenih izraza za novoformirane modele turbulencije FSO kanala, kako za slučajeve kad se javlja greška pozicioniranja i za slučajeve kada su prijemnici odgovarajuće usmereni, a koji su izvedeni u četvrtom poglavlju ove disertacije, moguće je odrediti standardne mere performansi bežičnih komunikacionih sistema i analizirati ih u funkciji parametara sistema.

6. ZAKLJUČAK

Ubrzan razvoj različitih servisa, u okviru bežičnog telekomunikacionog sistema, dovodi do potrebe za stalnim proučavanjem i unapređenjem performansi ovih usluga. Zahtevi koji moraju da se ispune u procesu unapređenja performansi bežičnih komunikacionih sistema su: velike brzine prenosa, veći kapacitet kanala, veći domet veze uz što manje greške pri prenosu podataka. Ipak, moramo uzeti u obzir da je prostiranje korisnog signala kroz bežični medijum praćeno raznim neželjenim efektima. Promena nivoa korisnog signala u vremenu (fading) je jedan od osnovnih oblika smetnji pri prenosu digitalno modulisanog signala kroz komunikacioni kanal bežičnog medijuma (atmosfera).

Uopšteno govoreći, predmet proučavanja ove disertacije je prenos podataka bežičnim telekomunikacionim sistemom, tačnije FSO sistemom. To je bežična optička mreža, zasnovana na korišćenju slobodnog prostora (atmosfera), kao medijuma za prenos podataka. U radu su opisane performanse, dobre strane kao i ograničenja ovog sistema, takođe dati su i konkretni primeri upotrebe FSO prenosa.

Zbog ograničenja u domenu spektra, postojeća RF tehnologija ne može u potpunosti da podrži ubranu ekspanziju razvoja novih tehnologija i usluga. Upotreba IoT (Internet Thing) i IoE (Internet of Everithing) uređaja, tj. pametnih uređaja koji se povezuju na mrežu je u stalnom porastu, pa trenutni raspoloživi elektromagnetni frekvencijski opseg nije dovoljan za tehničke potrebe 5G mreže koja omogućava ove usluge. Usled ograničenja u frekvencijskom opsegu RF sistema, podopsezi bivaju već raspoređeni i zauzeti. Kao način za prevazilaženje nedostataka RF tehnologije, nameće se bežična komunikacija talasima milimetarske i nanometarske dužine. Kao alternativa prenosa u RF delu spektra, predložena je upotreba optičke bežične komunikacije OWC, konkretno FSO sistema. Opravdanost upotrebe FSO sistema se ogleda u velikom broju unapređenih karakteristika prenosa koje pruža ova tehnologija, kao što su: širok spektar, velike brzine prenosa, niža potrošnja energije, ekonomičnost, prednosti koje se ogledaju u velikom kapacitetu prenosa podataka u rasponu od

nekoliko nanometara do nekoliko kilometara, kako za zatvoren tako i za otvoren prostor, itd. Kako je noseća frekvencija FSO sistema mnogo veća od frekvencije RF sistema, ona može da podrži veću stopu signalizacije. Sve ovo opravdava značaj i cilj istraživanja koja su sprovedena u ovom radu.

U disertaciji su date osnovne karakteristike prenosa signala kroz opisani komunikacioni kanal, kao i sve relevantne karakteristike bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema. Razmatrane su smetnje kao i raspodele kojima se opisuje koristan signal, efekti greške kao i modeli turbulencije u bežičnim optičkim telekomunikacionim sistemima, predstavljene su statističke karakteristike prvog reda za razne tipove slučajnih promenljivih, a za navedene parametre izračunata je gustina verovatnoće, kumulativna verovatnoća i momenti. Na osnovu dobijenih rezultata iscrtani su grafici promene gustine verovatnoće i kumulativne verovatnoće za različite vrednosti propagacionog okruženja. Urađena je analiza performansi bežičnog optičkog prenosa (FSO) uvođenjem analitički trakabilnog modela funkcije gustine verovatnoće (PDF) za slučajnu promenljivu amplitude signala koji fluktuiira usled dejstva atmosferski indukovanih turbulencija.

U cilju smanjenja uticaja turbulencije i efekta greške pozicioniranja razmatrani su bežični optički telekomunikacioni sistemi sa aspekta upotrebe prostornih diverziteti tehnika MRC i SC kombinovanja. Za oba slučaja pokazan je pristup za određivanje gustine verovatnoće i kumulativna verovatnoća na izlazima iz prijemnika, kao i srednja verovatnoća greške po bitu (ABER). Predložen je model kanala za hibridnu FSO/RF komunikaciju, zasnovan na poznatom simultanom kanalu koji uzima u obzir razlike u brzini signalizacije i efekat atmosferskog slabljenja koji je prisutan u FSO i RF linkovima. Za ovako modelovan sistem na izlazu iz diverziteti kombinera predstavljen je pristup pomoću koga se određuje gustina verovatnoće i kumulativna verovatnoća prenosa.

Iz svega navedenog, zaključujemo da je proučavanjem performansi bežičnih optičkih telekomunikacionih sistema u prisustvu turbulencije i efekta greške pozicioniranja moguće odrediti optimalne parametre prenosa.

LITERATURA

- [1] A. Ijaz, L. Zhang, M. Grau, A. Mohamed, S. Vural, A. U. Quddus, M. A. Imran, C. H. Foh, and R. Tafazolli, "Enabling massive IoT in 5G and beyond systems: PHY radio frame design considerations," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3322–3339, Jul 2016.
- [2] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam, and Y. M. Jang, "A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819–9840, Jan 2018.
- [3] U. Siddique, H. Tabassum, E. Hossain, and D. I. Kim, "Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 22–31, Oct 2015.
- [4] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, and J. Cheng, "Emerging optical wireless communications-advances and challenges," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1738–1749, Sep 2015.
- [5] M. R. Palattella, M. Dohler, A. Grieco, G. Rizzo, J. Torsner, T. Engel, and L. Ladid, "Internet of things in the 5G era: Enablers, architecture, and business models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 510–527, Mar 2016.
- [6] T. Koonen, "Indoor optical wireless systems: Technology, trends, and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 8, pp. 1459–1467, Apr 2018.
- [7] S. Arnon, J. Barry, G. Karagiannidis, R. Schober, and M. Uysal, *Advanced optical wireless communication systems*. Cambridge university press, May 2012.
- [8] W. Guo, Q. Li, H.-Y. Yu, and J.-H. Liu, "A parallel transmission MAC protocol in hybrid VLC-RF network," *Journal of Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 80–85, Jan 2015.
- [9] A. Aldalbahi, M. Rahaim, A. Khreishah, M. Ayyash, and T. D. Little, "Visible light

communication module: An open source extension to the NS3 network simulator with real system validation,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 22 144–22 158, Oct 2017.

- [10] Z. Zheng, L. Liu, and W. Hu, “Accuracy of ranging based on DMT visible light communication for indoor positioning,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 8, pp. 679–682, Apr 2017.
- [11] F. Yang, J. Cheng, and T. A. Tsiftsis, “Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 2, pp. 713–725, Feb 2014.
- [12] A. Malik and P. Singh, “Free space optics: Current applications and future challenges,” *International Journal of Optics*, vol. 2015.
- [13] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, M. Shahjalal, M. T. Hossan, and Y. M. Jang, “Optical wireless hybrid networks: Trends, opportunities, challenges, and research directions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 930–966, Second Quart. 2020.
- [14] H.-H. Lu, C.-Y. Li, H.-W. Chen, C.-M. Ho, M.-T. Cheng, Z.-Y. Yang, and C.-K. Lu, “A 56 Gb/s PAM4 VCSEL-based LiFi transmission with two-stage injection-locked technique,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, Feb 2017.
- [15] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, “LED based indoor visible light communications: State of the art,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, Fourth Quart. 2015.
- [16] “Intel, different Wi-Fi protocols and data rates, sep 2018,” [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html>.
- [17] A. Roy, P. Chaporkar, and A. Karandikar, “Optimal radio access technology selection algorithm for LTE-WiFi network,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 7, pp. 6446–6460, Feb 2018.
- [18] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, and Y. M. Jang, “Interference management based on RT/nRT traffic classification for FFR-aided small cell/macroc cell heterogeneous networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31 340–31 358, Jun 2018.
- [19] G. Liang, H. Yu, X. Guo, and Y. Qin, “Joint access selection and bandwidth allocation algorithm supporting user requirements and preferences in heterogeneous wireless

- networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 23 914–23 929, Feb 2019.
- [20] M. Collotta, G. Pau, T. Talty, and O. K. Tonguz, “Bluetooth 5: A concrete step forward toward the IoT,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 125–131, Jul 2018.
 - [21] S. R. Hussain, S. Mehnaz, S. Nirjon, and E. Bertino, “Secure seamless bluetooth low energy connection migration for unmodified IoT devices,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 4, pp. 927–944, Apr 2018.
 - [22] X. Sun, C. H. Kang, M. Kong, O. Alkhazragi, Y. Guo, M. Ouhssain, Y. Weng, B. H. Jones, T. K. Ng, and B. S. Ooi, “A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 421–431, Jan 2020.
 - [23] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, “LED based indoor visible light communications: State of the art,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, Fourth Quart. 2015.
 - [24] A. G. Sarigiannidis, M. Iloridou, P. Nicopolitidis, G. Papadimitriou, F.-N. Pavlidou, P. G. Sarigiannidis, M. D. Louta, and V. Vitsas, “Architectures and bandwidth allocation schemes for hybrid wireless-optical networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 427–468, First Quart. 2014.
 - [25] R. Q. Shaddad, A. B. Mohammad, S. A. Al-Gailani, A. Al-Hetar, and M. A. Elmagzoub, “A survey on access technologies for broadband optical and wireless networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 41, pp. 459–472, May 2014.
 - [26] A. Sevincer, A. Bhattarai, M. Bilgi, M. Yuksel, and N. Pala, “LIGHTNETs: Smart lighting and mobile optical wireless NETWORKs—a survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1620–1641, Fourth Quart. 2013.
 - [27] A. N. Islam and S. Majumder, “Effect of pointing error on BER performance of a multi-wavelength OCDMA FSO system with SIK dual detector receiver,” *Journal of Optical Communications*, vol. 40, no. 3, pp. 247–253, Jul 2019.
 - [28] A. N. Islam and S. Majumder, “BER performance analysis of a FSO OCDMA communication system with receive diversity using SIK dual photodetector receiver,” in *International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*. IEEE, Sep 2016, pp. 1–5.

- [29] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, Jun 2014.
- [30] A. S. Hamza, J. S. Deogun, and D. R. Alexander, "Classification framework for free space optical communication links and systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1346–1382, second quarter 2019.
- [31] I. A. Alimi, A. L. Teixeira, and P. P. Monteiro, "Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 708–769, First Quart. 2018.
- [32] A. Jahid, P. Das, and S. P. Majumder, "Bit error rate (BER) performance of a free space optical (FSO) link considering the effect of cloud-induced fading," *Glob. J. Res. Eng. F Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, no. 6, pp. 43–48, Dec 2015.
- [33] W. Rabinovich, C. Moore, H. Burris, J. Murphy, R. Mahon, M. Ferraro, P. Goetz, L. Thomas, C. Font, G. Gilbreath *et al.*, "Free space optical communications research at the US naval research laboratory," in *Free-Space Laser Communication Technologies XXII*, vol. 7587. International Society for Optics and Photonics, Feb 2010, p. 758702.
- [34] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, Feb 2004.
- [35] I. K. Son and S. Mao, "A survey of free space optical networks," *Digital communications and networks*, vol. 3, no. 2, pp. 67–77, May 2017.
- [36] C. Kachris and I. Tomkos, "A survey on optical interconnects for data centers," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 1021–1036, Oct 2012.
- [37] M. L. Sichitiu and M. Kihl, "Inter-vehicle communication systems: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 10, no. 2, pp. 88–105, Jul 2008.
- [38] S. Sharma, A. Madhukumar, and R. Swaminathan, "Effect of pointing errors on the performance of hybrid FSO/RF networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 131 418–131 434, Sep 2019.
- [39] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou, and T. Zhang, "A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical

- communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1104–1123, Second Quart. 2018.
- [40] V. Dhasarathan, M. Singh, and J. Malhotra, “Development of high-speed FSO transmission link for the implementation of 5G and Internet of Things,” *Wireless Networks*, vol. 26, pp. 1–10, Oct 2020.
 - [41] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, “5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127 639–127 651, Sep 2019.
 - [42] R. Khan, P. Kumar, D. N. K. Jayakody, and M. Liyanage, “A survey on security and privacy of 5G technologies: Potential solutions, recent advancements and future directions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 196–248, First Quart. 2020.
 - [43] “Samsung, 5G requirements,” [Online]. Available: <https://developer.samsung.com/tech-insights/5G/5g-requirements> (accessed on April 25, 2020).
 - [44] L. Chettri and R. Bera, “A comprehensive survey on internet of things (IoT) towards 5G wireless systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, Jan 2020.
 - [45] H. Kaushal and G. Kaddoum, “Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, First Quart. 2017
 - [46] F. Nadeem, T. Javornik, E. Leitgeb, V. Kvicera, and G. Kandus, “Continental fog attenuation empirical relationship from measured visibility data,” *Radioengineering*, vol. 19, no. 4, pp. 596–600, 2010.
 - [47] H. Kaushal, V. Kumar, A. Dutta, H. Aennam, V. Jain, S. Kar, and J. Joseph, “Experimental study on beam wander under varying atmospheric turbulence conditions,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 22, pp. 1691–1693, Aug 2011.
 - [48] J. Ma, X. Li, S. Yu, L. Tan, and Q. Han, “Influence of satellite vibration on optical communication performance for intersatellite laser links,” *Optical review*, vol. 19, no. 1, pp. 25–28, Feb 2012.

- [49] A. Viswanath, V. K. Jain, and S. Kar, "Analysis of earth-to-satellite free-space optical link performance in the presence of turbulence, beam-wander induced pointing error and weather conditions for different intensity modulation schemes," *IET Communications*, vol. 9, no. 18, pp. 2253–2258, Dec 2015.
- [50] H. Zech, F. Heine, D. Tröndle, S. Seel, M. Motzigemba, R. Meyer, and S. Philipp-May, "LCT for EDRS: LEO to GEO optical communications at 1, 8 Gbps between Alphasat and Sentinel 1a," in *Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XI; and Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications*, vol. 9647. International Society for Optics and Photonics, Oct 2015, p. 96470J.
- [51] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, Fourth Quart. 2015
- [52] C.-H. Liu, Y.-C. Chang, T. B. Norris, and Z. Zhong, "Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature," *Nature nanotechnology*, vol. 9, no. 4, pp. 273–278, Mar 2014.
- [53] A. Aladeloba, A. Phillips, and M. Woolfson, "Improved bit error rate evaluation for optically pre-amplified free-space optical communication systems in turbulent atmosphere," *IET optoelectronics*, vol. 6, no. 1, pp. 26–33, Feb 2012.
- [54] M. Abtahi, P. Lemieux, W. Mathlouthi, and L. A. Rusch, "Suppression of turbulence-induced scintillation in free- space optical communication systems using saturated optical amplifiers," *Journal of Lightwave technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4966–4973, Dec 2006.
- [55] M. R. Bhatnagar and Z. Ghassemlooy, "Performance analysis of gamma–gamma fading FSO MIMO links with pointing errors," *Journal of Lightwave technology*, vol. 34, no. 9, pp. 2158–2169, May 2016.
- [56] E. Bayaki, R. Schober, and R. K. Mallik, "Performance analysis of MIMO free-space optical systems in gamma-gamma fading," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 11, pp. 3415–3424, Nov 2009.
- [57] A. B. Raj and A. K. Majumder, "Historical perspective of free space optical communications: from the early dates to today's developments," *IET Communications*, vol. 13, no. 16, pp. 2405–2419, Aug 2019.

- [58] T. D. Katsilieris, G. P. Latsas, H. E. Nistazakis, and G. S. Tombras, "An accurate computational tool for performance estimation of FSO communication links over weak to strong atmospheric turbulent channels," *Computation*, vol. 5, no. 1, p. 18, Mar 2017.
- [59] A. K. Majumdar, *Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*. Springer, Sep 2014, vol. 186.
- [60] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, and E. Udvary, *Optical wireless communications: An emerging technology*. Springer, Aug 2016.
- [61] A. S. Das and A. S. Patra, "Radio-over-fiber transport system employing free-space optical communication scheme with parabolic reflector," in *Broadband Access Communication Technologies IX*, vol. 9387. International Society for Optics and Photonics, Feb 2015, p. 93870W.
- [62] C. C. Davis, I. I. Smolyaninov, and S. D. Milner, "Flexible optical wireless links and networks," *IEEE Communications magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 51–57, Mar 2003.
- [63] Y. Wu, H. Mei, C. Dai, F. Zhao, and H. Wei, "Design and analysis of performance of FSO communication system based on partially coherent beams," *Optics Communications*, p. 126041, Oct 2020.
- [64] M. S. Al-Ebraheemy, A. M. Salhab, M. El-Absi, S. A. Zummo, and S. Ikki, "Performance analysis of mixed interference aligned MIMO RF/Unified FSO DF relaying with heterodyne detection and two IM/DD models," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 93 297–93 308, May 2020.
- [65] 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, Mar 2018.
- [66] A. B. Raj, J. A. V. Selvi, and S. Durairaj, "Comparison of different models for ground-level atmospheric turbulence strength (cn2) prediction with a new model according to local weather data for FSO applications," *Applied optics*, vol. 54, no. 4, pp. 802–815, Jan 2015.
- [67] Z. Li and X. Zhao, "BP artificial neural network based wave front correction for sensor-less free space optics communication," *Optics Communications*, vol. 385, pp. 219–228, Feb 2017.
- [68] A. Viswanath, S. Singh, V. Jain, and S. Kar, "Design and implementation of moems

- based ground to satellite free space optical link under turbulence condition,” *Procedia Computer Science*, vol. 46, pp. 1216–1222, Apr 2015.
- [69] N. Védrenne, J.-M. Conan, C. Petit, and V. Michau, “Adaptive optics for high data rate satellite to ground laser link,” in *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII*, vol. 9739. International Society for Optics and Photonics, Mar 2016, p. 97390E.
 - [70] R. Boluda-Ruiz, A. García-Zambrana, B. Castillo-Vázquez, and C. Castillo-Vázquez, “Impact of relay placement on diversity order in adaptive selective DF relay-assisted FSO communications,” *Optics express*, vol. 23, no. 3, pp. 2600–2617, Jan 2015.
 - [71] P. Yue, P. Zhao, X. Yi, Y. Wang, C. Shen, and Q. Ao, “Performance analysis for multi-hop UOWC system over mixture Exponential—Gamma with two IM-DD fading channels,” *Optics Communications*, vol. 459, p. 125012, Mar 2020.
 - [72] K. Xu, H.-Y. Yu, Y.-J. Zhu, and H.-B. Cai, “Channel-adaptive space-collaborative constellation design for MIMO VLC with fast maximum likelihood detection,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 842–852, Jan 2017.
 - [73] M.-A. Khalighi, C. Gabriel, T. Hamza, S. Bourennane, P. Leon, and V. Rigaud, “Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges,” in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, Jul 2014, pp. 1–4.
 - [74] M. S. Islam and H. Haas, “Modulation techniques for Li-Fi,” *ZTE Communication*, vol. 14, no. 2, pp. 29–40, Apr 2016.
 - [75] E. Balti, M. Guizani, B. Hamdaoui, and B. Khalfi, “Aggregate hardware impairments over mixed RF/FSO relaying systems with outdated CSI,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 3, pp. 1110–1123, Mar 2018.
 - [76] M. Z. Hassan, M. J. Hossain, J. Cheng, and V. C. Leung, “Subcarrier intensity modulated optical wireless communications: A survey from communication theory perspective,” *ZTE Communications*, vol. 14, no. 2, pp. 2–12, Apr 2016.
 - [77] T. Zhang, Y. Zou, J. Sun, and S. Qiao, “Improved companding transform for PAPR reduction in ACO-OFDM-based VLC systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 1180–1183, Apr 2018.
 - [78] T. Jiang, M. Tang, R. Lin, Z. Feng, X. Chen, L. Deng, S. Fu, X. Li, W. Liu, and D. Liu,

- “Investigation of DC-biased optical OFDM with precoding matrix for visible light communications: Theory, simulations, and experiments,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 1–16, Aug 2018.
- [79] C. Chow *et al.*, “Performances of M-ACO-OFDM, DCO-OFDM and M-GLIM OFDM in visible light communication systems,” in *25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*. IEEE, Mar 2020, pp. 297–300.
- [80] F. Ebrahimi, Z. Ghassemlooy, and S. Olyaei, “Investigation of a hybrid OFDM-PWM/PPM visible light communications system,” *Optics Communications*, vol. 429, pp. 65–71, Dec 2018.
- [81] M. F. L. Abdullah and S. W. Bong, “Adaptive differential amplitude pulse-position modulation technique for optical wireless communication channels based on fuzzy logic,” *IET Communications*, vol. 8, no. 4, pp. 427–432, Jan 2014.
- [82] M. Noshad and M. Brandt-Pearce, “Application of expurgated PPM to indoor visible light communications—part I: Single-user systems,” *Journal of lightwave technology*, vol. 32, no. 5, pp. 875–882, Mar 2014.
- [83] Y.-N. Mu, Z. Wang, and P. Li, “Analyzing the characteristics of pulse state interval modulation in atmosphere laser communication,” in *International Conference on Wireless Communication and Sensor Network*. IEEE, Mar 2015, pp. 46–49.
- [84] W.-S. Tsai, H.-H. Lu, H.-W. Wu, S.-C. Tu, Y.-C. Huang, J.-Y. Xie, Q.-P. Huang, and S.-E. Tsai, “500 Gb/s PAM4 FSO-UWOC convergent system with a R/G/B five-wavelength polarization-multiplexing scheme,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 16 913–16 921, Jan 2020.
- [85] W. M. R. Shakir, “Performance evaluation of a selection combining scheme for the hybrid FSO/RF system,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, Feb 2018.
- [86] H. Lei, Y. Zhang, K. Park, I. S. Ansari, G. Pan, and M.-S. Alouini, “Performance analysis of dual-hop RF-UWOC systems,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1–15, Mar 2020.
- [87] M. A. Amirabadi and V. T. Vakili, “Performance evaluation of a novel relay-assisted hybrid FSO/RF communication system with receive diversity,” *IET Optoelectronics*, vol. 13, no. 5, pp. 203–214, Feb 2019.
- [88] M.-A. Khalighi, S. Long, S. Bourennane, and Z. Ghassemlooy, “PAM-and CAP-based

- transmission schemes for visible- light communications,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27 002–27 013, Oct 2017.
- [89] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*. CRC press, Apr 2019.
 - [90] V. Palliyembil, J. Vellakudiyan, P. Muthuchidambaranathan, and T. A. Tsiftsis, “Capacity and outage probability analysis of asymmetric dual-hop RF–FSO communication systems,” *IET Communications*, vol. 12, no. 16, pp. 1979–1983, May 2018.
 - [91] N. Varshney, A. K. Jagannatham, and P. K. Varshney, “Cognitive MIMO-RF/FSO cooperative relay communication with mobile nodes and imperfect channel state information,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 4, no. 3, pp. 544–555, Sep 2018.
 - [92] L. Kong, W. Xu, L. Hanzo, H. Zhang, and C. Zhao, “Performance of a free-space-optical relay-assisted hybrid RF/FSO system in generalized M -distributed channels,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 1–19, Aug 2015.
 - [93] V. Jamali, D. S. Michalopoulos, M. Uysal, and R. Schober, “Link allocation for multiuser systems with hybrid RF/FSO backhaul: Delay-limited and delay-tolerant designs,” *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 15, no. 5, pp. 3281–3295, May 2016.
 - [94] J. M. Garrido-Balsells, A. Jurado-Navas, J. F. Paris, M. Castillo-Vázquez, and A. Puerta-Notario, “Spatially correlated gamma-gamma scintillation in atmospheric optical channels,” *Optics express*, vol. 22, no. 18, pp. 21 820–21 833, Sep 2014.
 - [95] T. Song and P.-Y. Kam, “A robust GLRT receiver with implicit channel estimation and automatic threshold adjustment for the free space optical channel with IM/DD,” *Journal of lightwave technology*, vol. 32, no. 3, pp. 369–383, Feb 2014.
 - [96] N. A. M. Nor, Z. F. Ghassemlooy, J. Bohata, P. Saxena, M. Komanec, S. Zvanovec, M. R. Bhatnagar, and M.-A. Khalighi, “Experimental investigation of all-optical relay-assisted 10 Gb/s FSO link over the atmospheric turbulence channel,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 45–53, Jan 2017.
 - [97] H. Safi, A. A. Sharifi, M. T. Dabiri, I. S. Ansari, and J. Cheng, “Adaptive channel coding and power control for practical FSO communication systems under channel

- estimation error,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7566–7577, May 2019.
- [98] K. O. Odeyemi, P. A. Owolawi, and V. M. Srivastava, “Optical spatial modulation over Gamma–Gamma turbulence and pointing error induced fading channels,” *Optik*, vol. 147, pp. 214–223, Oct 2017.
- [99] H. Liao, Q. Zhang, and L. Tan, “Coded error performance bound for Q-ary PPM signaling over the satellite-to-ground optical channel,” *Optik*, vol. 124, no. 13, pp. 1486–1489, Jul 2013.
- [100] B. D. Ajewole, P. A. Owolawi, and V. M. Srivastava, “Error performance of coded BPSK OFDM-FSO system under atmospheric turbulence,” *Journal of Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 936–944, Oct 2019.
- [101] H. D. Le, V. V. Mai, C. T. Nguyen, and A. T. Pham, “Throughput analysis of incremental redundancy hybrid ARQ for FSO-based satellite systems,” in *90th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. IEEE, Sep 2019, pp. 1–5.
- [102] A. García-Zambrana, R. Boluda-Ruiz, C. Castillo-Vázquez, and B. Castillo-Vázquez, “Novel space-time trellis codes for free-space optical communications using transmit laser selection,” *Optics express*, vol. 23, no. 19, pp. 24 195–24 211, Sep 2015.
- [103] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, M. Castillo-Vázquez, and A. Puerta-Notario, “An efficient rate-adaptive transmission technique using shortened pulses for atmospheric optical communications,” *Optics Express*, vol. 18, no. 16, pp. 17 346–17 363, Aug 2010.
- [104] Z. Hassan, J. Hossain, J. Cheng, and V. C. Leung, “Delay-QoS-aware adaptive modulation and power allocation for dual-channel coherent OWC,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 138–151, Mar 2018.
- [105] M. Z. Hassan, M. J. Hossain, J. Cheng, and V. C. Leung, “Statistical delay-QoS aware joint power allocation and relaying link selection for free space optics based fronthaul networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 3, pp. 1124–1138, Mar 2018.
- [106] H. Zhou, S. Mao, and P. Agrawal, “Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks,” *Digital Communications and Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 171–180, Aug 2015.

- [107] M. Karimi and M. Uysal, "Novel adaptive transmission algorithms for free-space optical links," *IEEE transactions on communications*, vol. 60, no. 12, pp. 3808–3815, Dec 2012.
- [108] J. A. Anguita, M. A. Neifeld, B. Hildner, and B. Vasic, "Rateless coding on experimental temporally correlated FSO channels," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 7, pp. 990–1002, Apr 2010.
- [109] I. B. Djordjevic, "Adaptive modulation and coding for free-space optical channels," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 2, no. 5, pp. 221–229, May 2010.
- [110] M. A. Amirabadi and V. T. Vakili, "Performance analysis of hybrid FSO/RF communication systems with Alamouti coding or antenna selection," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 5, pp. 3433–3437, Jun 2019.
- [111] R. Pernice, A. Andò, A. Parisi, A. C. Cino, and A. C. Busacca, "Moderate-to-strong turbulence generation in a laboratory indoor free space optics link and error mitigation via RaptorQ codes," in *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, Jul 2016, pp. 1–4.
- [112] J. Ma, K. Li, L. Tan, S. Yu, and Y. Cao, "Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma–Gamma atmospheric turbulence," *Applied optics*, vol. 54, no. 25, pp. 7575–7585, Aug 2015.
- [113] M. A. Al-Jarrah, A. Al-Dweik, K.-H. Park, and M.-S. Alouini, "Amplitude-coherent detection for optical wireless communications: Opportunities and limitations," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 550–562, May 2020.
- [114] H. S. Khallaf, H. M. Shalaby, J. M. Garrido-Balsells, and S. Sampei, "Performance analysis of a hybrid QAM- MPPM technique over turbulence-free and gamma-gamma free-space optical channels," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 2, pp. 161–171, Feb 2017.
- [115] Y. Zhu, M. Jiang, Z. Chen, and F. Zhang, "Terabit faster-than-Nyquist PDM 16-QAM WDM transmission with a net spectral efficiency of 7.96 b/s/Hz," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 14, pp. 2912–2919, Apr 2018.
- [116] K. Toyoda, Y. Koizumi, T. Omiya, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa,

- “Marked performance improvement of 256 QAM transmission using a digital back-propagation method,” *Optics express*, vol. 20, no. 18, pp. 19 815–19 821, Aug 2012.
- [117] Y. Wang, K. Kasai, M. Yoshida, and M. Nakazawa, “320 Gbit/s, 20 Gsymbol/s 256 QAM coherent transmission over 160 km by using injection-locked local oscillator,” *Optics Express*, vol. 24, no. 19, pp. 22 088–22 096, Sep 2016.
- [118] A. K. Majumdar and J. C. Ricklin, *Free-space laser communications: Principles and advances*. Springer Science & Business Media, 2010, vol. 2.
- [119] M. J. Saber, A. Keshavarz, J. Mazloun, A. M. Sazdar, and M. J. Piran, “Physical-layer security analysis of mixed SIMO SWIPT RF and FSO fixed-gain relaying systems,” *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 2851–2858, Mar 2019.
- [120] D. Tubail, M. El-Absi, A. Salhab, S. Ikki, S. Zummo, and T. Kaiser, “Physical layer security of interference aligned mixed RF/unified-FSO relaying network,” *IET Communications*, vol. 14, no. 14, pp. 2282–2293, Aug 2020.
- [121] T. Nguyen and T. Nguyen, “Embedded coding techniques for FSO communication,” in *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE, Feb 2018, pp. 1–5.
- [122] I. Alimi, A. Shahpari, A. Sousa, R. Ferreira, P. Monteiro, and A. Teixeira, “Challenges and opportunities of optical wireless communication technologies,” *Optical communication technology*, vol. 10, Aug 2017.
- [123] A. Vats, M. Aggarwal, and S. Ahuja, “Outage and error analysis of three hop hybrid VLC/FSO/VLC-based relayed optical wireless communication system,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 30, no. 5, p. e3544, May 2019.
- [124] J. Bohata, M. Komanec, J. Spáčil, Z. Ghassemloooy, S. Zvánovec, and R. Slavík, “24–26 GHz radio-over-fiber and free-space optics for fifth-generation systems,” *Optics letters*, vol. 43, no. 5, pp. 1035–1038, Mar 2018.
- [125] S. Chaudhary and A. Amphawan, “The role and challenges of free-space optical systems,” *Journal of Optical Communications*, vol. 35, no. 4, pp. 327–334, Dec 2014.
- [126] F. Aveta, H. H. Refai, and P. LoPresti, “Multi-user FSO communication link,” in *2017 Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop (CCAA)*. IEEE, Aug 2017, pp. 1–5.
- [127] L. Chen, W. Wang, and C. Zhang, “Multiuser diversity over parallel and hybrid

- FSO/RF links and its performance analysis,” *IEEE photonics journal*, vol. 8, no. 3, pp. 1–9, Jun 2016.
- [128] Y. F. Al-Eryani, A. M. Salhab, S. A. Zummo, and M.-S. Alouini, “Performance analysis and power allocation for two- way multi-user mixed RF/FSO relay networks,” in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, Apr 2018, pp. 1–6.
- [129] H.-C. Yang and M.-S. Alouini, *Advanced Wireless Transmission Technologies: Analysis and Design*. Cambridge University Press, Mar 2020.
- [130] H. Kong, M. Lin, W.-P. Zhu, H. Amindavar, and M.-S. Alouini, “Multiuser scheduling for asymmetric FSO/RF links in Satellite-UAV-Terrestrial networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 8, pp. 1235–1239, Apr 2020.
- [131] S. Arya and Y. H. Chung, “Spectrum sensing for free space optical communications in strong atmospheric turbulence channel,” *Optics Communications*, vol. 445, pp. 24–28, Aug 2019.
- [132] T.-P. Ren, C. Yuen, Y. L. Guan, and G.-S. Tang, “High-order intensity modulations for OSTBC in free-space optical MIMO communications,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 2, no. 6, pp. 607–610, Aug 2013.
- [133] I. A. Alimi, A. Shahpari, P. P. Monteiro, and A. L. Teixeira, “Effects of diversity schemes and correlated channels on OWC systems performance,” *Journal of Modern Optics*, vol. 64, no. 21, pp. 2298–2305, Jul 2017.
- [134] T. Yoo and A. Goldsmith, “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming,” *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 24, no. 3, pp. 528–541, Mar 2006.
- [135] M. Sharif and B. Hassibi, “On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information,” *IEEE Transactions on information Theory*, vol. 51, no. 2, pp. 506–522, Feb 2005.
- [136] M. Safari and M. Uysal, “Do we really need OSTBCs for free-space optical communication with direct detection?” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 11, pp. 4445–4448, Nov 2008.
- [137] K. Wang, A. Nirmalathas, C. Lim, K. Alameh, and E. Skafidas, “Space-time-coded high-speed reconfigurable card- to-card free-space optical interconnects,” *Journal of*

Optical Communications and Networking, vol. 9, no. 2, pp. A189–A197, Jan 2017.

- [138] I. A. Alimi and N. J. Muga, “Simple and robust transmit diversity based free-space optical communications for 5G and beyond networks,” *Optics Communications*, vol. 476, p. 126306, Aug 2020.
- [139] I. B. Djordjevic, *Advanced optical and wireless communications systems*. Springer, 2018.
- [140] N. H. Saidi and N. Hamdi, “End-to-end performance of DF multihop hybrid RF/FSO system using MPPM coding and MIMO technique under dependent GG turbulence channels,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 19, no. 2, pp. 811–818, Aug 2020.
- [141] R. Boluda-Ruiz, S. C. Tokgoz, A. Garca-Zambrana, and K. Qaraqe, “Enhancing secrecy capacity in FSO links via MISO systems through turbulence-induced fading channels with misalignment errors,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 1–14, Apr 2020.
- [142] H. Song, L. Li, K. Pang, R. Zhang, K. Zou, Z. Zhao, J. Du, H. Song, C. Liu, Y. Cao *et al.*, “Demonstration of using two aperture pairs combined with multiple-mode receivers and MIMO signal processing for enhanced tolerance to turbulence and misalignment in a 10 Gbit/s QPSK FSO link,” *Optics Letters*, vol. 45, no. 11, pp. 3042–3045, Oct 2020.
- [143] E. Zedini, A. Chelli, and M.-S. Alouini, “On the performance analysis of hybrid ARQ with incremental redundancy and with code combining over free-space optical channels with pointing errors,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 1–18, Jul 2014.
- [144] A. R. Hammons and F. Davidson, “Diversity rateless round robin for networked FSO communications,” in *Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications*. Optical Society of America, 2011, p. LTuB1.
- [145] L. Yang, M. O. Hasna, and X. Gao, “Performance of mixed RF/FSO with variable gain over generalized atmospheric turbulence channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1913–1924, Sep 2015.
- [146] R. Peach, G. Burdge, F. Reitberger, C. Visone, M. Oyler, C. Jensen, and J. Sonnenberg, “Performance of a 10 Gbps QoS-based buffer in a FSO/RF IP network,” in *Free-Space Laser Communications X*, vol. 7814. International Society for Optics and Photonics,

Aug 2010, p. 781402.

- [147] M. A. Amirabadi, M. H. Kahaei, S. A. Nezamalhoseini, and V. T. Vakili, "Deep learning for channel estimation in FSO communication system," *Optics Communications*, vol. 459, p. 124989, Mar 2020.
- [148] J. Thrane, J. Wass, M. Piels, J. C. Diniz, R. Jones, and D. Zibar, "Machine learning techniques for optical performance monitoring from directly detected PDM-QAM signals," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 868–875, Feb 2017.
- [149] D. Wang, M. Zhang, J. Li, Z. Li, J. Li, C. Song, and X. Chen, "Intelligent constellation diagram analyzer using convolutional neural network-based deep learning," *Optics express*, vol. 25, no. 15, pp. 17 150–17 166, Jul 2017.
- [150] C. Zheng, S. Yu, and W. Gu, "A SVM-based processor for free-space optical communication," in *2015 IEEE 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*. IEEE, Oct 2015, pp. 30–33.
- [151] Q. Tian, Z. Li, K. Hu, L. Zhu, X. Pan, Q. Zhang, Y. Wang, F. Tian, X. Yin, and X. Xin, "Turbo-coded 16-ary OAM shift keying FSO communication system combining the CNN-based adaptive demodulator," *Optics express*, vol. 26, no. 21, pp. 27 849–27 864, Oct 2018.
- [152] H. Liu, P. Xia, Y. Chen, and L. Wu, "Interference graph-based dynamic frequency reuse in optical attocell networks," *Optics Communications*, vol. 402, pp. 527–534, Nov 2017.
- [153] J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, and M. Asaduzzaman, "Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46 317–46 350, Apr 2019.
- [154] A. Jahid, A. B. Shams, M. Hossain *et al.*, "PV-powered CoMP-based green cellular networks with a standby grid supply," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017, 2017.
- [155] A. Kshatriya, Y. Acharya, A. Aggarwal, and A. Majumdar, "Estimation of FSO link availability using climatic data," *Journal of Optics*, vol. 45, no. 4, pp. 324–330, Dec 2016.
- [156] K. P. Peppas, A. N. Stassinakis, H. E. Nistazakis, and G. S. Tombras, "Capacity analysis of dual amplify-and-forward relayed free-space optical communication

- systems over turbulence channels with pointing errors,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 9, pp. 1032–1042, Sep 2013.
- [157] Y.-K. Choi, K. Hosoya, C. G. Lee, M. Hanawa, and C.-S. Park, “A hybrid WDM/OCDMA ring with a dynamic add/drop function based on Fourier code for local area networks,” *Optics Express*, vol. 19, no. 7, pp. 6243–6252, Mar 2011.
- [158] M. Hammouda, S. Akin, A. M. Vegni, H. Haas, and J. Peissig, “Link selection in hybrid RF/VLC systems under statistical queueing constraints,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2738–2754, Feb 2018.
- [159] N. D. Chatzidiamantis and G. K. Karagiannidis, “On the distribution of the sum of gamma-gamma variates and applications in RF and optical wireless communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 5, pp. 1298–1308, Feb 2011.
- [160] W. Fawaz, C. Abou-Rjeily, and C. Assi, “UAV-aided cooperation for FSO communication systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 70–75, Jan 2018.
- [161] A. Boucouvalas, N. Sagias, and K. Yiannopoulos, “First order statistics of semiconductor optical amplifier assisted optical wireless systems under log-normal fading,” in *2013 International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. IEEE, Oct 2013, pp. 142–146.
- [162] Y. Arimoto, M. Presi, V. Guarino, A. D’Errico, G. Contestabile, M. Matsumoto, and E. Ciaramella, “320 Gbit/s (8 40 Gbit/s) double-pass terrestrial free-space optical link transparently connected to optical fibre lines,” in *European Conference on Optical Communication*. IEEE, Sep 2008, pp. 1–2.
- [163] Z. Zhao, Z. Zhang, J. Tan, Y. Liu, and J. Liu, “200 Gb/s FSO WDM communication system empowered by multiwavelength directly modulated TOSA for 5G wireless networks,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 1–8, Jun 2018.
- [164] S. M. Hamzah and I. A. Murdas, “Enhancement of the performance of DWDM free space optics (FSO) communications systems under different weather conditions.”
- [165] I. K. Son, S. Mao, and S. K. Das, “On the design and optimization of a free space optical access network,” *Optical Switching and Networking*, vol. 11, pp. 29–43, Jan 2014.
- [166] 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, Jul 2007.
- [167] J. Cheng, J. Cheng, M. Zhou, F. Liu, S. Gao, and C. Liu, “Routing in internet of vehicles: A review,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 2339–2352, May 2015.
- [168] H. Urabe, S. Haruyama, T. Shogenji, S. Ishikawa, M. Hiruta, F. Teraoka, T. Arita, H. Matsubara, and S. Nakagawa, “High data rate ground-to-train free-space optical communication system,” *Optical Engineering*, vol. 51, no. 3, p. 031204, Mar 2012.
- [169] Z. Du, C. Wang, Y. Sun, and G. Wu, “Context-aware indoor VLC/RF heterogeneous network selection: Reinforcement learning with knowledge transfer,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33 275–33 284, Jun 2018.
- [170] X. Li, R. Zhang, and L. Hanzo, “Cooperative load balancing in hybrid visible light communications and WiFi,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 4, pp. 1319–1329, Mar 2015.
- [171] N. Skorin-Kapov, M. Furdek, S. Zsigmond, and L. Wosinska, “Physical-layer security in evolving optical networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 8, pp. 110–117, Aug 2016.
- [172] R. Boluda-Ruiz, A. García-Zambrana, B. Castillo-Vázquez, and K. Qaraqe, “Secure communication for FSO links in the presence of eavesdropper with generic location and orientation,” *Optics Express*, vol. 27, no. 23, pp. 34 211–34 229, Nov 2019.
- [173] H. Lei, H. Zhang, I. S. Ansari, C. Gao, Y. Guo, G. Pan, and K. A. Qaraqe, “Secrecy outage performance for SIMO underlay cognitive radio systems with generalized selection combining over Nakagami- m channels,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 12, pp. 10 126–10 132, Mar 2016.
- [174] J.-Y. Wang, C. Liu, J.-B. Wang, J. Dai, M. Lin, and M. Chen, “Secrecy outage probability analysis over Malaga- Malaga fading channels,” in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, Jul 2018, pp. 1–6.
- [175] H. Lei, H. Luo, K.-H. Park, Z. Ren, G. Pan, and M.-S. Alouini, “Secrecy outage analysis of mixed RF-FSO systems with channel imperfection,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1–13, May 2018.
- [176] 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,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 12, pp. 6384–6395, Aug 2018.
- [177] M. J. Saber and S. M. S. Sadough, “On secure free-space optical communications over Málaga turbulence channels,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 274–277, Apr 2017.
- [178] J. H. Cox, J. Chung, S. Donovan, J. Ivey, R. J. Clark, G. Riley, and H. L. Owen, “Advancing software-defined networks: A survey,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25 487–25 526, Oct 2017.
- [179] I. T. Haque and N. Abu-Ghazaleh, “Wireless software defined networking: A survey and taxonomy,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2713–2737, Fourth Quart. 2016.
- [180] B. Lin, Z. Ghassemlooy, C. Lin, X. Tang, Y. Li, and S. Zhang, “An indoor visible light positioning system based on optical camera communications,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 7, pp. 579–582, Feb 2017.
- [181] J. H. Churnside, S. F. Clifford, Log-normal Rician probability-density function of optical scintillations in the turbulent atmosphere, *Journal of Optical Society of America A* 4(10), 1987, pp. 1923–1930, DOI: 10.1364/JOSAA.4.001923.
- [182] E. Jakeman, P. Pusey, Significance of K distributions in scattering experiments, *Physical Review Letters* 40(9), 1978, pp. 546–550, DOI: 10.1103/PhysRevLett.40.546.
- [183] L. Andrews, R. Phillips, Mathematical genesis of the I-K distribution for random optical fields, *Journal of Optical Society of America A* 3(11), 1986, pp. 1912–1919, DOI:10.1364/JOSAA.3.001912.
- [184] M. A. Kashani, M. Uysal, M. Kavehrad, A novel statistical channel model for turbulence-induced fading in free-space optical systems, *Journal of Lightwave Technology* 33(11), 2015, pp. 2303–2312, DOI: 10.1109/JLT.2015.2410695.
- [185] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, J. F. Paris, A. Puerta-Notario, A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation, arXiv preprint arXiv:1102.1915, 2011, DOI:10.5772/25097.
- [186] N. D. Chatzidiamantis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, S. A. Kotsopoulos, Matthaïou M., New results on turbulence modeling for free-space optical systems, *Proceedings of 2010 17th IEEE International Conference on Telecommunications*

- (ICT), April 4-7, 2010, Doha, Qatar, pp. 487–492.
- [187] J. H. Churnside, R. G. Frehlich, Experimental evaluation of log-normally modulated Rician and IK models of optical scintillation in the atmosphere, *Journal of the Optical Society of America A* 6(11), 1989, pp. 1760–1766, DOI: 10.1364/JOSAA.6.001760.
- [188] F. Yang, J. Cheng, Coherent free-space optical communications in Lognormal-Rician Turbulence, *IEEE Communications Letters* 16(11), 2012, pp. 1872–1875, DOI: 10.1109/LCOMM.2012.100812.121341.
- [189] A. Belmonte, J. M. Kahn, Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques, *Optics Express* 16(18), 2008, pp. 14151–14162, DOI: 10.1364/OE.16.014151.
- [190] H. Zhou, W. Xie, L. Zhang, Y. Bai, W. Wei, Y. Dong, Performance analysis of FSO coherent BPSK systems over Rician turbulence channel with pointing errors, *Optics Express* 27(19), 2019, pp. 27062–27075, DOI: 10.1364/OE.27.027062.
- [191] S. M. Aghajanzadeh, M. Uysal, Diversity-multiplexing trade-off in coherent free-space optical systems with multiple receivers, *Journal of Optical Communications and Networking* 2(12), 2010, pp. 1087–1094, DOI: 10.1364/JOCN.2.001087.
- [192] S. Panić, H. Milošević, B. Prlinčević, Performance analysis of FSO transmission of double watermarked image over the Double Rician turbulence channel, *Proceedings of First West Asian Colloquium on Optical Wireless Communications (WACOWC)*, April 25, 2018, Isfahan, Iran.
- [193] S. Panić, H. Milošević, S. Vasić, V. Milenković, Dynamical characteristics of the FSO transmission capacity in the presence of Rician turbulence, *Proceedings of 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, March 6-7, 2018, Jogjakarta, Indonesia.
- [194] B. P. Prlinčević, S. R. Panić, P. C. Spalević, M. A. Mišić, A. Amnisi, V. Stanojević, On the transmission of double watermarked image over Rician FSO channel, *Elektronika ir Elektrotehnika* 22(3), 2016, pp. 83–88, DOI: 10.5755/j01.eie.22.3.15320.
- [195] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, R. L. Phillips, Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media, *Optical Engineering* 40(8), 2001, pp. 1554–1562, DOI: 10.1117/1.1386641.

- [196] P. Saxena, A. Mathur, M. R. Bhatnagar, BER performance of an optically pre-amplified FSO system under turbulence and pointing errors with ASE noise, *Journal of Optical Communications and Networking* 9(6), 2017, pp. 498-510, DOI: 10.1364/jocn.9.000498.
- [197] E. E. Elsayed, B. B. Yousif, Performance enhancement of the average spectral efficiency using an aperture averaging and spatial-coherence diversity based on the modified-PPM modulation for MISO FSO links, *Optics Communications* 463, 2020, DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125463.
- [198] M. Smilić, Z. Perić, D. Milić, A. Marković, M. Savić, Influence of zero and non-zero boresight pointing errors on bit-error rate free-space optic transmission over Málaga atmospheric channel, *Optica Applicata* 48(2), 2018, pp. 179–189, DOI: 10.5277/oa180202.
- [199] I. S. Ansari, M. S. Alouini, J. Cheng, Ergodic capacity analysis of free-space optical links with nonzero boresight pointing errors, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14(8), 2015, pp.4248–4264, DOI: 10.1109/TWC.2015.2418285.
- [200] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis, M. Uysal, BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors, *IEEE Communications Letters* 12(1), 2008, pp. 44-46, DOI: 10.1109/LCOMM.2008.071408.
- [201] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G.K. Karagiannidis, Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors, *Journal of Lightwave Technology* 27(20), 2009, pp. 4440-4445, DOI: 10.1109/JLT.2009.2024169.
- [202] N. Milošević, M. Petković, G. Djordjević, Average BER of SIM-DPSK FSO system with multiple receivers over M-distributed atmospheric channel with pointing errors, *IEEE Photonics Journal* 9(4), 2017, pp. 1-10, DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2710320.
- [203] G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [204] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, *Table of integrals, Series, and Products*, 7th Edition, Elsevier Academic Press, 2007.
- [205] G. T. Djordjević, M. I. Petković, M. Spasić, D. S. Antić, Outage capacity of FSO link with pointing errors and link blockage, *Optics Express* 24(1), 2016, pp. 219-230, DOI:

10.1364/oe.24.000219.

- [206] A. A. Farid, S. Hranilović, Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors, *Journal of Lightwave Technology* 25(7), 2007, pp. 1702–1710, DOI: 10.1109/JLT.2007.899174.
- [207] J. Todorovic, P. Spalevic, S. Panic, B. Milosavljevic, M. Gligorijevic, “FSO system performance analysis based on novel Gamma – Chi-square irradiance PDF model“, *Optica Applicata*, ISSN: 0078-5466 , DOI 10.37190/oa210303
- [208] The Wolfram Functions Site: MeijerG functions. [Online] Available: <http://functions.wolfram.com/PDF/MeijerG.pdf>
- [209] Sawhil, P. Bhardwaj, Effect of atmospheric turbulence and pointing error on OOK in free space optics, *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* 59(3), 2018, pp. 122-126.
- [210] H. Zhang, C. Li, C. Hao, Performance analysis for BPSK, DPSK and OOK-based FSO system in atmospheric turbulence conditions, *International Journal of Simulation - Systems, Science & Technology* 17(36), 2016, pp. 371-376, DOI: 10.5013/IJSSST.a.17.36.37.
- [211] The Wolfram Functions Site: Erfc functions. [Online] Available: <http://functions.wolfram.com/PDF/Erfc.pdf>
- [212] A. Abdi, W. C. Lau, M. S. Alouini, and M. Kaveh, “A new simple model for land mobile satellite channels: First and second order statistics,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 3, pp. 519–528, May 2003
- [213] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, SPIE Press, 2nd edition, 2005.
- [214] N. Letzepis and A. Guillén i Fàbregas, “Outage probability of the Gaussian MIMO free space optical channel with PPM,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 12, pp. 3682–3690, Dec. 2009.
- [215] N. Letzepis and A. Guillén i Fàbregas, “Outage probability of the free-space optical channel with doubly stochastic scintillation,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 10, pp. 2899–2902, Oct. 2009.
- [216] F. Nadeem, B. Flecker, E. Leitgeb, M. S. Awan, and T. Javornik, “Comparing the fog

- effects on hybrid network using optical wireless and GHz links,” in Proc. Int. Symp. Commun. Sys., Networks and Digital Signal proc., Jun. 2008, pp. 278–282.
- [217] H. Wu, B. Hamzeh, and M. Kavehrad, “Achieving carrier class availability of FSO link via complementary RF link,” in Proc. 38th Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Oct. 2004.
- [218] Z. Jia, F. Ao, and Q. Zhu, “BER performance of the hybrid FSO/RF attenuation system,” in Int. Symp. Anten., Prop. & EM Theory, Sep. 2006.
- [219] T. Mousley and E. Vilar, “Experimental and theoretical statistics of microwave amplitude scintillations on satellite down-links,” IEEE Trans. Anten. Propag., vol. 30, no. 6, pp. 1099–1106, Jan. 1982.
- [220] S. Vangala and H. Pishro-Nik, “A highly reliable FSO/RF communication system using efficient codes,” in Proc. IEEE Global Commun. Conf., 2007.
- [221] I. B. Djordjevic, B. Vasic, and M. A. Neifeld, “Power efficient LDPC-coded modulation for free-space optical communication over the atmospheric turbulence channel,” in Proc. Conf. Optical Fiber Commun. and Nat. Fiber Optic Engineers Conf., Feb. 2007.
- [222] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of Information Theory, Wiley Series in Telecommunications, 1991.
- [223] N. Letzepis, K. D. Nguyen, A. Guillén i Fàbregas, and W. G. Cowley, “Outage analysis of the hybrid free-space optical and radio-frequency channel,” IEEE J. Select. Areas Commun. (special issue on optical wireless communications), vol. 27, no. 9, pp. 1709–1719, Dec. 2009.
- [224] J. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill, 1995.
- [225] R. M. Gagliardi and S. Karp, Optical communications, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [226] E. Biglieri, J. Proakis, and S. Shamai, “Fading channels: information-theoretic and communications aspects,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2619–2692, Oct. 1998.
- [227] A. T. Asyhari and A. Guillén i Fàbregas, “Nearest neighbour decoding in block-fading channels with imperfect CSIR,” in IEEE Inf. Theory Workshop, Taormina, Italy, 2009.
- [228] A. Douik, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, M. S. Alouini: ‘Hybrid Radio / FreeSpace

Optical Design for Next Generation Backhaul Systems', IEEE Transactions on Communications, 2016.

- [229] M. A. Amirabadi, V. T. Vakili: 'New expressions on the performance of a novel multi-hop relay-assisted hybrid FSO/RF communication system with receive diversity', arXiv preprint arXiv:1806.08223, 2018.
- [230] L. Chen, W. Wang, C. Zhang: 'Multiuser Diversity Over Parallel and Hybrid FSO / RF Links and Its Performance Analysis', IEEE Photonics Journal, 2016.
- [231] M. A. Amirabadi, V. T. Vakili: 'Performance analysis of hybrid FSO/RF communication systems with Alamouti Coding or Antenna Selection', arXiv preprint arXiv:1802.07286, 2018.
- [232] M. A. Amirabadi, V. T. Vakili: 'Performance Comparison of two novel Relay Assisted Hybrid FSO/RF Communication Systems', arXiv preprint arXiv:1802.07335, 2018.
- [233] I. E. Lee, Z. Ghassemlooy W. P. Ng, S. Rajbhandari: 'Fundamental Analysis of Hybrid Free Space Optical and Radio Frequency Communication Systems', 2011.
- [234] H. Kazemi, M. Uysal, F. Touati: 'Outage Analysis of Hybrid FSO / RF Systems based on Finite-State Markov Chain Modeling', 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications (Iwow), 2014.
- [235] A. Goldsmith: 'Wireless Communications', University Press Cambridge, 2004.

PERFORMANSE BEŽIČNIH OPTIČKIH TELEKOMUNIKACIONIH SISTEMA U PRISUSTVU FEDINGA I INTERFERENCIJE

ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	fedorani.ni.ac.rs Internet	265 words — 1%
2	fedorabg.bg.ac.rs Internet	242 words — 1%
3	vbs.rs Internet	230 words — 1%
4	nardus.mpn.gov.rs Internet	222 words — 1%
5	www.researchgate.net Internet	152 words — < 1%
6	www.cfms-sols.org Internet	112 words — < 1%
7	vdoc.pub Internet	68 words — < 1%
8	pt.scribd.com Internet	57 words — < 1%
9	singipedia.singidunum.ac.rs Internet	46 words — < 1%

10	opticaapplicata.pwr.edu.pl Internet	30 words — < 1 %
11	sci-conf.com.ua Internet	28 words — < 1 %
12	fe.untz.ba Internet	24 words — < 1 %
13	Bahaa E. A. Saleh, Malvin C. Teich. "Optik und Photonik", Wiley, 2020 Crossref	23 words — < 1 %
14	archive.riversymposium.com Internet	22 words — < 1 %
15	export.arxiv.org Internet	20 words — < 1 %
16	web-ext.u-aizu.ac.jp Internet	20 words — < 1 %
17	link.springer.com Internet	18 words — < 1 %
18	svn.openqa.org Internet	18 words — < 1 %
19	www.osapublishing.org Internet	18 words — < 1 %
20	www.mi.sanu.ac.rs Internet	17 words — < 1 %
21	agrocentar-volodja.rs Internet	16 words — < 1 %

22	opus4.kobv.de Internet	16 words — < 1%
23	repo.lib.tokushima-u.ac.jp Internet	13 words — < 1%
24	Elforjani Jera, Sichao Zhou. "Free Space Optical System Performance using Non-Kolmogorov Spectrum over Gamma-Gamma Turbulent Atmosphere", NAECON 2018 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference, 2018 Crossref	11 words — < 1%
25	Yousef M. Shishtar, Rupert Young, Falah H. Ali. "A General Approach for Determining the Irradiance Distribution of EM Waves Propagating Through Random Media", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022 Crossref	11 words — < 1%
26	arxiv.org Internet	11 words — < 1%
27	nozdr.ru Internet	11 words — < 1%
28	Meng Lu, Fasong Wang, Rui Li, Ting Zuo, Jiankang Zhang. "Mirror array aided indoor SSK visible light downlink", Optics Communications, 2023 Crossref	10 words — < 1%
29	es.scribd.com Internet	10 words — < 1%
30	www.tuugo.us Internet	10 words — < 1%

31 Chadi Abou-Rjeily. "Spatial-Multiplexing for Photon-Counting MIMO-FSO Communication Systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018
Crossref 9 words — < 1%

32 M.A. Amirabadi, M.H. Kahaei, S.A. Nezamalhoseini. "Deep learning based detection technique for FSO communication systems", Physical Communication, 2020
Crossref 9 words — < 1%

33 infoteh.rs.ba
Internet 9 words — < 1%

34 liu.diva-portal.org
Internet 9 words — < 1%

35 repository.kaust.edu.sa
Internet 9 words — < 1%

36 web.bih.net.ba
Internet 9 words — < 1%

37 www.gzzjzbeograd.edu.rs
Internet 9 words — < 1%

38 www.sekretarijat-za-plurzs.podgorica.me
Internet 9 words — < 1%

39 Abdulgani A. Ibrahim, Serdar Ozgur Ata, Lutfiye Durak-Ata. "Performance of FSO Communication Systems Employing Alamouti-Type Space-Time Encoding Over Málaga Channels With Pointing Errors", IEEE Photonics Journal, 2022
Crossref 8 words — < 1%

40	Anirban Bhowal, Rakshesh Singh Kshetrimayum. "Advanced Spatial Modulation Systems", Springer Science and Business Media LLC, 2021 Crossref	8 words — < 1%
41	Elyes Balti, Mohsen Guizani. "Mixed RF/FSO Cooperative Relaying Systems with Co-Channel Interference", IEEE Transactions on Communications, 2018 Crossref	8 words — < 1%
42	Guanjun Xu, Jiahui Lai. "Average capacity analysis of the underwater optical plane wave over anisotropic moderate-to-strong oceanic turbulence channels with the Málaga fading model", Optics Express, 2020 Crossref	8 words — < 1%
43	assets.researchsquare.com Internet	8 words — < 1%
44	conference-indico.kek.jp Internet	8 words — < 1%
45	idoc.pub Internet	8 words — < 1%
46	minutzamene.com Internet	8 words — < 1%
47	par.nsf.gov Internet	8 words — < 1%
48	repozitorij.fsb.hr Internet	8 words — < 1%
49	ru.scribd.com Internet	8 words — < 1%

50	urn.nsk.hr Internet	8 words — < 1%
51	www.cris.uns.ac.rs Internet	8 words — < 1%
52	www.scribd.com Internet	8 words — < 1%
53	"Visible Light Communications", Wiley, 2017 Crossref	7 words — < 1%
54	Hamid Arezumand, Hossein Zamiri-Jafarian, Ehsan Soleimani-Nasab. "Exact and Asymptotic Analysis of Partial Relay Selection for Cognitive RF-FSO Systems With Non-Zero Boresight Pointing Errors", IEEE Access, 2019 Crossref	7 words — < 1%
55	www.singipedia.singidunum.ac.rs Internet	7 words — < 1%
56	Jiliang Zhang, Xiaojun Pan, Yongzhi Zhuang, Gaofeng Pan, Hongjiang Lei. "Secrecy performance for underlay cognitive multi-relaying MISO-RF/SIMO-FSO networks with outdated CSI", Physical Communication, 2021 Crossref	6 words — < 1%
57	Mohammad Javad Saber, Ahmad Keshavarz, Jalil Mazloun, Amir Mehdi Sazdar, Md. Jalil Piran. "Physical-Layer Security Analysis of Mixed SIMO SWIPT RF and FSO Fixed-Gain Relaying Systems", IEEE Systems Journal, 2019 Crossref	6 words — < 1%

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE MATCHES

OFF