

**УНИВЕРЗИТЕТ СИНГИДУМУ**

**БЕОГРАД**

**ДЕПАРТАМАН ЗА ПОСЛЕДИПЛОМСКЕ СТУДИЈЕ**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

**ПЕРФОРМАНСЕ БЕЖИЧНИХ ОПТИЧКИХ  
ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНИХ СИСТЕМА У ПРИСУСТВУ  
ФЕДИНГА И ИНТЕРФЕРЕНЦИЈЕ**

Ментор:

Проф. др Петар Спалевић

Студент:

Бојана Милосављевић, 466028/2015

БЕОГРАД, 2022. година

**UNIVERSITY OF SINGIDUNUM**

**BELGRADE**

DEPARTMENT FOR PHD STUDIES

PhD Thesis

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

Mentor:

PhD Petar Spalević

Student:

Bojana Milosavljević, 466028/2015

BELGRADE, 2022.

**Ментор:**

**Проф. др Петар Спалевић**

Универзитет Сингидунум, Београд

**Чланови комисије:**

**Проф. др Младен Веиновић**

Универзитет Сингидунум, Београд

**Проф. др Стефан Панић**

Природно-математички факултет,  
Универзитет у Приштини – К. Митровица

## САДРЖАЈ

АПСТРАКТ .....	I
ABSTRACT .....	II
СПИСАК СЛИКА.....	III
СПИСАК ТАБЕЛА.....	VI
1. УВОД.....	1
2. FREE SPACE OPTICS (FSO) КОМУНИКАЦИЈА.....	6
2.1. Савремени поглед на FSO комуникацију: потенцијал, технички изазови, достигнућа и правац истраживања .....	6
2.2. Основне карактеристике оптичког бежичниог преноса (OWC).....	8
2.2.1. OWC технологије.....	9
2.2.2. Light Fidelity (LiFi).....	10
2.2.3. Visible Light Communication (VLC).....	11
2.2.4. Optical Camera Communications (OCC).....	11
2.2.5. Light Detection And Ranging (LiDAR) .....	12
2.3. Релевантна истраживања .....	14
2.4. Принцип рада FSO (Free space optics) технологије.....	15
2.4.1. Предности и мане FSO система.....	16
2.4.2. Класификација FSO .....	17
2.4.3. Примена FSO система .....	19
2.4.4. FSO у IoT, 5G и B5G.....	22

2.5. FSO примопредајник.....	25
2.6. Поузданост FSO система .....	27
2.6.1. Адаптивна оптика (АО).....	32
2.6.2. Релејни пренос .....	32
2.6.3. Модулације у FSO системима .....	33
2.6.4. Моделирање FSO канала.....	35
2.6.5. Смањење позадинског шума.....	38
2.6.6. Кохерентни FSO системи.....	39
2.6.7. Хибридни FSO пренос.....	41
2.6.8. WiFo (WiFi-FSO) комуникација.....	42
2.6.9. Радио преко FSO система (RoFSO).....	44
2.6.10. Вишекорисничка FSO комуникација.....	44
2.6.11. MIMO FSO системи.....	45
2.6.12. FSO пренос у TCP слоју .....	47
2.7. FSO системи следеће генерације .....	48
2.8. Примена бежичног оптичког преноса у 5G технологијама .....	50
2.8.1. 5G/B5G/ и IoT/IoE решење.....	51
2.8.2. Релејне FSO мреже.....	52
2.8.3. WDM FSO веза.....	53
2.8.4. Карактеризација канала.....	54
2.8.5. Позиционирање, аквизиција и праћење (PAT-Pointing, Acquisition, Tracking).....	54
2.8.6. Подводна комуникација (UWC).....	56
2.8.7. FSO умрежавање .....	56
2.8.8. Безбедност физичког слоја.....	57
2.8.9. Софтверски дефинисана мрежна (SDN) контрола .....	57
3. БЕЖИЧНИ ОПТИЧКИ СИСТЕМИ ПРЕНОСА У ПРИСУСТВУ ТУРБУЛЕНЦИЈЕ .....	59

3.1. Оптички пријемници са директном детекцијом .....	60
3.2. Детекција прага у одсуству турбуленција .....	62
3.3. Статистика сметњи у оптичком каналу .....	68
4. БЕЖИЧНИ ОПТИЧКИ КОМУНИКАЦИОНИ СИСТЕМИ .....	77
4.1. Анализа перформанси FSO система заснована на новом Gamma-Chi-квадрат PDF моделу сцинтилације .....	77
4.1.1. Модел атмосферске турбуленције.....	78
4.1.2. Модел грешке позиционирања .....	82
4.2. Анализа перформанси FSO система заснована на новом осенчаном Chi-квадрат PDF моделу сцинтилације .....	84
4.3. Анализа добијених перформанси ситема.....	90
4.4. Примена просторних диверзити техника за унапређење перформанси FSO преноса .....	99
5. ХИБРИДНА RF/FSO КОМУНИКАЦИЈА.....	102
5.1. Основне претпоставке.....	102
5.1.1. Моделовање канала .....	104
5.1.2. Информације о стању канала и естимација канала .....	108
5.2. Хибридни FSO/RF комуникациони систем са диверзити пријемом .....	109
5.2.1. Модел система.....	111
6. ЗАКЉУЧАК .....	115
ЛИТЕРАТУРА .....	117

## АПСТРАКТ

Постојећи комуникациони систем у домену RF електромагнетног спектра није у могућности да задовољи све потребе брзог и обимног преноса података, које се јављају услед експанзије и све веће употребе IoT уређаја, 5G и B5G мрежа, као и разноврсних апликација и мултимедијалног садржаја. Оптичка бежична комуникација (OWC), која користи велики опсег нелиценцираног дела спектра, се показала као добра алтернатива за ублажавање недостатака конвенционалног система за пренос података који ради у RF домену.

FSO (Free Space Optics) технологија представља једну од врста оптичких бежичних комуникација, има велику употребу у LAN и MAN мрежама, бежичном видео надзору, користи се у медицинске сврхе, у свемирској комуникацији, за решавање проблема последње миље итд. Примена бежичних комуникација, знатно може да допринесе перформансама система, и то у смислу спектралне и енергетске ефикасности као и у смислу поузданости.

У дисертацији је у циљу утврђивања оптималног сценарија пријема сигнала, као и одређивања оптималних вредности параметара таквог преноса, извршена анализа карактеристика бежичног оптичког преноса сигнала у присуству турбуленције и ефекта грешке позиционирања, који се одвија под композитним утицајем наведених сметњи. За посматране сценарије преноса разматране су стандардне мере перформанси система, као што су средња вероватноћа грешке по биту, посматрана за одговарајуће модулационе формате, као и вероватноћа отказа. Представљена су аналитичка и нумеричка решења проблема, а утицаји појединих параметара система на перформансе бежичног оптичког преноса приказани су и графички.

**Кључне речи:** FSO (Free Space Optics) комуникација, фединг, интерференција, осенчени Chi-квадрат модел оптичког канала, хибридна RF/FSO комуникација.

## **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.



## СПИСАК СЛИКА

Слика 3.1. Систем директне детекције за дигитални сигнал .....	61
Слика 3.2. Подешавање прага за дигитални сигнал.....	63
Слика 3.3. Вероватноћа детекције и лажног аларма .....	63
Слика 3.4. Однос прага сигнала и шума (TNR) као функција FAR/B.....	67
Слика 3.5. Геометрија ширења Гаусовог снопа на растојаљу L лево од танког Гаусовог сочива стварне жижне даљине FG и ефективног радијуса преноса WG .....	69
Слика 3.6. Вероватноћа слабљења сигнала као функција испод нивоа прага у условима слабе флукуације зрачења $\sigma_R^2 < 1$ , претпоставља се да су унутрашњи и спољашњи опсежи $l_0=0$ , $L_0=\infty$ , а DG је пречник отвора пријемника.....	72
Слика 3.7. Исто као и слика 3.6. осим умерених услова флукуација зрачења $\sigma_R^2 > 1$ .	73
Слика 3.8. Иста као и слика 3.6. осим јаких услова флукуације зрачења $\sigma_R^2 \gg 1$ .....	73
Слика 4.1. PDF за Gamma-Chi-square модел оптичког канала посматран за случајеве слабе и јаке турбуленције .....	81
Слика 4.2. PDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала..	86
Слика 4.3. PDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за случајеве различитих интензитета сигнала.....	86
Слика 4.4. PDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за случајеве слабе и јаке турбуленције .....	87
Слика 4.5. CDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала..	88

<b>Слика 4.6.</b> CDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за случајеве слабе и јаке турбуленције .....	88
<b>Слика 4.7.</b> CDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за случајеве различитих интензитета сигнала.....	89
<b>Слика 4.8.</b> ABER за модел Gamma-Chi-square атмосферског турбулентног канала као функција средњег електричног SNR-а .....	91
<b>Слика 4.9.</b> ABER за Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања као функције средњег електричног SNR-а .....	92
<b>Слика 4.10.</b> ABER за Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања у случају различитих вредности стандардне девијације треперења (jitter) .....	93
<b>Слика 4.11.</b> ABER за Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите вредности нормализованог радијуса оптичког зрака.....	94
<b>Слика 4.12.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел за случајеве слабе и јаке турбуленције .....	94
<b>Слика 4.13.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала.....	95
<b>Слика 4.14.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел за случајеве различитих интензитета оптичких сигнала .....	95
<b>Слика 4.15.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за случајеве различитих вредности стандардне девијације треперења .	96
<b>Слика 4.16.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала .....	96
<b>Слика 4.17.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите вредности параметра неусмерености оптичког зрака s....	97
<b>Слика 4.18.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите вредности нормализованог радијуса оптичког зрака ....	97
<b>Слика 4.19.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за случајеве слабе и јаке турбуленције.....	98

<b>Слика 4.20.</b> ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за случајеве различитих интензитета оптичких сигнала .....	98
<b>Слика 5.1.</b> Хибридни FSO/RF систем.....	105
<b>Слика 5.2.</b> Хибридна кодна реч.....	106
<b>Слика 5.3.</b> Модел FSO/RF система .....	111

## СПИСАК ТАБЕЛА

<b>Табела 4.1.</b> Број чланова суме које треба сабрати у изразу за PDF у једначини (4.12) да би се постигла тачност на 5-тој значајној цифри .....	83
---	----

## 1. УВОД

Развој нових телекомуникационих технологија уследио је као последица како војних, тако и нових комерцијалних захтева. Услед константног раста броја корисника и развоја савремених висококвалитетних мултимедијалних апликација, напредне генерације бежичних система мораће да испуне низ нових захтева. Насупрот бежичним радио-фреквенцијским (RF) технологијама, оптички системи обезбеђују већи пропусни опсег, веће брзине и бољи квалитет преноса. Пошто се имплементација система са оптичким влакнима показала као доста компликована и скупа, ови системи представљају добар избор за комуникациони линк на великим удаљеностима. Међутим, као једно од решења за проблем „последње миље“, користе се оптичке бежичне комуникације (OWC – Optical Wireless Communications), које комбинују брзину оптичких система и флексибилност бежичних комуникација. Оптичке бежичне комуникације представљају савремену бежичну технологију која подразумева пренос оптичког сигнала кроз слободан простор (ваздух, свемир, вакуум и сл.). Карактеришу их велике брзине преноса, лака и јефтина имплементација, нелиценцирани широк пропусни опсег, као и побољшана безбедност преноса података.

Непрекидан развој различитих сервиса бежичних оптичких телекомуникационих система, доводи до потребе за проучавањем и унапређењем њихових перформанси. Основни захтеви који су присутни у процесу унапређења перформанси бежичних оптичких телекомуникационих система су: обезбеђивање великих брзина преноса, капацитета канала и што већег домета везе са што мањом вероватноћом грешке. Нажалост, простирање корисног сигнала у бежичном оптичком медијуму, је праћено разним нежељеним ефектима. Стога је неопходно извршити и свеобухватну анализу сметњи које се јављују при преносу.

Предмет истраживања у овој докторској дисертацији су управо, бежични оптички телекомуникациони системи. Због предности које имају, попут велике брзине и

поузданог преноса, једноставне и економичне имплементације, ови системи су све више актуелни, како у теоријским разматрањима, тако и са становишта могућих примена. У дисертацији је извршена анализа карактеристика бежичног оптичког преноса сигнала у присуству турбуленције и ефекта грешке позиционирања са освртом на перформансе преноса, који се одвија под композитним утицајем наведених сметњи, у циљу утврђивања оптималног сценарија пријема сигнала, као и одређивање оптималних вредности параметара таквог преноса. За посматране сценарије преноса разматране су стандардне мере перформанси система, као што су средња вероватноћа грешке по биту посматрана за одговарајуће модуларне формате, као и вероватноћа отказа. Представљена су аналитичка и нумеричка решења проблема, а утицаји појединих параметара система на перформансе бежичног оптичког преноса приказани су и графички.

Докторска дисертација садржи увод, још четири поглавља и закључак. У уводном, првом поглављу истакнут је значај и циљ истраживања, и представљена је организација докторске дисертације по поглављима, као и методолошки приступ.

У оквиру другог поглавља дате су основне карактеристике бежичних оптичких телекомуникационих система и карактеристике преноса кроз комуникационе канале.

У оквиру трећег поглавља разматране су основне сметње које се јављају у бежичним оптичким телекомуникационим системима, као и расподеле којима се описују корисни сигнали, модели турбуленције и ефекти грешке позиционирања у бежичним оптичким телекомуникационим системима.

У оквиру четвртог поглавља представљене су статистичке карактеристике првог реда за разне типове случајних променљивих. За наведене променљиве израчуната је густина вероватноће, кумулативна вероватноћа и моменти. На основу добијених израза биће исцртани графици промене густине вероватноће и кумулативне вероватноће за различите вредности пропагационог окружења. Разматрани су бежични оптички телекомуникациони системи чији пријемници користе диверзити технику како би се смањило утицај фединга на перформансе система. Коришћена диверзити техника је просторна. Перформансе система су разматране за случај MRC и SC комбиновања. За оба случаја показан је приступ за одређивање густине вероватноће и кумулативна вероватноћа на излазима из пријемника, као и средње вероватноћа грешке по биту (ABER). Повећање ефикасности преноса и унапређење квалитета сигнала на пријему на

овај начин може бити разматрано за случајеве примене различитих модулационих формата.

У оквиру петог поглавља биће разматран хибридни RF/FSO систем са SC комбинерима на чијим се улазима налазе оптички OWC и RF сигнал, тако да би се вршио одабир сигнала већег односа SNR. За овако моделован систем на излазу из диверзити комбинера представљен је приступ помоћу кога се одређује густина вероватноће и кумулативна вероватноћа преноса.

На крају дисертације изнет је закључак у коме ће бити дат преглед најважнијих резултата добијених током израде докторске дисертације, као и списак референтне литературе.

Општа хипотеза од које се кренуло приликом истраживања у дисертацији је - да је проучавањем перформанси бежичних оптичких телекомуникационих система у присуству турбуленције и ефекта грешке позиционирања могуће одредити оптималне параметре преноса. Посебна хипотеза на којој је било засновано истраживање је - да се описивањем основних карактеристика бежичних оптичких телекомуникационих система, увиђањем добрих и лоших страна, као и математичким и статистичким прорачунавањем параметара који утичу на побољшање и деградирање перформанси, добија могућност за пројектовање конкретних модела бежичних оптичких телекомуникационих система.

Циљ истраживања је утврђивање карактеристика бежичног оптичког преноса у присуству различитих сметњи које се јављају, као што су турбуленција и ефекат грешке позиционирања, а све то како би се одредио оптимални сценарио преноса и одредиле оптималне вредности параметара линкова таквог сценарија преноса. Са аспекта технолошког проблема сувишно је говорити колико је тема актуелна с обзиром да тренд у телекомуникацијама итекако форсира бежичне системе комуникација. Такође, ако се узме у обзир неоспоран раст у потражњи за брзим, лако приступачним и у сваком погледу квалитетним повезивањем сасвим је сигурно да ће се јавити потреба да се надмаше тренутне могућности дигиталних телекомуникационих система. Као одговор на претходно наведене захтеве за повезивањем, једно од значајних технолошких решења су свакако бежични оптички системи.

У току научног и истраживачког рада употребљене су различите методе како би били задовољени основни методолошки захтеви – објективност, поузданост, општост и систематичност. У складу са изабраном проблематиком, дефинисаним циљевима

истраживања и постављеним научним hipotezama radi definisaња научних и стручних закључака и изналажења могућих решења izvršena je teorijska analiza uz korišćenje rezultata istraživanja iz međunarodne научне литературе. U ovoj disertaciji su istraživana научно-teorijska saznanja и релевантна литература korišćenjem većeg broja metoda, и то: методе анализе, методе генерализације и специјализације, методе упоредног посматрања и анализе садржаја. Применом историјског метода прибављени су резултати истраживања других аутора који су се бавили бежичним оптичким преносом сигнала у присуству различитих типова сметњи.

Метода комплексног посматрања и анализа садржаја примењена је приликом обраде резултата из преузетих истраживања са других светских универзитета и докторских дисертација. Ови резултати су употребљени у циљу дефинисања правца истраживања проблема бежичног оптичког преноса у присуству турбуленције и ефекта грешке позиционирања. Применом аналитичког метода, као и метода симулације и експерименталног метода утврђене су могућности бежичног оптичког преноса у присуству фединга и интерференције. Након утврђивања могућности преноса у наведеним системима, разматрани су оптимални сценарији преноса и одређене оптималне вредности параметара линкова таквих сценарија преноса. На овај начин примењене су и метода анализе и синтезе.

Резултати који су изнети у овој дисертацији имају велики ниво генералности и применљивости, услед чињенице да је моделовање пропагационих сценарија било извршено помоћу генералног модела турбуленције. Изведени су аналитички и нумерички резултати за статистичке карактеристике сигнала на пријему оптичког пријемника у присуству ефекта турбуленције оптичког сигнала и грешке позиционирања. Такође, представљен је приступ за анализу перформанси система за случајеве када се на пријему користе диверзити комбинери различитих модела (SC, EGC, MRC). Добијени резултати су графички представљени за различите параметре, на основу којих је могуће утврдити како дати параметри утичу на квалитет пријема сигнала код оптичког пријемника. На основу добијених резултата промене средње вероватноће грешке по биту сигнала за различите модулационе формате дат је приказ утицаја параметара преноса и одабране модулације на квалитет преноса.

Користећи резултате који су представљени у дисертацији може се предвидети понашање различитих реализација бежичних оптичких система за различите сценарије бежичног преноса и у различитим пропагационим окружењима, што омогућава



пројектантима бежичних оптичких система преноса да за жељене перформансе система направе рационална систематска решења. Предложене су и реализације бежичних оптичких система за које је показано евидентно унапређење перформанси на пријему, па се отвара могућност њихове примене у циљу смањивања штетног утицаја турбуленције, ефекта позиционирања и осталих типова сметњи при пропагацији сигнала у бежичним оптичким системима.

## **2. FREE SPACE OPTICS (FSO) КОМУНИКАЦИЈА**

### **2.1. Савремени поглед на FSO комуникацију: потенцијал, технички изазови, достигнућа и правац истраживања**

Услед великог раста употребе IoT уређаја, 5G и B5G мрежа, разноврсних апликација и мултимедијалног садржаја, постојећи систем у домену RF електромагнетног спектра није у могућности да задовољи све потребе брзог и обимног преноса података. Оптичка бежична комуникација (OWC), која користи велики опсег нелиценцираног дела спектра, може да се сматра добром допуном за ублажавање недостатака конвенционалног система за пренос података који ради у RF домену. FSO системи који раде у опсезима блиским IR (NIR) опсегу, којима се остварује OWC конекција, имају велику примену између фиксних примопредајника који покривају удаљеност од неколико километара, и то управо због високе оптичке видљивости, великог пропусног опсега и брзине. FSO технологија има велику употребу у LAN и MAN мрежама, бежичном видео надзору, за медицинске сврхе, у свемирској комуникацији, за решавање проблема последње миље и многе друге. Упркос очигледним предностима FSO технологија још увек не налази широку примену. Међутим, и код FSO система јављају се одређени недостаци, и то услед сметњи због атмосферских турбуленција, фактора околине као што су: магла, аеросоли, варијација температуре, жеке кише, сцинтилација итд. Ипак, FSO системи дају решење за растеређивање саобраћаја у RF мрежама, па комбинована примена FSO/RF система и радија преко FSO (RoFSO) система може да буде одлична подршка захтевима 5G мреже, ова симбиоза би смањила појединачна ограничења сваког од ова два система. Примена бежичних комуникација, знатно може да допринесе перформансама система, и то у смислу спектралне и енергетске ефикасности као и у смислу поузданости. Током последњих деценија

спроведена су многа истраживања не тему FSO система и то у контексту моделирања канала, адаптивног преноса и модулације, техника ублажавања ометајућих фактора каналног преноса, архитектуре система и дизајна FSO пријемника и предајника.

Извесно је да се последњих година повећао пренос података у домену мултимедијалног садржаја, који захтева већи пропусни опсег и брзине преноса. 5G технологија нуди велики капацитет, изузетну повезаност уређаја, ниску потрошњу енергије, а самим тим добар квалитет преноса у домену QoS услуга [1]. 5G мрежа, као ултра густа хетерогена мрежа, омогућава сто пута већу повезаност и брзину преноса у поређењу са постојећим бежичним мрежама [2]. Због тога 5G и B5G технологија захтевају backhaul мрежу великог капацитета која би могла да подржи хипер-гусину преноса, брзи приступ, минималну потрошњу енергије и минимално кашњење [3]. Услед ограничења у домену спектра, RF технологија не може у потпуности да подржи овакву мрежу [4]. Са брзим развојем и великом употребом технологије IoT (Internet Thing) и IoE (Internet of Everithing) експоненцијално расте и број паметних уређаја који се повезују на мрежу. Тренутни расположиви електромагнетни фреквенцијски опсег није довољан за техничке потребе 5G мреже која омогућава IoT (Internet Thing) концепт [5]. Услед ограничења у фреквенцијском опсегу RF система, подопсеци бивају већ распоређени и заузети. Као начин за превазилажење недостатака RF технологије, истраживачи нуде бежичну комуникацију таласима милиметарске и нанометарске дужине. За алтернативу преноса у RF спектру, академска и индустријска заједница предлажу употребу оптичке бежичне комуникације OWC која покрива подручје електромагнетног спектра 1mm-10nm [6], па тако сам термин OWC можемо окатектерисати као бежично повезивање у домену оптичког дела спектра. Оправданост употребе OWC се огледа у великом броју унапређених карактеристика преноса које пружа ова технологија, као што су широк спектар, велике брзине преноса, нижа потрошња енергије, економичност итд.

За разлику од мрежа које користе RF опсег, OWC технологија има предности које се огледају у великом капацитету преноса података у распону од неколико нанометара до неколико километара, како за затворен тако и за отворен простор. Због коришћења широког оптичког спектра, OWC технологија омогућава добре комуникационе карактеристике у смислу безбедности, преноса без електромагнетних сметњи и високе ефикасности система [7]. У условима унутрашњег простирања OWC пренос може да достигне брзину од 100Gb/s, а да при томе практична реализација система не захтева велике инфраструктурне трошкове. Светлосни таласи OWC се не простиру изван зидова

објекта, чиме је гарантована већа безбедност комуникације. Најчешће се као пропагациони медији користе (VL) спектар видљиве светлости, (IR) инфрацрвени или (UV) ултраљубичасти спектар.

Најперспективнији бежични системи комуникације OWC технологије су VLC (Visible light communication), LiFi (light fidelity), OCC (optical camera communication), FSO (Free space optics). Али како сви ови системи поред своје сличности имају и разлика у смислу протокола, апликација и архитектуре, хибридни RF/OWC системи би могли представљати најсвеобухватнији одговор на све потребе корисника у погледу квалитета и брзине преноса.

Насуприт својим великим предностима сама OWC технологија има и недостатака, на пример: ограничена област покривености, сметње које изазивају вишеструки извори светлости, сметње услед атмосферских прилика, све ово као и SINR (Signal-to-noise interference ratio) деградирају перформансе оваквог система. Када је у питању NLOS (non-line of sight) бежични пренос, RF технологија постиже боље перформансе, међутим управо због оваквог односа карактеристика RF/OWC хибридни оптички преносни систем би могао задовољити потребе IoT/LoE и 5G/B5G система [8]. Хибридни оптички преносни системи су засновани на повезивању две или више технологија преноса, на пример: RF/FSO, LiFi/OCC, у циљу побољшања перформанси система, нпр, енергетске ефикасности, брзине протока, вредности BER (вероватноћа грешке по биту), поузданости итд. Хибридне оптичке мреже су већ нашле примену у многим апликацијама [9].

## **2.2. Основне карактеристике оптичког бежичног преноса (OWC)**

Широк опсег (EM) фреквенцијског спектра омогућава и широку употребу спектра у домену бежичних оптичких комуникација. Сваки од ових опсега IR, VL, UV има своје јединствене карактеристике на основу којих се развијају типови OWC технологије преноса, на пример пренос у IR спектару се може користити при реализацијама где осветљење није потребно, пренос у UV фреквенцијском опсегу подржава брзине које захтеву LOS и NLOS линкови за комуникацију на малим удаљеностима. Самим тим OWC технологија обезбеђује добре карактеристике преноса од кратких до великих

удаљености. Поред повољних карактеристика система, као што су: већи ниво безбедности, нижи трошкови, лакоћа интеграције са постојећим системом и друго, OWC евидентно пати од недостатака при деградацији перформанси система услед препрека дуж комуникационе везе.

### 2.2.1. OWC технологије

Оптички пренос у домену IR, VL или UV дела спектра електромагнетног зрачења омогућавају различите врсте облика комуникација. FSO систем ради у IC и VL делу спектра, док се UV део спектра користи за велике брзине NLOS и LOS технологије.

LiFi (light fidelity) је релативно нова технологија која допуњује WiFi пружајући велике брзине преноса података. Треба напоменути да VLC и LiFi технологија омогућавају екстремно велике брзине у затвореном простору али нису ефикасне при преносу података на отвореном управо због препрека на које наилази светлост. Зато се као подврста OWC користи систем где се као предајник употребљава LED диода а као пријемник OCC (optical camera communication), чиме систем постиже високе SNR перформансе превазилазећи сметње чак и на отвореном [10].

LiDAR је метод скенирања на даљину 3D мапа велике резолуције. LiDAR апарат садржи LD, скенер и специјализован GPS уређај, тако да ови сензори дају податке високе резолуције за анализу карактеристика пејзажа. Упркос недостацима, као што су оштећење канала услед атмосферских турбуленција, усмереност између предајника и пријемника, ефекат грешке, FSO систем би могао да буде обећавајуће решење за светлосну мрежу следеће генерације [11], [12].

Према делу спектра EM зрачења које користи, OWC технологија се може класификовати у три категорије: технологија инфрацрвеног, ултраљубичастог и видљивог светла. IR опсег се користи у технологији FSO од тачке до тачке, укључујући следеће опсеге: ултра кратки (750nm-1450nm), кратки (1400-nm-3000nm), средњи (3000nm-8000nm), дуги (8000nm-15000nm) и ултра дуги (15000nm-1mm) таласни опсег. Предност преноса сигнала у VL спектру је безбедност при зрачењу у односу на људско здравље, па се преносени сигнал може истовремено користити и за осветљење и за пренос података. Такође, NIR и VL пренос показују добре карактеристике у домену LOS комуникација, а због слабије брзине нису погодни за NLOS пренос података, док пренос у UV спектару обезбеђује довољну брзину и за NLOS/LOS везу. Пренос у UV делу

спектра (радна таласна дужина од 10 до 400nm) је релевантан за кратки и средњи домет LiFi технологије, као и за ултра кратке, кратке, дуге и ултра дуге удаљености у FSO системима [13].

Свака од OWC технологија преноса (VLC, LiFi, OCC, LiDAR i FSO) има своје одређене карактеристике у смислу: протокола, архитектуре, принципа рада, технике модулације, каналног медијума, шеме за пренос, па тако и свака од ових технологија има своје предности и мане. При реализацији OWC преноса као предајници се обично користе LED или ласерске LD диоде, док се фотодетектори (PD) или камере користе као пријемници. Тако се пренос сигнала у IR, VL и UV делу електромагнетног спектра користи као комуникациони медијум.

FSO представља подврсту OWC технологије, код које се обично као канални медијум користи NIR опсег спектра због ниског нивоа слабљења, међутим може се користити и VL и UV део спектра електромагнетног зрачења. Као предајник се користи уски сноп LD диоде који обезбеђује велике брзине, док се PD диода користи као оптички пријемник. Због кохерентне природе ласерске технологије, FSO сигнал може да путује на велике удаљености омогућавајући комуникацију од тачке до тачке уз велике брзине преноса података. За повећање интензитета сигнала ласера могу се користити оптички појачавачи, а потом се ласерски сноп, пре трансмисије, поново скупља и фокусира. Излазни сигнал са PD диоде се одговарајућим електронским колима претвара у напон, нископропусни филтар LPF елиминира ниво шума а демодулатор обавља процес слања изворног сигнала на одредиште. Примена FSO система укључује видео надзор, backhauling за мобилне мреже, за LAN to LAN повезивање, подводну комуникацију, комуникацију између микропроцесорских чипова итд. Упркос вишеструким предностима FSO технологија има и неке ограничавајуће факторе, на пример, спољашњи временски услови (јака киша, магла, дим, олуја, снег, облаци и сцинтилација), атмосферске турбуленције и физичке препреке.

### **2.2.2. Light Fidelity (LiFi)**

Принцип рада LiFi је сличан принципу рада WiFi технологије, а такође се користи комуникациони опсег нанометарских таласе. LiFi карактеришу велике брзине преноса, а такође се и овде VLC, LD или LED диоде користе као оптички предајници, а PD као пријемник. LiFi је двосмерна комуникација за разлику од VLC комуникације која

може бити једносмерна и двосмерна. LiFi подржава комуникацију од тачке до тачке, од тачке до више тачака, од више тачака до више тачака а тиме и неприкосновену мобилност корисника. Стога је LiFi бежична мрежа која омогућава везу више корисника у оквиру постојећег NetNeta. IR, VL или UV опсег електромагнетног зрачења се користи као медијума за повратну путању, док се VL опсег користи за пренос података ка пријемнику. Оптички извор најчешће представљају микро LED диоде, док извор сигнала најчешће представља VCSEL ласер брзине 56Gbps [14]. У затвореном простору ова технологија може истовремено обављати функције осветљења и преноса података. На отвореном, као пример употребе у сврху преноса података, можемо навести контролу саобраћајне сигнализације или контролу апликација које управљају уличним светилкама. Кључне карактеристике LiFi технологије су висока безбедност, велике брзине преноса, економичност и доступност светлосног спектра. Недотраци су сметње које изазива сунчева светлост као и други извори амбијенталног светла, па због тога LiFi технологија није погодна за пренос на великим удаљеностима као ни за пренос у спољашњој средини.

### **2.2.3. Visible Light Communication (VLC)**

VLC технологија користи LED и LD диоде као предајник а PD диоду као оптички пријемник, док комуникациони медијум представља (VL) видљива светлост. VLC обезбеђује комуникацију од тачке до тачке, од тачке до више тачака (било једносмерну или двосмерну), може да подржи брзину преноса од 100Gbps и неколико хиљада пута већи капацитет пропусног опсега у поређењу са RF технологијом [15]. VLC технологија има много примена у затвореном и отвореном простору, неки од примера су: паметно осветљење, акустична комуникација, паметне дисплеј табле, употреба у авијацији, у LAN мрежама итд. Употребом LED-а постиже се брзина 10 Gbps, док LD диода обезбеђује брзину од 100Gbps. VLC технологија није погодна за употребу у спољашњој средини као ни за велике удаљености, али је безбедна у погледу утицаја зрачења на људско здравље.

### **2.2.4. Optical Camera Communications (OCC)**

Optical Camera Communications (OCC) технологија као предајник користи LED диоде, као пријемник камеру а зрачење у IR и VL делу електромагнетног спектра као комуникациони медијум, OCC технологија се имплементира у постојећу хардверску структуру. Сигнал из више извора се на пријему детектује помоћу камере тј. сензора

слике. OCC може да оствари пренос у спољашњем окружењу без сметњи тако што сензори на пријемној страни одвајају пикселе сметњи као што је сунчева светлост и светлост амбијенталних услова [2]. При преносу података са малим вредностима BER-а, постигнута брзина достиже 45Mbps. OCC технологија је отпорна на неке деградирајуће карактеристике система, као што су велика слабљења сигнала, сметње услед сунчеве светлости и другог амбијенталног светла, позадинска бука, итд. OCC технологија је погодна за позиционирање у затвореном простору, V2V, V2I, I2V комуникацију, дигиталну сигнализацију, дрон-дрон комуникацију, за пренос сигнала који врше детекцију покрета и препознавање лица, за дељење података међу мобилним корисницима, и карактерише је отпорност на сметње уз задржавање високог квалитета пренетог сигнала са аспекта односа SNR. Међутим, иако OCC технологија има стабилност у раду у спољашњим условима, брзина преноса је релативно мала, такође, блокирање оптичких сигнала и треперење светлости због мале брзине кадрова могу представљати један од недостатака OCC-а.

### **2.2.5. Light Detection And Ranging (LiDAR)**

LiDAR технологија се користи за даљинско оптичко скенирање објеката при чему се користи блиски инфрацрвени (NIR) и VL део спектра електромагнетног зрачења. Принцип рада LiDAR технологије је слична радио детекцији објеката (RADAR). Основна разлика је та што LiDAR користи светлосне таласа док RADAR користи микроталасе. Технологија је таква да се рефлектовани сигнал са жељене локације враћа до пријемника и на основу тог сигнала анализирају се параметри као што су: растојање, величина и друге карактеристике објекта. Ласерски зраци су отпорни на честице прашине, аеросоли, неметалне предмете, кишне капи, облаке итд. LiDAR мапира физичке карактеристике предмета дајући 3D слику високе резолуције. LiDAR технологија садржи ласерски извор, фотодетектор, скенер и уређај за позиционирање и навигацију који прати кретање објекта.

LiDAR технологија има примену у метеорологији, роботизи, шумарству, транспорту, свемирским истраживањима, архитектонским истраживањима, користи се у војне сврхе итд.

У наставку, напоменућемо још неке технологије бежичног умрежавања, као што су:



- WiFi технологија омогућава бежично умрежавање, користи посебан радио фреквенцијски опсег, заснован на стандарду IEEE802.11. WiFi има велику брзину преноса до 8Gbps при мобилности корисника и користи се и у LOS и у NLOS окружењу. Предности технологије су нелиценцирани бесплатни спектар и мали трошкови имплементације, недостаци су низак ниво безбедности као и сметње.
- Microwave link networks [16], [17] - Ова технологија подржава комуникацију од тачке до тачке радио снопом у микроталасном фреквенцијском опсегу. Због велике брзине преноса и удаљености микроталасна технологија може да буде алтернатива вези коју дају оптичка влакна, па тако микроталасна веза може да покрије линкове и до 100km удаљености са брзином од 12,6 Gbps. Деградирајући фактори овог система су: електромагнетне сметње, магла, киша и друге атмосферске турбуленције.
- Ћелијске мреже (Cellular Network) [18], [19] - Могу да се састоје од макроћелија и малих ћелија које чине хетерогену мрежу HetNet, која је јако распрострањена у употреби, и пружа корисницима велику брзину преноса. Макроћелијска базна станица (BS) обезбеђује широку покривеност и подржава мобилност корисника и употребу различите опреме, док, мрежа малих ћелија проширује ћелијску повезаност на рубовима ћелија и попуњава рупе у покривености подручја сигналом. Примена технологије макро ћелија је скупа и даје малу брзину преноса података, недостатак микро ћелија је што је ограничен опсег RF који могу да користе.
- Bluetooth [20], [21] - Bluetooth је технологија бежичног повезивања заснована на RF-у, обезбеђује брзину од 2Mbps користећи радио сигнале кратке таласне дужине у нелиценцираном фреквентном опсегу од 2,4GHz, Bluetooth троши мало енергије и подржава LOS/NLOS технологије, лоше стране су низак ниво безбедности линка, мала оперативна покривеност и неотпорност на сметње.
- Подводна комуникација (UVC) [22] - UVC је комбинација акустичне и RF технологије за пренос података под водом, на удаљености до 20km, подржава LOS и NLOS комуникацију. Негативне карактеристике UVC технологије су мала брзина преноса података, велико кашњење и осетљивост на услове воде.

### 2.3. Релевантна истраживања

Бројни истраживачки радови се баве разматрањем проблематике OWC технологије, у смислу фреквенцијског опсега, економичности, безбедности и ниске потрошње енергије. Истраживачи широм света, за описивање OWC система, водили су се литературом датом у референцама [23],[24],[25]. У раду [2] дат је преглед преносивих система OWC-а, са фокусом на VLC, LiFi, LiDAR, FSO системе у смислу предности примена ових технологија и области примене. У раду [20] објављено је истраживање које обухвата: различите шеме модулације, функције затамњења, филтрирање, изједначавање и обликовање зрака за унутрашње VLC апликације. Аутор у [24] врши истраживање у правцу оптичко бежичне конвергенције, указујући на проблеме при спајању две оптичке бежичне мреже. Темељи технологије и напредак у развоју сличних технологија дати су у раду [25]. У раду [26] расправља се о обједињавању функције осветљења и умрежавања за интегрисани FSO и VLC систем.

У раду [27] одређена је вредност BER-а, узимајући у обзир интерференцију вишеструког приступа (MAI) и преслушавање SIK пријемника. Извршена је процена вредности SINR-а за вредности праћеног BER-а у функцији параметара система као што су: дужина кода и број истовремених корисника система. Резултати су показали да OCDMA са више таласних дужина (MV-OCDMA) достиже супериорне вредности BER-а у односу на реализацију система са једном таласном дужином OCDMA FSO шеме. Смањење моћи тј. PP (power penalty) је израженије за веће вредности стандардне девијације подрхтавања снопа сигнала и више истовремених корисника и то за вредности BER од  $10^{-9}$ . Иначе, вредност PP се значајно смањује ако се повећа дужина кода и таласна дужина за дати број истовремених корисника. Аналитички модел OCDMA са више таласних мултиплексираних таласних дужина тзв. MV-OCDMA-VDM FSO комуникациони систем се користи да процени BER функционалност и капацитет везе у присуству претходно наведених ограничавајућих фактора за слободан простор [28]. Аутори декомпонују евалуацију BER-а у две категорије; Q-ary оптички PPM (Q-OPPM) пријемник са модулацијом интензитета и пријемник са директном детекцијом (IM/DD). Даље се истражује FSO комуникација заснована на декодеру IM/DD у присуству слабих и јаких атмосферских турбуленција. Испитане су особине OCDMA FSO система у смислу односа сигнал-интерференција и шум (SINR), BER-а при комбинованим атмосферским турбуленцијама, интерференција са више приступа (MAI), брзина преноса,

параметри канала, дужина кода итд. Такође се проучавају и различите врсте предајника и пријемника, попут: SIMO, MISO и MIMO преко турбулентног канала са ОКК директном детекцијом преко Rake пријемника, како би се проценили недостаци у снази, осетљивост и побољшање капацитета пријемника за вредност BER-а од  $10^{-9}$ . На крају, резултатима се потврђује ефикасност MVOCDM-хибридне шеме аналитичког модела као кандидата за бежичну оптичку земаљску комуникацију у будућности. Рад [29] описује теоријске ограничавајуће факторе FSO канала, шеме адаптивне модулације, просторни диверзитет као и хибридни RF/FSO систем.

## 2.4. Принцип рада FSO (Free space optics) технологије

FSO подразумева технологију оптичког преноса у слободном простору, која се заснива на бежичном преносу сигнала од тачке до тачке, где се као преносни медијум користе таласи у IR и VL делу електромагнетног спектра. Другим речима, FSO је LOS технологија која користи ласерски сноп за бежични пренос података у слободном простору. FSO пријемници садрже телескопска сочива која скупљају светлосни сноп и преносе дигиталну информацију до одредишта брзинама реда величине Gbps. Примена широког оптичког спектра омогућава пренос велике количине података, па је FSO пренос алтернатива радио релејној вези, јер се светлосни сигнал простире кроз ваздух већом брзином него кроз оптички кабл. На отвореном FSO веза функционише у VL и UV делу електромагнетног спектра, а под водом и у затвореном простору у делу близу IR и VL опсега [30].

За разлику од RF технологије, која је осетљива на слабљења услед вишепутног простирања сигнала, FSO систем који ради на високим фреквенцијама превазилази ову врсту слабљења. Дигитални подаци као што су: глас, слика/видео, датотеке итд. се прво, помоћу оптичког предајника, конвертују у светлосне сигнале, а затим модулишу одговарајућом шемом, даље овај мултиплексирани сигнал тако путује кроз FSO канал у оптичком домену, на пријему је фотодетектор и демултиплексер где се сигнал даље пребацује у електрични домен.

### 2.4.1. Предности и мане FSO система

Преносни отвор, за NIR таласне дужине, се креће од 700nm-1600nm, док су таласне дужине за RF између 30mm и 3m, дакле оптичка таласна дужина је много мања од RF таласне дужине, тиме је и пропусни опсег FSO технологије много шири од RF-а опсега. FSO системи, најчешће, као носеће сигнале, користе ласерске зраке веома уског спектра који пружају велику брзину преноса података између две фиксне тачке на удаљености од неколико километара, при чему је пренос отпоран на електромагнетне сметње. За разлику од радио таласа, оптички сноп не продире кроз зидове. Због широког пропусног опсега FSO системи имају много већу брзину преноса од RF система. Кохерентност и ниска дивергенција оптичког зрака омогућава инсталацију већег броја паралелних FSO веза. Предности употребе оптичког спектра. у односу на друге фреквенцијске опсеге су: велики пропусни опсег, добар однос SNR-а, лакоћа повезивања са постојећом инфраструктуром итд. Фреквенцијски опсег за таласе преко 300GHz, које користе FSO системи, је нелиценциран тј. не захтева никаву финансијску надокнаду, што знатно смањује цену система. Економичност FSO система се огледа и у нижим трошковима инсталације и одржавања. За разлику од RF система, оптичке компоненте троше мање енергије и показују ултра-ниску латенцију.

Дивергенција снопа је директно пропорциона таласној дужини. Као резултат тога, оптички сноп је много ужи него код RF сигнала, па је и јачина примљеног сигнала већег интензитета. Због мање таласне дужине величина антене је много мања код FSO система, али су усмереност и појачање антене бољи него код RF бежичних система. Међутим усмеравање са већим таласним дужинама је мање подложно утицају фединга. Закључујемо да је избор таласне дужине важан параметар који утиче на перформансе везе. С друге стране, економски фактор, доступност компоненти, питање безбедности за људске очи, у великој мери утичу на избор таласне дужине у FSO мрежи. Укратко, избор таласне дужине је резултат компромиса између грешке у усмеравању и осетљивости пријемника. За разлику од RF система оптички сноп се не може детектовати анализом спектра. FSO примопредајници су лаки за постављање, мале су масе, компактни су и лако надоградиви.

Међутим, FSO комуникација има и недостатке. Перформансе FSO везе се интензивно погоршавају услед ефекта атмосферске турбуленције, јаке кише, магле, снега, облака. Ограничавајући фактори као што су: дисперзија зрака, сунчева светлост, ефекат

сенке деградирају систем у смислу параметара као што су: вероватноћа грешке по биту (BER), вредност односа сигнал/интерференција (SINR), вероватноћа отказа система. Турбуленције у атмосфери као што су промена брзине ветра, неравномерна температура, атмосферски притисак, утичу на ширење оптичког снопа дуж FSO везе у темпо-просторном домену. Атмосферска турбуленција изазива фазне помаке оптичког зрака што резултира изобличењем сигнала. Сцинтилација је изобличење интензитета ширења светлосних импулса изазвано атмосферским турбуленцијама [31]. Влага, аеросоли, варијација температуре и притиска стварају одступања у индексу преламања, тзв. вртлози. Промена индекса преламања ваздуха, код неких таласних фронтова, који имају различиту фазу, изазива интерференцију и варијацију амплитуде. Због тога примљени оптички сигнал несумично флукутира и изазива изобличења. Уколико су димензије турбулентних вртлога веће од радијуса снопа долази до савијања ласерског зрака. На пријемнику се јављају временске флукутације интензитета светлости, изазване варијацијама у времену доласка вишеструких таласних фронтова.

Однос (error/ jitter) је још један параметар FSO система који се дефинише као дигресија између очекиваног положаја антене и њеног стварног положаја. Другим речим, механичка неусклађеност FSO примопредајника и механичке вибрације, узрокују грешку у систему за праћење. Због јаке усмерености зрака са FSO предајника, сваки пријемник мора бити прецизно поравнат. Нежељени објекти у LOS везама прекидају комуникацију између пријемника и предајника. Још један важан ограничавајући фактор су облаци, тј. скупљање капљица воде и кристали који се суспендују у ваздуху. Облаци узрокују слабљење, расипање и апсорпцију снопа ласерског зрака који путује кроз ваздух, такође и магла изазива једно од највећих ограничења у раду FSO система. Укратко магла и капљице кише изазивају рефлексију и преламање светлости што деградира рад FSO система [32].

#### **2.4.2. Класификација FSO**

Због раста броја бежичних уређаја и разних мултимедијалних апликација, расте и потреба за RF спектром, међутим овде је већина подопсега већ лиценцирана. Ипак, током протеклих деценија примена FSO технологије је остала ограничена на војну употребу, сателитске везе и апликације кратког домета [33], мада се развија и увођење FSO система у земаљску комуникацију [34]. Развој ефикасног бежичног система као што је FSO је од

суштинског значаја за апликације хетерогене комуникације и то у распону од комуникације између зграда до сателитских веза.

Узимајући у обзир удаљеност везе и географску локацију, FSO технологија се може користити у четири различита сценарија: атмосфера, затворени, свемирски и подводни простор. Атмосферско окружење се сматра спољашњом земаљском FSO комуникацијом, комуникација у затвореном простору подразумева кућно окружење, док свемирска FSO комуникација подразумева везу ван Земљине атмосфере. Земаљска FSO комуникација се односи на успостављање везе у спољашњој средини LOS механизмом од тачке до тачке. FSO комуникација је обећавајуће решење за приступ последњој миљи и за широкопојасни приступ интернету. Оптичко повезивање се често користи за за услугу FTTH (fiber to home), међутим због географских ограничења већина корисника није повезана на ову услугу. Иначе, ова технологија омогућава велики пропусни опсег на великим удаљеностима. Што је најважније, интеграција FSO-а са бежичним RF мрежама минимизира проблеме капацитета и скалабилности са већим нивоом QoS-а. Чињеница је да је спектрална ефикасност и поузданост RF бежичног система јако ослабљена када су дужина и број скокова велики.

FSO кућно умрежавање (FSO-HN) се користи за унутрашње широкопојасне бежичне мреже у кући, згради или канцеларији. FSO-HN има домет од неколико метара до неколико десетина метара. Хардвер је обично преносив, јефтин, мале масе и безбедан за људе. Више малих терминалних ћелија повезаних преко оптичке бежичне везе кратког домета чине везу у једној згради. За разлику од радио сигнала, оптичка светлост не може да прође кроз зидове, па је свака мала ћелија ограничена на одређени простор а сви терминали су даље повезани на кичму велике брзине. Оптички снопови се могу поново користити јер терминали не стварају сметње међу суседним ћелијама. У поређењу са не-LOS везама, LOS FSO технологија има високу пропусност и изузетно низак BER. Извор дифузног светла се обично користи у затвореном простору за распршивање светлосних снопова у не-LOS везама. Услед вишеструког ширења, које узрокују различити објекти, као што су плафон, зидови, намештај, не-LOS веза показује робусније перформансе [35]. Међутим, дифузна веза има нижу брзину бита у поређењу са LOS везама и компромис између поузданости везе и капацитета.

FSO свемирска веза се може даље поделити на међуорбиталну, међусателитску и везу са дубоким свемиром. FSO обезбеђује међусателитску везу великог квалитета. Употребом FSO технологије, веза сателит-линк крајњем кориснику обезбеђује добар

квалитет без обзира да ли је пријемник у покрету (авион, возило у покрету...) или стационаран. Ограничење у покривености удаљених хелија може се превазићи захваљујући сателитској широкопојасној комуникацији заснованој на FSO технологији.

На основу покривености, класификација FSO система се може представити на следећи начин:

- Ултра кратка удаљеност, интегрисана комуникација између чипова примопредајника, удаљеност је нанометарска [36].
- Кратка удаљеност, комуникација у затвореном простору видљивим светлом за бежичне локалне мреже (VLAN), комуникација између паметних возила, (V2V) и V2X [37].
- Међуградска комуникација, комуникација између зграда [38].
- Изузетно велике удаљености, сателитске везе (међусателитске, сателит-земља, сателит-авион) [39].

### 2.4.3. Примена FSO система

FSO системи су првенствено привукли пажњу као решење уског грла последње миље која се јавља код оптичких влакана, FSO је и алтернатива када је употреба оптичких влакана неизводљива или неисплатива. Неки од примера употребе FSO система су:

- Повезивање међу зградама (нпр. кампус/предузеће/стамбени простор). Зграде различите намена (школе, канцелерије предузећа) имају потребу за хетерогеним комуникационим саобраћајем (гласовни подаци, мултимедијални садржај, факс, пренос датотека итд.). FSO технологија може да подржи овакву комуникацију уз пружање великих брзина и ниске цене инсталације система. Такође, FSO веза може да подржи и комуникацију географски одвојених објеката нпр. брода и копна.
- Видео надзор, бежични видео надзор се користи како у војним тако и у комерцијалним и јавним системима безбедности. FSO системи обезбеђују веома квалитетни видео пренос.
- Backhaul (резервни линк) за мобилне мреже. Комуникација између хелијских базних станица подразумева жичану T1/E1 везу и микроталасну бежичну везу.

FSO је алтернативна технологија која мобилној комуникацији може да обезбеди проширење мобилних услуга и веће брзине преноса.

- Праћење катастрофа. Постоје многи догађаји који се прате уживо, тако да је у реалном времену потребно послати HD сигнал високе резолуције. FSO систем је способан да задовољи висок квалитет преноса између различитих чворова до крајњег корисника. Такође, привремене FSO везе, које су једноставне за инсталацију, су погодне за праћење немилих догађаја, као што су ванредне ситуације, природне катастрофе, терористички напад итд. FSO систем се лако поставља у областима где не постоји или није могуће успоставити жичану мрежу.
- Безбедност. Сајбер безбедност и уопште рачунарска безбедност је једно од најважнијих питања у дањашњој комуникацији, један од примера за то је безбедан трансфер новца. Квантна криптографија пружа безусловну сигурност и углавном је повезана са инфраструктуром оптичких влакана. Како FSO систем не дозвољава могућност пресретања сигнала, тако и нежељени корисници не могу да хакују информације.
- Проблем последње миље. Већина зграда је још увек повезана коаксијалним или оптичким кабловима, па већина крајњих корисника нема приступ инфраструктури оптичких влакана (FTTH). FSO систем је решење које удаљеним крајњим корисницима (нпр. корисници у руралним подручјима) може да обезбеди квалитетну везу велике брзине. Такође, у случају прекида везе оптичким влакном, FSO систем може тренутно да обнови везу и обезбеди услугу широкопојасног интернета на удаљеним локацијама где конвенционална технологија то не може да постигне.
- IoT и 5G. Концепт IoT захтева комуникацију изван конвенционалних мултимедијалних уређаја, тј. захтева размену информација између ових уређаја и спољашње средине. Примена IoT захтева висок пропусни опсег, велику брзину преноса, безбедност, минимална кашњења и пренос података без сметњи. Имплементација 5G технологије у IoT и линкови FSO система велике брзине проширују подручје покривености и побољшавају перформансе система [40]. Другим речима, интеграција FSO система са IoT преко 5G повезивања може задовољити захтеве за реализацију глобалног IoT-а.



- Сателитска комуникација. Заједно са даљинском детекцијом и радио астрономијом, FSO технологија се успешно може употребити у свемирској комуникацији. FSO технологија омоћућава енергетски ефикасну међусателитску везу на великим удаљеностима. Зраци орбиталног угаоног момента (ОАМ) имају способност преноса података везом великог капацитета и одличних перформанси и то у удаљеностима дубоког свемира.
- Backhaul мреже великог капацитета. Backhaul мрежа прави мост између приступне мреже и основне (осовинске) мреже. Backhaul мрежа мора да поседује велику брзину повезивања за пренос огромних количина података између приступне мреже (AN) и основне мреже (CN) за технологију 5G/В5G или IoT. Јавља се згушњавање ћелијских мрежа услед масовног постављања малих ћелија, чији је циљ повећање капацитета система и фреквенцијског опсега. У густо насељеним подручјима, са великим интензитетом саобраћаја, врши се уградња додатне инфраструктуре у постојеће приступне мреже. Краћа удаљеност од корисничке базне станице, у 5G/В5G мрежама обезбеђује мањи фединг (блеђење сигнала) тј. већу пропусност. Висок капацитет Backhaul-а је од суштинског значаја за апликације дугог домета, као што је комуникација између зграда или комуникација сателит-сателит. Иако AN или CN подржавају брзине величине Gbps, ако резервна мрежа није великог капацитета доћи ће до стварања уског грла. Постојеће Backhaul мреже су подржане оптичком инфраструктуром, коаксијалним или бакарним кабловима, микроталасном и mmWave везом, а некад и сателитским линком. Заједно са мрежама са оптичким влакнима, FSO систем нуди ефикасно решење проблема транспорта ниског капацитета, посебно у спољашњој Backhaul вези на даљину. FSO систем Backhaul мрежама омогућава повезаност на великим удаљеностима, на пример: под водом, у свемирској комуникацији, комуникација са удаљеним острвом итд. У овом случају FSO систем може да обезбеди, за технологију од тачке до тачке, кашњење мање од једне милисекунде, са брзином преноса података од 40Gbps. Можемо да закључимо да FSO систем мрежној платформи Backhaul може да обезбеди велики обим саобраћаја, масовну комуникацију са IoT уређајима, најмању потрошњу енергије, већу спектралну ефикасност као и исплативост. За разлику од NLOS везе, FSO LOS линк постиже већи капацитет, управо због одсуства кашњења услед вишеструког простирања сигнала и ефективне везе за напајање. С друге

стране код NLOS везе јавља се распршивање светлосног снопа услед рефлексије коју стварају различите препреке.

- Комуникација од уређаја до уређаја (D2D). Механизам комуникације од уређаја до уређаја (D2D), која може бити комуникација од машине до машине (M2M), од возила до одређене инфраструктуре (V2X), од више тачака до више тачака, од краја до краја, могу се применити у здравству, саобраћају, индустрији, тржним центрима итд. Ограничења скалабилности RF мреже (нпр. тачност и пропусност за велики број скокова), лако се могу превазићи FSO мрежама, преко постојећих бежичних мрежа велике брзине.

#### 2.4.4. FSO у IoT, 5G и B5G

Комуникација 5G технологијом омогућава ултра високу пропусност, повезивање паметних уређаја, изузетно низак ниво кашњења, висок ниво енкрипције, ниску потрошњу енергије, и висок квалитет услуга [41]. У циљу повећања мрежног капацитета и квалитета услуга, 5G мреже се нашироко примењују, и то у хетерогеним малим ћелијама (комбинација макроћелије, микроћелије, пикоћелије и фемтоћелије) [42]. 5G и B5G мреже захтевају ултра густу HetNet имплементацију. 5G/B5G мреже имају могућност преноса података брзином и до 10Gbps, број повезаних електронских уређаја је десет до сто пута већа него код 4G мрежа, што резултира хиљаду пута већим обимом протока података [1]. 5G технологија троши 90% мање енергије него 4G мрежа. Очекује се да ће B5G мреже имати четири пута већу спектралну ефикасност и много ниже трошкове постављања од 4G мрежа. Још једна од значајних карактеристика 5G/B5G мрежа је могућност пребацивања огромних количина података, у затвореном простору, из малих ћелија у микроћелије [43].

FSO подржава 5G комуникацију заједно са Backhaulom велике брзине преноса, капацитета и повезаности са IoT уређајима. У поређењу са RF системима, FSO концепт захтева много мањи утросак енергије [44]. IoT системи захтевају мале трошкове имплементације, имају висок ниво сигурности, енергетску ефикасност, исплативост и повезаност са великим бројем паметних уређаја, FSO технологије, због мале снаге LED или LD, може да обезбеди ове услове. Употребом FSO система, јаким шифровањем, може се обезбедити и висока безбедност система.

FSO у свемирској комуникацији - Са развојем сателитског програма као и са истраживањем свемира јавља се потреба за типовима везе као што су: сателитска комуникација која подразумева uplink (тј. везу земља-сателит), downlink (тј. веза сателит-земља), међусателитска веза, као и веза са дубоким свемиром, управо FSO системи се намећу као решење ове проблематике [45]. Оптички таласи се шире и изобличавају приликом пута ка земљи, док су губици много већи за FSO uplink него за downlink. Варијације температуре, концентрација аеросели и ваздушни притисак утичу на ширење ласерског зрака при проласку кроз атмосферу. Ове губитке можемо дефинисати као апсорпцију (апсорбери могу бити молекули воде, CO<sub>2</sub>) и губитак услед расејања. Губици услед апсорпције и расејања (dB/km) су функције таласне дужине. За FSO системе, губици услед расејања су уочљиви за таласне дужине испод 1 $\mu$ m, посебно у видљивом или ултраљубичастом делу спектра. Па је избор димензија оптичких прозора (нпр. да ли се ради о ултра кратким IR или кратким IR таласним дужинама) кључан параметар дизајна FSO система. Рејлијево расејање настаје када су атмосферске честице релативно мање од оптичких таласних дужина [45]. Честице ваздуха и магле узрокују Рејлијево расејање, док су аеросоли, киша, снег и честице магле примарни фактори за настајање Мијевог расејања. У присуству густе магле (видљивост испод 50м), губици сигнала могу бити већи од 350 dB/km [46]. У таквим условима, ласери велике снаге који емитују сигнале у опсегу трећег оптичког прозора, помажу да се повећа поузданост везе. Очигледно је да велике капљице кише доводе и до већег слабљења, јака киша (25mm/h) изазива десет пута веће слабљење од кише слабијег интензитета (2,5mm/h) и то у распону од 1dB/km до 10dB/km за таласну дужину од 1500nm. У оваквим условима хибридни RF/FSO системи показују добре перформансе.

Атмосферске турбуленције које изазивају тзв. вртлоге различите величине и индекса преламања, стварају ефекат лутања зрака, и то када је величина вртлога већа од радијуса снопа. Вртлози који су мањи од радијуса снопа изазивају темпо-просторне флукуације у зрачењу на страни пријемника [47].

Дивергенција снопа је важан фактор који утиче на перформансе FSO система и дизајн uplink-а код свемирске комуникације. Тзв. греда дивергенције настаје у делу пре отвора пријемника услед дифракције светлости. Један део ласерске светлости не бива скупљен на пријемнику па тако узрокује дивергенцијски или геометријски губитак. Овај губитак, без обзира на пречник пријемника, расте са растојањем. У том случају ласерски извор уског снопа је пожељнији ако се користи техника диверзити пријема.

До губитка усмерења може доћи услед мале вибрације сателита, малог стреса механичких или електронских уређеја или појаве jitter-а. Мала неусклађеност између пријемника и предајника може условити отказ FSO везе, тако да је веома важно користити LOS усмереност са уским снопом дивергенције [48]. Ефекат дисперзије зрака може да помери пропагацију путање емитованог снопа, што узрокује губитке у преносу. Грешка у усмеравању значајно смањује снагу на пријемнику и однос SINR што доводи до високих вредности BER-а тј. отказа FSO везе. Стога се морају инсталирати FSO уређаји без вибрација и помоћу контроле пропусног опсега се може покушати да се надокнади слабљење настало услед треперања снопа. Грешка усмеравања је очигледнија у области ниже Земљине орбите (LEO), него ког GEO сателита [48]. Грешка усмеравања изазива деградацију система, која се манифестује испадом, посебно, у спектру видљиве таласне дужине као и BER-ом. Шум у сензорима за праћење и механичке вибрације система узрокују грешку у праћењу. Техника за компензацију грешке праћења и показивања, за uplink FSO свемирске комуникације дати су у литератури [49].

Присуство густих облака ремети сигнале, чак и потпуно блокира везу. У зависности од геолокације или сезоне ови поремећаји могу трајати од неколико секунди до неколико сати. Непрозирни облаци могу довести до великог слабљења, реда величине и неколико десетина децибела. Због ефекта атмосферске турбуленције, оптички сигнал флукутира у фокалној равни фотодетектора или доводи до померања фокусне тачке. Овај ефекат је познат као флукуација угла доласка и може се ублажити применом адаптивне оптике или применом ретровизора за управљање брзином снопа. Наведена ограничења у FSO свемирској комуникацији решавају се правилним дизајном, што подразумева радну таласну дужину, дивергенцију снопа, интензитет пренесене снаге, видно поље примопредајника (FOV- Field of View).

Међусателитске свемирске FSO везе, код којих су сателити далеко од слоја атмосфере, не трпе временска и атмосферска ограничења. Али, међусателитска FSO комуникација је суочена са другом врстом проблема, то је аквизиција и праћење (AT) сателитске станице, Доплеров помак и позадинско зрачење. Због великих удаљености, метода кохерентне детекције је прихватљивија у односу на директну детекцију. За санирање утицаја Доплеровог померања прибегава се подешавању фреквенције између емитованих сигнала и локалног осцилатора (LO). Хомодинска или хетеродинска кохерентна техника одржава енергетску ефикасност везе и обезбеђује добру осетљивост пријемника [50]. За FSO линкове у дубоком свемиру, концепт детекторских низова

помаже у прикупљању светлосних сигнала чак и када постоји неусклађеност примопредајника. Примена низа пријемних детектора омогућује постизање бољих перформанси, у смислу вредности BER-а и односа SINR.

## 2.5. FSO примопредајник

FSO комуникацију, уопштено, можемо поделити у три фазе: оптички пренос кроз атмосферу који је дефинисан Beer-Lambert-овим законом, простирање кроз канал где се акумулирају различити шумови и турбуленције и пријемни део за обраду сигнала који садржи одређене електронске уређаје са сопственим недостацима и шумовима.

1) FSO предајник је оптички предајник који се састоји од извора светлости, модулятора, оптичког појачала (optional) и механизма за формирање линка. Битови долазних података су кодирани пре модулације. Модулисани светлосни снопови се појачавају оптичким предпојачивачем. Затим се ласерски зраци сакупљају и поново фокусирају оптичком за формирање зрака у пред преносу. Као оптички извори се најчешће користи светлост LED или ласерске (LD) диоде.

Са развојем технологије полупроводничке расвете, флуоресцентне и лампе са жарном нити замењене су LED диодама високог интензитета. Предности које имају LED диоде су: енергетска ефикасност, дужи век трајања, нижи ниво дисипације, као и то што се за њихову израду не користе токсични материјали [51]. LED диоде омогућавају брже пребацивање светлости различитог интензитета, што ове диоде чини брзим OWC предајником и високоефикасним оптичким извором. С друге стране, ласерски извори су монохроматски са једном излазном таласном дужином. LD диода ради као кохерентни извор светлости, где се цело емитовани светлосни фронт простире истим правцем у истом интервалу времена. Услед кохерентних карактеристика LD светлости, сигнал LD диоде прелази веће удаљености, већом брзином са мање сметњи у односу на светлост LED извора.

Главно ограничење LED извора је некохерентна природа емисије светлости. Због уског отвора LED извора могућа је комуникација само од тачке до тачке. Иако су на тржишту доступне LED диоде велике снаге, чији снап достиже раздаљину од неколико километара, у FSO системима се, најчешће, користе полупроводничке ласерске диоде

управо због интензивне оптичке снаге. Поред тога, LED диоде омогућавају широк опсег модулације у великом распону температуре. Други важан фактор ласерских диода је безбедност по људске очи. С друге стране, LED диоде се више користе у затвореном простору, са нижом брзином преноса података. VCSEL извори се, обично, користе за први прозор преноса, и раде на 850nm таласне дужине, док се Fabri-Perot ласери и ласери са дистрибуираном повратном спрегом (DFB) користе за рад на трећем VDM прозору за пренос од 1550nm таласне дужине [29]. Због сигурности по људске очи LD компоненте су ограничене на 1550nm.

2) FSO пријемник. На оптичком пријемнику, оптички сигнал се у виду фотона прикупља на оптичком детектору и на фотодетектору (PD), који помоћу трансимпедантног кола, фотоне претварају у електричну струју. FSO пријемник управља детектованом електричном струјом, где се, даље, преко електронских уређаја генерише оригинални сигнал. Оптички сигнал који је претворен у електрични се затим пропушта кроз нископропусни филтер (LPF), да би се ограничио ниво позадинског и термалног шума. У FSO системима се најчешће користе PiN PD (позитивно-унутрашње-негативни PD) и лавински фотодетектор (APD). PiN PD детектори имају ниску цену, толеришу велике промене температуре, могу да раде са ниском пропусношћу, користе се у FSO системима са кратким дометом и ниским брзинама [30]. Учинак PiN PD ограничен је термичким шумом. С друге стране APD-ови, захваљујући ударној јонизацији, имају добитак у множењу и бољи однос SNR, самим тим су пожељнији избор за FSO системе великих брзина и удаљености. Иако APD-ови имају супериорне перформансе, јако су скупи, захтевају велику потрошњу енергије и лавински добитак је температурно осетљив [29].

Уређаји који у чврстом стању имају добру квантну ефикасност, се нашироко користе у комерцијалним FSO системима, на таласним дужинама од 850 и 1550nm. Si PD су погодни за рад на краћој таласној дужини од 850nm, док InGaAs PD подразумевају ниско транзитно време, брз одзив на 1550nm таласне дужине. Са употребом материјала од графена, дводимензионалних материјала, квантне тачке наночестица, фотодетектори развијају ултра брзине у широком опсегу таласних дужина [52].

У циљу побољшања FSO везе са више линкова, користе се оптичка појачала (OA) [53]. Појачало са влакнима допираним ербијумом (EDFA) се користи са полупроводничким оптичким појачавачем (SAO) који ради на таласној дужини од 1550nm. Ипак оптички појачавач ствара спонтану емисију буке (ASE), која деградира

перформансе система у смислу нивоа SNR. Међутим, ОА може да се носи са појавом термичког шума и смањује ефекат сцинтилације у случају слабе турбуленције [54]. На пријемнику се јављају различити типови шума, шум тамне струје, шот шум (назива се и квантни шум) и термални шум. Шум тамне струје PD-а може се занемарити у већини практичних случајева. Шум релативних интензитета ласера (RIN) на пријемнику изазива флукуације фотострује, овај шум је резултат нестабилности интензитета LD-а. Слично шуму тамне струје, RIN изазива занемарљив утицај на SNR перформансе пријемника. Два главна извора шума су шот шум и термални шум који утиче на перформансе система уколико се позадинско осветљење сматра занемарљивим. Поред тога осетљивост пријемника у APD технологији зависи од појачања ударне јонизације и отпорности оптерећења. Термални шум је функција отпора оптерећења која потиче од електронских кола, која се може моделирати као нулти средњи Гаусов случајни шум. Шот шум настаје услед случајних флукуација електричне струје која тече у PD-у или од позадинског зрачења које се може моделовати Poisson-овим процесом [55]. Уколико је број апсорбованих фотона релативно велик, шот шум се може приближно моделовати Гаусовим процесом. Што се тиче FSO система, расподела шот шума се апроксимира Гаусовим моделом [56].

## 2.6. Поузданост FSO система

Питање поузданости је једно од најбитнијих питања сваког система. FSO системи достижу висок ниво SINR-а када је у питању комуникација у затвореном али и на отвореном простору на великим удаљеностима. Ограничавајући фактори као што су: расипање, апсорпција, варијације у атмосферској видљивости, прекидају високу брзину преноса података и погоршавају перформансе и поузданост FSO система. Атмосферске турбуленције су главни извор деградације везе. FSO пренос се мора оставрити и у тешким временским условима, тј. под утицајем вишепутног фединга, дисперзије снопа и флукуације пријемног сигнала, која се јавља услед атмосферских турбуленција. Лоша усмереност линка може узроковати ширење снопа са дивергенцијом од неколико mrad-а. Резултат неусмереног снопа је губитак везе. У оптичкој комуникацији лако се може проценити пријемна снага, док је код FSO система услед атмосферских турбуленција и нехомогености ваздуха, то много сложеније. Како је простирање оптичког сигнала

подложно великом утицају атмосфере, може доћи до губитка сигнала или фазног померања/флуктуација интензитета сигнала, што смањује однос SINR на пријему, доступност линка и повећава вредност BER-а на пријему. Појава магле значајно погоршава видљивост и NIR зрачење, већи проценат влажности ваздуха смањује квалитет оптичког сигнала на пријему. Ефекат сцинтилације је уочљивији код преноса на велике даљине, што деградира свеукупну поузданост система. С друге стране, атмосферска молекуларна апсорпција је функција таласне дужине. Па је кључно питање за успешно постављање FSO система избор радне таласне дужине, на лицу места, у складу са атмосферским условима. Важно је узети у обзир кашњење од тачке до тачке, губитак пакета, подрхтавање и тачност пројектовања и алгоритама у FSO системима. Некомпатибилност TCP протокола са FSO системом може изазвати слабије перформансе протока, стога је потребно развити прилагодљивије протоколе.

За дугорочни дизајн FSO система морају се узети у обзир статистички подаци о атмосферском понашању за конкретну локацију. Након ових анализа буџет везе (link budget) се може изразити као [57]:

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

где је  $P_{TX}$  снага преноса,  $S_{RX}$  осетљивост пријемника а  $L_P$  губитак ширења. Једначина (2.1) даје основну маргину везе (LM), којом се изражава поузданост везе, LM (поузданост везе) се може дефинисати и као [58]:

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

где је  $P_{RX}$  снага доступна на пријему, а  $P'_{RX}$  је снага која је потребна на пријему да би се одржао одређени ниво BER-а при одређеној брзини преноса.  $R_{LM}$  дефинише маргину губитака потребних за компензацију ефекта турбуленције, на одређеној покривености. Да би се FSO систем сматрао поузданим потребно је да кашњење није веће од пет минута годишње (поузданост везе је око 99,99%) [59]. Примера ради, ако ласер преноси снагу  $P_{RX}=30\text{nV}$ , ако је осетљивост фотодетектора  $S_{RX}=25\text{nV}$ , губитак неусклађености  $L_a = 3\text{dB}$ , оптички губитак  $L_0 = 4\text{dB}$ , онда је процењена  $R_{LM}=54\text{dB}$ . За одређен ниво BER-а, ниво опсега примљене снаге ( $P_{RX}$ ) дефинише поузданост везе. FSO систем не може да постигне жељени ниво BER-а, за минимални SINR, када услов  $P_{RX}>P_{Th,r}$  или  $P_{RX}<S_{Rk}$ ,



где  $P_{th,r}$  представља вредност zasiћења за одређени ниво  $P_{RX}$ . Доступност везе за пренос података  $T_a$  се дефинише када пропусност премашује граничну вредност, при одређеној вредности BER.

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

где  $\alpha_a$  представља коефицијент атмосферског слабљења, па је њена функција расподеле вероватноће [60]:

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

где је  $V$  измерена видљивост за процењену  $\alpha_a$  вредност  $q$  се бира на основу параметра  $V$ . За одређену локацију и раздаљину  $T_a$  је параметар који је јако користан за процену перформанси FSO система. У аутоматизованим FSO системима, за израчунавање  $T_a$  не узима се у обзир грешка при подрхтавању [61].

Поузданост линка се може израчунати и на основу једначине:

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

где  $p(I)$  означава кумулативну расподелу вероватноће зрачења,  $I_{th}$  праг интензитета,  $l$  представља удаљеност преноса дату у метрима,  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  је комплементарна функција грешке,  $I_0$  означава просечан интензитет без турбуленција и  $\sigma$  је параметар варијансе. Поузданост везе FSO система варира у опсегу од 0 до 1, где је  $R(l)$  инверзно пропорционално удаљености везе. Може се сматрати да је FSO веза успостављена када је поузданост већа од  $I_{th}$ .

У односу на RF, кључна предност FSO мреже је широкопојасна функционалност, коју обезбеђује широк фреквентни опсег што даље обезбеђује ултра-брзине. Ласер који ради у опсегу 1550nm таласне дужине, пропусног опсега 200THz има 200 000 пута већу брзину преноса података од брзине коју има микроталасна веза [62]. FSO системи су посебно повољно решење следеће генерације широкопојасних бежичних мрежа, за решавање проблема уског грла последње миље. FSO примопредајници захтевају

напредан ниво аутоматизације, у којој су самоконфигурисање алгоритма и самопоправка могући.

За одржавање високе поузданости FSO везе, у литератури су предложена решења као што су PAT техника преноса [39], [63] механизам диверзитета [64], хибридни RF/FSO системи [65]. Оптички сигнал може бити блокиран у потпуности или делимично привременим препрекама као што су: јата птица, дронави, беспилотне летилице, индустријски дим, гране дрвећа итд. Ове привремене флукуације могу се превазићи употребом MIMO FSO шеме, где сигнал блокиран објектом, било на Tx или Rx страни нема никакав значајан учинак на FSO систем. Данашње комерцијалне FSO везе се проширују следећим техникама: комбинацијом дивергенције снопа, праћењем-усклађивањем снопа, закључаном фазном петљом за опоравак такта (CRPLL). Велика моћ ласерског зрачења ублажава атмосферске сметње и омогућава велике брзине преноса података. Међутим, ласери екстремно велике снаге, која превазилази одређену граничну вредност, су штетни за људски вид па су безбедносни прописи једно од најважнијих питања током пројектовања FSO система. Оптички систем захтева ниску снагу преноса за јасно дефинисане услове, док је за обезбеђивање жељеног нивоа BER-а и QoS-а потребна велика снага ласера. На временски диверзитет (разноликост) FSO канала директно утичу: варијација температуре, географска локација, брзина ветра, надморска висина, ваздушни притисак, влажност итд. [66]. Да би се ублажило просторно изобличење пријемног зрака постоје бројне технике, као што су: аквизиција, указивање (PAT), усредњавање бленде и корекција таласног фронта. PAT техника је неопходна за одржавање централне стабилности зрака дуголинијске комуникације, као што је међусателитски FSO. Према [35], оптички бежични међусателитски пренос захтева прецизност од 1-10 $\mu$ rad за брзину протока од 10Gbps. Аберације таласног фронта подразумевају варијације оптичке фазе услед атмосферских поремећаја дуж бежичног пута пропагације. Уопштено, сензор таласног фронта или прикључен уређај са камером, се користи за мерење дисторзије (изобличење) таласног фронта, док се за компензацију грешке користе деформабилно огледало (DM) или електромеханичка огледала. Све компоненте раде на основу процеса управљања затвореном петљом где ласерски извор енергије преноси Гаусов снап са удаљене позиције и долази до аберације док путује кроз слободни простор. Оптичка сочива (DM) акумулирају све долазне зраке и DM се дели на два снопа: рефлектовани снопови падају на прикључен уређај са камером (CCCD) а пропагирајући сигнали падају на фотодетектор. DSP контролер покреће DM да исправи

измерена изобличења кроз генерисање одговарајућих контролних сигнала на основу СССРD излаза. Интеграција напредне оптике у FSO комуникацији побољшава поузданост система елиминацијом фазних грешака [67]. У наставку су илустроване неке обећавајуће технике ублажавања за решавање техничких изазова са којима се сусрећу мреже FSO-а.

Одређивање величине отвора бленде (димензионирање отвора бленде)

Усредњавање отвора пријемника је популарна техника за ублажавање флукуација примљеног сигнала. Подручје отвора бленде је одређено дужином преноса и јачином претходно наведених ограничавајућих фактора. Повећање димензија пријемника помаже да се смањи затамњење канала и брзо затамњење изазвано појавама вртлога у снопу.

Усредњавање отвора бленде показује количину смањења бледења на платформи физичког слоја. Имајмо на уму да се количина позадинског шума повећава са повећањем отвора пријемника (бленде). Дакле, избор радијуса отвора бленде треба да буде оптималан за повећање енергетске ефикасности FSO везе.

Фактор усредњавања отвора,  $F_a$  на страни пријемника може се изразити као:

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

где је  $D$  отвор пријемника,  $\sigma_l^2$  је снага сигнала, а  $\sigma_l^2(D_0)$  означава варирање интензитета сигнала у центру пријемника. За раван талас  $F_a$  се може апроксимирати са [57]:

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

где  $l$  представља удаљеност везе,  $k$  је таласни број ( $2\pi/\lambda$ ). За мањи отвор бленде,  $(\frac{kD^2}{4l}) \ll 1$ ,  $F_a = 1.0$  и интензитет сигнала се смањује са повећањем величине отвора, односно за већи отвор важи  $(\frac{kD^2}{4l}) \gg 1$ . Стога је усредњавање отвора значајан параметар за решавање варијација снаге јер антена већег отвора прикупља све снопове сигнала који падају у њу, зато показује релативно нижу сцинтилацију изазвану турбуленцијом.

### **2.6.1. Адаптивна оптика (АО)**

Адаптивна оптика је заснована на принципу управљања затвореном повратном спрегом која помаже да се ласерски сноп без изобличења преноси кроз атмосферу. Прецизно усмеравање зрака у смислу положаја и угла постиже се имплементацијом адаптивне оптике уз помоћ управљачких огледала у путањи простирања зрака. Међутим, електромеханички уређаји на пиезоелектрични погон обично се користе за управљање снопом, али у том случају систем трпи због велике заузетости простора и дужег времена обраде. АО систем се састоји од сензора таласног фронта и коректора, и сета деформабилних огледала на свакој јединици примопредајника за компензацију фазних флукуација пода. Проучавање АО коришћењем микро-електромеханичких система (MEMS) за FSO комуникацију на даљину истакнуто је у [68]. Систем управљања снопом заснован на MEMS омогућава брзо праћење и прецизно усмеравање између два FSO терминала. Поред тога, АО системи базирани на MEMS контролишу ласерске зраке на уској скали величина, омогућавајући интегрисане електричне, механичке и оптичке системе. Примена АО у FSO сателитским комуникацијама према downlink-у истражена је у [69].

### **2.6.2. Релејни пренос**

Основни циљ увођења релејних чворова у FSO систем је да се продужи линк преноса без жртвовања квалитета сигнала на пријему - QoS нивоа. Релејни пренос се актуелизује у случајевима када је веза извор-одредиште лошег квалитета јер се применом релејног преноса обезбеђују побољшане перформансе система, смањује утицај турбуленције и постиже висок ниво SINR уз постизање вишег нивоа интензитета примљеног сигнала у односу на шум. Такође, релејни пренос гарантује побољшани ниво услуге квалитета корисничког искуства под јаким ефектима бледења сенке или губитка путање. Механизам регенеративног релејног преноса такође побољшава покривеност мобилних бежичних система искоришћавајући додатне предности диверзитета. Релејни пренос елиминише потребу за вишеструким отвором бленде на страни предајника или пријемника, једна антена има потенцијал да постигне значајан диверзитет без жртвовања QoS-а. Избор постављања релејних чворова је важан критеријум дизајна за постизање огромног добитка диверзитета коришћењем кооперативних FSO комуникација.

Проучавање постављања свих оптичких релеја и перформанси система у борби против ограничавајућих фактора спроведено је у неколико примерака литературе [70].

### 2.6.3. Модулације у FSO системима

Техника модулације се бира на основу врсте апликације. Разне модулационе шеме имају карактеристичне особине, као што су спектрална ефикасност (SE) и енергетска ефикасност (EE). EE подразумева максималну достижну брзину преноса података при циљном BER-у за дату снагу преноса. Иако се нелиценцирани оптички опсег састоји од огромног пропусног опсега, SE је ипак кључни дизајнерски параметри јер је, у практичном случају, пропорционално везан за брзину електронских склопних кола у FSO системима. На пријемном крају за оптималну детекцију, важно је знати тренутне коефицијенте стања канала. Неколико пилот носиоца се користе у пракси за процену стања канала (CSI) са савршеном прецизношћу [71]. Детекција максималне вероватноће симбол по симбол (ML) користи се као алтернативни приступ, заснован на делимичном знању о дистрибуцији коефицијената фединга, као и на ML детекцији заснованој на статистичким коефицијентима фединга. [72]. Због своје једноставности најчешће коришћена модулациона шема у FSO системима је шема бинарног нивоа под називом On-Off Keying (OOK). Међутим, када се ради о ултрабрзој комуникацији и комплексној архитектури система, шема ОКК је мање ефикасна, због лоше спектралне и енергетске ефикасности (EE). Позициона импулсна модулација (PPM) или варијабилна PPM је добро решење када се ради о адресирању EE апликација за комуникацију у дубоком свемиру [73]. За разлику од ОКК-а, PPM-у није потребан никакав динамички праг за оптималну детекцију сигнала.

Међутим, ОКК и PPM модулационе шеме су базиране на једном носиоцу, зато могу бити непоуздане у случају озбиљних оштећења у каналу FSO везе. Технике засноване на једном носиоцу су непоуздане у случају великих брзина преноса, и то, због велике међусимболне интерференције (ISI) [74]. Затим, технике модулације интензитета подносиоца (SIM) и мултиплексирања са ортогоналном фреквенцијском поделом (OFDM) базиране на више носилаца (MCSIM) су разматране у литератури [75].

Приступу базирани на SIM-у имају неке предности у односу на модулацију са једним носиоцем као што су ублажавање слабљења у каналу, једноставност, исплативо решење и побољшана спектрална ефикасност [76]. Додавање екстерног DC преднапона

са RF сигналом због занемаривања импулса ненегативне амплитуде узрокује смањену енергетску ефикасност.

Са повећањем броја подносиоца у MCSIM шеми, DC сигнал преднапона такође треба да се повећа да би се спречила нелинеарна дисторзија и ефекти клипинга. Дакле, техника MCSIM модулације заснована на OFDM-у одређена је односом вршне и просечне снаге (PAPR), што деградира енергетску ефикасност [76]. Нелинеарност светлосних сигнала је такође критичан изазов у MCSIM техници, која доводи до интерференције међу носиоцима и ширења спектра сигнала што резултира интермодулационом дисторзијом (IMD). Као последица тога, потребан је мали број подносиоца за ограничавање IMD-а, али то сигурно смањује брзину преноса. Друго решење за смањење IMD ефекта је коришћење одвојеног оптичког извора за сваки носилац, што резултира сложеносћу и већим трошковима.

У поређењу са PPM, мулти-пулсни PPM (MPPM) смањује PAPR и повећава спектралну ефикасност, али има већу сложеност демодулације. MPPM показује супериорне перформансе у односу на PPM под вршном снагом одашиљања, а PPM надмашује MPPM при просечној снази преноса. У раду [77] предложена је побољшана линеарна несиметрична трансформација за смањење PAPR-а у бежичним оптичким комуникацијама базираним на OFDM. PAPR техника редукције чини сигнал мање рањивим у смислу нелинеарне дисторзије, дакле, побољшава перформансе MSIM технике.

Технике матрице претходног кодовања су предложене како би се побољшале перформансе PAPR, SNR, BER DC-bias оптичког OFDM (DCO-OFDM) система у перспективи OWC система [78]. Да би се постигла иста ефикасност пропусног опсега и побољшана спектрална ефикасност са традиционалним (DCO-OFDM), аутори предлажу [79] модификовану асиметрично исечену оптичку OFDM методу.

Још једна добро позната техника модулације је модулација ширине импулса (PWM) која има побољшану спектралну ефикасност, захтева нижу вршну снагу одашиљања и боље перформансе интер-симболске интерференције (ISI) у поређењу са PPM [80]. Међутим, потребан је додати допунски заштитни слот, за сузбијање слања узастопних позитивних импулса током периода симбола. И PPM и PWM су познати као синхроне модулације, јер захтевају синхронизацију слотова и симбола.

С друге стране, дигитална импулсна интервална модулација (DPIM) је врста асинхроне модулационе шеме која је спектрално ефикаснија од PPM и PWM не захтева синхронизацију симбола и слотова. Могућа пропација грешке током демодулације на пријемнику је потенцијално ограничење DPIM-а [81]. Пратећи концепт MPPM, преклапајући PPM (OPPM) [82], диференцијални PPM [81] и дигитална импулсна интервалска и ширинска модулација (DPIWM) [83] су предложени за побољшање спектралне ефикасности.

У OPPM-у, оптички импулси заузимају суседне слотове и симболи који се завршавају импулсом могу се искористити за синхронизацију у DPPM-у, док је бинарна секвенца кодирана у ширину импулса наизменичне амплитуде у DPIWM-у. Основна ограничења свих ових модулација су слаба енергетска ефикасност, висока сложеност пријема и вероватноћа пропационе грешке приликом детекције кодиране секвенце бита.

Инспирисани горе поменути проблемима, модулационе шеме на више нивоа могу се користити у FSO системима како би се постигла боља SE у поређењу са бинарним модулацијама. На пример, оптички импулс је модулиран на М нивоима у M-PAM [84], M-PSK [85] и M-QAM [86] модулационом формату, што захтева ласерски извор са различитим интензитетом емисије. Све ове методе модулације М нивоа дају већи SE и EE у односу на модулационе шеме бинарног нивоа. Осим тога, друге шеме модулације интензитета на више нивоа и директне детекције (IM/DD) као што су диференцијална фазна модулација (DPSK) [87] и амплитудно-фазна модулација без носиоца (CAP) [88] разматране су у FSO системима.

#### **2.6.4. Моделирање FSO канала**

FSO канали су подложни атмосферским турбуленцијама и федингу, тако да треба узети у обзир дефиницију капацитета канала помоћу ергодичког капацитета и вероватноће отказа, због случајне природе коефицијената фединга канала. Ергодичним капацитетом се назива очекивани тренутни капацитет канала, који се може израчунати путем међусобне количине информација за различите коефицијенте фединга. Ако међусобна количина информације не досегне брзину протока у FSO каналима, спецификује се догађај отказа који је познат као вероватноћа отказа.

Перформансе FSO везе значајно су погоршане због слабљења сигнала под јаким факторима атмосферске турбуленције. Конкретно, FSO канал је веома варијабилан, непредвидив и рањив због нехомогености притиска и температуре атмосферског слоја. Варијација индекса преламања и вишеструко расејање дуж путање пропагације резултирају флукуацијама фазе и интензитета примљеног оптичког сигнала. Ефекат сцинтилације, изазван температуром и просторним флукуацијама интензитета светлости, погоршава перформансе FSO везе чак и по ведром времену. Као последица тога, број грешака по биту се значајно повећава, посебно за FSO комуникацију на даљину чак и за мали утицај горе наведених сметњи.

Приступ маргине везе (LM) је статистички параметар који се користи за квантификацију перформанси FSO преносног система. LM се може изразити у децибелима (dB) и може се дефинисати као однос примљене оптичке снаге и снаге потребне за циљну брзину преноса и вероватноћу грешке. Термин LM узима у обзир све ограничавајуће факторе повезане са FSO линком, укључујући параметре примопредајне станице и моделе буџета везе који подржавају дизајнерска решења за оптималну имплементацију у свим временским условима на датој локацији [89]. Неки други фактори као што су губитак дивергенције снопа, расипање светлости, позадинска бука, варијације угла долазног зрака, видљивост слободног простора и блокада облака морају се узети у обзир током имплементације FSO везе.

Сprovedена су бројна истраживања како би се описао капацитет FSO канала у условима турбуленције. Студија ергодичног капацитета FSO канала спроведена је у [90] за случајеве Gamma-Gamma, Rayleigh, Nakagami-m, Malaga, Rician и log-normalnog фединга, узимајући у обзир AWGN модел за шум пријемника. С друге стране, вероватноћа отказа [75], [85]–[87], [91], анализа вероватноће грешака по биту [27], [65], [91], [92] и перформансе пропусности канала [27], [84], [86], [92], [93] проучавају се за споменуте моделе фединга у присуству AWGN шума.

Неуслерене флукуације снопа сигнала у слободном простору, које се јављају због утицаја фединга канала изазваног атмосферском турбуленцијом доводе до значајног смањења перформанси FSO система које се манифестује пријемом погрешних битова. Кодовање канала је једна од обећавајућих техника ублажавања фединга, у условима слабе и јаке турбуленције. За решавање атмосферске турбуленције, неколико техника смањења фединга, као што су временско-посторни диверзити [94], алгоритми за детекцију секвенци података [95], и релејне комуникације [96] разматране су у контексту



FSO комуникација. Међутим, већина предложених метода је сложена и тешка за имплементацију током спровођења комуникације високе брзине преноса података.

Фединг канала FSO система је сличан квазистатичком својству које се споро мења и CSI се може проценити са бољом прецизношћу и послати назад у предајник. FSO одашиљач тада прилагођава свој параметар, на пример, снагу одашиљања, ниво модулације и брзину кода према тренутном CSI. Имајмо на уму да је адаптивни пренос најприкладнији приступ за full duplex операције повратне везе у FSO линку. Стога су адаптивно кодирање канала и шема контроле снаге врло важни за комерцијалне FSO системе под практичним ограничењима како би се задовољио циљни BER и жељени ергодички капацитет уз минимални прекид рада. Рад [97] предложио је адаптивни пренос са шемом контроле снаге уз претпоставку Gamma-Gamma канала турбуленције, са циљем постизања одговарајућих вредности BER-а и вероватноће отказа.

Пункт конволуциони (RCPC) кодови компатибилни са брзином користе се за извођење адаптивног преноса за контролу брзине кодирања канала. Декодер максималне вероватноће заснован на Viterbi алгоритму и RCPC кодовима се користи за смањење сложености FSO примопредајника. Аутори су у [98] проучавали перформансе FSO система просторне модулације (FSO-SM) с обзиром на утицај Gamma-Gamma дистрибуције и грешке усмеравања. Вероватноћа грешке по симболу (SER) се одређује коришћењем конволуционог кодирања.

Изрази BER-а и вероватноће грешке по пару (PEP) за конволуционе кодове и Q-ary PPM сигналне шеме су детаљно испитани у [99]. У [100], перформансе BPSK OFDM-FSO у присуству Gamma-Gamma турбулентног канала истражује се интегрисањем исправљања грешака унапред (FEC) како би се побољшале вредности вероватноће грешке. Аутори су дизајнирали протокол за контролу грешака и анализирали перформансе протока користећи RCPC код преко канала атмосферске турбуленције за FSO burst пренос у сателитским комуникацијама [101].

Рад нових просторно-временских решеткастих кодова (STTC) за FSO комуникацију користећи IM/DD под атмосферским турбуленцијама и неусклађености фединг канала истражује се у [102]. Једноставан приступ преноса који се прилагођава брзини базиран на ООК модулацијским форматима с меморијом приказан је у [103]. Аутори су у [104], [105] анализирали QoS алокацију кашњења ограничења снаге за кохерентне FSO системе за посматрани фединг канал атмосферске турбуленције.

Проблем оптималне алокације снаге под сигурносним ограничењима за људски вид проучава се за адаптивне WDM-FSO системе у [106]. Аутори су предложили адаптивну некодирану политику преноса за снагу преноса у зависности од стања канала и нивоа модулације у FSO комуникацијама у [107]. Рад [108] предлаже политику прилагођавања брзине кодирања засновану на временским условима фединга канала под фиксном снагом преноса. Да би се побољшале перформансе FSO везе у присуству јаке турбуленције, адаптивна модулација с провером паритета ниске густоће (LDPC) разматра се у [109]. У [110], аутори су представили хибридну комуникацију из две деонице уз помоћ релејног RF/FSO преноса користећи Alamouti кодирање у присуству грешке усмеравања преко Gamma-Gamma канала атмосферске турбуленције. Аутори су истраживали поузданост FSO везе у затвореном простору у смислу вероватноће грешке у [111].

### 2.6.5. Смањење позадинског шума

Позадински шум настаје услед сунчевог зрачења, у току дана. Позадински шум зрачења је функција таласне дужине, када је радна таласна дужина нижа од таласне дужине позадинске буке. Просторни филтери са техником адаптивне модулације, који имају висок PAPR, могу да ублаже овај шум. У овом случају, битни параметри за дизајнирање су: Доплеров помак, угао доласка сигнала, и ширина спектра ласерског извора. Просторни филтери М-ари PPM су најбољи избор за FSO системе, у овом случају.

Диверзити технике се примењују у три различита домена, временском, фреквенцијском и просторном, и то у циљу смањења атмосферских сметњи. Уместо једног великог отвора бленде користи се низ вишеструких предајника, на пријему се генерише више копија међусобно корелисаних сигнала. Диверзити техником побољшава се однос BER-а система. Да би се постигао прави ефекат диверзити технике, потребно је да размак између антена буде једнак или већи од дужине кохерентности на крају предајника или пријемника. Међутим, просторна корелација је функција ширине снопа, дивергенције снопа и варијансе лутања зрака. За SIMO диверзити пријем, диверзити техника се може спровести усредњавањем више независних ласерских зрака. На пријемној страни, за троструки диверзити користе се технике: селективног комбиновања (SC), комбиновања максималног односа (maximal ratio combining MRC) и комбиновања сигнала са једнаким уделом (equal gain combining EGC). Добитак диверзити технике за

MRC шему је већи од максималног нивоа SINR-а. У односу на две друге наведене методе EGC је најповољнија, у смислу једноставности и ниске цене инсталације [112]. FSO MIMO је сличан RF MIMO, где се капацитет канала повећава линеарно скаларно са бројем предајних антена. Временски диверзитети се обично користи за канале са временски селективним федингом где се преносе поновљени симболи у различитом кохерентном времену. Ипак, временски диверзитети се може користити само уз укључивање кодирања или бита преплитања и то у складу са разликом између дужине оквира података и временске кохерентности канала.

### 2.6.6. Кохерентни FSO системи

Флуктуације амплитуде и фазе пријемног сигнала деградирају систем, тј. смањују SINR и ремете жељени ниво BER-а. На основу техника детекције FSO системи се могу класификовати на: DD FSO (директна детекција) и CD FSO (кохерентна детекција). Код DD FSO шеме, интензитет светлости која долази са извора носи информацију, на страни пријемника, не постоји никакав спољашњи механизам и фотодетектор детектује промене свих фотона. За побољшање спектралне ефикасности у кохерентним FSO системима, амплитуда, фреквенција или фаза се могу користити за кодирање информација (што није случај код IM/DD системима). Како пријемна јединица садржи сноп локалног осцилатора (LO), пријемни сигнал је пре детекције фотографије помешан са LO генерисаним оптичким пољем. Након тога, сигнали се појачавају и пролазе кроз филтер у циљу одбацивања позадинске буке и сметњи [113]. Доказано је да кохерентна FSO шема испољава већи ниво осетљивости пријемника код IM/DD система. У CD-FSO системима се користе бројне технике модулације: M-арна квадратурна амплитудна модулација (M-QAM), квадратурно фазно померање са више нивоа (M-QPSK) или померање фазне поларизације са више нивоа (M-PolSK) [114].

Упркос потенцијалним предностима кохерентног FSO система, углавном се користе DD FSO системи, због једноставности и ниже цене. Са напретком интегрисања ултра брзих јединица дигиталне обраде, кохерентне FSO шеме се све више примењују. Атмосферски поремећаји модификују емитовани сигнал, што доводи до несавршености таласног фронта, код LO на пријемном крају. Релевантна фазна изобличења озбиљно ограничавају перформансе система, посебно када је отвор бленде пријемника већи од дужине кохерентности таласног фронта долазног сигнала. Али, изобличења изазвана

турбуленцијама, могу се отклонити техником компензације фазе кроз праћење оптичког зрака. Постоје два различита приступа: хомодина и хетеродина детекција у кохерентним пријемницима. Хомодина техника пријема захтева прецизно фазно усклађивање, тј. правилно фазно закључану петљу, што овакву врсту уређаја чини веома скупим. Управо из овог разлога, хетеродински пријемник се нашироко користи, иако прва техника обезбеђује бољу осетљивост детекције. У последње време написано је више истраживачких радова на тему побољшања спектралне ефикасности, повећања удаљености везе и капацитета система где се користи напредна модулација у контексту кохерентне комуникације FSO система [115]. У референци [116] показана је брзина од 160Gbps за 256 QAM OFDM, у случају једномодног влакна од 160km (SMF) за оптичку кичму и за 4km FSO везе. Аутори су у [117] представили 1024-QAM шему примопредајника са двоструком поларизацијом (DP) од 200Gbps, 200Gbaud и спектралне ефикасности (SE) 14bit/sec/Hz. Аутори рада (359) су показали систем брзине од 640Gbps са брзином симбола од 40 Gbps, SE од 15,3 bit/sec/Hz за инфраструктуру оптичког језгра и за инфраструктуру слободног простора исте раздаљине (160km SMF и 4km FSO). Међутим диверзити техника у кохерентним системима, у условима различитих турбуленција има многе предности: ублажавање фединга, ублажавање шума и ометајућих сигнала.

Оптички ViMAX систем преноса, омогућава комуникацију у слободном простору на даљину, са великим преносним капацитетом и великим брзинама, комбинујући предности оптичке и бежичне технологије. У FSO ViMAX системима, OFDM дели канал на  $N$  ускопојасних слотова. OFDM техника побољшава спектралну ефикасност и стопу дисперзије.

#### - Мултиплексирање подносача (SCM)

Ако се користи више таласних дужина за технику мултиплексирања подносиоца (SCM), може се постићи брзина протока података од 1Tb/s до 3Tb/s-km пропусног опсега, уз смањење цене по преносу бита [57]. Техника заснована на SCM-у, FSO системима нуди решење за пренос података последње миље за велике временске и пропусне опсеге светлосног сигнала. По дефиницији,  $N$  мултиплексираних подносача се преноси, а Mach-Zehnder-ов модулатор (MZM) се користи за модулацију сигнала оптичког носиоца. Након тога модулисани сигнал се пропушта кроз FSO канале; фотодиода је демултиплексира долазне сигнала до њиховог одредишта. Због кохерентне електричне детекције на пријему, пун спектар се може ефикасно користити у SCM-FSO системима.

### 2.6.7. Хибридни FSO пренос

Свака технологија заснована на RF и оптичким бежичним мрежама има неке предности и мане. Ограничења FSO система, нпр. блокирање комуникације услед препрека, се могу превазићи коегзистенцијом RF и FSO мрежа. Хибридне RF/FSO мреже побољшавају поузданост везе и олакшавају балансирање оптерећења у различитим сценаријима. Конвергенција хетерогене архитектуре RF и FSO мреже, која укључује различите фреквентне опсеге, има кључну улогу у обезбеђивању вишег степена QoS-а, и поузданог рада у неповољним временским условима. Применом хибридних технологија RF/FSO, тежи се беспрекорном раду система и услуге крајњим корисницима. Тачније, RF системи обезбеђују широку просторну покривеност, а FSO велике брзине преноса, где ова два система могу да раде на подручју исте просторне покривености без да међусобно изазивају сметње. Хибридна технологија пружа предности као што су: боља поузданост везе, енергетска ефикасност, добра повезаност са удаљеним дестинацијама, минимизирање сметњи итд. Циљ комбинованих бежичних система је постизање бољих перформанси, где се елиминишу недостаци појединачних технологија. Техничке препреке, као што су: ефекат сенки, интер-симболичка интерференција (ISI), фазно индуквана бука, интерференција вишеструког приступа (MAI), и фединг услед вишеструких путања, смањују интензитет пријемног сигнала. RF мреже су резервна путања сигнала када дође до блокаде, неусклађености антене или било које озбиљније деградације FSO система. Када се систем поврати, веза се опет враћа на оптички пренос.

RF мрежа служи као резервна путања и представља потенцијално решење током прекида FSO мреже. Термално ширење, јак ветар, вибрације изазване мањим земљотресом ремете усклађеност FSO предајника и фородетектора на пријему [118]. Комбинована употреба RF (микро и милиметарски таласи) и FSO система може да отклони ове ометајуће факторе. Иако RF системи развијају мање брзине преноса у односу на FSO системе, у погледу поузданости везе, показују боље перформансе од FSO система. На RF канале мање утичу грешке при усмеравању, магла и атмосферске турбуленције. Сједињена са FSO системима, RF веза заснована на милиметарским таласним дужинама од око 60GHz има високу пропусност. Такође, перформансе за NLOS пренос су много боље, као и мобилност система, ипак RF технологија је осетљива на електромагнетне сметње. За комбиноване RF/FSO системе, великог распона, RF линк се може користити за усмеравање и аквизицију зрака, што би обезбедило већу поузданост

система [29]. Може се рећи да неке карактеристике RF-а ублажавају ограничења FSO система. Енергетска ефикасност (bps/Watt) FSO система је релативно већа од RF система. Пребацавање саобраћајног оптерећења са RF на оптичке мреже минимизира укупну потрошњу енергије. RF/FSO системи омогућавају најбољу искоришћеност спектра и пружају најбоље перформансе преноса података, посебно за кориснике у затвореном простору. Мобилност при великим брзинама преноса је једна од основних предности ових хибридних система, на пример (V2X) за системе возила у густом саобраћају и на ширем географском подручју. FSO мрежа је мрежа примарне везе, док се RF користи као секундарни резервни пут који обезбеђује високу поузданост. Бежично повезивање преко релејних чворова се назива мешовитом RF/FSO везом.

Проблем који се јавља у хибридни мрежама је приступ ретрансмисије, тј. изгубљени пакети се поново преносе преко RF везе. Овде је предложена техника планера, тј. пропуштања података оптималним редоследом, која ефикасно руководи примопредајом између оптичке мреже и RF-а. Функција пролаза (gateway) је ре-емитовање, заказивање и руковање свим долазним подацима из планера пакета података. Кључни изазов овде, је одржавање очекиваног QoS-а. За управљање путањом вертикалне примопредаје предлаже се Марковљев процес одлучивања и приступ фази логике (fuzzy-logic). Марковљева шема одлучивања минимизира ефекат пинг-понга, тј. избегава се редундантно пребацавање када дође до блокирања у LOS линку. Прекид оптичке везе зависи од дистрибуције корисника на основу простора, времена и трајања. У складу са предвиђеном мобилношћу корисника, распоређивање хибридних FSO мрежа може се одредити на основу Марковљевог ланчаног процеса. С друге стране процес фази логике се заснива на неизвесности метрике одлуке. Радови [119],[120] показују сигурност физичког слоја хибридних FSO/RF система, где минимална потрошња енергије задовољава степен тајности корисника.

#### **2.6.8. WiFo (WiFi-FSO) комуникација.**

WiFo је хибридни тип комуникације тј. комбинација RF и FSO технологије, тачније, то је бежични комуникациони систем за затворене просторе, великог капацитета, заснован на фемтоћелијској архитектури, са великом спектралном ефикасношћу и минималним сметњама [121]. WiFi се може користити на местима где у FSO системима долази до преклапања сигнала. Уз предности високе модулације VCSEL-

a, за WiFi је типична PAM техника кодирања за комуникацију на кратким удаљеностима у затвореном простору, што резултира ниском потрошњом енергије PIN фотодиода [121]. FSO генеришу невидљиву светлост која је повезана великом брзином од 100Gbps у Етернет мрежу коју контролише приступна тачка (AP). Док, AP управља симултаним преносом података FSO сигнала и WiFi веза, WiFi омогућава гушће коришћење извора светлости где један пријемник може да ухвати све FSO сигнале као што су MISO системи. Овакав систем омогућава крајњим корисницима у преклопним областима већу брзину преноса података.

Подводна оптичка бежична комуникација (UOVC) која функционише помоћу комбиноване технологије RF, акустике и оптике, привлачи велику пажњу за разне намене, нпр: пређење цеви за нафту, подводна истраживања итд. UOVC заснован на RF и акустичној технологији, не може да подржи велике брзине преноса на великим удаљеностима. Акустични талас омогућава око 20km везе са распоном брзина од десетина херца до стотина килохерца [122]. Такође RF системи показују лоше перформансе и ограничени су на кратке удаљености везе. Хибридна RF/акустична/оптичка технологија превазилази ограничења као што су: кашњење, мала покривеност и јако слабљење сигнала.

Оптичке/оптичке хибридне бежичне технологије као што су FSO/VLC, FSO/OCC, такође су предмет истраживања многих аутора. FSO/OCC хибридна веза омогућава V2X комуникацију на даљину, веза је стабилна а појединачни недостаци сваког од система су елиминисани. OCC подржава комуникацију на кратким удаљеностима са ниском стопом података. Насупрот томе, FSO мреже обезбеђују комуникацију између аутомобила на већој удаљености. Дакле, хибридни систем задовољава потребе корисника и повећава поузданост везе. Међутим систем није отпоран на атмосферске услове на отвореном [123].

Да би се измерила ефикасност било ког система, анализа перформанси представља најзначајнију метрику. Процена метрике учинка може се извршити на различите начине: аналитичком евалуацијом, нумеричким методама, симулацијом у одређеном окружењу и експерименталном верификацијом. У радовима се користе разне методе: анализа протока, BER, спектрална ефикасност, вероватноћа грешке симбола, анализа степена заштите података, вероватноћа отказа, ергоични капацитет, SINR и енергетска ефикасност пријемног сигнала, капацитет система и поузданост.

### **2.6.9. Радио преко FSO система (RoFSO)**

Радио преко FSO система (RoFSO) је занимљива технологија, пре свега јер овакав систем има могућност великог преноса података уз ниску потрошњу енергије. Концепт RoFSO је систем тј. радио преко влакана (RoF) и FSO система, где се оптички сигнал модулише као RF пре преноса на пријемник. Може се рећи да RoFSO техника омогућава истовремени пренос података широкопојасних RF сигнала, двосмерном путањом преко FSO везе. Техника модулације RF подносача на оптички носач, позната је као RoF. На местима где је инсталација оптичког кабла ограничена, RoFSO је технологија која може да пружи потребну услугу, тј. да превазиђе проблем последње миље за широкопојасне услуге [124]. Да би се задовољили захтеви корисника 5G и B5G мрежа, телеком оператери су принуђени да инсталирају већи број базних станица, што би имало за циљ избегавање спектралног загушења у нижим RF фреквенцијским опсезима. Ипак, овакав приступ доводи до повећавања цене и сложености система. Са друге стране, RoFSO систем нуди већу поузданост, флексибилност примене, мале губитке, отпорност на електромагнетне сметње, висок пропусни опсег и економичност [125].

Принцип RoFSO-а је сличан WDM техници. Централне базне станице, кроз слободан простор, дистрибуирају оптичке сигнале ка више удаљених станица. Mach-Zehnder модулатор (MZM) се користи за модулацију оптичког сигнала у функцији RF сигнала, и то комбиновањем фазно одложених оптичких зрака. У MZU-у, разделнику сигнала, се раздвајају упадни ласерски светлосни таласи на два пута, чиме се реализује линеарни оптички ефекат (ЕО), који када се примени електрично поље доводи до преламања у оптичкој средини. Подешавањем електричног поља тј. RF улазних сигнала, фазно кашњење доњег и горњег пута се може контролисати, у том случају снопови се комбинују на излазу, било то конструктивно или деструктивно. Механизам ЕО мења индекс преламања оптичког медијума па се MZM може користити за амплитудну, фазну и фреквенцијску модулацију.

### **2.6.10. Вишекорисничка FSO комуникација**

Када више корисника емитује различите сигнале, долази до њиховог мешања у медијуму бежичног простора. Техника BSS раздвајања извора (BSS- Blind source separation), користи се за издвајање оригиналних информација из надлазећих мешовитих



сигнала. Проблем ове врсте се јавља код многих апликација, као што су: анализа биомедицинских података, идентификација говорних сигнала, комуникација заснована на машинском учењу итд. [126]. Како су корисници насумично распоређени у простору, фединг појединачних канала је независан. Диверзити техника више антена може значајно да побољша перформансе бежичног преноса FSO система. Вишекорисничка диверзити техника нуди нека пријемчивија решења за диверзитет антена, такође је и структура система једноставнија, јер један пријемник захтева једну антену. Увођењем бројних приступних тачака у FSO везу дугог домета, и то преко RF везе кратког домета, појачава се пријемни сигнал, даљина и поузданост преноса података. У раду [87] представљен је RF/FSO систем за више корисника са више скокова, овакав систем захтева нижу потрошњу енергије, има мало кашњење и није сложен. Када CSI (информација о стању канала) није позната користи се појачало са фиксним појачањем и појачало са појачењем и преношењем унапред, када је CSI позната користи се адаптивно појачање. У раду [127] проучаван је вишекориснички диверзитет RF/FSO система за MISO (point-to-multipoint) технологију, који се састоји од хибридних приступних тачака, све то са циљем да се BER сведе на минимум. Такође, да би се испитала вероватноћа отказа и енергетска ефикасност, разматра се вишекорисничка мешовита RF/FSO метода двосмерног релеја (TVR) [128]. У односу на просторно мултиплексирање, вишекориснички MIMO пренос је боље решење јер значајно побољшава капацитет бежичних комуникационих система [129]. Неопходно је, периодично, ослушкивати оптички спектар, како би се у случају вишекорисничког приступа избегле сметње и заузетост канала. Сензор спектра има значајну улогу за вишекорисничку FSO комуникацију, јер омогућава кориснику да прати расположиви фреквенцијски спектар у свом радном опсегу [130]. У [131] опсежно је приказана метода детекције енергије, на оптичким уређајима, за FSO комуникацију експоненцијално дистрибуираног канала.

#### **2.6.11. MIMO FSO системи**

Диверзити технике, као што је техника просторног диверзитета, где се вишеструким сноповима на предајнику или вишеструким отворима на пријемнику, могу значајно побољшати карактеристике FSO система, свакако су предмет проучавања. Техника просторног диверзитета помаже да се побољша поузданост FSO система и то увођењем инхерентне редундансе сигнала [132]. Можемо напоменути, да фединг изазван турбуленцијама значајно погоршава SISO-FSO (веза између једног улаза и једног излаза

) [133]. Да би се постигао жељени QoS користи се додатна снага. Ипак, овакав приступ није практичан због недостатака у безбедности и ниже поузданости. Типичан, конвенционалан Гаусов светлосни сигнал подложен је: ефекту лутања снопа, флукуацијама снаге и изобличењу таласног облика услед нежељених атмосферских турбуленција. Такође, неусмереност између пријемника и предајника узрокује значајан губитак снаге. Поред неколико начина за ублажавање ових деградација сигнала, отвор бленде је једна потенцијална техника за побољшање перформанси система. Ова техника је таква да се на страни пријемника уграђује шире сочиво чиме се ублажава ефекат фединга, усредњавањем флукуација интензитета. Техника је ефикасна у условима умерених до јаких атмосферских турбуленција, када је отвор пријемника већи од дужине корелације фединга  $\sqrt{\lambda l}$ , где је  $l$  раздаљина преноса а  $\lambda$  таласна дужина [29]. Коришћење више малих отвора, уместо једног великог отвора на пријемнику, је начин да се смањи фединг. Више малих отвора је погодно решење у условима јаких турбуленција, али је имплементација овог решења мало сложенија. За SIMO (један улаз више излаза) систем, користи се EGC (комбиновање једнаког појачања) метода, која даје инфериорне резултате у односу на методу MRC (комбиновање максималног односа) [129]. С друге стране, FSO шема са више улаза и једним излазом (MISO) на крају предајника, углавном се користи за пренос истог сигнала на одвојеним сноповима, што се назива поновљено кодирањ (RC).

Слично RF системима, MIMO техника је популарна за решавање вишепутног фединга изазваног турбуленцијама [110]. У оваквом сценарију FSO примопредајник опслужује истовремено више крајњих корисника на истом фреквенцијском опсегу, где је уз учешће више колоцираних антена учинак мултиплексирања бољи [129]. У циљу спречавања међукорисничке интерференције, проучава се неколико техника, једна од њих је и модулација интензитета/директне детекције (IM/DD), која је имплементирана у MIMO-FSO систем, где се IM користи за пренос сигнала а DD се користи на пријемнику. Према [129], нелинеарне шеме претходног кодирања дају боље резултате у односу на метод претходног линеарног кодитања. Ипак, методе линеарног претходног кодирања као што су нулто формирање снопа (ZFBB) [134] и насумично јединствено формирање снопа (RUB) [135] су популарне због своје једноставне имплементације. У ZFBB-у матрица претходног кодирања је моделирана псеудо инверзна матрица одабраних корисника, док је у RUB-у претходно кодирање матрице дизајнирано на основу квалитета канала насумично одабраних корисника. У референци [136] проучаван је

ортогонални просторно-временски блок код OSTBC-а и код понављања (RC) у условима логаритамско нормалног фединг канала. Међутим, када је огроман број хетерогених уређаја повезан у 5G, лог-нормални атмосферски модел канала није задовољавајући [31]. Постоји велики број радова фокусираних на MIMO-OSTBC FSO апликацијама, које омогућавају већи диверзитет и широк спектар примене FSO уређаја [137]. RC шема је проучавана у [138] а употреба поновног кодирања у MIMO FSO у [139].

MIMO шема заснована на OSTBC се користи као успешна за решавање временске неусклађености асинхроних MIMO FSO канала. Аутори су у [140] представили BER перформансе за мултихоп хибридни RF/FSO систем, где се предлаже коришћење M-арне импулсне модулације положаја (MPPM) и MIMO технике у Gamma-Gamma турбулентном каналу. У [141] први пут је приказана MIMO-FSO веза са техником пријема са једним појачањем за Gamma-Gamma атмосферски турбулентни канал. У [142] приказан је задовољавајући BER за 10 Gb/sKPSK FSO везе за MIMO просторну технику.

#### **2.6.12. FSO пренос у TCP слоју**

Многи радови су фокусирани на поновни пренос сигнала тзв. рерутинг, на дизајн унакрсног слоја, где је слој за контролу преноса у комбинацији са физичким слојем [143].

Поновни пренос (Re- transmission). Захтев за аутоматско понављање (ARQ) је протокол који се користи у сврху поузданог преноса података. Према овом протоколу пренос података се врши у сету пакета одређене дужине и оквира. Пакет се поново преноси када, после одређеног временског периода, са пријемне стране нема потврде о пријему података, процес се наставља све док се, на страни предајника, не прими позитивна потврда. Као резултат N-ARQ (крени - врати се - заустави - сачекај) шеме долази до деградације пропусног опсега, великог кашњења и веће потрошње енергије. Друга техника је селективно понављање ARQ (SR-ARQ), где се пакети више пута шаљу са предајника, без чекања било које потврде од стране пријемника, било на нивоу везе или на транспортном слоју. У [143] проучава се и хибридни ARQ (H-ARQ), који комбинује FEC кодирање и механизам контроле грешке. Даље, метода кооперативне разноликости ARQ (C-ARQ) даје добре перформансе у смислу турбуленција изазваних федингом код FSO система. Модификовани C-ARQ (MCARK) даје боље перформансе у смислу енергетске ефикасности и кашњења. Rateless Round Robin алгоритам има

пракричну примену у FSO системима и користи се за контролу грешке у условима јаких атмосферских турбуленција [144].

Преусмеравање (Re-routing). Током неповољних временских услова, преусмеравање путање података између оптичке везе или RF везе, повећава поузданост FSO комуникације. У [145] демонстрирана је аутономна динамичка реконфигурација путање, укључујући механизме контроле топологије и алгоритме за преусмеравање снопа за хибридне RF/FSO везе. Предложени метод значајно унапређује систем али и подиже цену реализације. Уобичајени протокол за рутурање је тзв. проактивно рутирање, код овог приступа све могуће руте се израчунавају и чувају у табели рутирања, ипак ова шема није прикладна за мреже великих размера. Други протокол за рутирање је тзв. реактивно рутирање, који у поређењу са претходним мање оптерећује мрежу. Ова шема израчунава нове путање на основу захтева у реалном времену током кварова постојеће руте, што ипак узрокује продужено кашњење података. Па тако, хибридна шема рутирања, која се састоји од ова два протокола, користи се унутар сваког тј. између различитих кластера [145].

QoS контрола. QoS се може дефинисати у контексту: пропусности, кашњења, губитка сигнала, спектралне ефикасности и енергетске ефикасности. Да би се постигла поуздана комуникација између два FSO чвора систем мора да испуни захтеве QoS-а. Примарни изазови QoS-а у FSO системима су кашњења пакета података. У [146] предложен је бафер од 10 Gbps који би минимизирао стопу одбијених пакета у атмосферским условим, за хибридну RF/FSO мрежу. Према [146] баферска шема заснована на QoS-у, обезбеђује 8 dB мањи маргинални фединг. Строга контрола грешке и политика исправног канала пружају задовољавајући ниво QoS-а.

## **2.7. FSO системи следеће генерације**

Последњих година, FSO системи, као алтернативна бежична комуникациона технологија, завређују велику пажњу, јер задовољавају потребе преноса података на исплатив начин. Поред тога, FSO технологија се бави проблемима сметњи и поузданог повезивање са високим нивоом безбедности преко постојеће RF инфраструктуре. FSO међуканалне сметње могу се ограничити контролом ширине оптичког снопа на предајној станици. Искоришћавањем коегзистенције RoFSO, OVC/FSO или RF/FSO компензују се

слабости сваке појединачне технологије. Хетерогене структуре FSO система (RF, Соак, FSO, оптичко влакно) обезбеђују екстремни капацитет бежичних услуга, како на земљи тако и у свемиру [57]. Оптиелектронски уређаји, који се користе за инфраструктуру брзих оптичких влакана као што су, на пример: оптички извор од 100 Gb/s, Макс-Зендеров модулатор (MZM), мултиплексирање таласних дужина (VDM), фотодетектор итд. такође се могу користити у FSO системима. Дизајн који подразумева интеграцију конвенционалних сигнала високе брзине преноса података у FSO системе, омогућава: пренос земаљских дигиталних HD TV сигнала, WLAN, обављање 5G комуникационих протокола и IoT/IoE бежичне услуге.

Савршена процена FSO канала је изазован задатак јер укључује високе трошкове и потрошњу енергије. То није прикладан избор у систему целуларних комуникација, пошто пилот пренос погоршава брзину преноса података. Инспирисани овим проблемима, аутори [147] су предложили процену канала ниске цене и ниске сложености засновану на машинском учењу (deep learning) за FSO систем. Иако слепа процена канала не захтева пилот пренос, осим тога, нуди нижу сложеност, ипак овај приступ није реалистичан због услова фиксног канала. Недавно је концепт машинског учења [148] навео на истраживање праћења оптичких перформанси, што је веома корисно када је системски модел сложен. С друге стране, машинско учење би могло да реши сложене проблеме када улаз није довољан за израчунавање и обезбеђује алате за динамичку и статистичку обраду сигнала, за генерисање савршеног модела вероватноће канала за оштећења примљених података. Алгоритми дубоке неуронске мреже (DNN) [149] могу се користити у симулацији високог нивоа за анализу улазних података, нудећи брз одговор. DNN алгоритми се користе за: идентификацију најбоље модуларне шеме, управљање оптичким појачавачима, парадигме рутирања и процену квалитета пренетих сигнала.

Из горе поменутих дискусија, машинско учење (ML) за будуће генерације FSO мрежа постаје актуелна тема. Неколико истраживања је спроведено у FSO комуникацији заснованој на ML-у, као што је сврха детекције [150], корекција грешака за напредну оптику [67] и савршен дизајн демодулатора за угаоне оптичке зраке [151].

## 2.8. Примена бежичног оптичког преноса у 5G технологијама

Са порастом употребе разних врста мултимедијалних апликација, постојећи RF системи нису у стању да испуне све потребе IoT-а, 5G и других напреднијих комуникационих система. Бежичне технологије, различитог типа, имају низ пожељних карактеристика али и одређена ограничења. Опште је познато да RF и оптичке бежичне технологије (нпр. FSO) имају реципрочне карактеристике. Кључне предности RF технологије су: мобилност, пренос се врши под LOS/NLOS условима, просторна покривеност је широка, а ограничавајући фактори су: недостатак пропусног опсега, електромагнетне сметње и мањи пропусни учинак. С друге стране, FSO системи, међу свим осталим OWC технологијама, имају предност огромног пропусног опсега и велике дужине покривености. За разлику од RF сигнала, оптички сноп не може да се детектује анализаторима спектра, такође ласерски зраци не могу да прођу кроз зидове. Иначе, FSO примопредајници су лаки за постављање, лагани по тежини, компактни и лако прошириви. Ипак, FSO технологија има ограничавајуће факторе, као што су: магла, јака киша, густе снежне падавине, густе облаци, грешке у усмеравању, ефекат сцинтилације и атмосферска молекуларна апсорпција. Различити аспекти употребе FSO система су: свемирска комуникација, сајбер безбедност, решење проблема последње миље. Наведени унапређени оптички извори су нпр. монохроматски LASER предајник на бази чврстог стања, као и различити фотодетектори. Насупрот LED диодама, кохерентност ласерских диода (LD) омогућава брз пренос података са мање сметњи. За краће раздаљине PiN фотодиода (PD) је прихватљивије решење, док је за већу удаљеност везе боље решење Avalanche PD (APD), јер због побољшаног нивоа осветљености пријемника има боље перформансе. Циљеви FSO система су различити, сходно томе, предложени су бројни приступи за решавање питања поузданости. Показивање, аквизиција и техника праћења (PAT) за одржавање LOS усмерености између две крајње тачке, усавршавање модулационих техника [76]-[80], развој техника за кодирање канала различитих оптичких бежичних веза [103]-[111], техника за смањење позадинске буке, механизам просторних диверзитија, развој нових кохерентних FSO система, развој адаптивне оптика [68]-[69] за смањење флукуације таласног фронта, усавршавање релејног преноса [70] за постизање високог појачања канала, развој хибридних FSO система за превилажење ограничења једне технологије [119],[120], представљају основне правце истраживања из ове области. Кључна питања која треба разрешити како би се постигла

успешна имплементација FSO система су: ублажавање сметњи [152], аутоматска корекција грешака на пријему [153], побољшање пропусности [85] енергетска ефикасност за 5G, B5G, IoT апликације [154]. Даље, проблеми дизајна FSO система за квантне THz комуникације [155], мулти-хоп, вишекорисничке и кооперативне комуникације засноване на релејном преносу [156], VDM FSO комуникације [157], адаптивни оптички механизам у подводним бежичним комуникацијама, питања хоризонталног и вертикалног хендовера у хетерогеним мрежама, безбедност физичког слоја, такође представљају значајне теме за истраживање. Дискутована су и питања умрежавања FSO система [158]. Радио преко FSO технологије (RoFSO) је представљен у перспективи 5G и других комуникација [124]. Свеобухватна MIMO студија у циљу постизања робусних перформанси FSO система се проучава у [137]-[140]. Истраживања су, такође, фокусирана на могуће инкорпорирање FSO мрежа у технологије следеће генерације, као: машинско учење, дубоке неуронске мреже, ефикасни алгоритми рутирања, методе контроле QoS-а.

Постојећи RF систем није у стању да подржи велике брзине преноса података које захтева 5G и B5G мрежа. FSO систем са ултра-појасним фреквентним опсегом, без лиценце, може да буде одрживо решење. FSO комуникација се обично одвија са уским усмереним снопом, у условима LOS пропагације за велике раздаљине. Брзина података од 40GB/s за FSO комуникацију већ је постигнута. FSO систем може да покрије удаљености од неколико нанометара (имплементација у интеринтегрисаним колима) до 10000 километара (од земаљске базе до сателитске FSO тачке) [57]. FSO систем има могућност да подржи пораст броја паметних телефона, велику количину података који се складиште у облаку, IoT/IoE уређаје, вештачку интелигенцију итд. Ипак, развој робусне инфраструктуре представља и даље велики изазов. Један од проблема је и ефикасно постављање FSO система. У овом одељку је стављен акценат на истраживање проблема везаних за све аспекте примене FSO система.

### **2.8.1. 5G/B5G/ и IoT/IoE решење**

FSO је најновија технологија која подржава мобилне мреже следеће генерације и велику међуповезаност IoT уређаја. Примена LD диода у пројектовању FSO система резултира великим интерфељнијским сметњама у 5G/B5G/ и IoT/IoE мрежама. Поред тога, различите технике модулације LD-а могу да изазову треперење (флукуацију

модулисаног сигнала). CoMP (ћелијска мрежа са више координираних тачака) смањује интерћелијске сметње осигуравајући максималну пропусност [154]. Опште је прихваћено да се повећавањем броја распоређених OWC чворова повећава интерћелијска интерференција (ICI). Технике ублажавања ICI у OWC домену су спроведене на основу познатог приступа који се користи у RF технологији [152]. Проблем уског грла последње миље настаје јер мобилне мреже не могу да се носе са великим брзинама и протоком података који корисници захтевају. Због великог броја уређаја за пренос података у мрежи, јавља се потреба да приступна мрежа има велику пропусност. Такође, потребно је обезбедити прецизно преношење корисничких података преко карактеристичних backhaul мрежа. Неке од будућих FSO апликација обухватају и позадинску и фронталну комуникацију на нивоу транспортне и приступне мреже. Трошкови и поузданост прилагођавања FSO система мобилној мрежи backhauling су једно од важнијих питања на које је потребно дати одговор. Иначе, умрежавање засновано на машинском учењу је технологија на којој ће се заснивати ћелијске мреже следеће генерације. Данас је све већа потражња за технологијом вештачког управљања и даљинског одлучивања.

Масовна употреба IoT уређаја ствара потребу за међусобним прожимањем различитих технологија, као и потребу за хибридним повезивањем. На пример, бројним апликацијама је потребна интеграција разноврсних технологија, као што су: RFID, бежичне сензорске мреже (WSN), WiFi и ZigBee повезивање на једну или на неку хибридну мрежу. Оваквим потребама конвенционални RF спектар бива веома оптерећен. Решење овог проблема је хибридни FSO систем, јер овај тип OWC технологије не омета постојећи систем заснован на RF делу спектра, већ користи део електромагнетног зрачења у видљивом делу спектра, који има хиљаду пута већи пропусни опсег него RF домен [159].

### **2.8.2. Релејне FSO мреже**

Перформансе земаљске FSO везе могу бити озбиљно деградирани услед неусклађености снопа, слабљења и атмосферских турбуленција. Релејне FSO мреже могу да се носе са овим изазовима, јер се подаци преносе до средњег релејног чвора чиме се избегава директна веза [93]. Да би се одржала веза са краја на крај потребна је велика снага преноса. Потребна додатна снага може утицати на ниво безбедности. Дакле,



оптимална алокација (додавање) снаге у хибридную RF/FSO мрежу је кључно питање пројектовања оптичке бежичне мреже потпомогнуте релејем. Хетерогене мреже засноване на баферу са релејем за дроне (UAV), са фиксним и покретним релејним станицама приказана су у [160]. Multi hop пренос и кооперативни диверзитети релеји дати су у [30]. Техником преноса са више скокова проширује се просторна покривеност, сигнал се преноси од релејног чвора до одредишног чвора. Код паралелног релејног приступа, исте информације се преносе и пријемном и релејном чвору, где релејни чвор опет преноси информацију одредишном чвору. Питања релејног преноса обрађена су у [152]-[156]. Увођењем оптичких релеја избегава се потреба за оптичко-електрично-оптичком (ОЕО) конверзијом на сваком релејном чвору. Употребом полупроводничких појачавача засићења (SOA), FSO системи имају могућност да елиминишу сцинтилацију, атмосферске турбуленције, чак и без информације о стању канала (SCI) [161]. Ипак релејно повезивање је технологија која се много више везује за RF него за FSO начин преноса.

### 2.8.3. WDM FSO веза

Интеграција FSO и технике мултиплексирања по таласним дужинама (WDM) има за циљ проширење капацитета FSO везе. Увођењем густе WDM (DWDM), FSO систем може бити знатно побољшан. 320 Gbps LOS/Long WDM FSO веза је имплементирана помоћу ООК модулације [162], а FSO веза од 200 Gb/s је приказана у [163]. За анализу вероватноће отказа WDM FSO везе узима се у обзир међуканално преслушавање и турбуленција. Ипак, оптички CDMA се више узима у обзир за FSO мреже наредне генерације као подршка оптичким мрежама у FTTH технологији. Радови [157] посвећени су OCDMA-WDM оптичким мрежама у контексту FSO технологије, узимајући у обзир грешке показивања коришћењем пријемног диверзитета за повећање капацитета канала и, исто тако, узимајући у обзир укупне перформансе канала. OCDMA са више таласних дужина (MW) је атрактивно решење за побољшање капацитета канала путем смањења интерференције вишеструког приступа (MAI) и преслушавања. Технологија комбиновања WDM-OCDMA, у односу на конвенционалну WDM технологију, подржава постојање огромног броја истовремених корисника као и динамичко додавање/испуштање приступне мреже следеће генерације. Проучавање хибрида DVDM-MIMI FSO [164] се спроводи у циљу повећања покривености са минималним BER-ом и минималном вероватноћом отказа, све то у тешким временским условима.

Ипак, потребно је још истраживања да би се дошло до економичности и једноставније интеграције FSO WDM система са већ постојећом инфраструктуром.

#### **2.8.4. Карактеризација канала**

Током протеклих деценија, у циљу квантификације FSO система, предложени су различити модели канала: Log-normal, Lognormal-Rician, Gamma-Gamma [35]. На перформансе FSO канала у великој мери утичу атмосферске турбуленције: расејање, сцинтилација, апсорпција ваздуха, губитак слободног простора и рефлексија. Осим тога олуја, магла, јака киша као и прашина могу озбиљно да деградирају везу између пријемника и предајника. Стога, питање ублажавања ефекта атмосферских турбуленција, као и питање статистичког моделовања утицаја атмосферских турбуленција, покретљивости препрека и грешке показивања на пријемни сигнал, није нимало једноставно. Алокација (додавање) снаге и перформансе везе у великој мери зависе од атмосферских губитака. Једна од опција је NLOS комуникација у UV спектралном домену. Питања за истраживања у будућности су и геометријска конфигурација примопредајника, атмосферски услови и ефективно моделирање канала. Моделирање канала комуникације оптичког расејања (OSC) је компликованије од моделирања LOS FSO везе, управо јер дужи домет везе захтева сложеније моделовање услед слабљења и расејања. Примена MIMO-а, иако захтева сложенији хардвер, је једно од питања којим се баве истраживачки радови.

#### **2.8.5. Позиционирање, аквизиција и праћење (PAT-Pointing, Acquisition, Tracking)**

Уопштено говорећи, веза FSO система је широкопојасна и усмерена, од тачке до тачке и чини линију између чвора за слање и одредишта. PAT техника се обично користи и у статичним и у мобилним FSO системима, када примопредајник користи уске снопове и дивергенција таквог снопа је мања од неколико микро радијана ( $\mu\text{rad}$ ) [39]. Овакавим ултра уским снопом постижу се велике брзине преноса података, дуг домет, сметње су мање а енергетска ефикасност FSO система је већа. Ипак FSO систем са уским спектралним снопом, између две тачке, је компликованији за изградњу. Правац преноса LOS везе мора да буде прецизан да би се повезаност између крајњих корисника одржала.

За конкретан учинак РАТ механизма, потребно је развити интегрисану и флексибилну хардверску архитектуру.

Код механизма показивања, FSO чвор почиње да размењује информације са потенцијалним чворовима који постоје у слободном простору mmWave мрежа [165]. Дакле, синхронизација између чворова је веома битно питање дизајна мреже, које је повезано са механизмом показивања. Аквизиција је механизам повезан са техником модулација-демодулација. Отвор FSO пријемника је дизајниран тако да може да прихвати више оптичких зрака, након тога пријемник одлучује о механизму декодирања. Физичка архитектура мора да буде таква да су димензије отвора пријемника прилагођене углу дивергенције зрака емитованог из ласера [166]. Оваквом техником значајно се смањује вероватноћа отказа рада система, повећава се брзина и ефикасност. Механизам праћења повезан је са својством уског спектралног снопа. Перформансе везе у великој мери зависе од поравнања снопа између пријемника и предајника и облика сочива. Механизам праћења код мобилних примопредајника, услед неусклађености оптичких зрака, има мањи расположиви капацитет и већу вероватноћу отказа. С друге стране висока прецизност усмеравања је одржива код стационарних примопредајника.

Интелигентни транспортни системи, као што су V2V, V2I, Vehicle-to-everything (V2X) захтевају да се LOS комуникација са возилом константно одржава [167]. Оптичка бежична технологија је применљива у управљању саобраћајем. Оваква примена је јако изазовна са аспекта аквизиције и праћења, нарочито у густо урбанизованим срединама. Велике брзине кретања аутомобила или возова, пред FSO систем стављају захтевну реализацију у области V2X (Vehicle to everything) комуникације. Агилни РАТ систем је у стању да испрати велике брзине кретања возила и V2X систему [168]. Ефикасан РАТ модел мора да обезбеди вишесмерну покривеност као и ублажавање вибрација. Овако директивним механизмима за мобилну FSO комуникацију, где је унапред познато кретање објекта, смањује се време примопредаје. Недостатак ове технологије је грешка која настаје услед неусклађености стварне и очекиване брзине возила, па је као подршка потребна GPS или нека друга техника праћења. Код РАТ технике, временска синхронизација је једно од кључних питања. Као решење овог питања, примопредајници имају могућност размене контролних података: о локацији, мобилности и времену потребном за синхронизовано поравњање.

### 2.8.6. Подводна комуникација (UWC)

UWC технологија има велику примену, пре свега за истраживање, детекцију и надзор објеката на мору, један од примера су нафтоводи. Предност UWC технологије су велике брзине преноса података и велика област покривености. Једно од важних питања, овде, је техника адаптивне модулације и кодирања (AMC). Штавише, адаптивни механизам за пребацивање између акустичног и оптичког режима, за хибридне оптичко/акустичне везе у подводном окружењу има велику примену.

### 2.8.7. FSO умрежавање

5G/B5G је технологија састављена од густих хетерогених мрежа (комбинације макроћелија-пикоћелија, макроћелија-фемтоћелија, макроћелија-микроћелија), чиме се повећава транспортни капацитет података. Мале ћелије густе хетерогене мреже (HetNet) генеришу јако честа пребацивања између оптичких и RF мрежа, што може да доведе до многих непотребних примопредаја [169]. Последица тога је да је контрола нежељених примопредаја и пинг-понг ефекат једно од важних питања за правилно функционисање система. Хибридна FSO мрежа захтева подршку два различита типа (хетерогених) пријемника, како се особине RF и оптичког примопредајника разликују, обе мреже морају бити активне истовремено. Услед комбиновања две различите архитектуре на истој платформи, истовремени пренос података преко различитих система је једно од битнијих питања. С друге стране, својства физичког слоја и слоја везе, хибридни RF и оптичких мрежа, имају важну улогу за мобилност система. Важно је омогућити хоризонтално и вертикално пребацивање, чиме се омогућава неограничена мобилност корисника. На пример, корисник може неприметно са се креће у LiFi ћелији (хоризонтално пребацивање) или међу LiFi и WiFi мрежама (вертикално пребацивање) у оквиру хибридног LiFi-WiFi система. Време потребно за процес пребацивања треба да буде довољно кратко да би се испунила спецификација 5G/B5G мрежа. Време потребно за размену информација између корисничког уређаја и централне станице зависи од алгорита [170].

### **2.8.8. Безбедност физичког слоја**

Према [171], бежичне оптичке комуникације, као што је FSO су на физичком слоју рањиве на сајбер нападе. Спољашње прислушкивање FSO комуникације отвара питање безбедности и приватности овог система. Аутори у [172] анализирају (SOP) вероватноћу отказа тајности комуникације, узимајући у обзир спољашње прислушкивање, које је усмерено на физички слој. Како код оптичког зрака долази до пулног ширења, спољашње прислушкивање доводи до већег струка снопа у поређењу на величину пријемника. У [173] анализирана је безбедност физичког слоја FSO система за MISO (вишеструки антенски терминали на предаји, једна антена на пријему), MIMO и кооперативне системе. Анализа SOP-а преко Malaga канала турбуленције дата је у [174]. Сигурност физичког слоја, са аспекта дисторзије канала, за хибридне RF/FSO релејне мреже дата је у [175]. Анализа средњег капацитета тајности (ASC) за активно прислушкивање RF/FSO мреже засновано на декодирању и прослеђивању (DF), проучава се у [176]. Перформансе ASC-а за Malaga турбуленцију разматране су у [177].

### **2.8.9. Софтверски дефинисана мрежна (SDN) контрола**

SDN (Software Defined Networking) ефикасно контролише и управљање хибридним оптичким мрежама. Међутим, неким од OWC апликација које захтевају: преусмеравање саобраћаја, управљање грешкама као и безбедносним проблемима, управља први слој апликације SDN система [178]. Али, активности као што су: ажурирање контроле тока, одабир мреже и друга суштинска контролна питања, извршавају се на контролном слоју [179]. SDN технологија се уграђује у FSO систем у циљу минимализације потрошње енергије и то кроз контролу саобраћаја података. Виртуелизација мрежних функција и приступ апликацији у реалном времену SDN система је једно од нових истраживачких питања.

Проширивање оптичког спектра изван UV опсега има за циљ постизање велике снаге преноса и снижавање цене извора светлости. Системи за унутрашње позиционирање који имају RF подршку пате од вишепутног фединга и губитка позиционирања [180]. Да би се смањило губитак података, битан је избор оптималног предајника између више чворова и минимализација кашњења што би резултовало беспрекорним преносом података.

Дизајнирање оптичких бежичних система наилази на низ изазова, као што су енергетско ограничење преносивих уређаја и ограничења уског снопа за мобилне уређаје. Дакле, мобилност узлазне везе је отворено истраживачко питање. Неколико истраживачких радова спроведено је на тему RF/оптичка хибридна бежична мрежа из перспективе физичког слоја док се једва фокусирају на метрику нивоа везе [158].

### **3. БЕЖИЧНИ ОПТИЧКИ СИСТЕМИ ПРЕНОСА У ПРИСУСТВУ ТУРБУЛЕНЦИЈЕ**

У овом поглављу дат је приказ оптичке бежичне комуникације, где се фреквенција носиоца бира из много вишег оптичког спектра, обично реда величине 10<sup>14</sup> Hz. У поређењу са конвенционалним RF системима, FSO системи нуде неколико значајних предности, које су последица кратких таласних дужина (високих фреквенција). Предности ових система су следеће:

- Мање димензије пријемне антена;
- Мања величина и тежина компоненти;
- Концентрација снаге у веома уском снопу (безбеднији канал);
- Потенцијално повећање модулационог опсега.

Посебно је важна последња наведена ставка, управо због количине информација коју преноси комуникациони систем а што је директно повезано са пропусним опсегом модулисаног носиоца. Дакле, повишење фреквенције носиоца до области оптичког спектра има потенцијал да значајно повећа информациони капацитет система (већа брзина преноса података). Апликације чије би перформансе побољшала FSO комуникација су оне са критеријумима високих перформанси, и које раде у окружењу где није могуће успоставити физички везу оптичким каблом нпр. између зграда или у случају свемирских веза.

Ипак, треба напоменути, да иако FSO системи нуде одређене предности у односу на RF системе, услед кратких таласних дужина јављају се и одређени недостаци, на пример:

- Јака усмереност емитованог зрака отежава аквизицију и усмеравање.
- Дизајн оптичких компоненти захтева сопствену технологију, другачију него што је то случај код RF система.

- На перформансе FSO система утичу атмосферске турбуленције, магла, јака киша, снег.

Утицај атмосферских турбуленција је можда најозбиљнији недостатак FSO система, јер ограничава радну доступност и/или узрокује изобличење таласа носиоца што није случај код RF система. Губици снаге повезани са зрачењем ласерског зрака у видљивом и ИС делу спектра могу бити узроковани апсорпцијом и расејањем гасова и честица у атмосфери. Поред тога, оптичка апсорпција која је резултат малих температурних варијација у атмосфери, доводи до даљих губитака снаге услед ширења радијуса снопа, што даље узрокује временске и просторне флукуације ласерског зрака познате као сцинтилација. Мале грешке усмеравања могу лако да доведу до ефекта бледења услед Гаусовог опадања у профилу средњег зрачења у комбинацији са великом сцинтилацијом ван осе.

FSO системи се састоје од три основна подсистема: предајника, канала и пријемника. Предајник се састоји од енкодера и модулатора који припремају информације које се шаљу на оптички сигнал. Преносни медијум између сабирног сочива предајника и пријемника назива се канал. За проблематику којом се ми бавимо, канал је део атмосфере и представља ограничавајући фактор у перформансама FSO система. Циљ пријемника је да прикупи пренесено оптичко поље и обради га тако да се реконструише послата информација. Типичан оптички пријемник се састоји од предњег пријемног сочива које фокусира светлост на оптички детектор где се оптичко поље претвара у електрични сигнал.

Оптички пријемници су у општем смислу подељени на два типа: пријемнике са директном (или снагом) детекције, који детектују само амплитуду таласа и кохерентне пријемнике који детектују сам талас (тј. амплитуду, фазу и поларизацију). Детектор обично прати постдетекциони процесор који појачава, обрађује и на крају обнавља информације са излаза детектора.

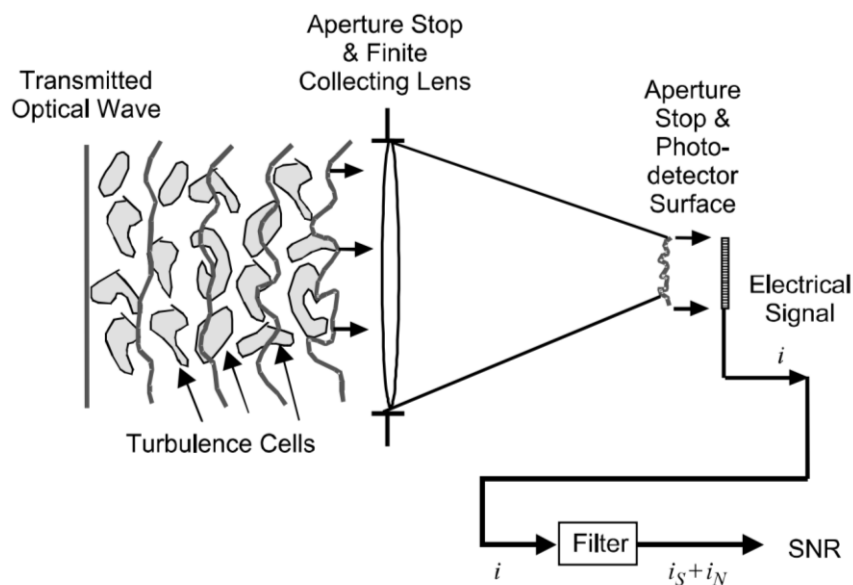
### **3.1. Оптички пријемници са директном детекцијом**

Најједноставнији тип оптичког пријемника за имплементацију је пријемник за детекцију снаге, који се такође назива пријемник за директну (или некохеренту)



детекцију. Зато што региструје само тренутну снагу примљеног поља, пријемник са директном детекцијом се користи у апликацијама у случају када се за детекцију не користи фаза оптичког поља.

Код типичног FSO системе са директном детекцијом, жељена информација се модулише интензитетом на оптичко поље зрака и преноси кроз атмосферски канал до пријемника. Сочиво пријемника сакупља део пренесеног оптичког поља, које се затим фокусира на површину фотодетектора, као што је приказано на слици 3.1. Сврха фотодетектора је да претвори фокусирано оптичко поље у електрични сигнал за обраду.



**Слика 3.1.** Систем директне детекције за дигитални сигнал. Ниво „1“ је одговарајући ниво сигнала за укључени импулс, а ниво „0“ је искључен импулс. Ниво сигнала изнад прага када је импулс искључен је лажни аларм, а ниво сигнала испод прага је када је импулс укључен.

Ипак, напоменимо да се, нажалост, оптичко поље увек детектује у присуству страних извора и шума, што је случај у целом пријемнику. На пример, позадинско зрачење ( сунце, зрачење црног тела итд.) пријемно сочиво такође сакупља и фокусира се на површину за детекцију фотографија заједно са пренесеним оптичким пољем. Позадинско зрачење које је на таласним дужинама различитим од жељеног сигнала може се елиминисати оптичким филтрирањем. Ови оптички филтери пропуштају одређене таласне дужине које одређују фотодетектовано оптичко поље. Позадинско зрачење на истој таласној дужини као и сигнал ( или унутар пропусног опсега оптичког филтера) се

обично третира као адитивно поље шума за жељено оптичко поље. Други извор буке је сам процес фотодетекције који производи унутрашње сметње, које се називају шум детектора или шум снимања. Електронски термални шум се ствара у електроници за обраду након фотодетекције. Сви извори електричне буке се третирају као адитивни деградирајући сигнали.

### 3.2. Детекција прага у одсуству турбуленција

Потреба да се утврди присуство дигиталног сигнала у системима са адитивним шумом је фундаментална за комуникациони систем. Постоји неколико техника за детекцију сигнала, које се обично ослањају на неку врсту детекције засноване на прагу (слика 3.2). Само када излаз детектора премашује постављену граничну вредност прага, кажемо да је сигнал присутан. Лажни аларми настају када сам шум премашује граничну вредност и стога се тумачи као сигнал. Међутим, ако сигнал импулса шума не премашује праг, долази до немогућности детекција. Концепти детекције прага су илустровани на слици 3.3. Појава лажних аларма и немогућности детекције су засновани на посматраној величини односа сигнала-шум (SNR).

Може се приметити да детектор на слици 3.1 прати филтер ширине  $B$ , где је пропусни опсег изабран тако да одговара фреквентном ширењу долазног дигиталног импулса сигнала. Проток струје на излазу филтера, индукован упадним оптичким таласом је :

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

где је  $i_N$  шум детектора, а  $i_s$  је струја сигнала дефинисана са:

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

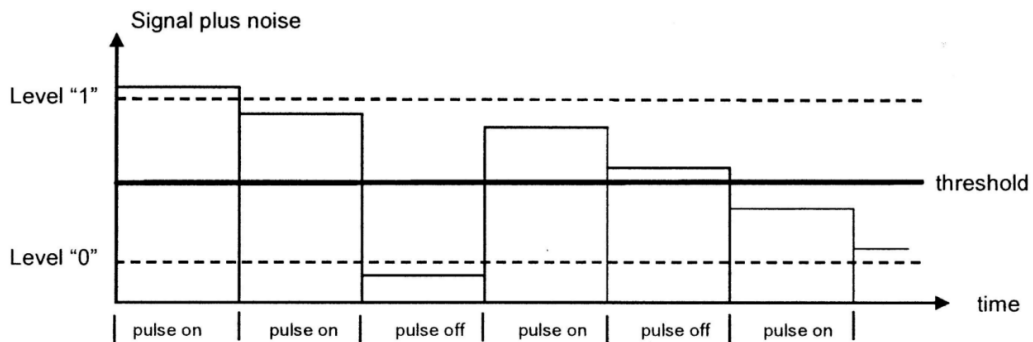
$P_s$  је снага сигнала у ватима,  $\eta$  је квантна ефикасност детектора у електронима - фотонима (изражена као константа у области детекције),  $e$  је електрични набој у кулонима,  $h$  је Планкова константа ( $h=6,63 \cdot 10^{-34}$  џул секунди), а  $\nu$  је оптичка фреквенција

у херцима. Претпостављамо да струја насумичне буке  $i_N$  на излазу из филтра има нулту средњу вредност, тако да је укупна снага буке дефинисана са:

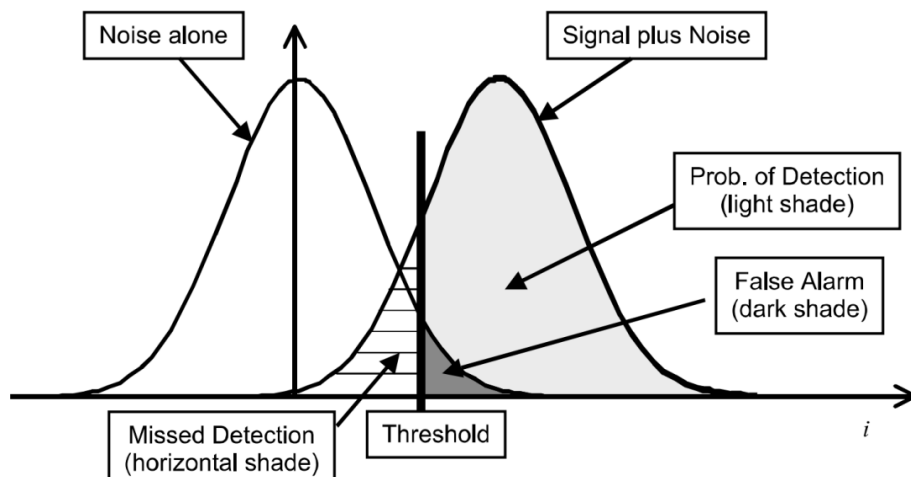
$$\sigma_N^2 = \langle i^2 \rangle - \langle i \rangle^2 = \langle i_N^2 \rangle \quad (3.3)$$

где је средња квадратна вредност шума (када се занемари позадинско светло и други извори буке):

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



**Слика 3.2.** Подешавање прага за дигитални сигнал. Ниво „1“ одговара сигналу укљученог импулса, а ниво „0“ је за искључен импулс. Ниво сигнала изнад прага када је импулс искључен је лажни аларм, а ниво сигнала испод прага када је импулс укључен је немогућност детекције.



**Слика 3.3.** Вероватноћа детекције и лажног аларма

Закључујемо да је снага струје детектора пропорционална струји (или снази) сигнала. Излазни SNR (у одсуству оптичке турбуленције) дефинишемо односом струје сигнала детектора и средње квадратне струје шума (rms)  $\sigma_N$ , што даје:

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

Пошто смо занемарили позадинско осветљење, струју цурења и термални шум, SNR у изразу (3.5) се назива ограниченим шумом (фотонским шумом).

Када су нивои сигнала ниски у режиму бројања фотона, уобичајено је да се користи Пуасонова статистика за описивање случајног шума када су други извори шума занемарљиви. Овде ћемо претпоставити да је средњи број фотона довољно велик да се Гаусова статистика може применити за све изворе шума. Па SNR можемо изразити као:

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

А, функција густине вероватноће амплитуде (PDF) за случајни шум је описана Гаусовом дистрибуцијом нулте средње вредности:

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

Укупна излазна струја  $i$  која излази из филтра садржи и сигнал и шум и има средњу вредност  $i_s$ , па је укупна струја моделована Гаусовом PDF функцијом чија средња вредност није нула.

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

Вероватноћа детекције и вероватноћа лажног аларма дате су, респективно, са:

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

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

где је  $\operatorname{erfc}(x)$  комплементарна функција грешке.

SNR је уобичајени показатељ перформанси система, ипак у дигиталној комуникацији бољи увид у карактеристике система даје вероватноћа грешке, која се назива још и вероватноћа грешке по биту (BER), а зависи од SNR-а. Најосновнији облик импулсне модулације у дигиталним комуникацијама је *on-off-keying* (OOK). Сваки битни симбол се преноси пулсирањем извора или укључивањем или искључивањем пулсирања током трајања сваког бита. Услед случајног шума, пренети бит 0 може бити погрешно детектован као бит 1, што означавамо са  $\operatorname{Pr}(1|0)$ , док ако се бит 1 погрешно пренесе са битом 0, означава се као  $\operatorname{Pr}(0|1)$ . Ако претпоставимо да ће сваки симбол бити послат са једнаком вероватноћом, BER израчунавамо помоћу:

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

где је  $\operatorname{SNR}_0$  дефинисан изразом (3.6), и претпостављено је да је  $i_T = 0.5i_s$ . Овде је  $\operatorname{Pr}(1|0)$  означава вероватноћу лажних аларма, а  $\operatorname{Pr}(0|1)$  означава вероватноћу неостварене детекције дефинисане са  $1 - \operatorname{Pr}_d$ .

Вероватноћу промашаја (неостварене детекције) испод посматраног прага дефинишемо са  $\operatorname{Pr}_{\text{fade}} = 1 - \operatorname{Pr}_d$ , где је  $\operatorname{Pr}_d$  вероватноћа детекције (3.9). Вероватноћа неостварене детекције даје процену колико је вероватно да ће излазна струја  $i$  из детектора пасти испод прописаног прага  $i_T$ . Повезане величине од интереса су: учесталост пренапона и учесталост затамњивања излазне струје, које су идентичне са учесталошћу позитивних и негативних прелаза нивоа прага, односно нагиба струје  $i$ .

Рајс је, за стационарни процес показао да је учесталост и позитивних и негативних прелазака граничне вредности  $i_T$  излазне струје дата очекиваним бројем прелазака у секунди дефинисана са:

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

где је  $p_{s+n}(i, i')$  здружена PDF функција излазне струје  $i$  и њеног временског извода  $i'$ . Рајс је такође показао да су временски деривати случајног процеса и сам процес неповезани, али не и нужно независни. Међутим, временски дериват Гаусовог процеса је још један Гаусов процес и зато је статистички независан од првобитног процеса.

Излазна струја система директне детекције има Гаусову расподелу (3.8), и здружени PDF струје  $i$  и њеног временског извода  $i'$ , па ја продукт Гаусове маргиналне расподеле.

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

где је:

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

Величина  $S_N(\omega)$  у (3.14) означава спектар снаге струје шума, а  $\omega$  представља угаону фреквенцију.

Овде је са  $b_0 = \sigma_N^2$  означена снага шума, а средна величина  $b_2$  је аутокорекциона функција временског извода. На основу (3.12) и (3.13) добија се:

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

где је  $v_0 = \sqrt{b_2/b_0}/2\pi$  тзв. квази фреквенција, односно фреквенција слабљења, када је  $i_T = i_s$ , тако да  $v_0$  даје меру ефикасног пропусног опсега  $i$ .

Када је струја сигнала  $i_s = 0$  очекивани број промашаја се своди на величину вероватноће појаве лажних аларма (FAR).

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

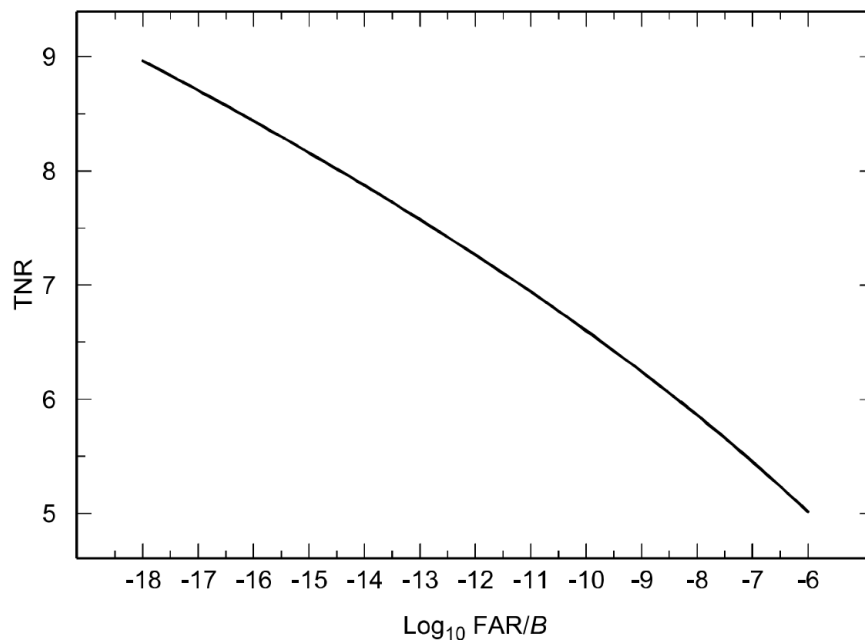
Напоменимо да вероватноћа појаве лажних аларма (3.10) и FAR (3.16) зависе од односа прага и буке (TNR) дефинисаног као:

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

Обично се жељени FAR (3.16) или вероватноћа лажног аларма (3.10), наводи у спецификацијама FSO комуникационих система, како би се предефинисао одређени ниво перформанси. TNR је функција FAR-а дата помоћу:

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

Ако је предефинисана вредност вероватноће лажног аларма, онда једначина (3.10) представља TNR као функцију  $Pr_{fa}$ . На слици 3.4 TNR (3.18) дат је као функција FAR/B. Ако одредимо  $FAR/B=10^{-12}$ , из (3.18) следи да је  $TNR=7,26$ .



Слика 3.4. Однос прага сигнала и шума (TNR) као функција FAR/B

### 3.3. Статистика сметњи у оптичком каналу

Области примене FSO система су бројне, пример за то је и употреба у војне сврхе, ипак сцинтилација изазвана простирањем зрака кроз атмосферу знатно деградира перформансе система. Конкретно, сцинтилација може довести до губитка снаге на пријемнику и на крају до слабљења пријемног сигнала испод прописаног прага. Поузданост FSO система може се добити из функције густине вероватноће (PDF) за насумично ослабљени сигнал зрачења. На основу оваквог PDF модела може да се израчуна вероватноћа појаве слабљења сигнала (вероватноћа неуспешних детекција), очекивани број слабљења сигнала испод прописаног прага као и просечно време у коме сигнал остаје испод прага а које се назива средње време слабљења.

Ако претпоставимо да су у моделу расподеле фактори расејања од великих препрека  $X$  и расејања од малих препрека  $Y$ , приликом формирања нормализованог модела расејања  $I$ ,  $I=XY$ , статистички независни и да је сваки од њих представљен помоћу Gamma расподеле, тј.:

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

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

где су  $\alpha$  и  $\beta$  позитивни параметри директно повезани са сцинтилацијама великих и малих размера оптичког таласа дефинисани помоћу:

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

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

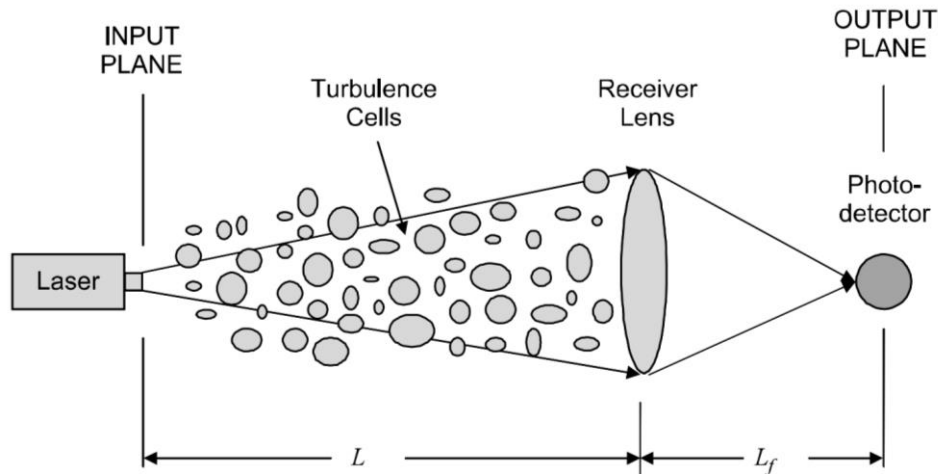
На тај начин, PDF за композитни модел расејања (3.19) се моделује помоћу Gamma-Gamma расподеле.



За случај коначне димензије отвора пријемника (слика 3.5), уобичајено је да претпостављамо да је PDF модел расејања у равни фотодетектора на растојању  $L+L_f$  од предајника истог типа као и она у равни зенице на удаљености  $L$  од предајника. Тако можемо закључити да се флукуације снаге у случају пријема сигнала код великог отвора сочива пријемника и расејање у равни таласног фронта могу моделовати преко исте PDF функције. У следећој анализи ћемо претпоставити да је зрачење у равни таласног фронта, узимајући у обзир промену средњег зрачења и флукуације снаге (варијанса флукса).

На основу горе реченог закључујемо да је примарна PDF под свим условима флукуације у равни фотодетектора моделована помоћу Gamma-Gamma PDF-а.

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



Слика 3.5. Геометрија ширења Гаусовог снопа на растојању  $L$  лево од танког Гаусовог сочива стварне жижне даљине  $F_G$  и ефективног радијуса преноса  $W_G$ .

Овде узимамо општу вредност за средњу вредност расејања,  $\langle I(0, L+L_f) \rangle \neq I$  а  $K_v(x)$  представља модификовану Беселова функцију другог реда. Код писања овог израза занемарићемо сваку могућу грешку усмеравања. Иначе, PDF модел расејања који се најчешће користи за случај слабих флукуација зрачења је логаритамски модел.

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

где је  $\sigma_I^2(0, L+L_f) = \sigma_I^2(D_G)$  варијанса флуksа у равни детектора која показује зависност од пречника пријемника  $D_G$ .

У овом случају када је однос сигнал-шум (SNR), на излазу детектора, довољно висок да статистика фединга може бити у потпуности заснована на статистици зрачења пријемног сигнала, не морамо да правимо разлику између система пријемника са директном детекцијом и са кохерентном детекцијом.

На основу PDF модела за флукуације снаге зрачења  $PI(I)$ , вероватноћа појаве слабљења сигнала (probability of fade), се дефинише као проценат времена у коме је снага зрачења таласа испод неке прописане граничне вредности  $I_T$ . Може се рећи да је вероватноћа појаве слабљења сигнала, као функција нивоа прага, дефинисана кумулативном вероватноћом

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

За логнормални модел PDF (3.22), резултујућа вероватноћа појаве слабљења сигнала се може представити у облику:

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

где  $\operatorname{erf}(x)$  представља функцију грешке. Да би смо дошли до овог израза увели смо параметар прага слабљења:

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

Параметар слабљења  $F_T$  дат је у (dB), и представља ниво децибела испод средњег зрачења на оси ако је постављени праг  $I_T$ .

За Gamma-Gamma расподелу (3.21), одговарајућа кумулативна расподела је (3.12).

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

где  ${}_1F_2$  представља генерализовану хипергеометријску функцију. Иако је (3.26) тачан резултат, софтвер може довести до грешке у израчунавању генерализоване хипергеометријске функције за одређене аргументе (посебно за велике вредности аргумената). Да би се избегла ова могућност, боље је, у неким случајевима, PDF нумерички интегрисати у једначину (3.21).

На сликама 3.6-3.8 показана је вероватноћа слабљења сигнала, повезана са Гаусовим снопом, као функција параметра прага слабљења  $F_T$ . Резултати су представљени и за логнормални модел и за Gamma-Gamma PDF модел, коришћен је Kolmogorov power-law спектар. Вероватноће слабљења су разматране на усмереном пријемнику ( $D_G \cong 0$ ), као и на пријемнику са великим отвором бленде  $D_G=4\text{cm}$ , где је разматран и ефекат усредњавања. У нашем случају претпоставља се да је сцинтилација изазвана лутањем зрака занемарљива. Параметри  $\alpha$  и  $\beta$  за Gamma-Gamma PDF дефинисани су општим једначинама (3.20). Када се узме у обзир ефекат усредњавања отвора бленде, параметри су изражени помоћу:

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

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

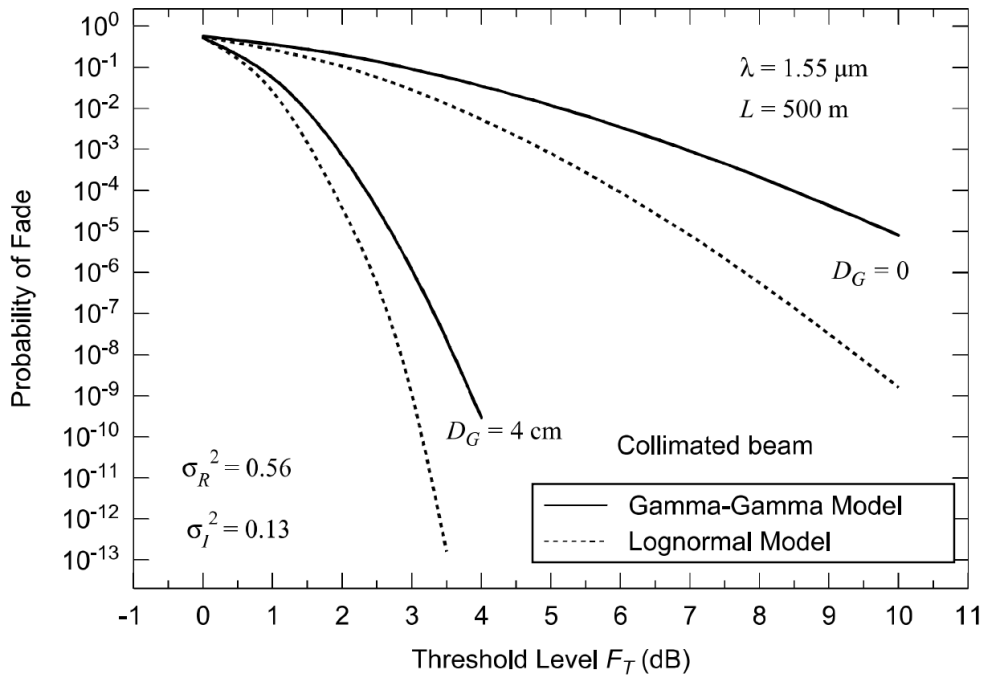
Варијанса флукса флукуација означена је са:

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

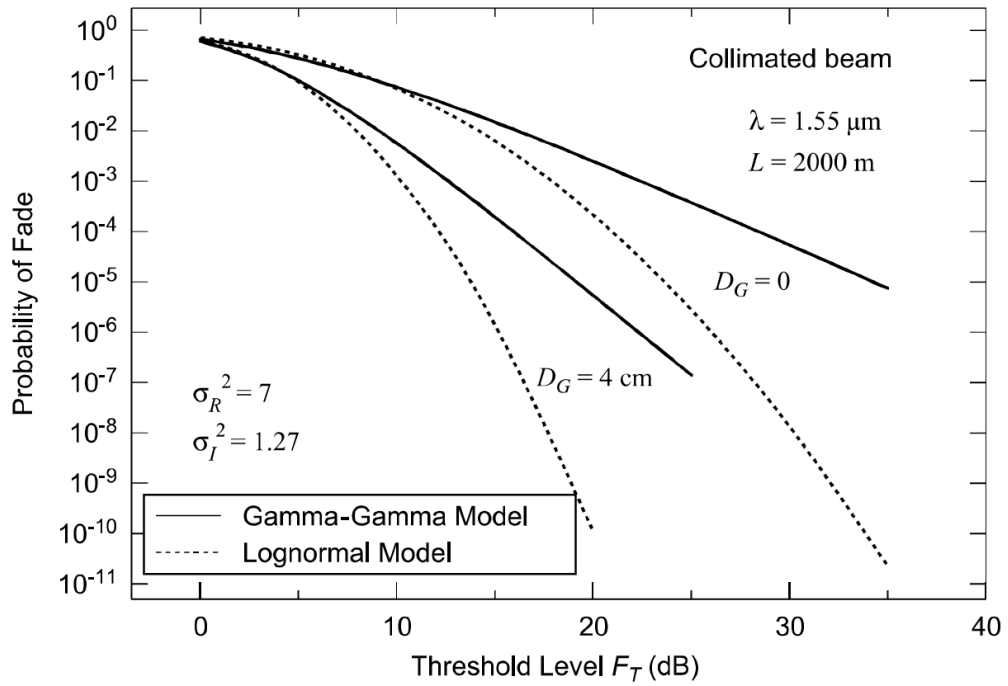
где су расејања од препрека већих димензија и расејања од препрека мањих димензија код log-зрачења дефинисана помоћу:

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

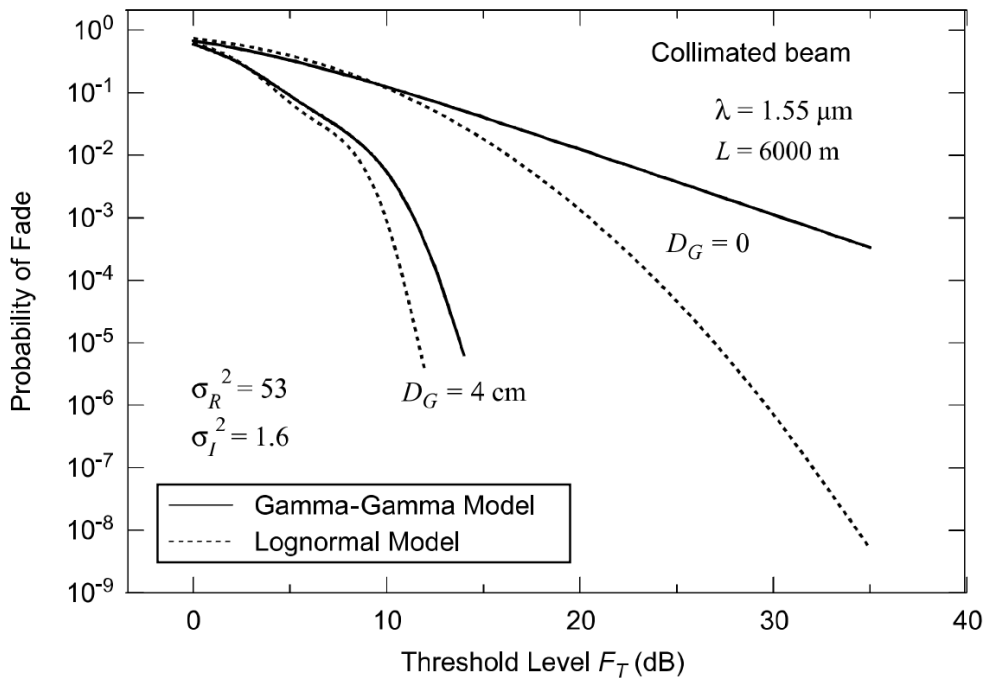
$$\sigma_{\ln Y}^2(D_G) = \frac{0.51 \sigma_B^2 (\Omega_G + \Lambda_1) (1 + 0.69 \sigma_B^{12/5})^{-5/6}}{\Omega_G + \Lambda_1 + 1.20 (\sigma_R / \sigma_B)^{12/5} + 0.83 \sigma_R^{12/5}} \quad (3.30)$$



Слика 3.6. Вероватноћа слабљења сигнала као функција испод нивоа прага у условима слабе флукуације зрачења  $\sigma_R^2 < 1$ , претпоставља се да су унутрашњи и спољашњи опсежи  $l_0=0$ ,  $L_0=\infty$ , а  $D_G$  је пречник отвора пријемника.



Слика 3.7. Исто као и слика 3.6. осим умерених услова флукуација зрачења  $\sigma_R^2 > 1$ .



Слика 3.8. Иста као и слика 3.6. осим јаких услова флукуације зрачења  $\sigma_R^2 \gg 1$

Параметри снопа сигнала дати су у (3.29) и (3.30).  $\sigma_R^2$  представља Rytov-ову варијансу за раван талас, а  $\sigma_B^2$  је Rytov-ова веријанса Гаусовог снопа. Осим за велики отвор бленде, последњи параметар се може апроксимирати изразом:

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

Да бисмо дошли до резултата на сликама 3.6-3.8, коришћене су различите дужине путање  $L$ , за разматране вредности  $C_{n^2} = 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ ,  $l_0=0$ ,  $L_0 \infty$ ,  $W_0=1 \text{cm}$ ,  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ . Претпостављана дужина пута на слици 3.6 је  $L=500 \text{m}$ , што води до  $\sigma_R^2=0.56$  и  $\sigma_I^2=0.13$ , и то у равни фокуса пријемника. Ове вредности су карактеристичне за услове слабих флукуација. Иначе, за дату вредност прага слабљења, Lognormal модел предвиђа ниже (оптимистичније) вероватноће слабљења  $F_T$ , и то у поређењу са Gamma-Gamma моделом. За оба модела, пријемник са великим отвором бленде показује значајна побољшања у смислу предвиђене вероватноће слабљења. Режим фокусирања приказан је на слици 3.7 на којој је  $L=2000 \text{m}$ . Резултујућа Rytov-ова варијанса у равни зенице и индекс сцинтилације су  $\sigma_R^2=1.7$ ,  $\sigma_I^2=1.27$ , Lognormal модел је на овој слици приказан ради поређења. Вероватноћа слабљења је  $10^{-6}$ , код Gamma-Gamma модела и отвора пријемника  $D_G=4 \text{cm}$  постиже се стање слабих флукуација, слика 3.6, и то када је  $F_T \cong 23 \text{dB}$  испод средње вредности зрачења. Режим засићења је представљен на слици 3.8 где је  $L=6000 \text{m}$ . Индекси Rayatov-љеве варијансе и сцинтилације дати су:  $\sigma_R^2=53$  и  $\sigma_I^2=1.6$ , респективно. Да би се компензовала сцинтилација, потребно је веће фокусирање отвора (већи отвор), за услове јаке турбуленције ( $\sigma_R^2 \gg 1$ ). Међутим на слици 3.8 се види да се вероватноћа слабљења  $10^{-6}$  може постићи са ј  $F_T \cong 15 \text{dB}$  испод средње вредности зрачења. Ови резултати се лако могу проширити на опште случајеве.

Број негативних (или позитивних) прелаза прописаног прага карактерише очекивани број слабљења сигнала у јединици времена  $\langle n(I_T) \rangle$ . Општа дефиниција очекиваног броја слабљења сигнала, дата у једначини (3.12), је применљива и у овом случају. Када посматрамо Lognormal-ни модел расподеле, почиње се од здруженог PDF-а (3.13) за Гаусову расподелу и врши се трансформација:

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

Одавде се изводи Јакобиан-ова трансформација  $J=I/(4I^2)$ . Као последица тога, здружена PDF зрачења и њеног временског извода дати су помоћу:

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

Овде узимамо у обзир  $\sigma_I^2 \cong 4, \sigma_I^2 = 4b_0$ ,  $\langle i \rangle = -\sigma_I^2$ , да је валидно у условима слабих флукуација. Користећи (3.33) у (3.12) добијамо очекивани број слабљења:

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

где је  $v_0$  квази фреквенција дата као:

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

За Гамма-Гамма дистрибуцију здружени PDF дат је у форми  $p_{I,I'}(I,I') = p_I(I) p_{I'}(I'|I)$ . Закључујемо да расподеле зрачења и њихови временски изводи нису статистички зависни ни за Lognormal ни за Гамма-Гамма расподелу. Међутим за Гамма-Гамма модел, облик условног PDF-а за  $I'$  је непознат, али се сматра да није Гаусов. Ипак засновано на физичком искуству може се подразумевати да је приближно Гаусов PDF са нултом средњом вредношћу када је  $\alpha \rightarrow \infty$  и  $\beta \rightarrow \infty$  (3.9). У овом случају је:

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

Одакле закључујемо да је:

$$\langle n(I_T) \rangle = \frac{2\sqrt{2\pi\alpha\beta\nu_0\sigma_I}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{\alpha\beta I_T}{\langle I \rangle} \right)^{(\alpha+\beta-1)/2} K_{\alpha-\beta} \left( 2\sqrt{\frac{\alpha\beta I_T}{\langle I \rangle}} \right) \quad (3.37)$$

Овде је  $b = -\langle I \rangle B_I''(0)/4$ , а квази фреквенција је:

$$\nu_0 = \frac{1}{\pi\sigma_I} \sqrt{\frac{b}{\langle I \rangle}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\frac{B_I''(0)}{B_I(0)}} \quad (3.38)$$

Закључићемо да квази фреквенција  $\nu_0$  представља стандардну девијацију нормализованог временског спектра зрачења (израженог помоћу PDF-а). На крају максимална ширина спектра се може проценити на одприлике  $3 \nu_0$ .



## 4. БЕЖИЧНИ ОПТИЧКИ КОМУНИКАЦИОНИ СИСТЕМИ

У овом поглављу биће анализирани перформансе бежичног оптичког телекомуникационог система применом генералних модела турбуленције у каналу. Да би се дошло до новог аналитичког модела канала са турбуленцијом за описивање карактеристика FSO система биће изведени изрази у затвореном облику за функцију густине вероватноће расподеле (PDF) амплитуде сигнала у каналу са турбуленцијом. Графички ће бити представљени резултати за ABER за разне модулационе формате. Биће представљени изрази на основу којих је могуће одредити перформансе система чији пријемници користе MRC и SC диверзити технике комбиновања како би се смањио утицај турбуленције у оптичком каналу и грешке позиционирања на перформансе система. Анализа ефикасности преноса и квалитета сигнала на пријему биће извршена за случајеве примене одговарајућих модулационих формата при преносу.

### 4.1. Анализа перформанси FSO система заснована на новом Gamma-Chi-квадрат PDF моделу сцинтилације

Једно од главних питања у процесу анализе перформанси бежичног оптичког преноса (FSO) је увођење аналитички тракабилног модела функције густине вероватноће (PDF) за случајну променљиву амплитуде сигнала који флукутира услед дејства атмосферски индукованих турбуленција. До сада је у литератури предложено много различитих модела FSO канала за моделирање утицаја различитих нивоа турбуленције: Longnormal-Rician модел [181], K модел [182], I-K модел [183], Gamma-Gamma модел [184], модел Malaga [185], двоструки Weibull модел [186], двоструки генерализован Gamma модел [184]. Сви ови модели дају резултате који се поклапају са мерењима за широк спектар услова турбуленција, с обзиром да се сви формирају

узимајући у обзир утицај вртложних турбуленција великих и малих расејања (large-scale, small-scale). У [187], [188] показно је како се за Lognormal-Rician расподелу поклапају подаци добијени на основу симулације са експерименталним подацима. Ипак, у [188] изрази за PDF и CDF Lognormal-Rician модела су апроксимирани, јер се њихови облици не могу аналитички изразити у затвореним облицима. У [189]-[194] је представљен Rician (Chi-square) модел, као веома ефикасан модел за моделовање широког спектра вртложних турбуленција (eddy effect). У складу са предходно реченим, предложен је аналитички Gamma-Chi-square (Gamma-Rician) PDF композитни модел, који је добијен као комбинација Gamma модела и Chi-square (Rician) модела. На основу анализираних резултата [188], [189], [195], [196], [197] закључује се да је Gamma модел поуздан за анализу малих расејања (small-scale) под утицајем вртложне турбуленције, док се Chi-square (Rician) модел показао као ефикасан за описивање ефеката великих расејања (large-scale) изазваних вртложном турбуленцијом. Даље је овај PDF модел генерализован, па су у обзир узети ефекти услед погоршања перформанси система због неусклађености индукваног фединга, и то кроз увођење модела грешке усмеравања у новодобијену Gamma-Chi-square расподелу, слично као у [198]-[201]. Да би се извршила свеобухватна анализа перформанси FSO преноса за случај употребе ООК (on-off keying) модулационог формата за дати новоуведени модел канала, посматраћемо вредности средње вероватноће грешке по биту (ABER) и анализирати их у функцији параметара снаге преносног система. За оба случаја, у присуству атмосферских турбуленција, са и без грешке позиционирања, ABER изрази на пријемној страни биће представљени у аналитички затвореном облику. Аналитички добијени резултати ће бити верификовани са резултатима добијеним на основу Monte Carlo симулације

#### 4.1.1. Модел атмосферске турбуленције

Већ смо напоменули добро познати приступ у теорији сцинтилације [195] где се интензитет зрачења примљеног оптичког таласа добија као производ интензитета зрачења која се јављају у каналу услед ефеката вртложних турбуленција великих и малих размера расејања, тј.  $I_a = I_x I_y$ , уз претпоставку да су  $I_x$  и  $I_y$  статистички независни случајни процеси. Углавном, на бежични оптички сигнал утиче варијација индекса преламања што доводи до интеракције оптичког сигнала и вртложних турбуленција, што даље резултира фазним и амплитудским флукуацијама пријемног сигнала [185], [195], [202].

У складу са теоријом, претпоставићемо да у Gamma-Chi-square каналу делују симултано флукутације малих и великих размера. .

Chi-square модел расподеле амплитуде оптичког сигнала дат је следећим изразом [189], [203] :

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

где  $I_x$  представља амплитуду оптичког сигнала, параметар  $K$  дефинише однос снаге LOS (Line-of-sight) компоненте и расејаних компоненти зрачења [189],  $\Omega_p$  означава укупну пријемну снага сигнала, док је  $I_0$  (\*) модификована Bessel-ова функција  $\nu$ -тог реда прве врсте [204, Eq.8.431].

Gamma модел расподеле амплитуде оптичког сигнала дат је следећим изразом [195]:

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

где  $I_y$  представља амплитуду оптичког сигнала,  $\Gamma$ (\*) представља Gamma функцију [204, Eq.8.310]. Параметар  $\alpha$  је параметар атмосферске турбуленције који представља ефективни број вртлога малих размера у окружењу расејања. Ово је параметар атмосферске турбуленције који се за ширење равних таласа у случају нулте унутрашње скала може изразити као [195], [201]:

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

где  $\sigma_R^2$  представља Ritov-у варијансу која се користи за одређивање интензитета оптичког сигнала у случају атмосферских турбуленција, а дефинисана је као:

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

Параметар  $C_n^2$  означава индекс преламања оптичког сигнала који се користи као мера турбуленције снаге. За хоризонталну путању пропагације, параметар се сматра константним са средњим вредностима од  $10^{-17}$  до  $10^{-13} m^2/3$ , у зависности од тога да ли посматрамо оптичке канале са слабом или јаком турбуленцијом. Параметар  $k$  представља оптички таласни број, дефинисан као  $k=2p/\lambda$ , где  $\lambda$  означава таласну дужину,  $L$  представља растојање између предајника и пријемника, односно дужину простирања оптичког сигнала.

Користећи релацију  $I_a = I_x I_y$ , PDF за модел атмосферске турбуленције се може добити као:

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

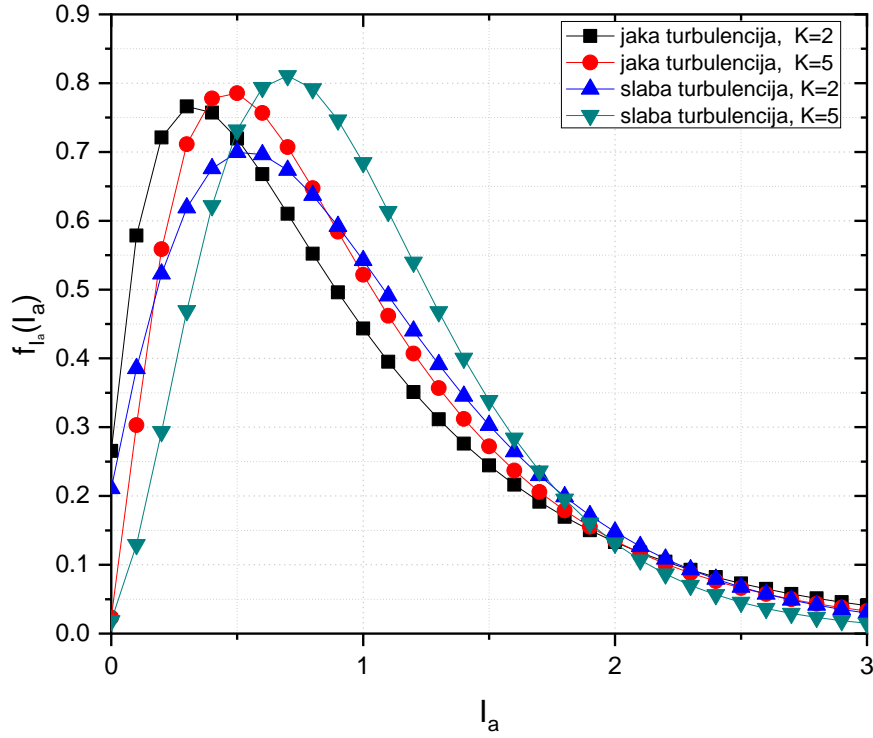
Заменом једначина (4.1) и (4.2) у једначину (4.5) и представљањем модификоване Bessel-ове функције првог реда  $I_\nu(*)$  у једначини (4.1) у облику бесконачног реда [204, Eq.8.445], као и коришћењем решења резултујућег интеграла датог у [204, Eq.3.478.4], добићемо израз затвореног облика за PDF модел за Gamma-Chi-square расподелу у облику [207]:

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

где  $K_\nu(*)$  представља модификовану Bessel-ову функција  $\nu$ -тог реда, друге врсте [204, Eq.8.432].

Тренутни однос сигнал-шум (SNR) у каналу се може извести на следећи начин у функцији математичког очекивања посматраног PDF [203], [204]:

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



Слика 4.1. PDF за Gamma-Chi-square модел оптичког канала посматран за случајеве слабе и јаке турбуленције

На сличан начин се у функцији математичког очекивања добијеног израза за PDF може представити параметар  $\mu_a$ , који представља тренутну вредност електричног односа SNR:

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

где  $P_T$  представља просечну пренешену оптичку снагу, параметар  $R$  означава одзив детектора, а  $\sigma_N$  представља варијансу AWGN шума у каналу.

Коришћењем једначина (4.6) и (4.7) и применом неких математичких манипулација може се изразити PDF за тренутни SNR у облику [207]:

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

Слика 4.1 приказује PDF за новоизведени модел зрачења, и то за различите вредности фактора  $K$  (за јаку и слабу турбуленцију).

#### 4.1.2. Модел грешке позиционирања

Поред атмосферских турбуленција, грешка позиционирања је још један фактор који може да утиче на слабљење сигнала у FSO систему, и то услед неусклађености усмерења између предајног ласера и пријемног детектора. Non-zero Boresight модел PDF оптичког сигнала описује грешку позиционирања за коју се сматра да укључује радијус оптичког зрака на одређеној удаљености од предајника, полупречник отвора кружног детектора и варијансу подрхтавања и представљен је у облику [198], [200], [205], [206]:

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

Параметар  $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$  представља максималан удео усмерене снаге, где је  $\text{erf}(\cdot)$  функција грешке [204, Eq.8.250], параметар  $v = \sqrt{\pi} a / (\sqrt{2} w_L)$  и где  $a$  представља полупречник отвора кружног детектора, док је  $w_L$  радијус оптичког зрака на растојању  $L$  од предајника. Параметар  $\xi = w_{Leq} / (2\sigma_s)$  представља однос еквивалентног полупречника снопа на пријемнику  $w_{Leq}$ , и стандардног показивања грешке померања при девијацији (jitter) на пријемнику  $\sigma_s$ , где је  $w_{Leq}^2 = w_L^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$ .

Користећи исти поступак као у [198], и користећи релацију  $I = I_a I_p$  за овај модел грешке позиционирања нова PDF се може добити на основу:

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

Заменом једначина (4.6) и (4.10) у једначину (4.11) и представљањем модификоване Bassel-ове функције другог реда  $K_v(\cdot)$  преко Мејјер G функције као у [204, Eq.9.34.3], као и коришћењем решења резултујућег интеграла датог у [208, Eq.07.34.21.0082.01], добија се израз за PDF за Gamma-Chi-square модел са грешком позиционирања у облику [207]:

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

У табели 4.1 је дат број чланова суме које треба сабрати да би се постигла жељена тачност израза. Прорачун је извршен за параметре:  $\Omega_p=1$ ,  $\xi=1.25$ ,  $A=0.0197921$ ,  $t=0.1$ . Као што се види у табели, повећање фактора  $K$  повећава број чланова суме које треба сабрати да би се постигла тачност на 5-тој значајној цифри.

Атмосферске турбуленције	К фактор		
	K=2	K=4	K=6
$\alpha=4$ (јака)	10	15	20
$\alpha=7$ (средња)	10	18	20
$\alpha=19$ (слаба)	15	20	30

**Табела 4.1.** Број чланова суме које треба сабрати у изразу за PDF у једначини (4.12) да би се постигла тачност на 5-тој значајној цифри.

Коришћењем једначине (4.12) након неких математичких манипулација израз за PDF тренутног SNR-а у присуству грешке позиционирања се може представити у облику [207]:

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

Средња вероватноћа грешке по биту, ABER, у функцији SNR-а за оптички сигнал на пријемнику који се преноси FSO системом са ООК модулационом шемом, може се израчунати на основу [209], [210]:

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

где је са  $\text{erfc}(\cdot)$  означена комплементарна функција грешке [204, Eq.8.250.4] а  $f_\gamma(\gamma)$  представља PDF за тренутни SNR пријемног сигнала.

Заменом једначине (4.12) у једначину (4.14), а затим представљањем  $\text{erfc}(\cdot)$  помоћу Мејјер G функције као у [211, Eq.06.27.26.0003.01] и модификоване Bessel-ове функције друге врсте  $K_\nu(\cdot)$  преко Мејјер G функције као у [204, Eq.9.34.3] добијамо израз ABER за атмосферске турбуленције Gamma-Chi-square каналног модела као функцију просечне оптичке снаге преноса  $P_T$ , у облику:

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

Заменом једначине (4.13) у једначину (4.14) и представљањем  $\text{erfc}(\cdot)$  Мејјер G функцијом као у [211, Eq.06.27.26.0003.01], као и коришћењем решења добијеног интегралом према [208, Eq.07.34.21.0013.01], изводимо ABER израз за грешку позиционирања за Gamma-Chi-square канални модел у функцији просечне пренете оптичке снаге  $P_T$ , у облику :

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

## 4.2. Анализа перформанси FSO система заснована на новом осенчаном Chi-квадрат PDF моделу сцинтилације

У овом поглављу ћемо ставити акценат на моделовање ефеката вртложних турбуленција малих размера расејања,  $I_\gamma$ , моделујући овај случајни процес помоћу густине расподеле вероватноће турбуленције који је предложен у раду [212]:



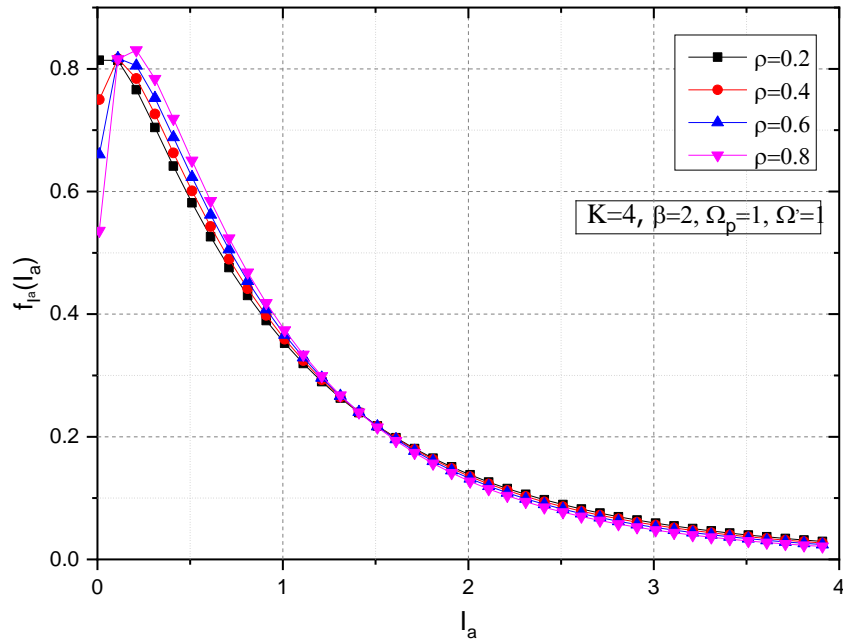
$$f_{I_y}(I_y) = \left( \frac{g\beta}{g\beta + \Omega'} \right)^\beta \frac{1}{g} e^{-\frac{I_y}{g}} {}_1F_1 \left( \beta, 1, \frac{\Omega' I_y}{g(g\beta + \Omega')} \right), \quad I_y > 0 \quad (4.17)$$

где параметар  $\beta$  означава интензитет турбуленције у каналу, параметар  $g$  ( $g=2b_0(1-\rho)$ ) означава укупну снагу расејаних компоненти сигнала, параметар  $b_0$  означава средњу снагу расејаних компоненти сигнала, док параметар  $\rho$ , ( $0 \leq \rho \leq 1$ ), означава снагу расејаних компоненти сигнала спрегнутих са LOS компонентом сигнала. Параметар  $\Omega'$  ( $\Omega' = \Omega + 2b_0\rho + 2\sqrt{2b_0\rho\Omega} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$ ), означава средњу снагу оптичког сигнала, где параметар  $\Omega$  представља удео средње снаге LOS компоненте сигнала, док  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  означавају детерминистичке фазе сигнала LOS компоненте и компоненте сигнала која је спрегнута са LOS компонентом.

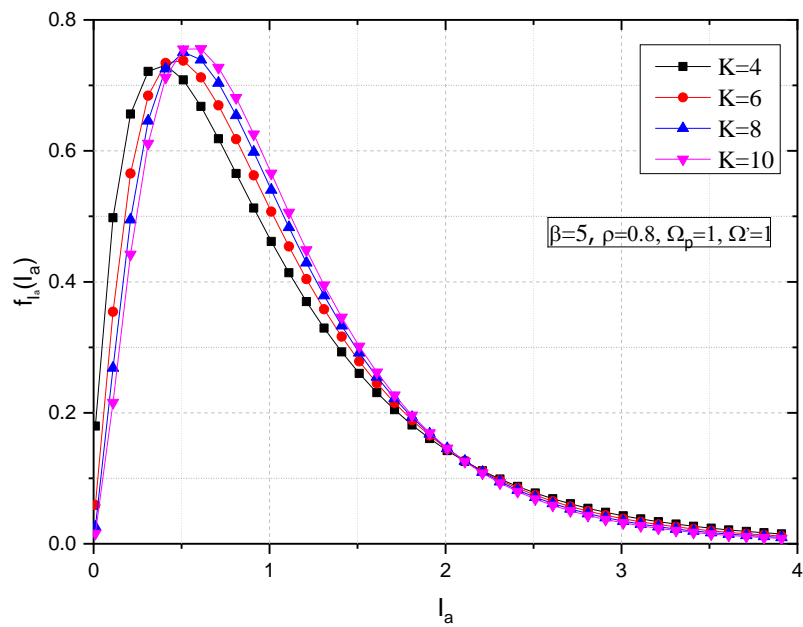
Након замене једначина (4.17) и (4.1) у (4.5) и представљањем модификоване Bessel-ове функције првог реда  $I_\nu$  (\*) у једначини (4.1) у облику бесконачног реда [204, Eq.8.445], као и коришћењем решења резултујућег интеграла датог у [204, Eq.3.478.4], добићемо израз затвореног облика за PDF модел за осенчану Chi-квадрат расподелу у облику:

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

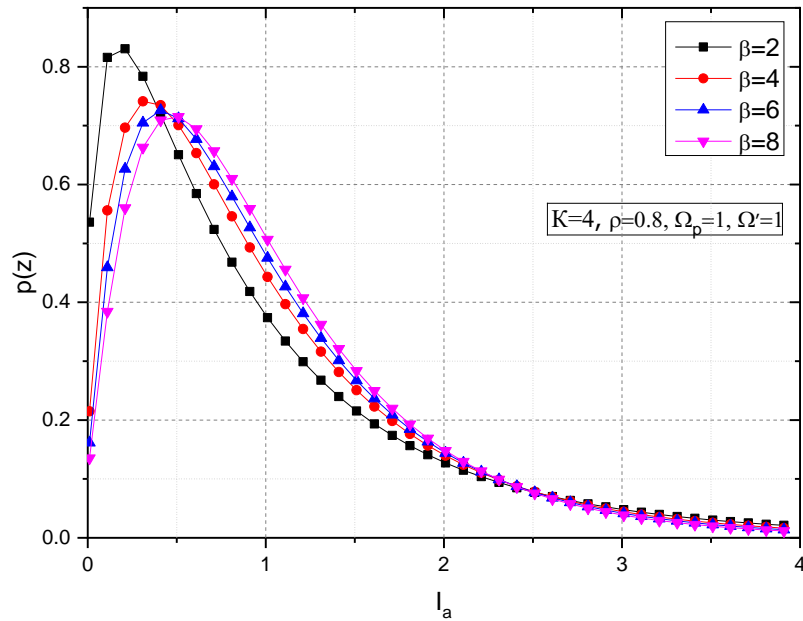
Овај резултат представља значајан допринос дисертацији јер овакав модел расподеле турбуленције у каналу до сада није разматран у литератури, а представља генерални модел који се постављањем одговарајућих вредности параметара може свести на досада познате моделе расподеле. На графицима 4.2, 4.3 и 4.4 приказане су PDF вредности интензитета сигнала који се преноси кроз осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за различите вредности параметара система.



Слика 4.2. PDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала



Слика 4.3. PDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за случајеве различитих интензитета сигнала

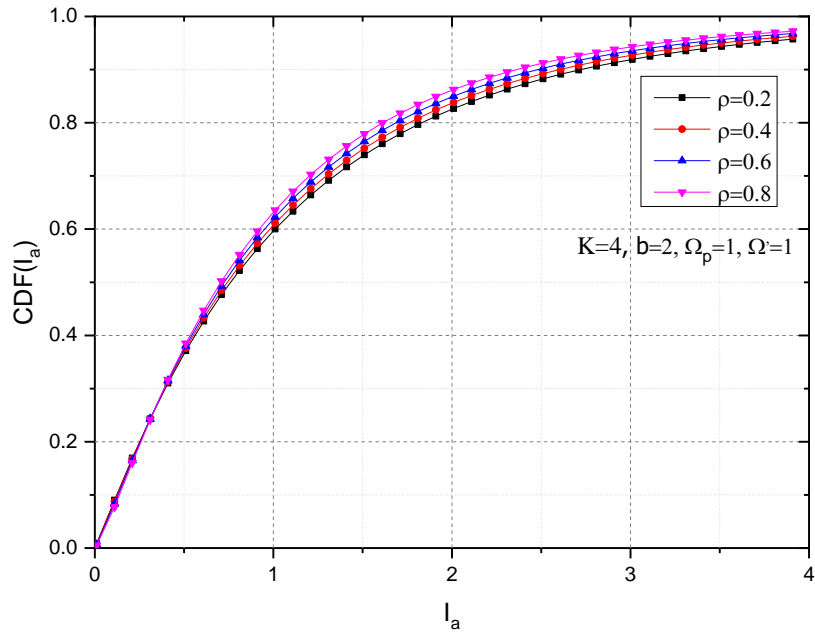


Слика 4.4. PDF за осенчани Chi-квadrat модел оптичког канала посматран за случајеве слабе и јаке турбуленције

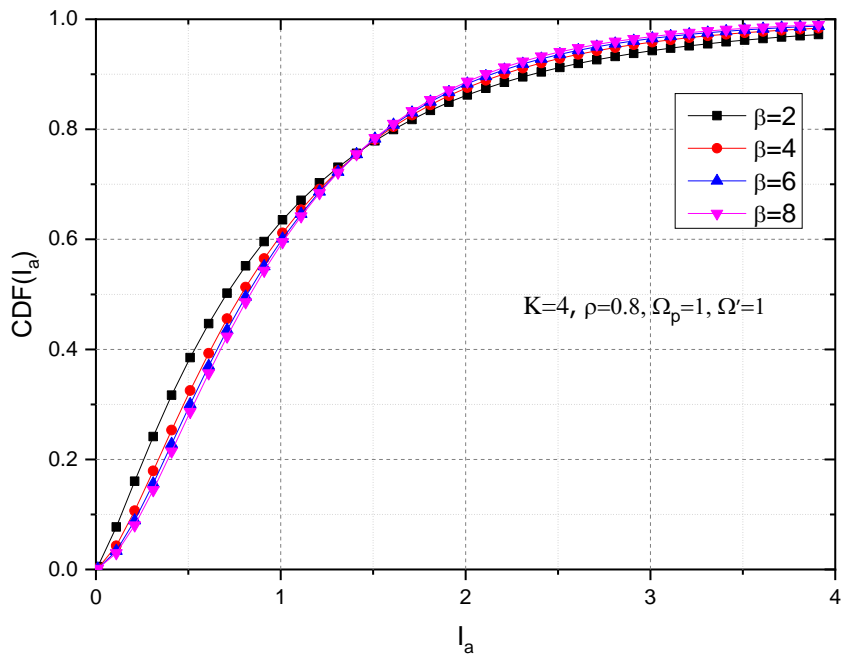
На основу изведене једначине (4.18) могуће је одредити следећу значајну меру перформанси за изведени модел оптичког канала - кумулативну функцију вероватноће, CDF (Cumulative distribution function), у затвореном облику представљаном помоћу две бесконачне суме:

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

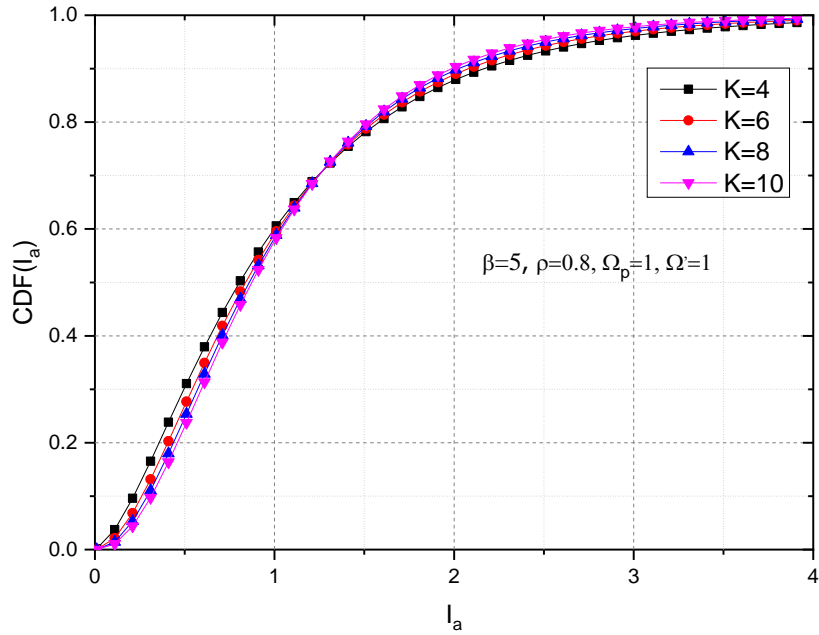
На графицима 4.5, и 4.6 приказане су CDF вредности интензитета сигнала који се преноси кроз осенчани Chi-квadrat модел оптичког канала посматран за различите вредности параметара система.



Слика 4.5. CDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала



Слика 4.6. CDF за осенчани Chi-квадрат модел оптичког канала посматран за случајеве слабе и јаке турбуленције



Слика 4.7. CDF за осенчани Chi-квadrat модел оптичког канала посматран за случајеве различитих интензитета сигнала

Средња вероватноћа грешке по биту, АBER, у функцији SNR-а за оптички сигнал на пријемнику који се преноси FSO системом са OOK модулатионом шемом, кроз осенчани Chi-квadrat модел, може се израчунати након замене (4.19) у (4.14), а затим представљањем  $\text{erfc}(\cdot)$  помоћу Мејер G функције као у [211, Eq.06.27.26.0003.01] и коришћењем релације [211, Eq.07.34.21.0012.011] у облику:

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

где:

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

представља Fox H функцију.

Користећи исти поступак као у [189], и користећи релацију  $I=I_a I_p$  за посматрани Zero-boresight модел грешке позиционирања, нова PDF се може добити заменом (4.18) у (4.11), након представљања модификоване Bassel-ове функције другог реда  $Kv(*)$  преко Мејџер G функције као у [204, Eq.9.34.3], као и коришћења решења резултујућег интеграла датог у [208, Eq.07.34.21.0082.01]:

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

Резултат (4.21) такође представља значајан допринос дисертације јер представља генерални модел расподеле амплитуде оптичког канала у присуству турбуленције и ефекта позиционирања.

Средња вероватноћа грешке по биту, АBER, у функцији SNR-а за оптички сигнал на пријемнику који се преноси FSO системом са OOK модулационом шемом, кроз осенчани Chi-квадрат модел, у присуству грешке позиционирања, може се израчунати након замене (4.21) у (4.14), а затим представљањем  $\operatorname{erfc}(*)$  помоћу Мејџер G функције као у [211, Eq.06.27.26.0003.01] и коришћењем релације [211, Eq.07.34.21.0012.011] у облику:

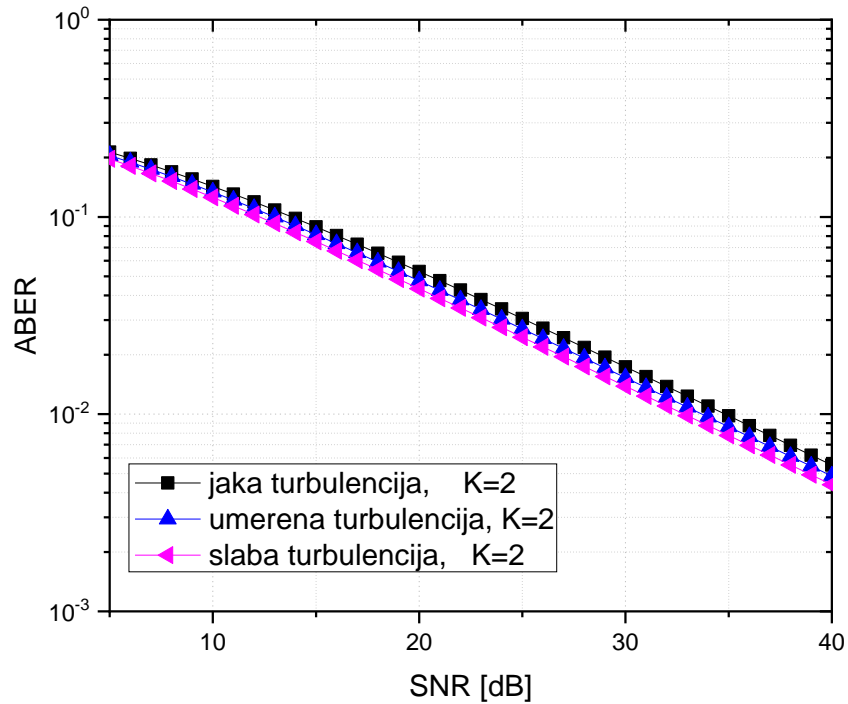
$$P_e(P_T) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{\xi^2 K^p e^{-K} g^{\beta+1} \beta^\beta (\Omega')^q (\beta)_q \Omega_p}{4\sqrt{\pi} \Gamma(p+1) p! (q!)^2 (g\beta + \Omega')^{\beta+q}} H_{2,5}^{5,1} \left[ \left( \frac{P_T \Omega_p g A_0}{\sigma(1+K)} \right)^2 \middle| \begin{matrix} (1,1), (-\xi, 2) \\ (0,1), \left(\frac{1}{2}, 1\right), (-\xi, 2), \left(-\frac{3p}{2} - \frac{q}{2}, 2\right), \left(-\frac{3q}{2} - \frac{p}{2}, 2\right) \end{matrix} \right] \quad (4.22)$$

### 4.3. Анализа добијених перформанси ситема

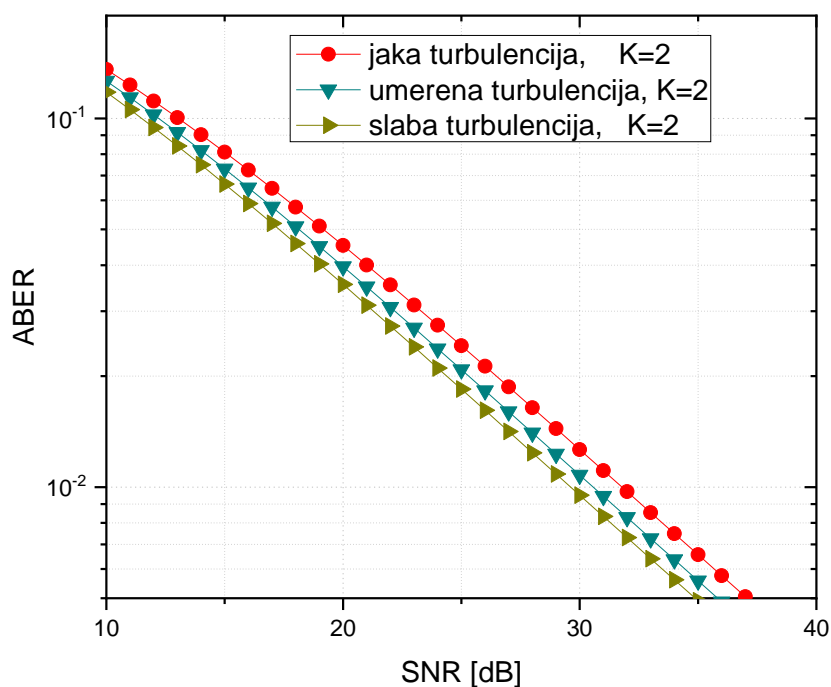
За нумерички прорачун узет је FSO систем чија је радна таласна дужина  $\lambda=1550\text{nm}$  и на удаљености између предајника и пријемника  $L=1\text{km}$ . Разматрана су три типа атмосферских турбуленција: слаба, умерена и јака, са индексима рефлексије  $C_n^2 = 6 \cdot 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ ,  $C_n^2 = 2 \cdot 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  и  $C_n^2 = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ , респективно. Укупна снага пријемног сигнала је  $\Omega_p=1$ , док је одзив детектора  $R=1\text{A/V}$  и варијанса шума  $\sigma_N=10^{-7} \text{A/Hz}$ . Разматрани су: полупречник отвора кружног детектора  $a=0,05\text{m}$ , радијус оптичког снопа на растојању  $L$  од предајника  $w_L=0,5\text{m}$ , грешка показивања помераја стандардне девијације (jitter) на пријемнику је  $\sigma_s=0,2\text{m}$ .

Прво су анализирани перформансе оптичког сигнала који се преноси у каналу где је присутан утицај Gamma-Chi-square турбуленције у присуству и одсуству грешке позиционирања.

На слици 4.8 и 4.9 приказане су вредности ABER као функција средњег електричног SNR, за различите нивое атмосферских турбуленција, различите вредности фактора  $K$  и ООК модулативну шему изражене једначинама (4.9) и (4.13).



Слика 4.8. ABER за модел Gamma-Chi-square атмосферског турбулентног канала као функција средњег електричног SNR-а



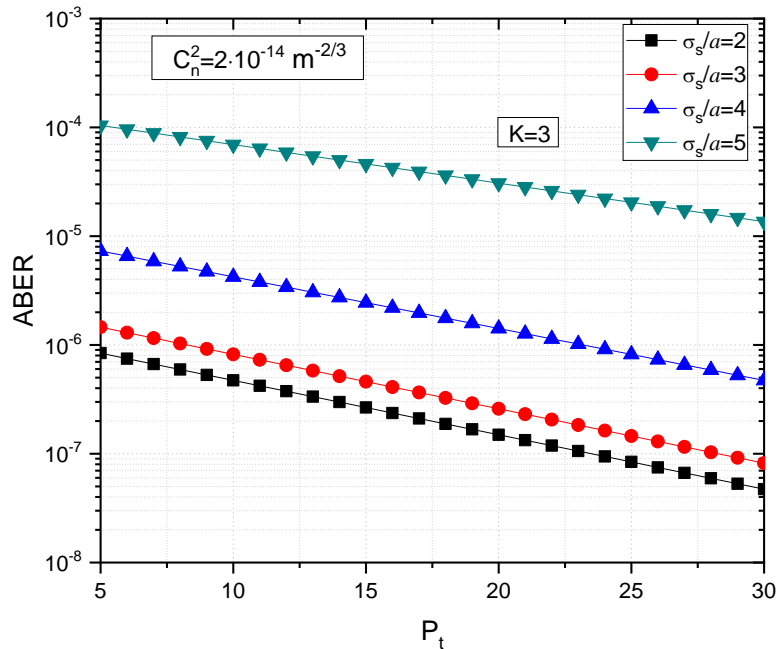
Слика 4.9. АБЕР за Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања као функције средњег електричног SNR-а

АБЕР промена је приближно линеарна у оба случаја. Као што се и очекивало за јачу турбуленцију и ниже вредности фактора  $K$ , добијају се веће вредности АБЕР. И у случају модела атмосферске турбуленције и за модел грешке показивања АБЕР опада значајно брже за веће вредности фактора  $K$ . У циљу верификације добијених резултата, урађена је Monte Carlo симулација за АБЕР, показано је да се ови резултати одлично уклапају у вредности добијене из аналитичких израза. Као што се може видети на сликама 4.8 и 4.9, АБЕР вредности добијене коришћењем изведених израза и њима одговарајуће вредности добијене симулацијама Monte Carlo имају одлична поклапања.

Слика 4.10 показује понашање АБЕР за модел Gamma-Chi-square атмосферског турбулентног канала, уз примену ООК модуларне шеме у функцији средње оптичке снаге на предаји  $P_t$ , за различите вредности нормализоване стандардне девијације треперања на пријемнику  $\sigma_s$ . Са слике 4.10 се може уочити да су за веће вредности нормализоване стандардне девијације треперања (jitter),  $\sigma_s$ , добијене АБЕР вредности веће. Погрешно позиционирање предајника и пријемника се манифестује већим

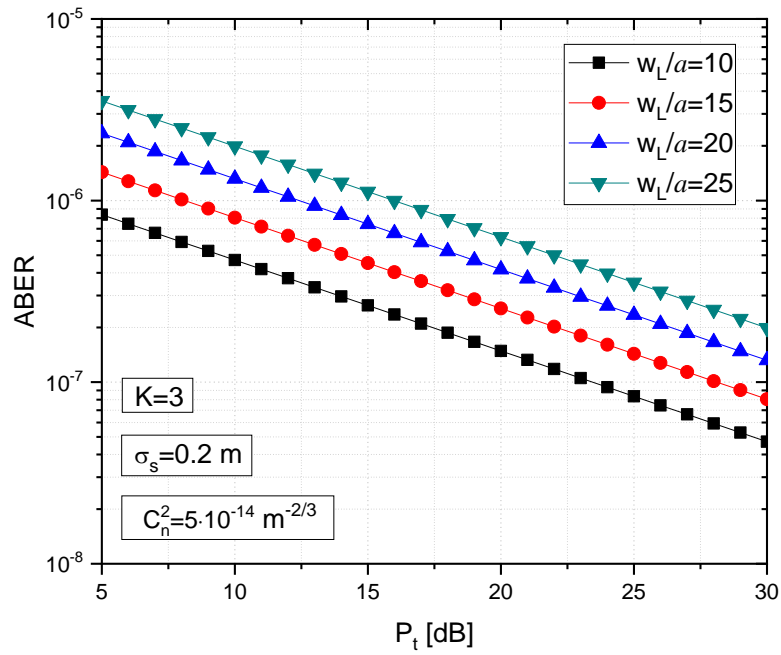


вредностима стандардне девијације треперање (jitter)  $\sigma_s$ , што доводи до деградације перформанси система.

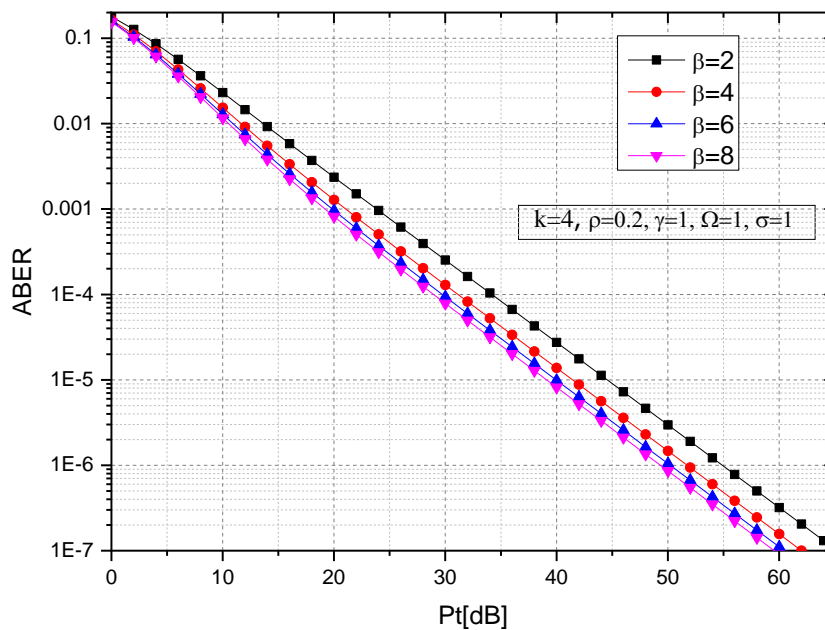


Слика 4.10. ABER за Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања у случају различитих вредности стандардне девијације треперења (jitter)

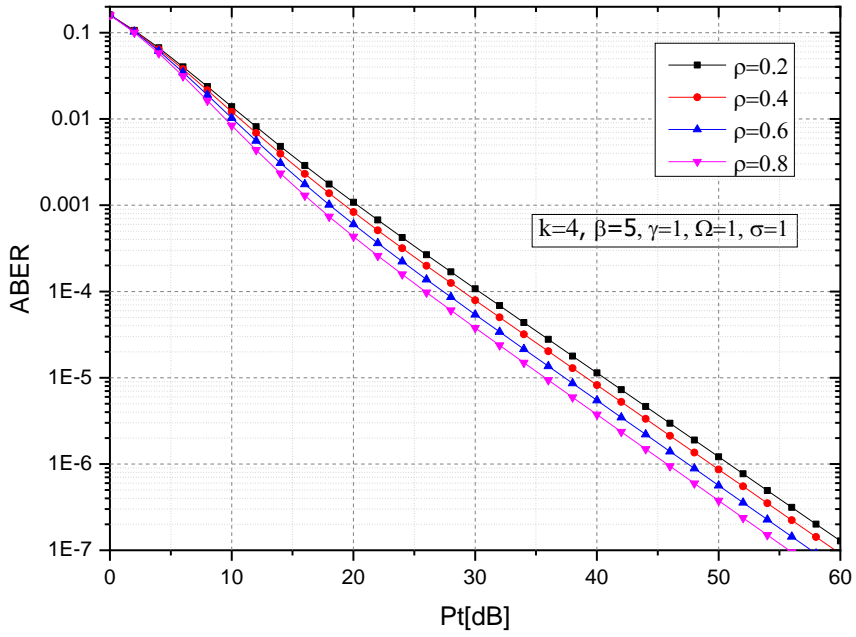
Слика 4.11 приказује понашање ABER за модел Gamma-Chi-square канала, уз примену ОКК модуларне шеме као функцију средње оптичке снаге на предаји,  $P_t$ , на растојању  $L$  од предајника. Како радијус оптичког зрака  $\omega_L$  зависи од растојања  $L$  од предајника, закључујемо да већа вредност овог параметра у великој мери утиче на погоршање ABER, а тиме и на перформансе система. Слика 4.11 показује да се ABER повећава са повећавањем нормализованог радијус оптичког зрака  $\omega_L$ .



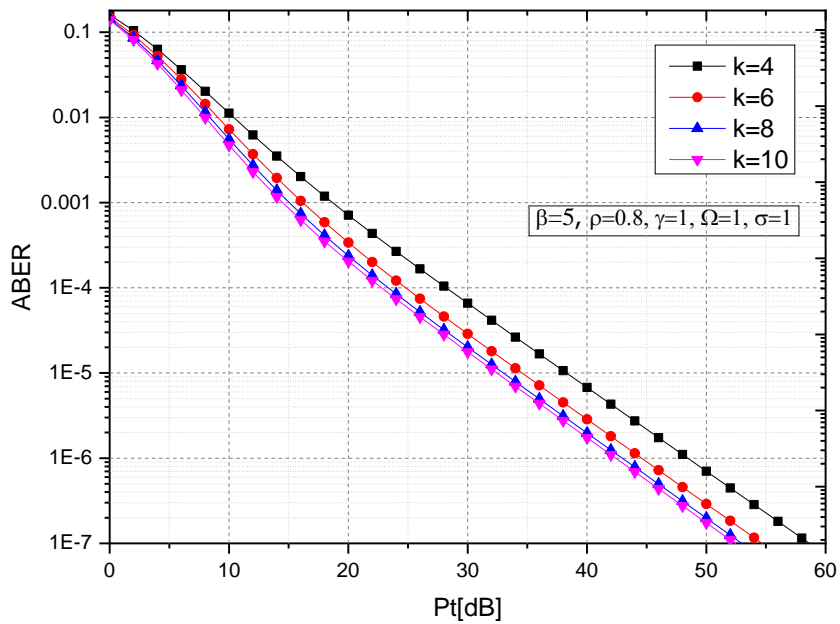
Слика 4.11. ABER за Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите вредности нормализованог радијуса оптичког зрака



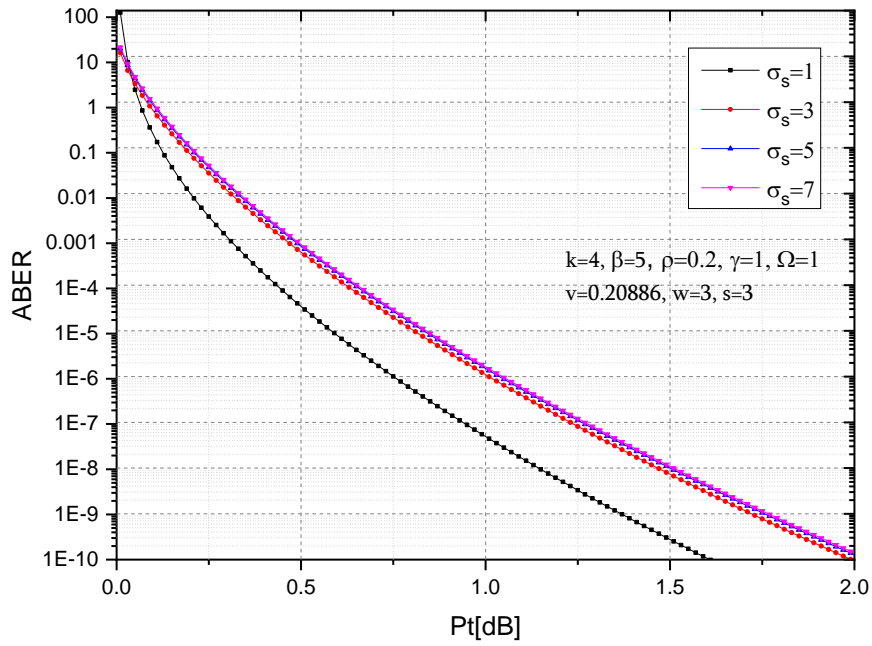
Слика 4.12. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел за случајеве слабе и јаке турбуленције



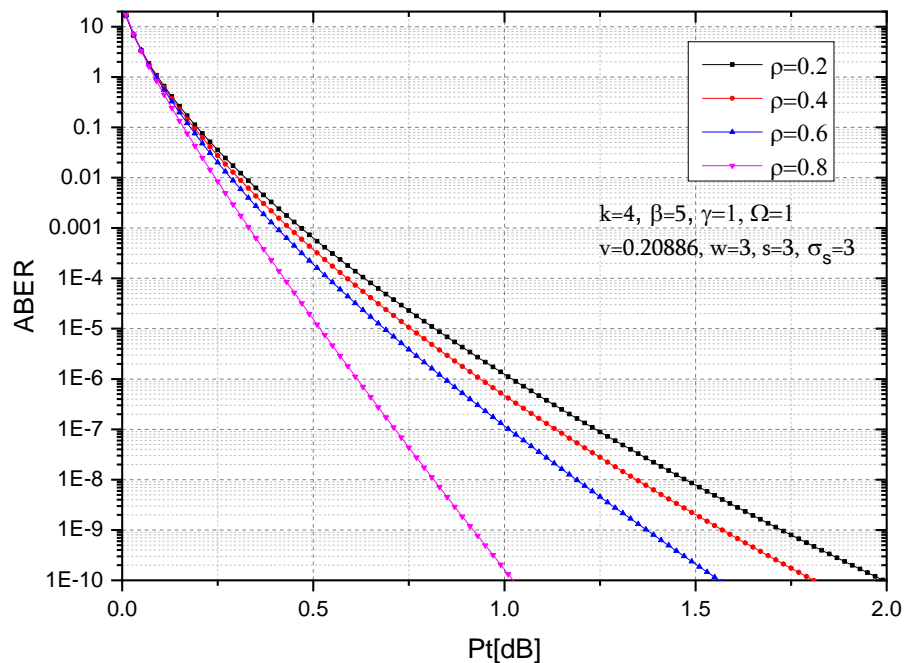
Слика 4.13. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала



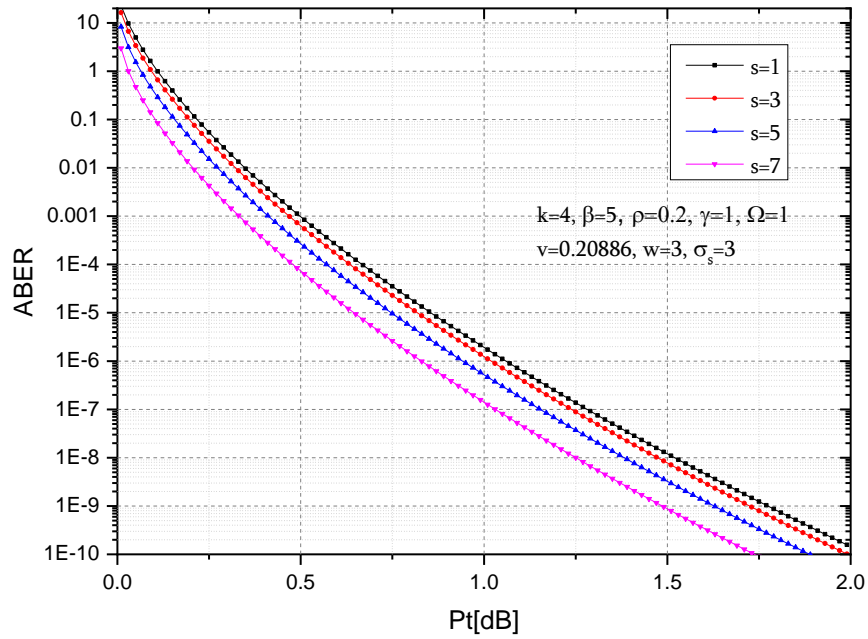
Слика 4.14. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел за случајеве различитих интензитета оптичких сигнала



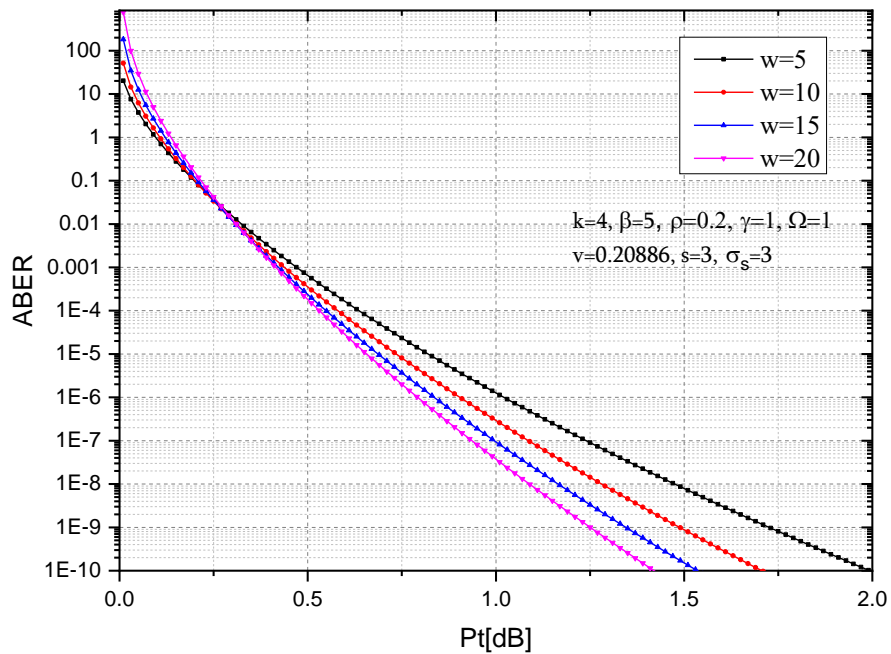
Слика 4.15. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за случајеве различитих вредности стандардне девијације треперења



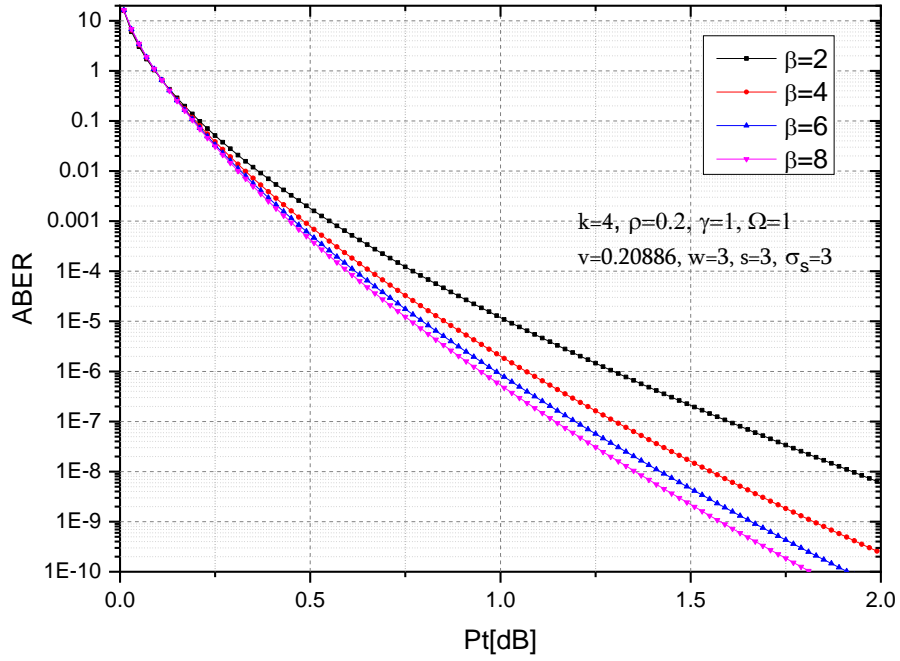
Слика 4.16. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите случајеве степена спрегнутости расејаних компоненти са LOS компонентом сигнала



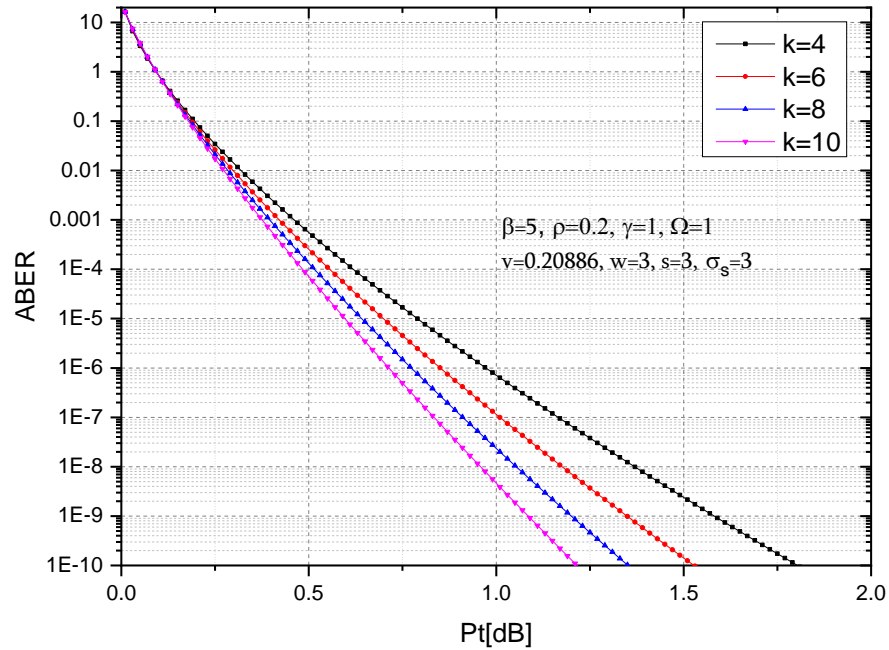
Слика 4.17. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите вредности параметра неусмерености оптичког зрака  $s$



Слика 4.18. ABER за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за различите вредности нормализованог радијуса оптичког зрака



Слика 4.19. АВЕР за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за случајеве слабе и јаке турбуленције



Слика 4.20. АВЕР за осенчани Gamma-Chi-square модел у присуству грешке позиционирања за случајеве различитих интензитета оптичких сигнала

На сликама 4.12 - 4.20 разматране су вредности ABER за пренос OOK модулационим форматом кроз осенчани Gamma-Chi-square модел канала за случајеве присуства и одсуства грешке позиционирања на пријему. Може се уочити да су за веће вредности нормализоване стандардне девијације треперања (jitter),  $\sigma_s$ , добијене ABER вредности веће. Погрешно позиционирање предајника и пријемника се манифестује већим вредностима стандардне девијације треперање (jitter)  $\sigma_s$ , што доводи до деградације перформанси система. Такође повећање вредности параметра неусмерености оптичког зрака  $s$ , доводи до деградације перформанси система и повећања вредности ABER. Радијус оптичког зрака  $\omega_L$  који представља функцију дужине оптичког линка  $L$ , па се са његовим повећањем повећавају вредности ABER датог линка. Такође је видљиво са слике да се боље перформансе система добијају у областима параметра  $\beta$  које одговарају нижим нивоима турбуленције у осенчаном Gamma-Chi-square каналу, односно нижим вредностима индекса рефракције. Уколико је доминантна, LOS компонента оптичког сигнала изаженија, постиже се мањи ниво грешке на пријему, као и за случај када је степен спрегнутости расејаних компоненти са доминантном LOS компонентом већи.

#### 4.4. Примена просторних диверзити техника за унапређење перформанси FSO преноса

Један од најефикаснијих начина за унапређење перформанси FSO преноса јесте примена просторних диверзити комбиновања техника на пријему. Најзначајније просторне технике диверзити пријема су селективно комбиновање (SC-Selection Combining) и комбиновање са максималним односом (MRC-Maximal Ratio Combining). Код SC технике диверзити пријемник одабира и на излаз води грану са највећом тренутном вредноћу SNR посматраног сигнала:

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

Израз за PDF за SNR процес на излазу SC пријемника се може одредити на основу израза за PDF за SNR оптичких сигнала улазних грана помоћу:

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

где  $f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_N)$  представља здружену функцију густине вероватноће (JPDF) вредности SNR са улазних грана. Уколико вредности SNR на појединачним гранама нису корелисане, тада се претходна релација може написати у облику

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

CDF односа SNR на пријему са SC техником се може одредити на сонову израза:

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

односно за некорелисане сигнале на пријемним гранама помоћу:

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

Додатно смањење утицаја турбуленције у каналу је могуће постићи употребом MRC технике комбиновања, приликом којег се сви оптички сигнали доводе у фазу у циљу елиминисања флукуација фаза до којих долази услед расејања сигнала, па се на тај начин максимизује вредност сумираног SNR на пријему.

Вредност сумираног SNR на излазу MRC комбинера се може одредити помоћу релације:



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

Израз за PDF за SNR процес на излазу MRC пријемника се може одредити на основу израза за PDF за SNR оптичких сигнала улазних грана помоћу:

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

где  $f_{\Gamma_1, \dots, \Gamma_N}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N)$  представља здружену функцију густине вероватноће (JPDF) вредности SNR са улазних грана. Уколико вредности SNR на појединачним гранама нису корелисане, тада се претходна релација може написати у облику:

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

Одговарајући CDF односа SNR на пријему са MRC техником се може одредити на сонову израза:

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

Заменом одговарајућих израза представљених у овој глави дисертације (4.9), (4.11), (4.18), (4.19), (4.21) у изразе (4.24)-(4.31) а затим новодобијених израза у (4.14) може се извршити компаративна анализа побољшања перформанси вредности ABER при преносу оптичких сигнала OOK модулационим форматом кроз канале са Gamma-Chi-square сцинтилацијом и осенчаном Gamma-Chi-square сцинтилацијом у присуству и одсуству грешке позиционирања за случајеве примене предложених SC и MRC диверзити техника комбиновања оптичких сигнала.

## 5. ХИБРИДНА RF/FSO КОМУНИКАЦИЈА

### 5.1. Основне претпоставке

Оптички носећи сигнал се користи за бежични пренос информација у оптичкој комуникацији кроз слободан простор. FSO системи имају предности које се огледају у могућности да постигну велике брзине преноса података, економичност и безбедност преноса на високом нивоу. Ипак FSO системи су подложни атмосферским турбуленцијама. Сцинтилација коју изазивају атмосферске турбуленције проузрокује насумичне флукуације ласерског зрака на пријемној страни [213]. Многобројна истраживања су показала да се ефекат сцинтилације може смањити употребом вишеструких извора сигнала (ласера) и вишеструких отвора бленде, чиме се ствара вишеструки излаз са више улаза, MIMO канал. [215], [216].

Највеће деградације система изазивају облаци и густа магла, нпр. густа магла може да изазове слабљење реда величине стотине децибела по километру [216]. Један од начина за превазилажење овог проблема је увођење радио фреквенцијске (RF) везе, чиме се стварају хибридни FSO/RF комуникациони системи [217], [218]. У случају када је FSO комуникација прекинута облаком или маглом, пренос информација преузима RF систем, овде се најчешће користе милиметарске таласне дужине. На овим таласним дужинама RF веза је такође подложна утицају сцинтилације изазаване кишом, али је отпорнија на маглу [219]. Ова два канала су комплементарна: FSO сигнал је ослабљен маглом док RF није; А RF сигнал је ослабљен кишом док FSO није. Међутим на оба система утиче сцинтилација.

Главна сврха RF везе је да делује као резервна комуникација када је FSO веза прекинута. У раду [220] предложена је хибридна шема кодирања канала FSO и RF где се

брзина прилагођава условима канала. У [221] су такође предложене шеме кодирања на више нивоа за хибридни канал.

Тема овог поглавља је предлагање модела канала за хибридную FSO/RF комуникацију, заснованог на познатом симултаном каналу [222] који узима у обзир разлике у брзини сигнализације и ефекат атмосферског слабљења који је присутан у FSO и RF линковима. Како су ефекти слабљења спори у односу на уобичајене брзине преноса података, сваки канал бива заснован на моделу block-fading канала. У [213] и [214] је коришћењем block-fading канала испитана вероватноћа отказа FSO канала са више улаза и више излаза (MIMO), под претпоставком да се користи модулација импулсне позиције (PPM) за неколико познатих дистрибуција сцинтилације тј. за Lognormal-ну, Exponential-ну, Gamma-Gamma, Lognormal-Rice, I-K дистрибуцију сцинтилације [213]. Посебно је испитана експонента отказа (*outage exponent*) која описује нагиб криве вероватноће испада у високом асимптотичком режиму рада. Анализа се даље проширује укључивањем RF везе за креирање хибридног FSO/RF канала. Порука која се преноси се паралелно кодира битовима који се истовремено шаљу и преко FSO и RF канала. Прво се испитује случај када је савршен CSI познат на пријемнику (CSIR случај), а онда разматрамо и пример када је CSI познат и на предајнику (CSIT случај), алокација снаге се користи као начин за решавање проблема ограничења снаге. У случају када CSI није доступан на предајнику користи се експонента отказа (*outage exponent*) за опште расподеле у сваком од канала. Међутим када CSI није доступан на предајнику употребљава се алгоритам оптималне алокације снаге, који одговара и (појединачном) и (укупном) максимуму ограничења снаге. За FSO канал са фиксним једнако вероватним улазним расподелама, решење се огледа у неконвексној оптимизацији, међутим, она има превисоку сложеност када је у питању практична имплементација у практичним системима. Да би се ово превазишло у [223] је предложено мање сложено субоптимално решење, па се у овом поглављу разматра алтернативни приступ. Уместо да се спроводи једнако вероватна сигнализација, разматрамо друге две алтернативне стратегије сигнализације: дељење времена и сигнализација са оптималном дистрибуцијом улаза. Са оваквим приступом, проблем алокације снаге постаје конвексан па стога даје поправљива решења. Даље израчунавамо експонент отказа са CSIT-ом, показујући то за било који коначан однос вршне и просечне снаге, овај експонент је дат истим експонентом као и за случај без CSIT-а. Међутим, што је ограничење вршне снаге веће, пренос постаје све поузданији, а на крају се потпуно уклања могућност отказа.

Даље, у одељку 5.2 представљен је модел канала са претпоставкама које се односе на наш модел канала. У овом поглављу случајне варијабле и њихове реализације су означене великим и малим словима, нпр. ако је  $X$  случајна промењива, онда се њен случајни узорак или реализација означава са  $x$ . Густина вероватноће и кумулативна расподела случајне промењиве  $X$  означене су са  $f_X$  и  $F_X$ , респективно. Услови густине су означени са  $f_{Y|X}(y|x)$ , где се, да би се истакла њихова важност експлицитно наводе одређени параметри, нпр. густина  $f_X(x;\theta)$  је параметризована са  $\theta$ . Оператор очекивања случајне промењиве означен је са  $E$ , ове ознаке се преносе на случајне векторе, где су вектори означени подебљаним словима.

### 5.1.1. Моделовање канала

Хибридни комуникациони систем који је разматран у овом поглављу илустрован је на слици 5.1. Прво, секвенца бинарних порука се заједнички кодира у паралелни FSO и RF ток битова. Сваки ток битова је модулисан у складу са дискретном модулационом шемом, конвертован у своју одговарајућу носећу фреквенцију и истовремено пренет кроз атмосферски канал све до хибридног пријемника. Хибридни пријемник истовремено конвертује, наниже, сваки сигнал носиоца, такође, демодулише и заједнички декодира примљене секвенце за враћање оргиналне поруке. Пре него што се упустимо у информационо-теоријско проучавање, битно је да се обухвате и дефинишу сви основни параметри хибридног система. У пракси FSO веза ради на фреквенцијама у опсегу тера херца (THz), док RF мреже раде на милиметарским таласним дужинама тј. гига херцима (GHz). Као последица ових веома различитих фреквенција носиоца, јављају се одређене физичке карактеристике које ће бити објашњене у наставку.

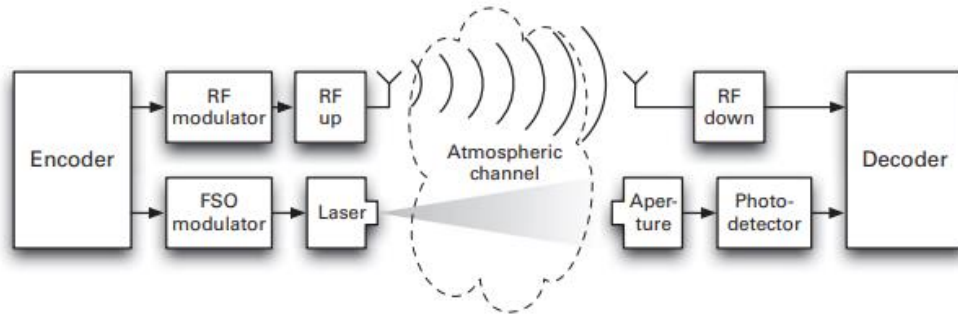
Како је носећа фреквенција FSO система много већа од фреквенције RF система, она може да подржи већу стопу сигнализације. Ова карактеристика је обухваћена дефиницијом хибридног симбола (hybrid symbol), који се састоји од  $N$  FSO симбола и једног паралелног RF симбола. Формалније хибридну формацију дефинишемо на следећи начин.

Нека  $\chi_{rf}$  и  $\chi_{fso}$  означавају дискретну RF и FSO консталацију, респективно, где је  $|\chi_{rf}| = M = 2^m$  и  $|\chi_{fso}| = Q = 2^q$ . Хибридна симболна консталација је дефинисана као:

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

где је  $N$  позитиван број, укупна величина хибридне консталације је  $|\chi|=2^{Nq+m}$ . Однос између FSO битова и укупног броја битова је дефинисан као:

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



Слика 5.1. Хибридни FSO/RF систем

Практични RF системи, обично, модулирају информациони сигнал користећи амплитуду и фазу носиоца. На пријемнику се користи хетородина операција за конверзију фреквенција на доле за основни опсег и обнављање фазних и квадратурних компоненти [224]. Зато за RF везу претпостављамо да је  $\chi_{rf} \subset \mathbb{C}$  нека пригодна дискретна комплексна консталација. Phase-Shift-Keying (PSK) или Quadrature Amplitude Modulation (QAM) модулацје, као и симболи су нацртани независно и једнако су вероватни у овој консталацији. Поред тога  $\chi_{rf}$  је нормализован тако да има јединичну просечну енергију:

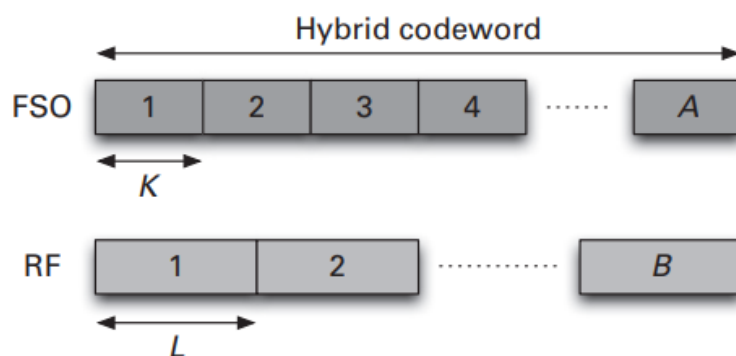
$$\frac{1}{M} \sum_{x \in \chi_{rf}} |x|^2 = 1$$

Иако је могуће модулисати амплитуду и фазу оптичког носача, ипак, то би захтевало да се одговарајућа хетородин/хомодина операција изврши оптички пре фотодетекције [225]. Овај поступак захтева компликовану пријемну оптику за имплементацију хетородина и за одржавање кохерентности са оптичким носачем. Већина практичних FSO система користе једноставнију модулацију интензитета и директну детекцију (IM/DD), односно модулише се само снага оптичког носача. Ради једноставности ми претпостављамо да је IM/DD таква модулација, да је FSO симбол

подељен на  $J$  временских интервала, где се у сваком временском слоту преноси одређена количина оптичке енергије. Ова генерална шема консталације покрива специјалне случајеве на пример за  $J=1$ ,  $Q$ -ary Pulse Amplitude Modulation (PAM), или  $J=Q$ ,  $Q$ -ary Pulse Position Modulation (PPM). Као и код RF везе претпостављамо да су FSO симболи нацртани из  $\chi_{fso}$ . Међутим, за разлику од случаја RF везе, оптимизација вероватноће улазних консталационих симбола биће од користи како у смањењу сложености расподеле моћи тако и у побољшању перформанси отказа система. За све  $x = (x[1], \dots, x[J]) \in \chi_{fso}$  где  $f_X(x)$  означава дискретну улазну расподелу вероватноће, претпостављамо да је нормализована и има јединичну енергију тј.  $\sum_{x \in \chi} f_X(x) \sum_{j=1}^J x[j] = 1$ .

Постоји неколико битних разлика у томе како ће атмосфера утицати на ова два носача. Слабљење, које је индуковано сцинтилацијом, утиче на оба носиоца али са различитим временом кохерентности. Код оптичког носача, обично, је време кохерентности много краће (10s msec), док је код RF носιοца оно око 100s msec. [213], [119]. На сваки од носιοца утичу и честице у складу са њиховим таласним дужинама. На оптичке таласне дужине негативно утичу честице магле, облака и аеросоли, док на RF милиметарске таласне дужине утичу капљице кише [219].

Треба напоменути да су горе наведени ефекти бледења, и за FSO и за RF канале, спори у поређењу са њиховим типичним временима сигнализације. У теорији, тј. литератури канали са спорим федингом (slow feding) су поједностављено моделовани каналима са блок федингом (block feding) [226]. Овако дефинисано, свака пренета кодна реч је подељена на коначан број блокова, од којих сваки има једнак број коришћења канала (или симбола).



Слика 5.2. Хибридна кодна реч

Симболи унутар блока су изложени истој количини фединга, која је представљена на слици од блока до блока. Како је сцинтилација споро променљиве природе, block-feding модел је прикладан и за FSO и за RF канале, тј. моделира се целокупан хибридни канал као паралелни канал фединг блокова. Међутим остаје и да се моделира разлика у кохерентном времену између ова два канала. Да бисмо ухватили овај важан ефекат, као што је приказано на слици 5.2, представимо FSO и RF хибридне кодне речи фединга као А и В, респективно. Јасно је да је  $A \geq B$ , јер је фединг на FSO линку обично бржи наго на RF линку. Претпоставимо да је FSO компонента  $K$  хибридних симбола под утицајем истих реализација FSO фединга. Слично, на RF компоненту  $L$  хибридних симбола утиче иста реализација RF фединга. Иначе, укупан број хибридних симбола мора бити конзистентан између два канала, онда постоји потреба да је  $AK=BL$ . У складу са овим претпоставкама, паралелне FSO и RF канале блок-фединга записујемо на следећи начин.

За FSO везу, примљени сигнал оптичког зрачења записујемо као:

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

где је:  $r_a[k,n] = (r_a[k,n,1], \dots, r_a[k,n,J]) \in \mathbb{R}^J$  док  $J$  вектор означава примљену оптичку снагу у сваком од  $J$  временских слотова FSO симбола  $n=1, \dots, N$ , хибридних симбола  $k=1, \dots, K$ , у блоку  $a=1, \dots, A$ ;  $x_a[k,n] = (x_a[k,n,1], \dots, x_a[k,n,J]) \in \mathcal{X}_{fso}$  означава  $n$ -ти пренесени FSO вектор хибридног симбола  $k$  у блоку  $a$ ;  $\rho$  је модел дугорочног фединга;  $h_a > 0$  представља фединг у блоку услед сцинтилације и извучен је из неке произвољне средине  $f_H(h)$ ;  $P_a$  означава снагу додељену блоку;  $\lambda \geq 0$  моделира позадинско зрачење/тамна струја (претпоставља се да је ово константа). У (5.3) фактор  $1/N$  обезбеђује да FSO и RF компоненте хибридног симбола имају исту енергију.

На сличан начин за RF канал означавамо  $l$ -ти примљени симбол блока  $b$  као:

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

за  $l=1, \dots, L$  и за  $b=1, \dots, B$ , где  $\hat{x}_b[l] \in \mathcal{X}_{rf}$  означава пренесени симбол,  $\hat{\rho}$  моделира дугорочне ефекте фединга,  $h_b > 0$  означава сцинтилацију блока  $b$ ; извучено из неке

произвољне густине  $f_{\hat{h}}(\hat{h})$  са ненегативним ослоном;  $\hat{p}_b$  означава снагу додељену блоку  $b$ ;  $\hat{z}_b[l]: N_{\mathbb{C}}(0,1)$  моделује нулту средњу вредност, јединичну варијансу комплексног гаусовог белог шума (AVGN);  $\hat{\sigma}^2$  означава снагу RF шума. Претпостављамо да су  $h_a$  и  $\hat{h}_b$  независни. За разлику од RF канала, у FSO каналу пријемни сигнал се мења па уместо  $p_a$  имамо  $\sqrt{p_a}$ .

Параметри  $0 < \rho, \hat{\rho} < 1$  у (5.3) и (5.4) моделују разлике релативне снаге два паралелна канала, нпр. одражавају дуготрајне ефекте бледења услед кише или магле, али и параметре као што су појачање отвора/антене и пропагацију губитака. Када је  $\rho > \hat{\rho}$  FSO канал је много јачи од RF канала, нпр моделирање ефекта јаког слабљења у случају магле и облака. Иако у пракси  $\rho$  и  $\hat{\rho}$  насумично варирају са временом, претпостављамо да остају непромењене током многих кодних речи и зато се сматрају фиксним константама. Зато ови параметри неће утицати на асимптотичну анализу испада.

### 5.1.2. Информације о стању канала и естимација канала

У бежичним оптичким комуникацијама, ефикасно прилагођавање снаге, не само да продужава радни век батерије код преносивих реализација већ смањује и оптерећење полупроводничког ласера, чиме се продужава и његов радни век. Међутим, да бисмо прилагодили снагу, морамо познавати фединг на предајнику, који се обично назива информација о стању канала (CSI). Како је слабљење споро, CSI се може проценити на пријемнику па се преноси на предајник преко повратне везе.

У овом поглављу разматрамо два сценарија информације о стању канала (CSI). У првом случају претпостављамо да пријемник има савршен CSI и да предајник равномерно додељује снагу преко свих блокова (CSIR случај). Други случај је CSIT, овде је савршен CSI такође познат на предајнику, тј. предајник савршено познаје  $h_1, \dots, h_A$  и  $h_1, \dots, h_B$ . Затим, предајник врши доделу снаге како би се смањила вероватноћа испада услед ограничења струје. Ипак, ова претпоставка је немогућа у пракси јер предајник има приступ само претходним проценама слабљења, који такође садржи грешке у процени



на пријемнику (несавршени CSI) [227]. Ипак, претпоставка CSI-а на предајнику служи као важно мерило перформанси система.

Снага преноса за оба канала се на крају црпи из истог ресурса снаге. Тако да претпостављамо да је дугорочна просечна снага која је потребна хибридном систему ограничена према:

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

где је:

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

Практични комутациони системи имају ограничења краткоточне снаге коју могу пренети. Пошто FSO и RF везе имају различита краткорочна (или вршна) ограничења снаге, претпостављамо да свеки од ових система подлеже сопственим краткорочним ограничењима снаге, па је:

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

где  $\alpha_{fso}$  и  $\alpha_{rf}$  означавају однос вршне и просечне снаге (PAPR) за FSO и RF канале, респективно.

## 5.2. Хибридни FSO/RF комуникациони систем са диверзити пријемом

У системима мобилних комуникација, управо због ограничења самог мобилног уређаја, највећи део обраде сигнала мора да се обави на базној станици. Техника вишеструког пријема, на базној станици, где се комбинује више различитих пријемних сигнала, заиста помаже у бољој реконструкцији оригиналног сигнала. У овом делу биће представљен један хибридни FSO/RF систем који користи технику вишеструког пријема,

са једним скоком у условима засићене атмосферске турбуленције. Такође је изведен и израз у затвореном облику за вероватноћу отказа оваквог система. Резултати указују на значајна побољшања у односу на перформансе уобичајених FSO и RF система, па иако ова предложена хибридна структура захтева сложени пријемник, њоме се добијају значајна побољшања која битно утичу на перформансе комуникационог система.

Последњих деценија, захтеви за великим брзинама преноса података утицали су и на важност FSO комуникационих система, као главног конкурента традиционалном комуникационом систему. Разлог томе је већа пропусност и капацитет FSO система у односу на RF комуникационе системе. Што се тиче економичности RF систем је прихватљивији, али је чињеница да има нижу брзину преноса података у односу на FSO системе. Међутим FSO систем је и економичан и има велике брзине преноса података [228].

Диверзити комбиновање је ефикасна и доста коришћена техника за побољшавање перформанси комуникационих система. У мобилним комуникационим системима, диверзити комбиновање на пријему (*receive diversity*) је јако практична техника, зато што предајник (мобилни телефон) има много ограничења, како у смислу потрошње енергије тако и у смислу сложености обраде. На пријемној страни (базна станица), диверзити тактиком се прикупљају различите копије емитованог сигнала, који се сустећу услед различитости у федингу канала. Комбинација ових копија заиста може да помогне у бољој реконструкцији послатог сигнала [229]. Неки од добро познатих комбинера су Комбинер максималног односа (MRC), Комбинер једнаког појачања (EGC) и Селективни комбинер (SC).

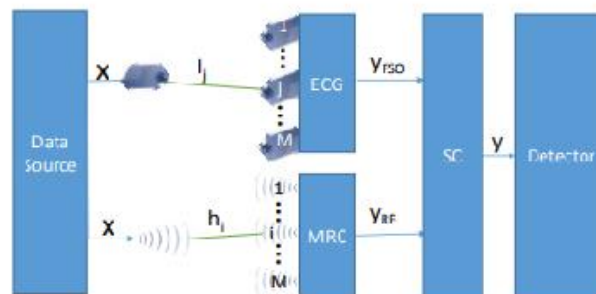
Такозвани хибридни FSO/RF системи могу имати структуру: појединачног пребацивања (*single hop*) [230], дуалног пребацивања (*dual hop*) [231] и вишеструког пребацивања (*multi hop*) [232]. Структура једног скока је пожељна за кратке дomete, где се подаци преносе преко две паралелна FSO и RF везе [233] или коришћењем прекидача [234]. Техника прекидача захтева стално укључивање, док код симултаног преноса овај проблем не постоји, такође не захтева ни повратну информацију.

У овом делу рада је приказан нови хибридни FSO/RF са једним пребацивањем и паралелним симултаним преносом. Ово је један од ретких случајева где се за хибридни FSO/RF комуникациони систем користи диверзити техника са једним пребацивањем. У овом делу хибридни FSO/RF систем са једним скоком је испитиван у условима засићене

атмосферске турбуленције. Овде је узета у обзир RF веза са Рејлијевим федингом и FSO линк под утицајем атмосферске турбуленције моделоване у претходном поглављу, па је за такав систем изведен израз затвореног типа за вероватноћу отказа.

У FSO и RF везама коришћене су ECG и MRC шеме, респективно. Разлог оваквој селекцији је то што се за FSO везу не може развити никакав затворени облик за функцију вероватноће густине (PDF) и функцију кумулативне дисртрибуције (CDF), када је у питању MRC шема за FSO линк са диверзити пријемом и негативном експоненцијалном дистрибуцијом. Такође, ни за RF линк са диверзити пријемом и Рејлијевом расподелом, за CDF и ECG шему не може се извести израз затвореног облика за PDF. Управо зато, нису изабрани исти комбинери за FSO и RF комуникациони систем.

У FSO систему се користе модулација интензитета и директна детекција (IM/DD). Комбинација ова два система, FSO и RF има велике предности, као што су поузданост, сигурност, брзина преноса. У поређењу са другим техникама, које се могу користити у FSO/RF системима, вишеструка диверзити пријемна техника омогућава да се на пријемној страни, употребом различитих пријемних копија сигнала, одабере најјачи сигнал, чиме се и перформансе система побољшавају.



Слика 5.3. Модел FSO/RF система

### 5.2.1. Модел система

Као што је приказано на слици 5.3 две копије оригиналног сигнала истовремено се преносе кроз паралелне FSO и RF везе. Емитовани сигнали се множе са интензитетом атмосферске турбуленције и коефицијентом фединга и додаје се шум пријемника. MRC

на RF пријемнику и EGC на FSO пријемнику комбинују пријемне сигнале. Између излазних сигнала са MRC-а и EGC-а, за детекцију се користе сигнали са максималним односом сигнал/шум (SNR).

SNR на улазу сваког од MRC и EGC комбинера, а тиме и SNR на улазу SC комбинера, ће бити у наставку израчунати.

- FSO веза

На излазу из EGC комбинера имамо:

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

па је SNR на излазу из EGC-а:

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

где је  $M$  број FSO пријемника.  $\bar{y}_{FSO} = \eta^2 E[x^2] / \sigma^2$  је просечан SNR на улазу EGC-а а  $E[x^2]$  је енергија пренешеног сигнала.

SNR у свакој грани MRC-а се израчунава на следећи начин:

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

где  $\bar{y}_i = \frac{E[x^2]}{\sigma^2}$  означава средњу вредност SNR на улазу  $i$ -тог RF прјемника а  $M$  представља број RF ресивера. SNR на излазу MRC-а је [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 амплитуде RF сигнала су дате помоћу:

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

док се одговарајуће MGF сигнала RF-а могу изразити помоћу:

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

где важи:

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

У наставку су представљени изрази затвореног облика, појединачно, за вероватноћу отказа FSO и RF везе. Множењем појединачних вероватноћа отказа FSO и RF везе добијамо вероватноћу отказа предложеног система. До отказа система долази када улазни SNR падне испод прага, тј.  $y \leq y_{th}$ . Према овој дефиницији вероватноћа отказа је:

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

Ако узмемо у обзир слику 5.3, између излазних сигнала MRC-а и EGC-а, сигнал са максималним SNR-ом бира SC, и то:

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

уз претпоставку независних FSO и RF линкова (5.15) се може написати као :

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

Након замене изведених израза за новоформиране моделе турбуленције FSO канала, како за случајеве кад се јавља грешка позиционирања и за случајеве када су пријемници одговарајуће усмерени, а који су изведени у четвртом поглављу ове дисертације, могуће је одредити стандардне мере перформанси бежичних комуникационих система и анализирати их у функцији параметара система.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Убрзан развој различитих сервиса, у оквиру бежичног телекомуникационог система, доводи до потребе за сталним проучавањем и унапређењем перформанси ових услуга. Захтеви који морају да се испуне у процесу унапређења перформанси бежичних комуникационих система су: велике брзине преноса, већи капацитет канала, већи домет везе уз што мање грешке при преносу података. Ипак, морамо узети у обзир да је простирање корисног сигнала кроз бежични медијум праћено разним нежељеним ефектима. Промена нивоа корисног сигнала у времену (фединг) је један од основних облика сметњи при преносу дигитално модулисаног сигнала кроз комуникациони канал бежичног медијума (атмосферу).

Уопштено говорећи, предмет проучавања ове дисертације је пренос података бежичним телекомуникационим системом, тачније FSO системом. То је бежична оптичка мрежа, заснована на коришћењу слободног простора (атмосфере), као медијума за пренос података. У раду су описане перформансе, добре стране као и ограничења овог система, такође дати су и конкретни примери употребе FSO преноса.

Због ограничења у домену спектра, постојећа RF технологија не може у потпуности да подржи убрзану експанзију развоја нових технологија и услуга. Употреба IoT (Internet Thing) и IoE ( Internet of Everithing) уређаја, тј. паметних уређаја који се повезују на мрежу је у сталном порасту, па тренутни расположиви електромагнетни фреквенцијски опсег није довољан за техничке потребе 5G мреже која омогућава ове услуге. Услед ограничења у фреквенцијском опсегу RF система, подопсеци бивају већ распоређени и заузети. Као начин за превазилажење недостатака RF технологије, намеће се бежична комуникација таласима милиметарске и нанометарске дужине. Као алтернатива преноса у RF делу спектра, предложена је употреба оптичке бежичне комуникације OWC, конкретно FSO система. Оправданост употребе FSO система се огледа у великом броју унапређених карактеристика преноса које пружа ова технологија,

као што су: широк спектар, велике брзине преноса, нижа потрошња енергије, економичност, предности које се огледају у великом капацитету преноса података у распону од неколико нанометара до неколико километара, како за затворен тако и за отворен простор, итд. Како је носећа фреквенција FSO система много већа од фреквенције RF система, она може да подржи већу стопу сигнализације. Све ово оправдава значај и циљ истраживања која су спроведена у овом раду.

У дисертацији су дате основне карактеристике преноса сигнала кроз описани комуникациони канал, као и све релевантне карактеристике бежичних оптичких телекомуникационих система. Разматране су сметње као и расподеле којима се описује корисни сигнал, ефекти грешке као и модели турбуленције у бежичним оптичким телекомуникационим системима, представљене су статистичке карактеристике првог реда за разне типове случајних променљивих, а за наведене параметре израчуната је густина вероватноће, кумулативна вероватноћа и моменти. На основу добијених резултата исцртани су графици промене густине вероватноће и кумулативне вероватноће за различите вредности пропагационог окружења. Урађена је анализа перформанси бежичног оптичког преноса (FSO) увођењем аналитички тракабилног модела функције густине вероватноће (PDF) за случајну променљиву амплитуде сигнала који флукутира услед дејства атмосферски индукованих турбуленција.

У циљу смањења утицаја турбуленције и ефекта грешке позиционирања разматрани су бежични оптички телекомуникациони системи са аспекта употребе просторних диверзити техника MRC и SC комбиновања. За оба случаја показан је приступ за одређивање густина вероватноће и кумулативна вероватноћа на излазима из пријемника, као и средња вероватноћа грешке по биту (ABER). Предложен је модел канала за хибридну FSO/RF комуникацију, заснован на познатом симултаном каналу који узима у обзир разлике у брзини сигнализације и ефекат атмосферског слабљења који је присутан у FSO и RF линковима. За овако моделован систем на излазу из диверзити комбинера представљен је приступ помоћу кога се одређује густина вероватноће и кумулативна вероватноћа преноса.

Из свега наведеног, закључујемо да је проучавањем перформанси бежичних оптичких телекомуникационих система у присуству турбуленције и ефекта грешке позиционирања могуће одредити оптималне параметре преноса.



## ЛИТЕРАТУРА

- [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. Hossain, 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/macrocell 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 (cn<sup>2</sup>) 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 sensorless 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 communication 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. Ghassemlooy, 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 opticalscintillations 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 i 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. Moulosley 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.