

**УНИВЕРЗИТЕТ СИНГИДУНУМ
ДЕПАРТМАН ЗА ПОСЛЕДИПЛОМСКЕ СТУДИЈЕ
БЕОГРАД**

**ПЕРФОРМАНСЕ ПРЕНОСА СЛИКЕ FSO
КАНАЛОМ У "LAST MILE" КОНЕКЦИЈИ
У ПРИСУСТВУ СЦИНТИЛАЦИЈЕ**

-ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА-

Ментор:
проф. др. Петар Спалевић

Студент:
Бојан Прлинчевић дипл. инг.
466010/2014



Београд, 2016.

**SINGIDUNUM UNIVERSITY
DEPARTMENT OF POSTGRADUATE STUDIES AND
INTERNATIONAL COOPERATION
BELGRADE**

**IMAGE TRANSMISSION PERFORMANCE
OF IMAGE TRANSMISSION OVER FSO
CHANNEL WITH SCINTILLATION IN
"LAST MILE" CONECTION**

-DOCTORAL DISSERTATION-

Mentor:
prof. dr. Petar Spalević

Student:
Bojan Prlinčević dipl. ing.
466010/2014



Београд, 2016.

Захвалница

Користим ову прилику да изразим искрену и неизмерну захвалност, свом ментору, проф. др Петру Спалевићу на исказаној подршци и пренесеном знању током рада на докторској дисертацији.

Ректору проф. др Младену Веиновићу захвалан сам на пруженој подршци и мотивацији за време докторских студија.

Посебну захвалност дугујем и проф. др Стефану Панићу на пренесеном знању и помоћи током рада на научно истраживачком раду и дисертацији.

Изузетна ми је част била сарадња са проф. др Зораном Миливојевићем, са којим сам направио прве кораке у научно истраживачком раду.

Захваљујем се колегама ВТШСС Звечан на разумевању и сарадњи, а посебно директору проф. др Милану Мишићу.

Дубоко се захваљујем својим родитељима и породици на исказаном разумевању и подршци, а посебно се захваљујем својој супрузи Мирјани.

Јун, 2016

Бојан П. Прлинчевић

Садржај

1. УВОД	- 1 -
2. МОДЕЛИ	- 6 -
2.1 Опште карактеристике FSO комуникација	- 8 -
2.1.1 Губици атмосферског канала.....	- 10 -
2.1.2 Сцинтилација	- 14 -
2.2 Модели атмосферских турбуленција	- 15 -
2.2.1 Експоненцијална Weibull дистрибуција	- 16 -
2.2.2 Log-Normalна дистрибуција.....	- 17 -
2.2.3 Рајсова дистрибуција	- 18 -
2.2.4 Nakagami-m дистрибуција	- 19 -
2.2.5 Gamma-Gamma дистрибуција.....	- 20 -
2.2.6 Негативна експоненцијална дистрибуција	- 21 -
2.2.7 <i>M</i> (Малага) модел дистрибуције	- 21 -
2.3 Модели слике и жига	- 25 -
2.3.1 Инсертовање и карактеристике дигиталних водених жигова.....	- 26 -
2.4 Основне мере перформанси	- 29 -
3. АНАЛИЗА ПЕРФОРМАНСИ ПРЕНОСА	- 32 -
3.1 Перформансе преноса FSO комуникациоих система кроз <i>M</i> атмосферски канал	- 32 -
3.1.1 BER перформансе <i>M</i> модела атмосферског комуникационог канала при BPSK модулативној шеми.....	- 33 -
3.1.2 BER перформансе <i>M</i> модела атмосферског комуникационог канала при BDPSK модулативној шеми	- 40 -

3.1.3	BER перформансе M модела атмосферског комуникационог канала при QPSK модулационој шеми	- 45 -
3.2	CS M модела атмосферског комуникационог канала.....	- 50 -
4.	МОДЕЛИ ПРЕНОСА СЛИКЕ КРОЗ АТМОСФЕРСКИ FSO КАНАЛ	- 53 -
4.1	Пренос слике са инсертованим воденим жигом кроз Рајсов FSO канал	- 53 -
4.1.1	Анализа перформанси преноса слике са воденим жигом кроз Рајсов фединг канал -	55 -
4.1.1.1	Модел канала преноса	- 55 -
4.1.1.2	Алгоритми	- 58 -
4.1.1.3	Симулациони резултати и анализа	- 60 -
4.1.2	Анализа преноса слике са инсертованим двоструким воденим жигом кроз Рајсов FSO канал	- 68 -
4.1.2.1	Модели система.....	- 69 -
4.1.2.2	Алгоритам тестирања.....	- 69 -
4.1.2.3	Симулациони резултати и анализа перформанси.....	- 74 -
4.2	Пренос слике у боји кроз Рајсов турбулентни канал у присуству сцинтилације.....	- 83 -
4.2.1	Детекција пожара у слици.....	- 83 -
4.2.1.1	Алгоритам детекције пожара у слици.....	- 85 -
4.2.1.2	Резултати тестирања и анализа	- 86 -
4.2.2	Пренос слике пожара кроз Рајсов FSO турбулентни канал у присуству сцинтилације и детекција пожара.....	- 90 -
4.2.2.1	Модел преноса и детекције пожара у слици кроз Рајсов FSO комуникациони канал.....	- 91 -

4.2.2.2	Симулациони резултати и анализа	- 95 -
5.	ПРИМЕНА FSO КОМУНИКАЦИОНИХ СИСТЕМА У "LAST MILE" КОНЕКЦИЈИ	- 103 -
6.	ПРИЛОЗИ	- 106 -
6.1	Прилог 1	- 106 -
6.2	Прилог 2	- 119 -
7.	ЗАКЉУЧАК	- 135 -
	REFERENCE:	- 137 -

Сажетак

Потреба за повећањем брзине у преносу података а уједно и све строжи захтеви за заштиту података у савременом друштву је све израженија. У том контексту FSO комуникације представљају веома добру алтернативу конвенционалним системима преноса података. Ови системи, у подручјима где је њихова примена могућа пружају изузетно високе перформансе корисницима, имају брзине преноса и од неколико Gb и практично изузетно велику могућност заштите података. Због своје јефтине реализације њихова примена у "last mile" конекцији је од изузетног значаја. У овом раду је истражена могућност преноса слике FSO комуникационим каналом у присуству сцинтилације. Истражен је пренос заштићених података (слике са инсертованим воденим жигом) и утицај FSO канала на њихову деградацију, односно деградацију заштитног кода, као и слике у боји у циљу детекције пожара у слици.

Abstract

The need to increase the data-rate of transferred multimedia and also the more stringent requirements for copyright protection in modern society is becoming more pronounced. In this context, FSO communications are a very good alternative to conventional wireless communication systems. These systems, in areas where their use is possible provide extremely high performance to users, with data rate transfer of up to several Gb and practically extremely high security option. Because of its cheap realization of their application, in the "last mile" connection, is practical and important. This paper explores the possibility of transmitting the images FSO communication channel in the presence of scintillation. Researched the transfer of copyright protected data (watermarked images) and the impact of FSO channels on their degradation, degradation or protection code, as well as color images to detect fires in the image after transmission over FSO communication channel.

Списак слика:

СЛИКА 2.1.1	ОДСТУПАЊЕ ЛАСЕРСКОГ СНОПА УСЛЕД ТУРБУЛЕНЦИЈЕ	12 -
СЛИКА 2.2.1.	БЛОК ДИЈАГРАМ LOS FSO СИСТЕМА.	16 -
СЛИКА 3.1.1.	BER, BPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ α , β И Ω'	37 -
СЛИКА 3.1.3.	BER, BPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ Ω' И γ	38 -
СЛИКА 3.1.5.	BER, BPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ Ω' И ρ	40 -
СЛИКА 3.1.6.	BER, BDPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈЕВЕ ПРОМЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА α И β	43 -
СЛИКА 3.1.7.	BER, BDPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈЕВЕ ПРОМЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА Ω' И γ	43 -
СЛИКА 3.1.8.	BER, BDPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈЕВЕ ПРОМЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА ρ И γ	44 -
СЛИКА 3.1.9.	BER, BDPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈЕВЕ ПРОМЕНЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТАРА Ω' И ρ	45 -
СЛИКА 3.1.10.	BER, QPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈ ПРОМЕНЕ ПАРАМЕТАРА α И β	47 -
СЛИКА 3.1.11.	BER, QPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈ ПРОМЕНЕ ПАРАМЕТАРА Ω' И γ	48 -
СЛИКА 3.1.12.	BER, QPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈ ПРОМЕНЕ ПАРАМЕТАРА ρ И γ	49 -
СЛИКА 3.1.13.	BER, QPSK FSO СИСТЕМА КРОЗ M ИНДУКОВАНИ ТУРБУЛЕНТНИ ФЕДИНГ ЗА СЛУЧАЈ ПРОМЕНЕ ПАРАМЕТАРА Ω' И ρ	49 -
СЛИКА 3.2.1.	НОРМАЛИЗОВАН СС FSO СИСТЕМА КРОЗ M ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ ЗА СЛУЧАЈ ПРОМЕНЕ ПАРАМЕТАРА α И β	52 -
.		- 52 -

СЛИКА 4.1.1. СЛИКЕ КОРИШЋЕНЕ У ЕКСПЕРИМЕНТУ: А) ЛЕНА, Б) ДЕВОЈКА, В) МАЈМУН И Г) ПАПРИКА.	- 62 -
СЛИКА 4.1.2. СЛИКА (ПУБЛИКА) КОРИШЋЕНА КАО ВОДЕНИ ЖИГ.....	- 62 -
СЛИКА 4.1.3. СЛИКЕ НАКОН ПРЕНОСА КРОЗ РАЈСОВ FSO ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ СА ПАРАМЕТРОМ $K = 1$ (А, В) И $K = 10$ (Б, Г).	- 63 -
СЛИКА 4.1.4. СЛИКЕ ЕКСТРАКОВАНОГ ЖИГА НАКОН ПРЕНОСА КРОЗ РАЈСОВ FSO ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ СА ПАРАМЕТРОМ $K = 1$ (А-ИЗ СЛИКЕ ЛЕНА, В ИЗ СЛИКЕ МАЈМУН) И $K = 10$ (Б-ИЗ СЛИКЕ ЛЕНА, Г ИЗ СЛИКЕ МАЈМУН).....	- 65 -
СЛИКА 4.1.5. MSE ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА КРОЗ РАЈСОВ FSO ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ А) ЛЕНА, Б) ДЕВОЈКА, Б) МАЈМУН И Г) ПАПРИКА.	- 65 -
СЛИКА 4.1.6. MSE ЕКСТРАКОВАНОГ ЖИГА ИЗ ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА КРОЗ РАЈСОВ FSO ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ, ИЗ СЛИКЕ: А) ЛЕНА, Б) ДЕВОЈКА, Б) МАЈМУН И Г) ПАПРИКА.	- 66 -
СЛИКА 4.1.7. PSNR ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА КРОЗ РАЈСОВ FSO ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ: А) ЛЕНА, Б) ДЕВОЈКА, Б) МАЈМУН И Г) ПАПРИКА	- 66 -
СЛИКА 4.1.8. PSNR ЕКСТРАКОВАНОГ ЖИГА ИЗ ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА КРОЗ РАЈСОВ FSO ТУРБУЛЕНТНИ КАНАЛ, ИЗ СЛИКЕ: А) ЛЕНА, Б) ДЕВОЈКА, Б) МАЈМУН И Г) ПАПРИКА.....	- 67 -
СЛИКА 4.1.9. ДИЈАГРАМ BER ЗА ПРЕНЕСЕНУ СЛИКУ ЛЕНА.....	- 67 -
СЛИКА 4.1.10. СЛИКА ПРИМАРНОГ ЖИГА-ЛЕПТИР.....	- 75 -
СЛИКА 4.1.11. СЛИКА СЕКУНДАРНОГ ЖИГА-ЗВЕЗДА.	- 76 -
СЛИКА 4.1.12. СЛИКЕ БАЗЕ: А) ЛЕНА, Б) ДЕВОЈКА, В) МАЈМУН И Г) ПАПРИКА.-	77 -
СЛИКА 4.1.13. PSNR ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА: ЛЕНЕ, ДЕВОЈКЕ, МАЈМУНА И ПАПРИКА.	- 77 -
СЛИКА 4.1.14. PSNR ЕКСТРАКОВАНОГ ПРИМАРНОГ ВОДЕНОГ ЖИГА ИЗ ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА: ЛЕНЕ, ДЕВОЈКЕ, МАЈМУНА И ПАПРИКА.....	- 78 -
СЛИКА 4.1.15. PSNR ЕКСТРАКОВАНОГ СЕКУНДАРНОГ ВОДЕНОГ ЖИГА ИЗ ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА: ЛЕНЕ, ДЕВОЈКЕ, МАЈМУНА И ПАПРИКА.....	- 78 -
СЛИКА 4.16. НОРМАЛИЗОВАНА КОРЕЛАЦИЈА ЗА ПРЕНЕСЕНЕ СЛИКЕ: ЛЕНЕ, ДЕВОЈКЕ, МАЈМУНА И ПАПРИКА.....	- 79 -

СЛИКА 4.1.17. НОРМАЛИЗОВАНА КОРЕЛАЦИЈА ЗА ЕКСТРАКОВАНИ ПРИМАРНИ ВОДЕНИ ЖИГ ИЗ ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА: ЛЕНЕ, ДЕВОЈКЕ, МАЈМУНА И ПАПРИКА.	- 79 -
СЛИКА 4.1.18. НОРМАЛИЗОВАНА КОРЕЛАЦИЈА ЗА ЕКСТРАКОВАНИ СЕКУНДАРНИ ВОДЕНИ ЖИГ ИЗ ПРЕНЕСЕНИХ СЛИКА: ЛЕНЕ, ДЕВОЈКЕ, МАЈМУНА И ПАПРИКА.....	- 80 -
СЛИКА 4.1.19. BER ЗА ПРЕНЕСЕНЕ СЛИКУ ЛЕНА, ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТРА K	- 80 -
СЛИКА 4.1.20. BER ЗА ПРЕНЕСЕНЕ СЛИКУ ДЕВОЈКА, ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТРА K	- 81 -
СЛИКА 4.1.21. BER ЗА ПРЕНЕСЕНЕ СЛИКУ МАЈМУН, ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТРА K	- 81 -
СЛИКА 4.1.22. BER ЗА ПРЕНЕСЕНЕ СЛИКУ ПАПРИКА, ЗА РАЗЛИЧИТЕ ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТРА K	- 82 -
СЛИКА 4.2.1. А) ТЕСТ СЛИКА И РЕЗУЛТАТ ПРОЦЕСИРАЊА ТЕСТ СЛИКЕ MIPFD АЛГОРИТМОМ: Б) ЗА $T_H=30$, В) $T_H=65$ И Г) $T_H=90$	- 87 -
СЛИКА 4.2.2. РЕЗУЛТАТИ ПРОЦЕСИРАЊА СЛИКЕ X_1 : А) ОРИГИНАЛНА СЛИКА, Б) R-КОМПОНЕНТА, В) G-КОМПОНЕНТА, Г) В-КОМПОНЕНТА, Д) Y-КОМПОНЕНТА, Ђ) СВ-КОМПОНЕНТА, Е) СR-КОМПОНЕНТА, Ж) СЛИКА ДЕТЕКТОВАНОГ ПОЖАРА	- 87 -
СЛИКА 4.2.3. РЕЗУЛТАТИ ПРОЦЕСИРАЊА СЛИКЕ X_2 И X_3 : А) ОРИГИНАЛНА СЛИКА X_2 , Б) ПРОЦЕСИРАНА СЛИКА X_2 , В) ОРИГИНАЛНА СЛИКА X_3 , Г) ПРОЦЕСИРАНА СЛИКА X_3 ,	- 88 -
СЛИКА 4.2.4. ПРОЦЕНТУАЛНИ РЕЗУЛТАТИ ЗА ГРЕШКУ У ЗАВИСНОСТИ ОД ВРЕДНОСТИ ПАРАМЕТРА T_H	- 89 -
СЛИКА 4.2.6. БАЗА СЛИКА (ДЕО).	- 96 -
СЛИКА 4.2.7. А) СЛИКА ПОЖАРА ДЕТЕКТОВАНА НА УЛАЗУ У КАНАЛ, Б) СЛИКА ДЕТЕКТОВАНОГ ПОЖАРА У СЛИЦИ НА МЕСТУ ДЕТЕКЦИЈЕ СЛИКЕ, В) СЛИКА ПОЖАРА НАКОН ПРЕНОСА КРОЗ КАНАЛА (ПРИ $K=1$), Г) СЛИКА ДЕТЕКТОВАНОГ ПОЖАРА КРОЗ КАНАЛА НАКОН ПРЕНОСА (ПРИ $K=1$), Д) СЛИКА НАКОН ПРЕНОСА КРОЗ КАНАЛ (ПРИ $K=10$) И Ђ) СЛИКА ДЕТЕКТОВАНОГ ПОЖАРА НАКОН ПРЕНОСА СЛИКЕ КРОЗ КАНАЛ (ПРИ $K=10$),	

ДУЖИНОМ ПРОПАГАЦИЈЕ $L=1000$ М, ПРЕЧНИКОМ ОТВОРА АПЕРТУРЕ $D=0.25$ М И ИНДЕКСОМ РЕФРАКЦИЈЕ $C_N^2=2 \times 10^{-16} \text{ M}^{2/3}$	- 98 -
СЛИКА 4.2.8. ВЕР ЗА ЈЕДНУ ОД СЛИКА ПОЖАРА ПРЕНСЕНИХ КРОЗ РАЈСОВ FSO КОМУНИКАЦИОНИ КАНАЛ ПРИ РАЗЛИЧИТИМ ВРЕДНОСТИМА ПАРАМЕТРА K , ДУЖИНОМ ПРОПАГАЦИЈЕ $L=1000$ М, ПРЕЧНИКОМ ОТВОРА АПЕРТУРЕ $D=0.25$ М И ИНДЕКСОМ РЕФРАКЦИЈЕ $C_N^2=2 \times 10^{-16} \text{ M}^{2/3}$	- 98 -
СЛИКА 4.2.9. ЗАВИСНОСТ ПАРАМЕТРА K , У ОДНОСУ НА ИНДЕКС РЕФРАКЦИЈЕ C_N^2 ПРИ КОНСТАНТНОЈ ДУЖИНИ ЛИНКА ПРОПАГАЦИЈЕ $L = 1000$ М.	- 99 -
СЛИКА 4.2.10. ЗАВИСНОСТ ПАРАМЕТРА K , У ОДНОСУ НА ДУЖИНУ ЛИНКА ПРОПАГАЦИЈЕ L ПРИ КОНСТАНТНОМ ИНДЕКСУ РЕФРАКЦИЈЕ $C_N^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ M}^{2/3}$	- 99 -
СЛИКА 4.2.11. ЗАВИСНОСТ ИНДЕКСА СЦИНТИЛАЦИЈЕ σ_i^2 , У ОДНОСУ НА ИНДЕКС РЕФРАКЦИЈЕ C_N^2 И ДУЖИНУ ЛИНКА ПРОПАГАЦИЈЕ L ПРИ КОНСТАНТНОМ ДИЈАМЕТРУ АПЕРТУРЕ $D = 0.1$ (М).....	- 100 -
СЛИКА 4.2.12. ЗАВИСНОСТ ИНДЕКСА СЦИНТИЛАЦИЈЕ σ_u^2 , У ОДНОСУ НА ПРЕЧНИК ДИЈАМЕТРА АПЕРТУРЕ D И ДУЖИНУ ЛИНКА ПРОПАГАЦИЈЕ L ПРИ КОНСТАНТНОМ РЕФРАКЦИОНОМ ИНДЕКСУ $C_N^2 = 2 \times 10^{-15} (\text{M}^{-2/3})$	- 100 -
СЛИКА 5.1. УПРОШЋЕНИ БЛОК ДИЈАГРАМ "LAST MILE" КОНЕКЦИЈЕ У УРБАНОЈ СРЕДИНИ, ИЗМЕЂУ ЗГРАДА.	- 104 -

Списак табела:

Табела 2.1.1. Варијације атмосферског слабљења услед расипања засноване невидљивости	-10-
Табела 2.2.1 Уобичајене вредности параметара σ_R^2 , α и β	-21-
Табела 2.2.2. Свођење параметара M дистрибуције на познате дистрибуције	-24-
Табела 4.1.1. MSE екстракованог жига и пренесених слика	-64-
Табела 4.1.2. PSNR екстракованог жига и пренесених слика	-64-
Табела 4.2.1. Принцип класификације грешке	-84-
Табела 4.2.2. Процентуалне вредности TP, FP, TN и FN у зависности од T_h	-89-
Табела 4.2.3. MSE и PSNR за слику пожара и детекцију пожара у слици пре и после преноса Рајсовим FSO каналом	-97-

1. Увод

а) Предмет истраживања

Предмет истраживања ове дисертације је пренос дигиталних података путем бежичног оптичког комуникационог линка кроз атмосферу у присуству сцинтилације. Бежични оптички пренос (*енгл.* **FSO**, **Free Space Optics**) представља веома погодан и јефтин вид преноса података који се заснива на простирању оптичког зрака кроз различите медијуме. Разумевање атмосферских прилика и њиховог утицаја на простирање светлости је од битног значаја за пројектовање ефикасног, интелигентног и економски исплативог FSO линка као и поуздане мреже у циљу обезбеђивања константног сервиса високог квалитета.

Једна од најчешћих реализација FSO комуникационих система налази примену у "last mile" конекцији. Међутим, постоје различите штетне карактеристике атмосферских прилика које могу битно утицати на оптички канал и самим тим довести до озбиљних слабљења сигнала па чак и до потпуног губитка истог.

Атмосфера је састављена од молекула гаса, водене паре, аеросола, прашине и загађивача чија је величина таква да може бити упоредива са таласном дужином светлосног снопа (Опсег таласних дужина је од 780-1550 *nm*), односно, типичног оптичког преносиоца сигнала те као такве могу да утичу на ширење преношења таласа. Услед таквих атмосферских прилика квалитет корисног сигнала, емитованог кроз атмосферу, може бити озбиљно нарушен изазивајући озбиљан фединг, повећање вероватноће грешке BER (*енгл.* **Bit Error Rate**). Случајне флукуације у ирадијацији примљеног оптичког сигнала (зрака) изазване атмосферским турбуленцијама односе се на ефекат који се назива сцинтилација. Она представља блесак светлости произведен у провидном материјалу проласком честица (електрона, јона, алфа честица или високо-енергетских фотона). Сцинтилација представља спектар луминистентне светлости који се емитује након апсорбције зрачења. Временске и просторне флукуације ласерског снопа које се јављају као

резултат варијације у индексу рефракције, изазване атмосферским турбуленцијама и које се манифестују као флукуације ирадијације примљеног сигнала, представљају FSO фединг који се назива сцинтилација. Атмосфера може представљати ограничавајући фактор у брзом бежичном FSO комуникационом линку те је због тога важно да се сагледа интеракција између оптичког таласа и атмосфере као би се могли предвидети FSO комуникационе перформансе атмосферског комуникационог канала.

Како се у савременој (дигиталној) ери веома често интернетом преносе дигитални подаци који могу најчешће представљати слику у овој дисертацији ће бити истражен утицај преноса слике FSO каналом. Пренос слике FSO каналом представља занимљиву тему за истраживање зато што је у новије време пренос слике интернетом у "last mile" конекцији веома интензиван. На овај начин се могу преносити различити типови дигиталних података (слика), од заштићених слика, дигиталним воденим жигом, до слике пожара.

Слика представља један од најзаступљенијих мултимедијалних садржаја коришћених у комуникацијама те се њеном дигитализацијом врши прилагођавање оптичке слике како би се приказала као дигитална. Дигитална слика предстаља матрицу која има коначан број пиксела тако да се дигитална монохроматска слика обично представља као осмобитна или шеснаестобитна, тј. таква слика има 256 односно 65536 нијанси сивог. Слика у боји се приказује преко примарних боја, црвене (**енгл. Red**), зелене (**енгл. Green**) и плаве (**енгл. Blue**), која као и монохроматска може бити осмобитна и шеснаестобитна.

Пренос дигиталног садржаја, слике, врши тако што се на страни емитовања изврши декомпозиција слике па се након преноса кроз FSO канал иста реконструише. Услед утицаја сцинтилације приликом преноса може доћи до грешке у преносу одеђеног броја битова што у крајњем случају може довести до грешке у реконструкцији слике на пријемној страни. Уколико се ради о преносу осетљивих података онда овај вид грешке може довести до нетачног интерпретирања.

У овој дисертацији ће бити истражен пренос дигиталне монохроматске слике са инсертованим воденим жигом и утицај сцинтилације на екстракцију

жига након преноса FSO каналом, а такође ће бити истражен пренос слике у боји, конкретно слике пожара FSO каналом и утицај сцинтилације на пренос такве слике оптичким бежичним каналом.

У новије време за превентивну заштиту великих шумских пространа све је чешћа употреба методе детекције пожара у слици. Како се за детекцију пожара у слици користи слика у боји то ће услед утицаја разних честица које се налазе у атмосфери у овој дисертацији бити и анализиран њихов утицај на пренос слике. Приликом пожара као нус продукти сагоревања јављају се дим, разне честице сагоревања, температура итд. то њихов утицај на пренос и квалитет преноса података FSO каналом биће анализирани у овом раду. У овом раду биће истражене могућности детекције пожара у слици на месту пожара и преноса сигнала пожара као и могућност преноса слике пожара до удаљене локације детекције и утицај атмосферских прилика на пренос слике и могућност детекције пожара након преноса FSO каналом.

На крају биће предложен алгоритам за детекцију и пренос слике пожара путем FSO канала.

б) Мотивација

Основни мотив овог рада јесте да се анализирају својства бежичног оптичког преноса података и квалитет пренесене дигиталне слике у "last mile" конекцији. Као резултат детаљне анализе бежичног оптичког система комуникације и његов утицај на пренос монохроматске слике и слике у боји долази се до закључка о квалитету FSO комуникација у "last mile" конекцији. На основу добијених резултата развијен је алгоритам за пренос слике у боји FSO комуникационим системом у присуству сцинтилације и детекцију пожара у слици. Алгоритам за детекцију пожара у слици након успешног преноса слике FSO каналом са великом прецизношћу врши превентивну детекцију пожара у слици што може довести до унапређења заштите од пожара.

в) Циљеви и задаци истраживања

Заштита великих шумских пространа од пожара представља велики проблем данашњице.

Научни циљ овог истраживања јесте утврђивање ефикасности преноса слике FSO каналом и алгоритама за детекцију пожара у слици као и могућност коришћења ове методе у заштити великих шумских површина коришћењем FSO канала за пренос података о пожару (аларма) или слике пожара на удаљене локације у циљу детекције.

Посебан циљ истраживања је утврдити могућност коришћења оваквих система за ефикасну заштиту шумских пространа од честих летњих пожара и уништења великих површина шума.

г) Очекивани допринос

Сагледавањем перформанси бежичних FSO комуникационих система може се значајно побољшати систем комуникације. Предложеним методама може се значајно побољшати анализирање перформанси бежичних комуникационих система.

Детекција пожара у слици представља једну јефтину и веома ефикасну методу за рану и превентивну детекцију пожара на великим шумским пространима. Анализираним и предложеним алгоритмима може се значајно унапредити ефикасност система за заштиту од пожара.

Применом предложених комбинација FSO комуникационих система у "last mile" конекцији (јер су економски исплативи и лако и ефикасно се инсталирају у неприступачним срединама и теренима) и алгоритама за детекцију пожара, могу се значајно, ефикасно и пре свега јефтино заштитити велика пространа.

Предмет и тема докторске дисертације су актуелни, а допринос предложеног истраживања је у уочавању значаја употребе савремених технологија у виду коришћења FSO комуникационих система и компјутерских система у циљу ефикасног преноса и обраде дигиталне слике ради детекције пожара.

У складу са предметом и циљем, постављеним претпоставкама и методама истраживања, очекује се да ће резултати овог научно-истраживачког рада дати допринос напретку у овој области.

Резултат ове дисертације након спроведеног истраживања јесте да се применом FSO комуникационих система у комбинацији са применом компјутерских система може успешно и јефтино вршити детекција пожара у слици.

2. Модели

Савремени развој комуникационих система довео је до развоја и коришћења оптичких система преноса са високом брзином преноса података (*енгл.* high-data-rate) [1, 2]. Наведене могућности се оставрују применом FSO комуникационих система. Ови комуникациони системи преноса имају својства која их карактеришу и препоручују за употребу а то су:

- Није потребна лиценца за емитовање сигнала у спектру који се користи за оптичке комуникационе системе у слободном простору. За употребу ових система једини је услов да постоји оптичка линија видљивости тзв . LOS (*енгл.* Line of Sight).
- FSO системи имају могућност преноса податак великом брзином (*енгл.* high-data-rate).
- Употребом FSO комуникационих система могу се постићи велики протоци података (*енгл.* Large Bandwidth) у односу на друге бежичне комуникационе системе.
- За рад FSO система није потребна велика снага, у односу на остале примењене бежичне системе потребна је знатно мања снага.
- код FSO система не постоји могућност преслушавања као код радио-фреквентних комуникационих система.
- пружају велику безбедност приликом преноса података. Разлог је јер се свако пресретање оптичког снопа може детектовати, у виду прекида на пријемној страни. Није могуће детектовати оптички снап коришћењем анализатора спектра. Оптички ласерски сигнал не може да пролази кроз физичке препреке што је разлог да се овакви сигнали не могу прислушкивати.
- Мала цена практичне реализације. Потребне антене за реализацију FSO система су много мањих димензија у односу на

антене потребне за друге бежичне комуникационе системе и није потребно много простора за њихово инсталирање.

Међутим, FSO комуникациони системи поседују и одређене недостатке у односу на друге (радио фреквентне) комуникационе ситеме:

- Атмосфера може изазвати слабљења оптичког снопа, а физичке препрека (у граду то могу бити зграде) могу у потпуности да блокирају пролазак оптичког снопа. Услед сцинтилације јављају се слабљења сигнала.
- Услед временских прилика и окружења емитовања ласерског снопа, може се јавити позадински шум који је последица сунчевих зрака или рефлектора и лампи које могу да делују дуж пропагационог пута.
- Дужина линка је ограничена у земаљским комуникацијама на неколико километара. Ово ограничење је последица снаге ласера.

Због велике потребе корисника да имају приступ широкопојасним мрежама и срединама где је компликовано и скупо применом конвекционалних комуникационих система пружити ове услуге, FSO комуникациони системи налазе време велику примену у "last mile" конекцији, услед напред наведених предности. Међутим, због слабљења изазваних атмосферским приликама које се манифестују у виду сцинтилације која директно утиче на повећање BER-а (*енгл.* Bit Error Rate), због потешкоћа приликом инсталације система које се огледају у виду стабилности усмеравања, и других практичних проблема приликом реализовања и истраживања FSO система потребно је математички моделовати сигнал.

У циљу математичког моделовања FSO комуникационих система истражени су и развијени многи модели којима се описују перформансе система у присуству различитих атмосферских прилика. Неке сатистичке расподеле атмосферске турбуленције које обезбеђују изузетну везу између теоретских и експериманталних података су Log-normal модел турбуленције, *K* модел, [3, 4, 5], Gamma-Gamma модел [6, 7, 8, 9], НК модел [5, 10], Рајсов модел [11, 12], Gamma модел [13, 14], Malaga модел [15] дистрибуције и

многи други модели који врло добро повезују експерименталне и теоретске анализе перформанси система.

2.1 Опште карактеристике FSO комуникација

Ваздух око земљине површине услед сунчевог зрачења које је апсорбовано од стране земљине површине може представљати простор који је топлији или хладнији у зависности од надморске висине. Код сателитских комуникација слојеви топлијег ваздуха који изазива мању густину која повећањем може довести до турбулентног мешања са хладнијим ваздухом што изазива да температура ваздуха варира [16]. Код земаљских комуникација, које се користе у "last mile" конекцији температуре се дуж линка могу сматрати константним. Слабљења су резултат процеса апсорпције и расејања. Концентрација честица у атмосфери која је узрокована локалним временским приликама јесте најбитнији фактор који изазива флукуације земаљског оптичког сигнала. Слабљење сигнала кроз канал јесте последица присуства молекуларних честица и аеросола. Најјачи утицај на атмосферске турбуленције у земаљским бежичним оптичким комуникацијама имају варијације у атмосферском притиску, брзина и промене брзине ветра и варијације индекса рефракције које се јављају услед температурне нехомогености дуж простирања линка.

Интеракција између ласерског снопа и турбулентне средине резултује случајним варијацијама фазе и амплитуде сигнала што представља карактеристично светлуцање оптичког снопа који преноси информацију (сцинтилација), што доводи до фединга оптичког сигнала на пријему, које даље узрокују деградацију перформанси оптичког система. Атмосферска турбуленција је обично категорисана у режимима који зависе од индекса преламања и нехомогености. Ови режими представљају функцију растојања односно, дистанце оптичког зрачења кроз медијум и класификовани су као слаби, умерени, јаки и засићени. Атмосферска турбуленција резултира федингом сигнала и на тај начин угрожава перформансе система FSO комуникационог линка.

За пројектовање, имплементацију и рад ефикасних бежичних оптичких комуникационих система неопходно је добро разумевање карактеристика канала. Опис карактеристика канала је извршен његовим импулсним одзивом. Овај импулсни одзив се онда користи у циљу анализирања канала и смањења ефеката поремећаја канала. Губици снаге који су директно повезани са каналом могу настати услед два фактора, односно услед оптичких губитака и услед дисперзије. Бежични оптички комуникациони системи (канални) могу бити конфигурисани као директне комуникационе везе са директном оптичком видљивошћу тзв. LOS (**енгл. Line Of Sight**) комуникације и док је конфигурисање ових система као Non - LOS (**енгл. Non Line Of Sight**) [17] комуникационих система практично веома тешко изводљиво на отвореном простору. Код LOS конфигурације FSO комуникационог система ако су познати параметри (дивергенција пропационог снопа у односу на величину пријемника и растојање) губици се лако рачунају. Међутим код Non - LOS комуникационих система чије су конфигурације познате и као дифузни системи и које се најчешће користе у затвореном простору за конфигурацију система користи се рефлексја површина просторије. Код ових система непожељни сигнал се управо јавља услед рефлексје сигнала.

Код земаљских бежичних оптичких комуникационих система нарочито битан фактор је видљивост. Умањена видљивост, која је последица присуства аеросола и разних честица у атмосфери, битно може утицати на примену, доступност и ефикасност FSO комуникационих система. Смањена видљивост значи да је концентрација и величина честица у атмосфери повећана у односу на просечну видљивост, што коначно узрокује слабљење и расејање оптичког снопа [18]. Транспарентност атмосфере може се мерити и објективно што представља метеоролошки оптички домет [19] или енглески RVR (**енгл. Runway Visual Range**). Неке вредности атмосферског слабљења засноване на видљивости приказане су у табели 2.1.1.

Табела 2.1.1. Варијације атмосферског слабљења услед расипања засноване навидљивости

Видљивост S (Line Of Sight) (km)	$\lambda = 800 \text{ nm}$ (dB/km)	$\lambda = 1550 \text{ nm}$ (dB/km)
0,5	32,5	30,8
0,7	23	21
0,9	18	16
1,1	14,5	12,5
1,3	12	10
1,5	10	8,33

Кохерентни извори могу бити коришћени за линкове који се називају "in direct sight" линкови и који се најчешће користе у "last mile" конекцији, под условом да паразитске рефлексије не ометају главни сноп узрокујући модулацију детектованог сигнала [19].

Ефекти турбуленције који су изазвани случајним флукуацијама светлости (изазване сунчевим односно звезданим светлуцањима) могу довести до промена у фази оптичког снопа која као резултат има смањену резолуцију слике. Ефекти атмосферских турбуленција укључују управљивост снопа, играње слике, ширење снопа [18].

2.1.1 Губици атмосферског канала

Механизми губитака у FSO комуникацијама су у многоне слични, скоро идентични са губицима у LOS RF каналима али је ниво фединга већи него у каналима са RF сигнаlima. Пропагација оптичког сигнала кроз FSO комуникациони канал је врло осетљива на атмосферске прилике (као што су магла, киша итд). Интеракција између фотона и молекуларних честица атмосфере узрокује губитке у снази преноса, који су описани Beer-Lambert-овим законом [20].

За земаљске FSO комуникационе преносне линкове оптичког сигнала кроз атмосферу, оптичка снага на пријемнику P_r је повезана са оптичком снагом на предајнику P_t изразом:

$$P_r = P_t e^{-\tau_{od}} \quad (2.1.1)$$

где је τ - оптичка дубина. Удео снаге у оптичком линку је дефинисан као проводљивост и дат је изразом:

$$T = \frac{P_r}{P_t} = e^{-\tau_{od}} \quad (2.1.2)$$

Оптичка дубина и оптичка атмосферска трансмитанса се односе на атмосферске коефицијенте пригушења и на дужину преносне путање L по Вер-Lambert-овом закону [21]:

$$T(\lambda, L) = \frac{P_r}{P_t} = e^{(-\gamma_t(\lambda)L)} \quad (2.1.3)$$

где $\gamma_t(\lambda)$ - представља коефицијент укупног слабљења (пригушења) (m^{-1}), а $T(\lambda, L)$ - представља проводљивост атмосфере на таласној дужини λ .

Уопштено говорећи, коефицијент атмосферског слабљења може се изразити као [22]:

$$\gamma_t(\lambda) = \alpha_{ml}(\lambda) + \alpha_{al}(\lambda) + \beta_{ml}(\lambda) + \beta_{al}(\lambda) \quad (2.1.4)$$

где α_{ml} - представља молекуларни апсорбциони коефицијент, а β_{ml} - представља аеросолни апсорбциони коефицијент.

Губици услед апсорбције се дешавају услед интеракције пропагационих фотона и молекула (присутних у атмосфери) дуж пропагационог пута. [22]. Коефицијент апсорбције и апсорбција зависе од врсте молекула и њихове концентрације као и од таласне дужине те је у том контексту и сама апсорбција селективна. У контексту наведеног закључује се да атмосфера има транспарентне нивое зона таласних дужина са

минималном апсорбцијом које називамо „transmission windows“ (преносни прозори) [18].

Турбуленција представља феномен који се јавља у чистом ваздуху и утиче на пропацију оптичког снопа у просторном и временском домену услед температуре, притиска и промене ветра дуж пута оптичке пропације [2, 23]. Атмосферска турбуленција представља основни узрок померања фазе пропације оптичког сигнала који узрокују дисторзију оптичког таласа. Овакве дисторзије оптичког таласа називају се оптичка аберација и такође изазивају сцинтилацију. Промене у атмосфери као што су влага, аеросоли, температура и притисак утичу на промену рефракционог индекса варијације изазивајући случајне варијације у интензитету које су познате као вирови (*енгл.* Eddies) које имају ефекат објектива на светлост. Рефракциони индекс може бити описан следећим изразом:

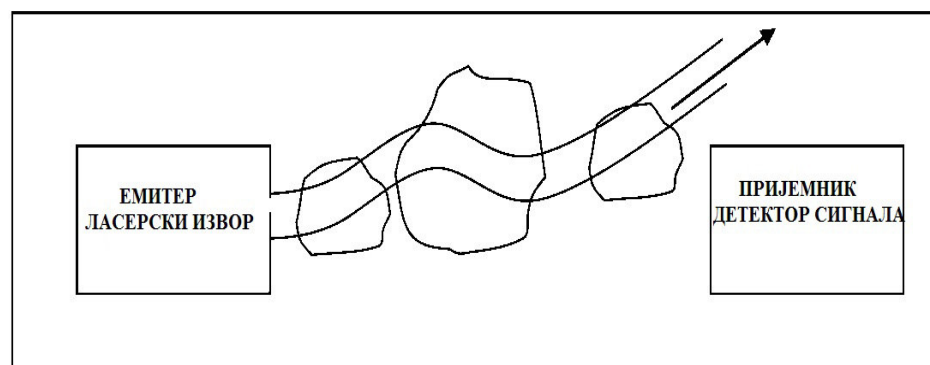
$$n-1 \approx 79 \times \frac{P}{T} \quad (2.1.5)$$

где је:

P - атмосферски притисак у (*mbar*)

T - температура у (К).

Ако је величина турбуленције вира већа од пречника снопа, цело ласерски снап изгледа као на слици 1.



Слика 2.1.1 Одступање ласерског снопа услед турбуленције

Параметар структурног индекса преламања (*енгл.* refractive index structure), који је увео Kolmogorov [24], обележава се са C_n^2 и представља најзначајнији параметар који одређује јачину турбуленције. Индекс рефракције C_n^2 зависи од географске локације, надморске висине и доба дана. Један од најчешће коришћених модела за описивање рефракционог индекса је Hufnagel-Valley [25, 26] модел:

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10}e^{(-h/1000)} + 2.7 \times 10^{-16}e^{(-h/1500)} + A_0e^{(-h/100)} [m^{-2/3}]. \quad (2.1.6)$$

где је:

h - надморска висина у (m),

v - брзина ветра на највишој надморској висини у (m/s),

A_0 - јачина турбуленције у нивоу земље, ($A_0 = 1.7 \times 10^{-14}$) у ($m^{-2/3}$).

Најважнија променљива овде јесте ветар и надморска висина. Турбуленција има три најважније последице:

- сцинтилацију,
- одступање снопа и
- ширење снопа.

У примени где је предвиђена хоризонтална путања, што је најчешћи случај код земаљских FSO комуникација, односно у "last mile" конекцији, може се претпоставити да је чак и код разумно велике удаљености C_n^2 константно. Карактеристична вредност индекса рефракције C_n^2 на земаљском нивоу за слабу турбуленцију може бити реда величина $10^{-17} (m^{-2/3})$, док за јаку иде до чак реда величина $10^{-13} (m^{-2/3})$ и више. Карактеристична вредност рефракционог индекса у умереним и најчешће присутним турбуленцијама, креће око $10^{-15} (m^{-2/3})$ [27].

2.1.2 Сцинтилација

Сцинтилација је један од најзначајнијих фактора који утичу на губитке FSO комуникационог система, она представља присуство оптичких турбуленција које утичу на флукуације сигнала у детектору [24, 28, 29, 30]. Пролазак светлости кроз атмосферске турбуленције изазване сцинтилацијом може да проузрокује губитак просторне и временске кохерентности ласерског снопа [24, 29, 31, 32]. Период трајања сцинтилације је релативно велики у односу на период трајања карактеристичног FSO преносног времена, (сцинтилација може трајати 1-10 ms), које скреће и до неколико Gbit/sec [32, 19], што представља довољан разлог да се оваква атмосферска флукуација (сцинтилација) може сматрати константном. Сцинтилација представља један од најзначајнијих видова сметњи узрокованих атмосферским приликама које изазивају повећање BER-а, чак и при релативно кратким пропагационим дужинама. Интензитет сцинтилације је описан сцинтилационим индексом σ_i^2 , односно, јачина сцинтилације може бити изражена као:

$$\sigma_i^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.1.7)$$

где I представља тренутно зрачење оптичког сигнала а $\langle I \rangle$ означава просечну ирадијацију оптичког сигнала.

У условима слабе турбуленције сцинтилациони индекс може бити написан као [29, 30]:

$$\sigma_i^2 = \exp \left[\frac{0,49\sigma_R^2}{(1+0,65d^2+1,11\sigma_R^{12/5})} + \frac{0,51\sigma_R^2(1+0,69\sigma_R^{12/5})^{-5/6}}{1+0,90d^2+0,62d^2\sigma_R^{12/5}} \right] - 1 \quad (2.1.8)$$

где се Rytov-а променљиву простирања таласа изражава као:

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.1.9)$$

где:

C_n^2 - представља индекс рефракције изражен у ($m^{-2/3}$) који се креће у опсегу од 10^{-17} до 10^{-13} ($m^{-2/3}$) [29, 30, 31], (треба напоменути да је за хоризонталне путање пропагационог пута, што је случај у "last mile" конекцији, параметар C_n^2 константан).

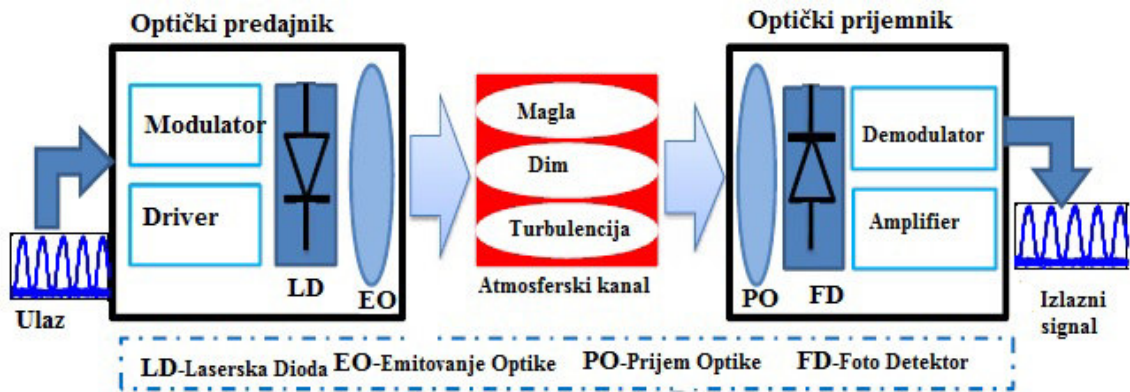
$k = 2\pi / \lambda$ - таласни број изражен у (m),

$d = \sqrt{kD_{RX}^2 / 4l}$ нормализовани објектив пријемника [29, 30, 34].

2.2 Модели атмосферских турбуленција

FSO комуникациони системи, морају имати обезбеђену оптичку видљивост (LOS) како би се несметано одвијао процес комуникације. На слици 2.2. дат је упрошћени приказ блок шеме једног FSO комуникационог система. Међутим, приликом пропагације оптичког снопа може доћи до нарушавања пропагационог пута, атмосферским приликама те је потребно математички моделовати тај утицај. У циљу ефикасног моделовања FSO комуникационог система потребно је што квалитетније сагледати и описати његове карактеристике. У циљу ефикасног описивања пропагације FSO комуникационог пута потребно је познавати функционалне карактеристике система и пропагацију описати математичким моделом. Због изузетне комплексности која је присутна код математичког моделовања атмосферске турбуленције универзални модел валидан за све врсте турбулентних режима тренутно не постоји иако постоји константна тежња да се предложи један ефикасан и универзалан математички модел. У том контексту предложени су многи математички модели а у скорије време предложен је и један модел, који се успешно може свести на већину познатих модела, M модел дистрибуције који у себи укључује већину до сада предложених модела. Овде ћемо дати кратак осврт на најчешће коришћене моделе као што су Rayleigh-ова дистрибуција, Log-Normal-на дистрибуција, Рајсов дистрибуција, Nakagami дистрибуција, Gamma-Gamma дистрибуција, Негативна експоненцијална дистрибуција као и M (Malaga) дистрибуција која ће бити

детаљније описана и анализирана и биће изведен затворени облик функције густине вероватноће PDF (**енгл. Probability Density Function**).



Слика 2.2.1. Блок дијаграм LOS FSO система.

2.2.1 Експоненцијална Weibull дистрибуција

Веиблов експоненцијални модел дистрибуције најчешће се користи за моделовање фединга и статистике сигнала који се простира кроз канал у окружењима при разним интензитетима турбуленција. Веиблов експоненцијални модел дистрибуције примењује се нпр. код система са великим отвором бленде на пријемној страни [35, 36]. Аутори радова [35, 36] препоручују коришћење Веиблове дистрибуције да би се описала вероватносна дистрибуције у облику датом изразом:

$$p_I(I) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right], \quad I \geq 0 \quad (2.2.1)$$

односно:

$$p_I(I) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left(\frac{I}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right] \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{I}{\eta}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1} \quad (2.2.2)$$

где:

α -представља параметар који даје већу свестраност експоненцијалној Веибаловој дистрибуцији и чврсто је завистан од димензија пријемне апертуре.

$$\alpha \approx \frac{7.220\sigma_i^{2/3}}{\Gamma(2.487\sigma_i^{2/6} - 0.104)} \quad (2.2.3)$$

β представља параметар облика и изражен је изразом

$$\beta \approx (\alpha\sigma_i^2)^{-6/11} \quad (2.2.4)$$

η параметар скалирања и изражен је изразом:

$$\eta = 1/\left[\alpha\Gamma(1+1/\beta)\right]g_1(\alpha, \beta) \quad (2.2.5)$$

где:

$$g_n(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i (i+1)^{-(n+\beta)/\beta} \times \Gamma(\alpha) / [i! \Gamma(\alpha-1)] \quad (2.2.6)$$

Напред наведене формуле 2.2.1 и 2.2.2 предствљају математички модел Веибалове експоненцијалне дистрибуције.

2.2.2 Log-Normalna дистрибуција

Log-Normalna дистрибуција се углавном користи за моделовање фединга повезаног са режимима слабе атмосферске турбуленције [24, 34, 37].

Овај модел је математички описан и карактерише га Ritova варијанса σ_i^2 . Ова турбуленција која изазива фединг се креће у границама $\sigma_i^2 < 1.2$, што уједно и дефинише границу важења Log-Normalnog модела [24]. Ritova варијанса се може израчунати као:

$$\sigma_i^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.2.7)$$

где је L - дистанца пропагације, а k - оптички таласни број.

Log-Normalni модел дистрибуције претпоставља да ће \log интензитет I ласерске светлости који пролази кроз атмосферу бити нормално расподељен када је средња вредност $-\sigma_i^2/2$. Функција густине расподеле вероватноће, pdf, примљене ирадијације дата је изразом:

$$f(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left\{-\frac{\left(\ln(I) + \frac{\sigma_i^2}{2}\right)^2}{2\sigma_i^2}\right\}, \text{ за } I \geq 0, \quad (2.2.8)$$

где је I - ирадијација на пријемнику, а σ_i^2 - сцинтилациони индекс.

2.2.3 Рајсова дистрибуција

Рајсов модел дистрибуције користи се за описивање сигнала у окружењима где постоји оптичка видљивост - LOS између предајника и пријемника. Компонента сигнала која се простире дуж линије оптичке видљивости је значајно интензивнија од компоненти које се добијају расејањем. Овај модел се користи за описивање земаљских комуникационих канала у слабо насељеним местима и предграђима градова (где најчешће постоји линија оптичке видљивости LOS) као и за описивање сателитских канала.

Густина вероватноће Рајсовог фединга изражена је изразом:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\alpha^2} e^{-K-(1+K)\alpha^2/\alpha^2} I_0\left(2\alpha\sqrt{\frac{K(1+K)}{\alpha^2}}\right) \quad (2.2.9)$$

где $I_0(x)$ представља Bessel-ову функцију првог реда [72], док је параметар K , дат у раду [82], и представља однос снаге кохерентне и некохерентне компоненте представљен:

$$K = \left[\frac{\overline{\alpha^2}}{\sqrt{\alpha_r^4 + 2\overline{\alpha_r^2}(\sigma_i^2 - \sigma_r^2)} - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)} - 1 \right] \quad (2.2.10)$$

и:

$$\overline{\alpha^2} = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \overline{\alpha_r^2} \quad (2.2.11)$$

$$\overline{\alpha_r^2} = \exp\left(-\frac{\sigma_\chi^2 + \sigma_\varphi^2}{2}\right) \quad (2.2.12)$$

$$\sigma_r^2 = (1/2G)(1 + \exp(-2\sigma_\varphi^2) - 2\exp(-2\sigma_\chi^2 - 2\sigma_\varphi^2)) \quad (2.2.13)$$

$$\sigma_i^2 = (1/2G)(1 - \exp(-2\sigma_\varphi^2)) \quad (2.2.14)$$

где σ_χ^2 представља Log-амплитудну варијансу која је дата изразом [94]

као:

$$\sigma_\chi^2 = 0.307k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (2.2.15)$$

2.2.4 Nakagami-m дистрибуција

Модулација која обједињује у опису Рајлијев и Рајсов фединг дистрибуције назива се Nakagami-m дистрибуција [25]. PDF примљеног сигнала овог модела може се описати математичким моделом:

$$f(I) = \frac{1}{2\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{I + A_0^2}{2\sigma_s^2}\right) I_0\left(\frac{A_0\sqrt{I}}{\sigma_s}\right) \quad (2.2.16)$$

где- σ_s^2 представља варијансу, а A_0 константа.

2.2.5 Гамма-Гамма дистрибуција

Гамма-гамма модел турбуленције заснива се на процесу модулације чији је PDF модел дистрибуције базиран на претпоставци расејања и преламања може бити представљен математички као [67]:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{(\alpha-\beta)}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I \geq 0 \quad (2.2.17)$$

где је I - интензитет сигнала, $\Gamma(\cdot)$ Гамма функција, и $K_{(\alpha-\beta)}$ представља модификовану Bessel-ову функцију другог реда. Параметри α и β су PDF параметри који описују сцинтилацију просторног таласа.

Ако се претпостави да је оптичка ирадијација просторни талас, параметри α и β карактеришу флукуације ирадијације, а PDF је повезан са атмосферским условима преко ових параметара као:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{0.49\sigma_R^2}{e^{(1+1.1\sigma_R^{12/5})^{7/6}} - 1}} \quad (2.2.18)$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{0.49\sigma_R^2}{e^{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} - 1}} \quad (2.2.19)$$

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.2.20)$$

где:

C_n^2 - представља рефракциони индекс који се може усвојити да буде константа за хоризонталну путању,

$k = 2\pi / \lambda$ - талсани број изражен у (m),

L - представља пропагациону дистанцу

PDF овог модела може се сматрати валидним за велики број режима турбуленције, од слабе до јаке турбуленције.

Уобичајене вредности за параметре σ_R^2 , α и β приказане су у табели 2.2.1. [67].

Табела 2.2.1 Уобичајене вредности параметара σ_R^2 , α и β

Параметар	Режим турбуленције		
	Слаба	Умерена	Јака
σ_R^2	0.2	1.6	3.5
α	11.6	4.0	4.2
β	10.1	1.9	1.4

2.2.6 Негативна експоненцијална дистрибуција

У режимима јаких флукуација где је дужина линка неколико километара број независних расејања постаје већи а флукуације амплитуде прате Рајлијевијеву дистрибуцију укључујући негативну статистику за зрачење, тако да је pdf ове дистрибуције моделован као:

$$f(I) = \frac{1}{I_0} e^{-\left(\frac{I}{I_0}\right)}, I \geq 0 \quad (2.2.21)$$

где $E[I]=I_0$ представља средњу вредност примљене ирадијације.

2.2.7 *M* (Малага) модел дистрибуције

Генерализовани модел дистрибуције којим би се могао описати велики број режима јесте *M* (Малага) модел. Истраживачи су развијањем познатих метода и њиховом модификацијом покушавали да дођу до генерализованог модела који би описао што већи број режима. Тако, Ритова метода представља конвенционалну методу за анализирање режима слабих

флуктуација. Додатак ове теорије истраживачи [39, 40] су развили у циљу добијања генералнијег модела, LL модела [14] како би добили Gamma-Gamma модел PDF-а. Оба наведена модела апроксимирају понашање флуктуације оптичког зрачења у турбулентној атмосфери у свим режимима зрачења. LL модел представља генерички модел зато што укључује у себи Log-Normalnu дистрибуцију која може бити примењена код слабих турбуленција и Log-Normalnu модулисану експоненцијалну дистрибуцију која се користи у јаким турбуленцијама па се чак шта више она може свести и на негативну експоненцијалну дистрибуцију у екстремно јаким турбулентним режимима [15]. На основу тога аутори у раду [39] су предложили модел дистрибуције који је више генерички и који укључује већину специјалних случајева, велики број валидних метода које су претходно предложене у литератури, обједињујући их у једну општију формализацију дату у затворном облику. Овај модел пропагације назива се M модел дистрибуције. Код овог модела се поред LOS компоненте и компоненте расејања укључује и трећа компонента која је уско повезана са LOS компонентом, као што је представљено изразом:

$$U = (U_L + U_S^C + U_S^G) e^{(x + js)} \quad (2.2.22)$$

где је:

$$U_L = \sqrt{G} \sqrt{\Omega} e^{(j\phi_A)} \quad (2.2.23)$$

$$U_S^G = \sqrt{\rho} \sqrt{G} \sqrt{2b_0} e^{(j\phi_B)} \quad (2.2.24)$$

$$U_S^C = \sqrt{(1-\rho)} U_S' \quad (2.2.25)$$

Где су U_S^C и U_S^G статистички независни стационарни случајни процеси, као и U_L и U_S^G који су такође независни случајни процеси. Променљиве U_L и U_S^G представљају случајне променљиве Log-amplitudne и фазне флуктуације. Параметар $\Omega = E[|U_L|^2]$ представља средњу снагу LOS компоненте, где је

средња снага укупне компоненте расејања означена са $2b_0 = E\left[|U_S^C|^2 + |U_S^G|^2\right]$.

Детерминистичке фазе LOS компоненте повезане са компонентом LOS расејања означене су са ϕ_A и ϕ_B . Са друге стране ρ представља фактор количине снаге расејања LOS компоненте расејања повезане са LOS компонентом. Фактор ρ зависи од дужине простирања L , интензитета турбуленције, оптичке таласне дужине λ , пречника снопа, просечне скале нехомогености ($l = \sqrt{\lambda L}$) зрака дивергенције услед ширења зрака, индукованог атмосферским приликама и растојања између различитих путева пропагације (LOS компоненте и компоненте расејања). Ако је размак између наведених путева већи од таласне дужине онда је индукована турбуленција фединга некорелисана.

Ирадијација M модела може се дефинисати изразом:

$$I = |U_L + U_S^C + U_S^G|^2 e^{2\chi} = \left| \sqrt{G} \sqrt{\Omega} e^{j\phi_A} + \sqrt{\rho} \sqrt{G} \sqrt{2b_0} e^{j\phi_B} + \sqrt{(1-\rho)} U_S' \right|^2 e^{2\chi} \quad (2.2.26)$$

Добијена M pdf расподела може се написати као:

$$I = |U_L + U_S^C + U_S^G|^2 \exp(2\chi) = YX \quad (2.2.27)$$

где:

$$\begin{cases} Y \triangleq |U_L + U_S^C + U_S^G|^2 & \text{(брзе флукуације)} \\ X \triangleq \exp(2\chi) & \text{(споре флукуације).} \end{cases} \quad (2.2.28)$$

PDF расподела M модела може се изразити сада као:

$$f(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}} \right) \quad (2.2.29)$$

где K_ν представља Bessel-ову функцију друге врсте ν - тог реда.

$$A \triangleq \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\gamma^{1+\frac{\alpha}{2}}\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\gamma\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}} \quad (2.2.30)$$

$$a_k \triangleq \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\gamma\beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}}}{\Gamma(k)} \left(\frac{\Omega'}{\gamma} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}} \quad (2.2.31)$$

где $\binom{\beta}{k}$ представља биноминални коефицијент и $\Gamma(\cdot)$ представља

Гамма функцију.

Код ове новопредложене M дистрибуције може се свођењем параметара, већина познатих дистрибуција изразити као у табели 2.2.2. [15].

Табела 2.2.2. Свођење параметара M дистрибуције на познате дистрибуције

Модел дистрибуције	Генерализација	Модел дистрибуције	Генерализација
Rice-Nakagami	$\rho = 0$ $\text{Var}[[U_L]] = 0$	Lognormalna	$\rho = 0$ $\text{Var}[[U_L]] = 0$ $\gamma \rightarrow 0$
Gamma	$\rho = 0$ $\gamma = 0$	K distribucija	$\Omega = 0$, and $\rho = 0$ or $\beta = 1$
HK distribucija	$\text{Var}[[U_L]] = 0$ $\rho = 0$ $X = \gamma$	Eksponecijalna Distribucija	$\Omega = 0$ $\rho = 0$ $\alpha \rightarrow \infty$
Gamma-Gamma distribucija	$\rho = 1$, then $\gamma = 0$ $\Omega' = 1$	Gamma-Rician Distribucija	$\beta \rightarrow \infty$
Shadowed-Rician distribucija	$\text{Var}[[X]] = 0$		

2.3 Модели слике и жига

У ери дигиталних комуникација слика представља један од најзаступљенијих мултимедијалних садржаја. Дигитална слика има коначан број пиксела и представљена је матрицом. Положај одређене тачке у слици одређен је индексима матрице (представљају врсте и колоне), док ниво сивог (ако се ради о монохроматској слици) представља вредност тог елемента матрице. Оваква слика може бити бинарна (црно бела), 8-битна или 16-битна, што значи да је представљена са 2 нијансе (црна и бела), 256, односно 65536 нијанси сивог. Такође, а сада и најчешће у примени је колор слика која се најчешће приказује преко примарних боја, црвене, зелене и плаве. Код представљања слике у боји користи се тродимензионална матрица док се елементи матрица крећу у опсегу као и код монохроматске слике у зависности од тога са колико је бита представљена слика. Велики проблем код дистрибуције мултимедијалног садржаја представља и заштита ауторских права. У циљу заштите ауторских права један од веома заступљених метода јесте инсертовање дигиталног воденог жига у мултимедијални садржај (слику) [43]. Инсертовање дигиталног воденог жига се може вршити у фреквентном и у просторном домену [44]. У циљу инсертовања дигиталног жига у трансформационом домену користи се више врста трансформација као што су: Дискретна косинусна трансформација (DCT) (*енгл.* **D**iscrete **C**osine **T**ransform) [45, 46], дискретна вавелет трансформација (DWT) [47, 48], (*енгл.* **D**iscrete **W**avelet **T**ransform), дискретна Фуријерова трансформација (DFT), (*енгл.* **D**iscrete **F**ourier **T**ransform), сингуларна декомпозиција матрица (SVD) [49, 50, 51, 52, 53] (*енгл.* **S**ingular **V**alue **D**ecomposition) и Шурова декомпозиција (*енгл.* Schur) [54, 55, 56, 57, 58], као и разне комбинације наведених трансформација. Такође жигови се могу поделити према више критеријума. Према критеријуму видљивости деле се на видљиве и невидљиве, где невидљиви који су углавном у

употреби могу бити невидљиви робусни и невидљиви ломљиви жигови. Жигови се могу поделити и према начину инсертовања и то на три класе:

- метод који у процесу детекције и екстракције инсертованог жига захтева оригиналну слику тзв. non-blind метод,

- метод који у процесу детекције и екстракције инсертованог жига корисити само слику (податке-елементе) оригиналног жига или неку другу потребну информацију.

- метод који у процесу детекције и екстракције инсертованог жига не корисити ни оригиналну слику нити оригинални жиг тзв. blind метод.

2.3.1 Инсертовање и карактеристике дигиталних водених жигова

Дигитални водени жигови имају више карактеристика које зависе од области у којој се примењују али без обзира на то могу се издвојити и набројати опште карактеристике жигова:

- Верност оригиналу (екстраковани жиг треба да буде веродостојан инсертованом)

- Робустност (инсертовани дигитални жиг треба да буде отпоран на различите промене)

- Безбедност

- Цена израчунавања

- Погрешна позитивна детекција (*енгл.* false positive detection), могућност да се из слике са жигом екстракује жиг који није идентичан инсертованом.

Битно је напоменути да не мора сваки дигитални жиг да испуњава све наведене карактеристике али у зависности од конкретне примене неопходно је да задовољи потребе исте. Међутим, приликом трансмисије слике са дигиталним жигом могуће су врло различите врсте атака на слику те је стога

овде наведена већина метода за инсертовање и екстракцију дигиталног жига у фреквентном домену.

У фреквентном домену приликом инсертовања дигиталног жига врши се модификација коефицијената трансформације оригиналне слике док се приликом инсертовања жига у просторном домену врши модификација пиксела оригиналне слике. Жигови инсертовани у просторном домену представљају слабо робустне жигове те је стога чешћа употреба метода инсертовања дигиталног воденог жига у фреквентном домену.

У циљу успешног инсертовања дигиталног жига у слику развијени су многи алгоритми којима је заједничко то да користе два приступа. Један је приступ у којем се приступа трансформацији целе слике у неком од трансформационих домена и инсертовање дигиталног жига, односно модификацијом коефицијената слике, док је други приступ при којем се врши дељење слике на блокове, а затим се врши трансформација сваког од блокова слике и модификација пиксела коефицијентима жига. За потребе жига може се користити било која слика (монохроматска или у боји) или псеудо случајни низ.

- Инсертовање дигиталног воденог жига применом DCT трансформације

У примени дискретне косинусне трансформације најчешће се користи техника која подразумева да се врши DCT трансформација целе слике и инсертовање дигиталног воденог жига у изабрани део DCT коефицијената слике [45, 46, 57]. Ова техника трансформације слике се такође успешно користи и при JPEG компресији што доводи до закључка да се жиг инсертован овом техником може сматрати робустним на ову врсту компресије.

- Инсертовање дигиталног воденог жига применом DWT трансформације

Код дигиталног процесирања сигнала, дискретна wavelet трансформација је широко примењена тако да се успешно може применити и

код метода за инсертовање дигиталног воденог жига у слику. Најчешће је у примени дводимензионална дискретна wavelet трансформација, 2-D DWT [47, 48, 58], која слику дели на 4 подслике (блока), од којих једна представља "апроксимацију" тј, нискофреквентну компоненту слике, а остале три представљају "детаље" слике, односно високофреквенцијске компоненте слике у хоризонталном, вертикалном и дијагоналном правцу. Обележавање наведених компоненти врши се на следећи начин HL - хоризонтални детаљи слике, LH - вертикални детаљи слике и HH - дијагонални детаљи слике. LL - представља високофреквентну компоненту слике и ако се даље жели поново применити ова трансформација на слику она се врши на овој компоненти, примењујући исти потупак изнова. Ова трансформација се успешно примењује при стандардној JPEG2000 компресији па је закључак да је дигитални жиг инсертован применом неке од метода које укључују ову трансформацију отпоран на JPEG2000 компресију.

- Инсертовање дигиталног воденог жига применом SVD трансформације

SVD трансформација се у процесирању сигнала врло успешно и распрострањено користи за компресију, елиминацију шума [53] или инсертовање дигиталног воденог жига у слику [51, 52, 53]. Карактеристике ове трансформације су између осталог и следеће:

- успешно се може применити и на квадратним и на правоугаоним матрицама,
- добијене сингуларне вредности имају веома добру стабилност и практично се не мењају код мањих деформација слике,
- оригинална слика A и слика над којом је примењена трансформација A^* , односно којој су промењени редови и колоне имају исте сингуларне вредности.

Дигитални водени жиг инсертован применом методе која укључује ову трансформацију јесте веома отпоран на различите врсте атака на слику, као што су ротација, суперпонирање импулсног шума, скалирање и тд.

Алгоритми који користе SVD трансформацију за инсертовање дигиталног воденог жига у слику могу се поделити у 4 групе и то су алгоритми који за инсертовање користе:

- сингуларне вредности,
- сингуларне векторе,
- и сингуларне вредности и сингуларне вектора, и
- комбинују SVD трансформацију са другим типовима трансформација.

- Инсертовање дигиталног воденог жига применом Шурове декомпозиције

Шур декомпозиције представља једно од битних средстава која су у примени у нумеричкој линеарној алгебри [48]. У процесирању сигнала користи се у процесу инсертовања дигиталног воденог жига у слику [55, 56]. Шур декомпозиција је по карактеристикама веома слична SVD декомпозицији али је код ове трансформације потребно знатно мањи број фајлова процесирати. Наравно и трансформација има своје предности и недостатке као и SVD трансформација а разлика је у томе што се предност огледа у брзини обраде док је недостатак робусност тако инсертованог жига.

2.4 Основне мере перформанси

У циљу ефикасног моделовања и провере квалитета перформанси система примењују се мере квалитета. Опште примењене мере квалитета у комуникационим системима и процесирању сигнала су функција густине вероватноће PDF (*енгл. Probability Density Function*), капацитет канала CC (*енгл. Channel Capacity*), грешка вероватноће у биту BER (*енгл. Bit Error Rate*), однос сигнал шум SNR (*енгл. Signal-to-Noise-Ratio*), максимални однос сигнал шум PSNR (*енгл. Peak Signal-to-Noise-Ratio*) и нормализована корелација NC (*енгл. Normalized Correlation*).

Основне карактеристике наведених мера квалитета су:

- **BER** и **SNR** су мере квалитета које се користе за оцену квалитета комуникационог система. BER перформанса зависи од просечне примљене снаге, снаге сцинтилације и примљеног шума и представљају проценат битова са грешком подељених са укупним бројем битова који су пренешени кроз канал. Са одговарајућим пројектовањем отвора на пријемној страни, примљена оптичка снага може бити повећана а ефекат сцинтилације у великој мери смањен па чак и у потпуности одбачен. Ова перформанса је битна и због тога што је веома важно да знамо који део битова је са грешком како би смо маргине подесили на одговарајући ниво. SNR је такође мера квалитета која нам показује квалитет трансмисионог канала или мултимедијалног сигнала кроз мрежни канал. Код турбуленције канала, SNR је изражен на следећи начин [61]:

$$SNR = \frac{P_T}{\sigma_N} = \frac{\text{snaga signala}}{\text{snaga šuma}} \quad (2.4.1)$$

А како су SNR и BER у директној вези то се за FSO линкове са on-off keying модулационом шемом BER може написати као [64, 65, 66]:

$$BER = \frac{\text{број пренесених симбола}}{\text{укупан број симбола}} \quad (2.4.2)$$

- **CC**-капацитет канала (*енгл.* Capacity of the Channel) представља максималну брзину комуникације којом се информације са изузетном поузданошћу могу преносити кроз дати канал за коју се може постићи произвољно мала грешка [64]. Општа једначина за капацитет канала дата је изразом:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.4.3)$$

где је B - канала у Hz, S - снага сигнала, а N - снага шума.

Можемо закључити да када је SNR мали капацитет канала расте линеарно са примљеном снагом сигнала. Са друге стране када је SNR

велики онда капацитет канала расте логаритамски у односу на примљену снагу сигнала. Закључујемо да што је већа снага на пријему или однос SNR онда је мањи ефекат на капиците канала. Капацитет канала такође зависи и од протока тако што је код мањих протока при високом SNR-у капацитет је неостељив на мале промене SNR-а. Док како проток расте тако се и капацитет канала мења тако што се капацитет брзо повећава.

- **NC** нормализована корелација представља однос који нам говори о томе колика је сличност или одступање појединих делова слике у односу на оригинал. Ова мера квалитета нам говори, за разлику од MSE, која нам каже колика је разлика у броју пиксела, колики је проценат пиксела на погрешном месту у односу на оригиналну слику. Ова мера квалитета нам говори и о квалитету пренесене слике.

3. Анализа перформанси преноса

У циљу што ефикаснијег и прецизнијег пројектовања система моделовање канала је веома важно како би се спровела прецизна процена перформанси система. У ту сврху спроведена су бројна истраживања и предложени су бројни математички модели за густину вероватноће функције за различите сценарије флукуација [2, 14, 39, 65, 66, 67]. Најпре су предложени модели који описују услове слабих флукуација ирадијације, а то су модели К-дистрибуције, Nakagami- m дистрибуције, нормализоване К-дистрибуције, као и Log-normal дистрибуција [2]. Математички модел који описује широки опсег турбуленција јесте Gamma-Gamma модел. Овај модел је дуго година представљао најпогоднији модел и модел који је највише описиван у литератури. Као модел који се намеће да буде погоднији од Gamma-Gamma модела за описивање великог броја флукуација FSO комуникационих система у новије време представљен је M (Malaga) модел [15]. Овај модел се свођењем одговарајућих параметара може применити на Rice-Nakagami модел, Gamma модел, НК модел, Shadowed-Rician модел дистрибуције, Log-Normal-ан модел дистрибуције, К-модел, Експоненцијални модел и Gamma-Rician модел дистрибуције.

3.1 Перформансе преноса FSO комуникационих система кроз M атмосферски канал

Моделовање FSO комуникационих система M моделом атмосферског канала јесте врло угодно због општости овог модела. Општост овог модела се огледа у томе што свођењем појединих параметара врло лако може бити редукован на велики број других добро познатих комуникационих модела, као што су Rice-Nakagami [65], Gamma-Gamma, Gamma-Ricean, Log-Normal [15]. Модулација дигиталног сигнала превођењем сигнала у специфични код (као што су RZ-return to Zero и NRZ Non Return to Zero) како би се добио stream импулса који се онда може модулисати од модулационих шема које могу бити фреквентна модулација - FSK (енгл. Frequency Shift Keying) [68, 69, 70]

(BFSK, QFSK....) и фазна модулација - PSK (енгл. Phase Shift Keying) [7, 24, 71], (BPSK, BDPSK, QPSK....MPSK).

3.1.1 BER перформансе M модела атмосферског комуникационог канала при BPSK модулационој шеми

Анализа перформанси M атмосферског турбулентног канала извршена је кроз призму BER мере перформанси и изведен је затворени математички облик. FSO комуникациони канал је моделован генерализованом M дистрибуцијом, која је описана FSO трансмисионим линком преко три компоненте сигнала, line - of - sight (LOS) компонентом и две расејане компоненте које су означене као U_S^{cop} и U_S^{ind} . За прву компоненту U_S^{cop} усвојено је да је повезана са LOS компонентом представљајући kvazi-forward оптички сигнал. Друга расејана компонента која је означена као U_S^{ind} представља статистички независну компоненту од предходне две компоненте и њоме је означено оптичко поље расејања, која се јавља из енергије која је расута. Овако састављено оптичко поље може бити предстаљено једначином [15]:

$$U = (U_L + U_S^{cop} + U_S^{ind}) \exp(\chi + jS) \quad (3.1.1)$$

где су χ и S - случајне реалне променљиве које представљају log-амплитудне и фазне флукуације оптичког поља. LOS компонента је дефинисана као $U_L = \sqrt{G} \sqrt{\Omega} \exp(j\phi_L)$, док су остале две расејане компоненте дефинисане као $U_S^{cop} = \sqrt{\rho} \sqrt{G} \sqrt{2b_0} \exp(j\phi_C)$ и $U_S^{ind} = \sqrt{(1-\rho)} U_S'$, где је параметр Ω дефинисан као $\Omega = E[|U_L|^2]$, тотална компонента расејања означена са $2b_0$ дефинисана је као $2b_0 = E[|U_S^{cop}|^2 + |U_S^{ind}|^2]$, параметар ρ , $0 \leq \rho \leq 1$, представља фактор који изражава вредност снаге расејања повезане са LOS компонентом и зависи од дужине пропационог пута, док U_S' представља циркуларну Гаусову случајну комплексну променљиву, а G означава Гамма случајни

процес са јединичном средњом вредношћу. Константе ϕ_L и ϕ_C означавају детерминистичке фазе LOS компоненте и LOS расејане компоненте.

Примљени сигнал ирадијације може бити изражен као:

$$I = |U_L + U_S^{cop} + U_S^{ind}| \exp(2\chi) = YX \quad (3.1.2)$$

где $X = \exp(2\chi)$ означава large-scale флукуације а $Y = |U_L + U_S^{cop} + U_S^{ind}|$ означава small-scale флукуације, развијене према изразима (20) и (21) из рада [15]. Даље може бити показано да примљена ирадијација је развијена у складу са генерализованим M моделом дистрибуције као:

$$f(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}} \right) \quad (3.1.3)$$

где,

$$\left\{ \begin{array}{l} A \triangleq \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\gamma^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\gamma\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}} \\ a_k \triangleq \frac{(\beta-1)}{(k-1)} \frac{(\gamma\beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}}}{\Gamma(k)} \left(\frac{\Omega'}{\gamma} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}} \end{array} \right. \quad (3.1.4)$$

где $K_\nu(\cdot)$ [73, (8.432.2)] означава модификовану Bessel-ову функцију другог

реда, где $\Gamma(\cdot)$ означава Гамма функцију [73, (8.310.1)] и $\binom{n}{k}$ представља

биноминални коефицијент.

Параметар α представља ефективни број ћелија кроз које се простире сигнал са спором сцинтилацијом, док параметар β представља ефективни број ћелија кроз које се простире сигнал са брзом сцинтилацијом, у истом облику као што је објашњено. Такође важи $\Omega' = \Omega + \rho 2b_0 + 2\sqrt{2b_0\Omega\rho} \cos(\phi_L - \phi_C)$, и $\gamma = 2b_0(1 - \rho)$.

Општост овог M модела дистрибуције може се показати ако се вредности параметара ρ , γ , Ω' , α , β , X , G и U_L редукују на одговарајуће вредности. Редуковањем коефицијената ρ , γ , Ω' , α , β , X , G и U_L тако што поставимо вредност: а) $\rho=0$, и $\text{Var}[|U_L|]=0$ M модел дистрибуције се редукује на Rice-Nakagami модел; б) $\rho=0$, и $\gamma=0$ овај модел се редукује на Gamma модел; с) $\text{Var}[G]=0$, $\rho=0$, и $X=\gamma$ овај се модел такође редукује на НК модел дистрибуције; д) $\rho=1$, $\gamma=1$ и $\Omega'=1$ анализирани модел се редукује на Gamma-Gamma модел дистрибуције; е) $\text{Var}[|X|]=0$, редукује се на Shadowed-Rician модел дистрибуције, ф) $\rho=0$, $\text{Var}[|U_L|]=0$, и $\gamma \rightarrow \infty$ редукује се на Log-normal-ан модел дистрибуције; г) $\Omega=0$ и $\rho=0$ или $\beta=1$ овај се модел редукује на К модел дистрибуције; х) $\Omega=0$, $\rho=0$, и $\alpha \rightarrow \infty$ редукује се на Exponential-ни модел дистрибуције; и и) $\beta \rightarrow \infty$ редукује се на Gamma-Рајсов модел дистрибуције.

Перформанса система BER може бити одређена решавањем услова за BER, где \bar{P}_e , зависи од типа модулације тј.:

$$P_e = \int_0^{+\infty} f_I(I) \bar{P}_e dI \quad (3.1.5)$$

У циљу добијања вредности BER перформанси BPSK FSO комуникационог система кроз M индуковани фединг турбулентни канал, потребно је израчунати израз:

$$\bar{P}_e = \int_0^{+\infty} \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{P_T}{\sigma_N} I \right) P(I) dI \quad (3.1.6)$$

где P_T означава средњу пренесену оптичку снагу, и σ_N означава средњу пренесену снагу шума.

У циљу добијања вредности BER перформанси BPSK FSO система кроз M турбулентни индуковани фединг канал, након изражавања интеграла

из израза (3.1.6) у облику Мејер-ове G-функције $erfc(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[x \mid 0, \frac{1}{2} \right]$ [73,

(8.4.14/2)], и $K_\nu(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \mid \frac{\nu}{2}, \frac{\nu}{2} \right]$ [73, (8.4.23/1)], добијамо:

$$P_e = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \int_0^{+\infty} I^{\frac{\alpha+k-1}{2}} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'}, \frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha-k}{2} \right] G_{1,2}^{2,0} \left[\left(\frac{P_T}{\sigma_N} I \right)^2 \mid 0, \frac{1}{2} \right] dI. \quad (3.1.7)$$

Користећи [73, (2.24.1/1)] заједно са [73, (8.2.2/14)], затворени облик за BER перформансе BPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг канал може се изразити као:

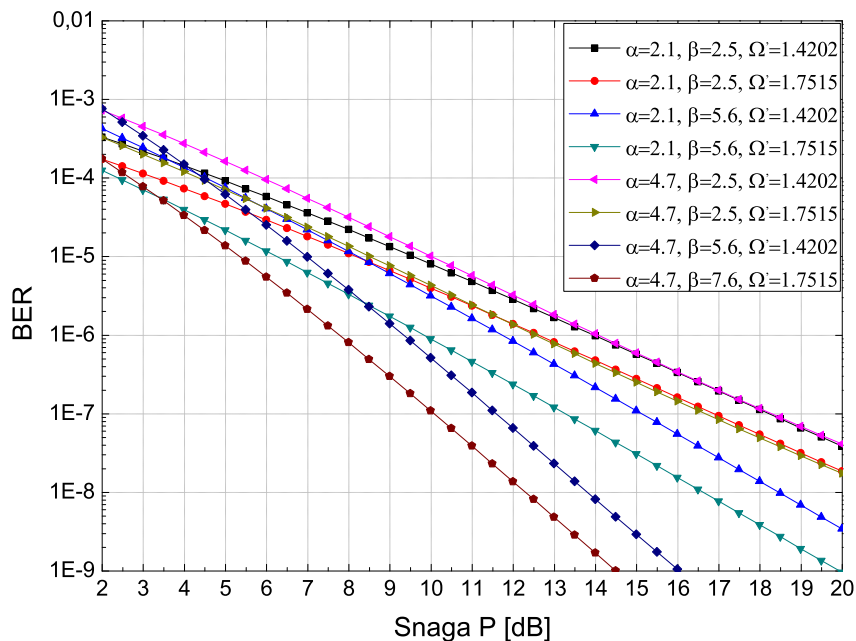
$$P_e = \frac{1}{4\pi\sqrt{\pi}} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{\frac{\alpha+\beta+1}{2}} G_{5,2}^{2,4} \left[\left(4 \frac{P_T}{\sigma_N} \frac{\gamma\beta + \Omega'}{\alpha\beta} \right)^2 \mid \frac{1-2\alpha}{2}, \frac{2-2\alpha}{2}, \frac{1-2k}{2}, \frac{2-2k}{2}, 1, 0 \right] \quad (3.1.8)$$

где $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ означава Мејер-ову G-функцију [73, (9.301)].

У циљу показивања општости овог модела и приказа перформанси, нумерички резултати за BER при BPSK FSO комуникационом систему кроз M индуковани турбулентни фединг представљени су графички.

На слици 3.1.1. су представљене добијене вредности за BER при BPSK модулативној шеми FSO комуникационог система кроз M индуковани турбулентни фединг канала у односу на $P = P_T/\sigma_N$. На слици 3.1.1. је приказан утицај α , β и Ω' параметара на добијени BER. Видљиво је да су перформансе боље, добијени BER има вредности које су мање, при константним вредноостима за параметре α и Ω' , и у случају када се вредности параметра β повећавају. Слично се може закључити са слике 1 да када вредности параметара β и Ω' , са коришћеном већом вредношћу параметра α вредности перформансе BER постају све веће до достизања вредности снаге $P=14$ [dB], док након тога са порастом вредности снаге P вредности перформансе BER имају исте вредности као и при мањим

вредностима параметра α . Такође се може закључити да за различите комбинације параметара α и β ако је Ω' постављено на већој вредности перформансе система су боље, односно, BER има мању вредност.

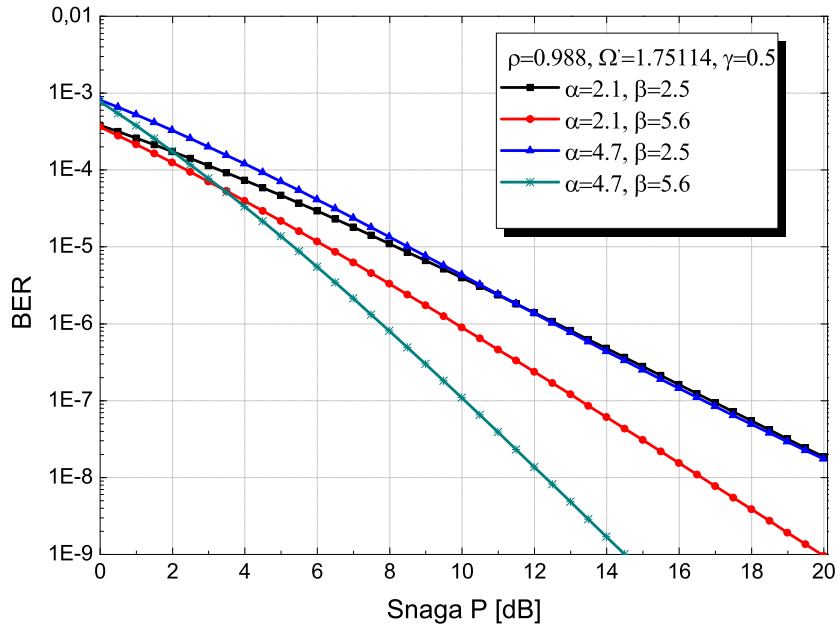


Слика 3.1.1. BER, BPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за различите вредности α , β и Ω' .

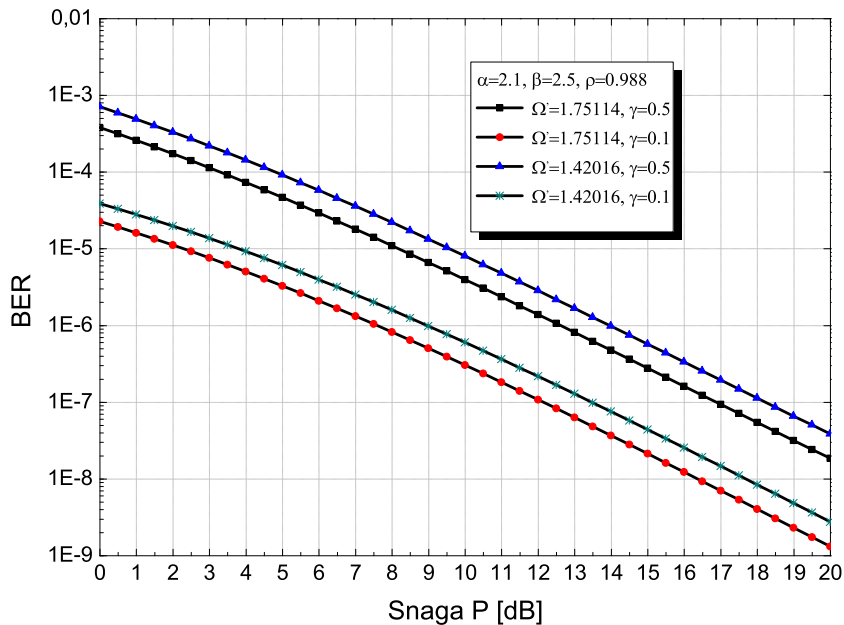
У случају већег утицаја параметра $\Omega'=1.75114$ на слици 3.1.2. је приказана зависност перформанси BER-а, од α и β када је вредност $\gamma = 0.5$ и $\rho = 0.988$, фиксирана на задату вредност. Са слике 3.1.2. је видљиво да када параметар α и β имају веће вредности перформансе су боље при већим снагама док су при врло малим снагама перформансе система нешто лошије. Такође при већој вредности параметра $\alpha = 4.7$ а при мањој вредности параметра $\beta = 2.5$ систем има знатно лошије перформансе на малим снагама док су перформансе система при снагама већим од $P=14$ [dB], параметри система незнатно бољи у односу на случај када су вредности параметара α и β са мањим вредностима.

Како би се истражили сви случајеви промене параметара на слици 3.1.3. је приказан утицај параметра Ω' и γ док су параметри $\alpha = 2.1$, $\beta = 2.5$ и $\rho = 0.988$ фиксиране на задате вредности. Са слике 3.1.3. се може уочити да систем има најлошије карактеристике при вредностима параметара $\Omega'=1.42016$ и $\gamma = 0.5$ а најбоље су при вредностима параметра $\Omega'=1.75114$ и

$\gamma = 0.1$. Повећање вредности параметра γ утиче на побољшање перформанси система док са друге стране побољшање параметара система се добија смањењем вредности Ω' .



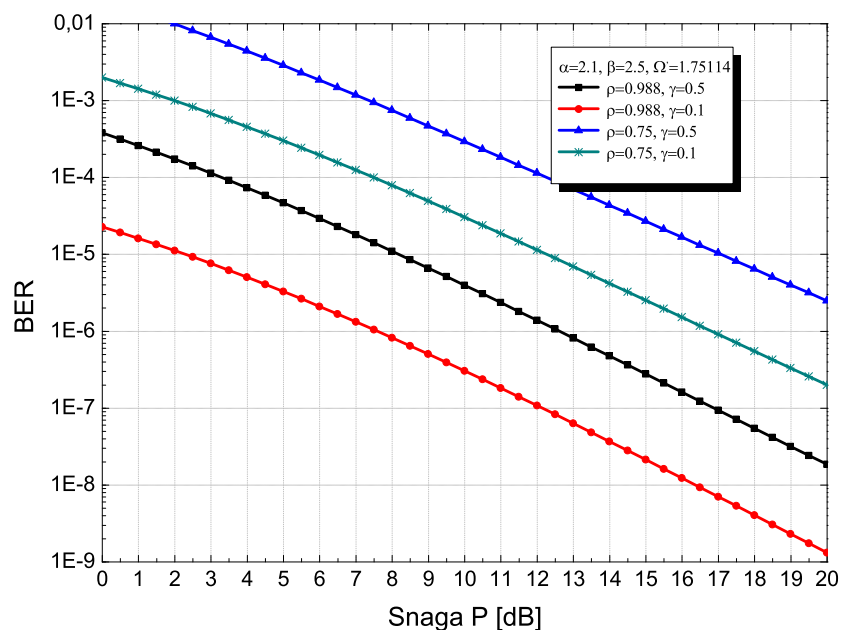
Слика 3.1.2. BER, BPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за различите вредности α , β .



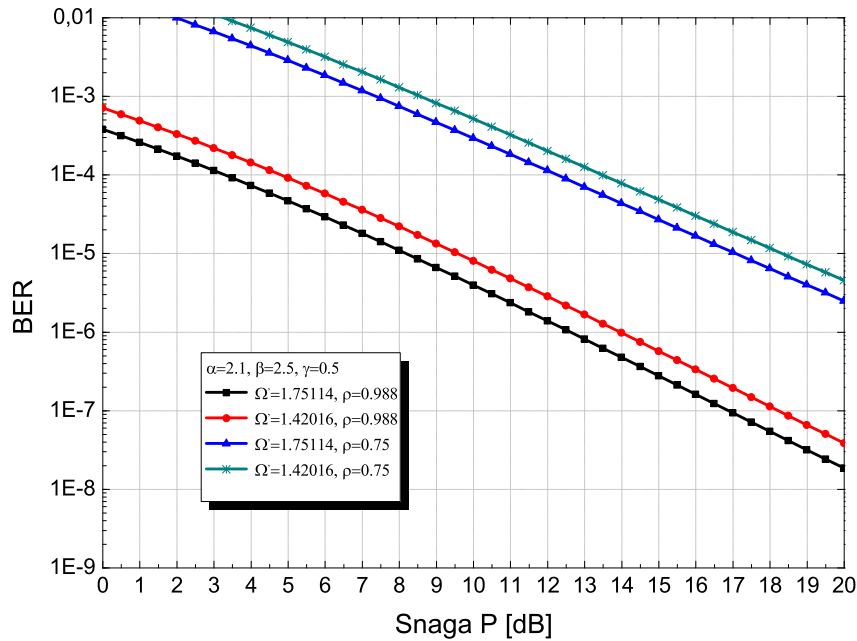
Слика 3.1.3. BER, BPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за различите вредности Ω' и γ .

У циљу потпуне и свеукупне промене параметара, на слици 3.1.4. је приказан утицај параметра ρ и γ док су параметри $\alpha=2.1$, $\beta=2.5$ и $\Omega'=1.75114$, фиксирани на задате вредности. Са слике 3.1.4. се може уочити да систем има најлошије карактеристике при вредностима параметара $\rho=0.75$ и $\gamma=0.5$, док су најбоље перформансе система при вредностима параметра $\rho=0.988$ и $\gamma=0.5$. Може се закључити да повећање вредности параметра ρ директно утиче на побољшање параметара система, док са друге стране смањење вредности параметра γ директно утиче на побољшање параметара система.

Коначно, на слици 3.1.5. је дат задњи случај могуће промене параметара за BPSK модулацију, где су варирани параметри Ω' и ρ док су параметри $\alpha=2.1$, $\beta=2.5$ и $\gamma=0.5$, фиксирани на задате вредности. Са слике 3.1.5. се може уочити да систем има перформансе које су најслабије при $\Omega'=1.42016$ и $\rho=0.75$, док су најбоље перформансе система при $\Omega'=1.75114$ и $\rho=0.988$. Са повећањем вредности параметра Ω' систем има боље перформансе док са друге стране повећање ρ такође утиче на побољшање перформанси система.



Слика 3.1.4. BER, BPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за различите вредности ρ и γ .



Слика 3.1.5. BER, BPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за различите вредности Ω' и ρ .

Анализом резултата приказаних на сликама 3.1.1-3.1.5 може се закључити да добијене вредности и приказане криве на дијаграмима имају очекиване вредности и изглед за BPSK модулатиону шему па се стога може рећи да се овај модел и добијени затворени облик могу примењивати у математичким моделма за описивање FSO комуникационих система.

3.1.2 BER перформансе M модела атмосферског комуникационог канала при BDPSK модулатионој шеми

У циљу свеобухватног анализирања перформанси преноса кроз M атмосферски турбулентни канал извршена је анализа BER мере перформанси и изведен је затворени математички облик за BDPSK примењену модулатиону шему. Ова модулатиона шема није кохерентан облик PSK и самим тим погодна је како би се потреба за кохерентним сигналом на пријемнику код PSK. Ова модулатијона шема може бити много јефтинија и једноставнија за практичну употребу у односу на стандардне фазне модулатионе технике управо због не постојања потребе за

кохерентним сигналом. Недостатак ове модулације јесте тај да се код ње јавља већи број погрешно демодулисаних битова. FSO комуникациони канал је моделован генерализованом M дистрибуцијом, која је описана у предходном поглављу где се оптичко поље, такође може представити једначином 3.1.1.

Примљени сигнал ирадијације може бити изражен једначином (3.1.2) како би даље у складу са M дистрибуцијом био изражен изразом (3.1.3) у којем су параметри A и a_k у складу са изразом (3.1.4).

Перформанса система BER може бити одређена решавањем услова за BER, где је у једначини (3.1.5) усвојен услов за \bar{P}_e , у зависности од типа модулације тј. за BDPSK модулацију.

У циљу решавања вредности BER перформанси, BDPSK FSO комуникационог система кроз M индуковани фединг турбулентни канал, следећи \bar{P}_e је усвојен и замењен у једначину (3.1.5) те сада једначина има следећи облик:

$$\bar{P}_e = \int_0^{+\infty} \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{P_T}{\sigma_N} I\right) P(I) dI \quad (3.1.9)$$

где P_T означава средњу пренесену оптичку снагу, и σ_N означава средњу пренесену снагу шума.

У циљу добијања вредности BER перформанси BDPSK FSO система кроз M турбулентни индуковани фединг канал, након изражавања интеграла из израза (3.1.6) у облику Мејјер-ове G-функције $e^{-x} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{0,1}^{1,0} \left[x \mid_0^- \right]$ [73,

(8.4.23/1)], и $K_\nu(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \mid_{\frac{\nu}{2}, \frac{\nu}{2}}^- \right]$ [73, (8.4.23/1)], добијамо:

$$P_e = \frac{1}{8} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \int_0^{+\infty} I^{\frac{\alpha+k-1}{2}} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega}, \frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha-k}{2} \right] G_{0,1}^{1,0} \left[\frac{P_T}{\sigma_N} I \mid_0^- \right] dI \quad (3.1.10)$$

Користећи [73, (2.24.1/1)] заједно са [73, (8.2.2/14)], затворени облик за BER перформансе BDPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг канал може се изразити као:

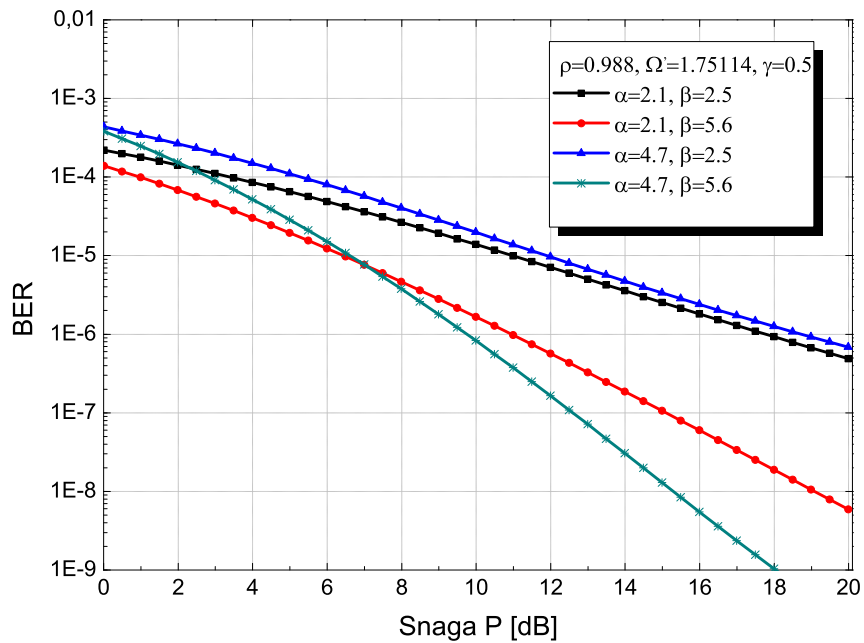
$$P_e = \frac{1}{4\pi} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+\beta+1}{2}} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{P_T}{\sigma_N} \frac{\gamma\beta + \Omega'}{\alpha\beta} \middle| \frac{1-2\alpha}{2}, \frac{2-2k}{2} \right] \quad (3.1.11)$$

где $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ означава Мејер-ову G-функцију [73, (9.301)].

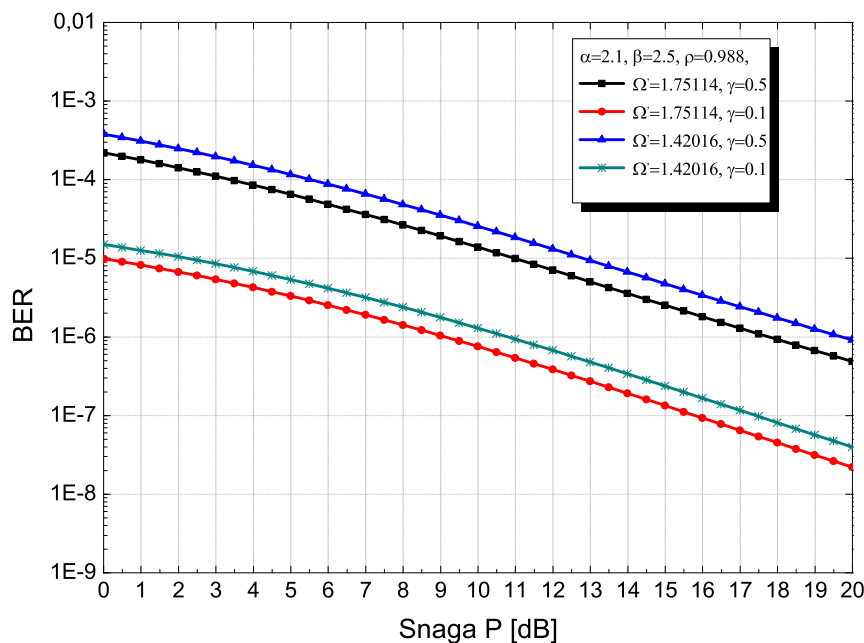
У циљу приказа перформанси овог модела када је примењена, наведена BDPSK модулација и упоређивања истих са другим модулацијама, нумерички резултати за BER при BDPSK FSO комуникационом систему кроз M индуковани турбулентни фединг канал представљени су графички.

На слици 3.1.6. је приказана зависност перформанси BER-а, од α и β када је вредност $\Omega'=1.75114$, $\gamma=0.5$ и $\rho=0.988$, фиксирана на задату вредност. Са слике 3.1.6. је видљиво да када параметри $\alpha=4.7$ и $\beta=5.6$ имају наведене веће вредности, перформансе су знатно боље при снагама већим од $P=14$ [dB] у односу на перформансе при осталим могућностима вредности варираних параметара. Систем има најслабије карактеристике при вредностима параметара $\alpha=4.7$ и $\beta=2.5$. Са дијаграма се може закључити да при одређеним околностима, за разлику од случаја када су перформансе најбоље (у случају када оба параметра имају веће вредности), смањење вредности параметра α може утицати на побољшање карактеристика система.

У циљу истраживања свих могућих варијација параметара при примењеној BDPSK модулацији, на слици 3.1.7. је приказан утицај параметра Ω' и γ док су параметри $\alpha=2.1$, $\beta=2.5$ и $\rho=0.5$ фиксиране на задате вредности. Са слике 3.1.7. се може уочити да систем има најлошије карактеристике при вредностима параметара $\Omega'=1.42016$ и $\gamma=0.5$ а најбоље су при вредностима параметра $\Omega'=1.75114$ и $\gamma=0.1$. И овде је случај исти као и када је примењена BPSK модулација што значи да повећање вредности параметра γ утиче на побољшање перформанси система као и смањењем вредности параметра Ω' .



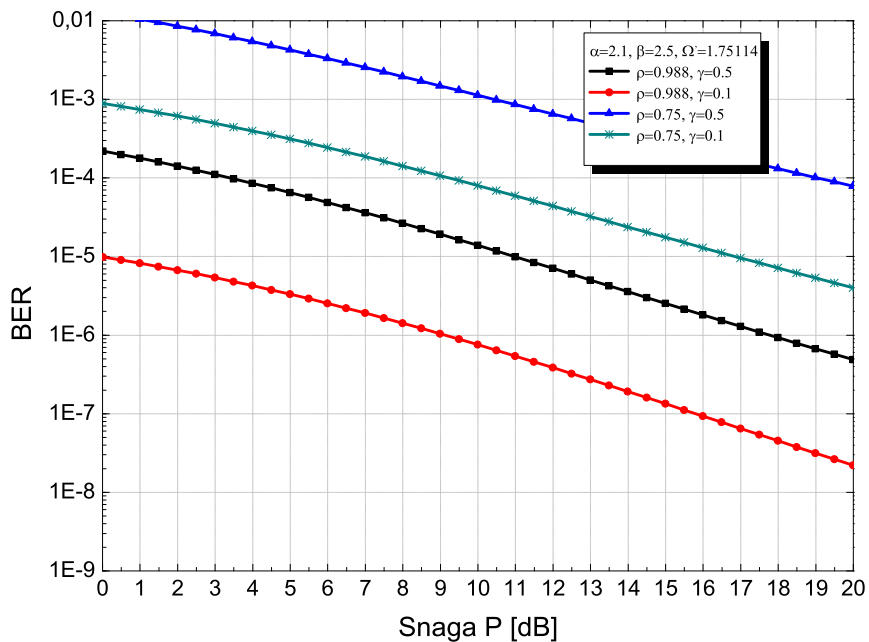
Слика 3.1.6. BER, BDPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случајеве промене вредности параметара α и β .



Слика 3.1.7. BER, BDPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случајеве промене вредности параметара Ω' и γ .

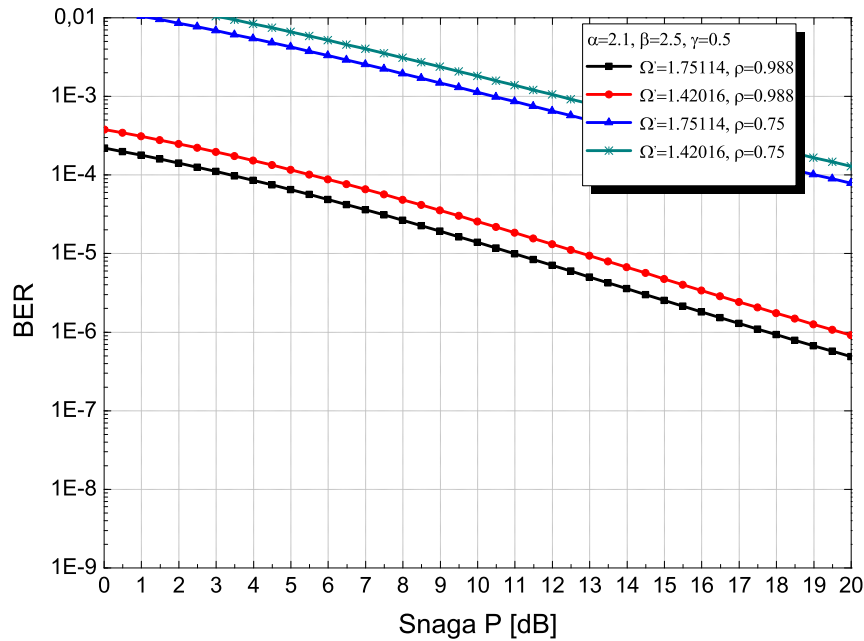
На слици 3.1.8. је приказан утицај параметра ρ и γ на карактеристике система при BDPSK модулацији, а при фиксираним вредностима параметра на $\alpha=2.1$, $\beta=2.5$ и $\Omega'=1.75114$. Са слике 3.1.8. се уочава да су карактеристике система најлошије при вредностима параметара $\rho=0.75$ и

$\rho = 0.75$, а најбоље при вредностима параметра $\rho = 0.988$ и $\gamma = 0.5$. Закључује се да повећање вредности за ρ директно утиче на побољшање, док смањење вредности γ утиче на побољшање параметара система.



Слика 3.1.8. BER, BDPSC FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случајеве промене вредности параметара ρ и γ .

На слици 3.1.9. је приказан случај варијације параметара за BDPSC модулацију, при варирању параметара Ω' и ρ и при фиксираним вредностима параметара $\alpha = 2.1$, $\beta = 2.5$ и $\gamma = 0.5$, на задате вредности. Са слике 3.1.9. се може уочити да систем има перформансе које су знатно лошије при $\Omega' = 1.75114$ и $\rho = 0.75$, што су вредности за BER које су лошије од вредности које се добијају при BPSK модулацији при истим задатим вредностима. Најбоље перформансе су при $\Omega' = 1.75114$ и $\rho = 0.988$ што опет представља слабије перформансе у односу на перформансе добијене при истим вредностима параметара а при BPSK модулацији. Повећање вредности параметра Ω' и ρ утичу на побољшање перформанси система.



Слика 3.1.9. BER, BDPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случајеве промене вредности параметара Ω' и ρ .

У складу са очекивањима и претпоставкама показано је да овај модел фединга уз коришћење BDPSK модулационе шеме даје очекиване вредности за BER, односно већу вредност за BER у односу на BPSK модулациону шему што се јасно може уочити директим упоређивањем дијаграма на сликама 3.1.1-3.1.5. са дијаграмима приказаним на сликама 3.1.6-3.1.9. На основу свега наведеног закључује се да се овај модел фединга може користити за математичко описивање FSO комуникационих система.

3.1.3 BER перформансе M модела атмосферског комуникационог канала при QPSK модулационој шеми

Поред BPSK, BDPSK модулационе шеме битно је анализирати и QPSK модулациону шему. Разлика између BPSK и QPSK модулационе шеме је у томе што као што ова модулациона шема користи два бита као носиоце сигнала који су померени за 90° један у односу на други. Ово значи да након пријема сигнала потребно је да би се демодулисао сигнал да се донесу 4 одлуке. То опет значи да се са овом модулацијом треба употребити већа снага како би се постигле исте перформансе система. У циљу комплетног сагледавања перформанси M атмосферског турбулентног канала извршена

кроз призму BER мере перформанси извршена је анализа преформанси за још једну у пракси веома често коришћену QPSK модулатиону шему [76]. FSO комуникациони канал је моделован генерализованом M дистрибуцијом, која је описана у предходним поглављима где је оптичко поље, такође представљено једначином (3.1.1).

Примљени сигнал ирадијације изражен једначином (3.1.2) док је даље примљена ирадијација развијена у складу са генерализованим M моделом дистрибуције приказаним у једначини (3.1.3) уз параметре A и a_k дефинисане у складу са једначином (3.1.4) и са раније дефинисаним параметрима.

Општост M модела дистрибуције је описана у претходном поглављу.

BER перформанса система може бити одређена решавањем услова за BER, где је у једначини (3.1.5) усвојен услов за \bar{P}_e , у зависности од типа модулатије тј. за QPSK модулатију.

У циљу решавања вредности BER перформанси, QPSK FSO комуникационог система кроз M индуковани фединг турбулентни канал, следећи \bar{P}_e је усвојен и замењен у једначину (3.1.5) те сада једначина има следећи облик:

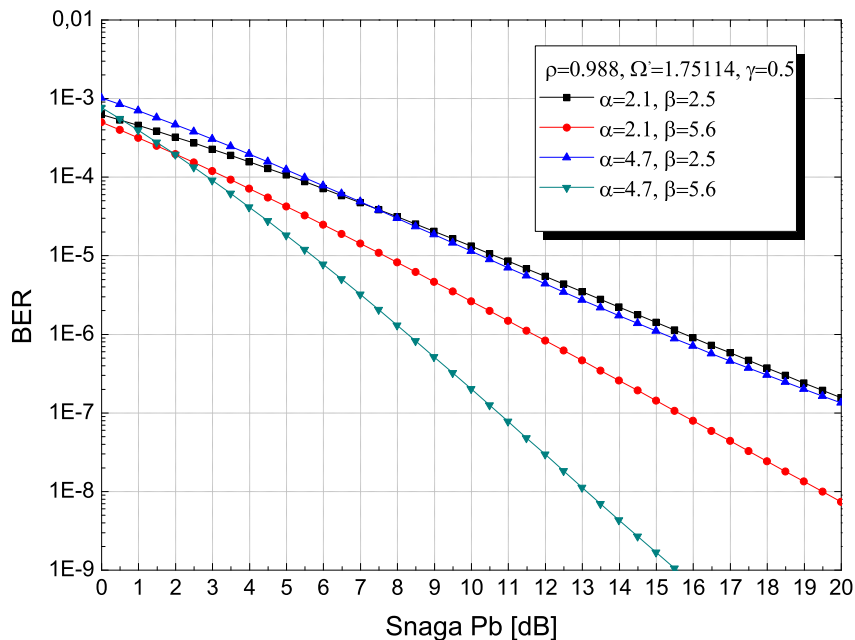
$$\bar{P}_e = \int_0^{+\infty} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{P_T}{\sigma_N} I \right) - 0.25 \operatorname{erfc}^2 \left(\frac{P_T}{\sigma_N} I \right) \right) P(I) dI \quad (3.1.12)$$

где P_T означава средњу пренесену оптичку снагу, и σ_N означава средњу пренесену снагу шума.

У циљу приказа перформанси овог модела када је примењена ова наведена QPSK модулатија и упоређивања са перформансама модулатија анализираних раније у раду, нумерички резултати за BER при QPSK FSO комуникационом систему кроз M индуковани турбулентни канал приказани су графички.

На слици 3.1.10. је приказана зависност BER-а, при QPSK модулатији, од α и β при фиксираним вредностима $\Omega' = 1.75114$, $\gamma = 0.5$ и $\rho = 0.988$, на

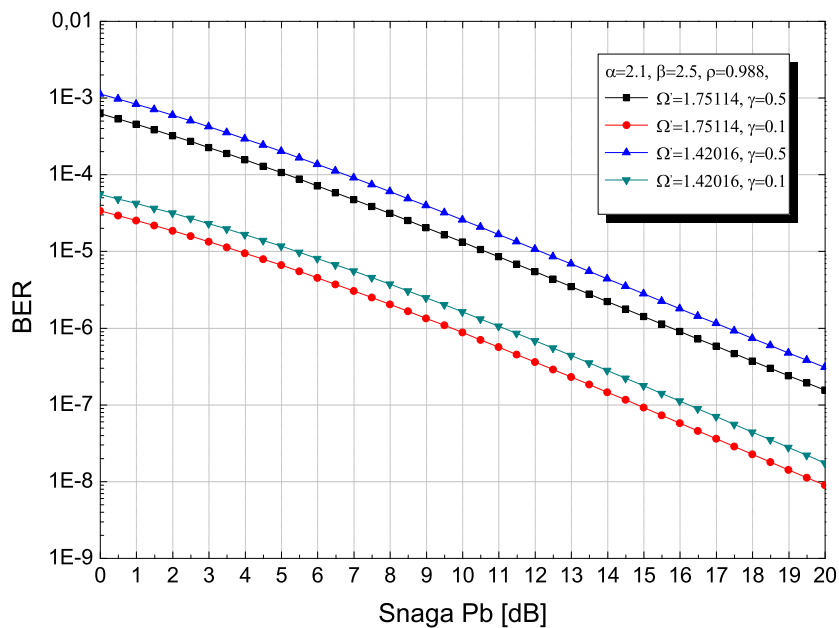
задату вредност. Са слике 3.1.10. уочавамо да систем, при снагама већим од $P = 6$ (dB), има најлошије карактеристике када су за вариране параметре узимане најмање вредности, док се за снаге мање од $P = 6$ (dB) перформансе система су лошије за већу вредност параметра $\alpha = 4.7$ што се мења са повећањем снаге па је видљиво да када параметари α и β имају веће вредности перформансе су боље при већим снагама док су при врло малим снагама перформансе система нешто лошије. Систем показује добре карактеристике када су вредности варираних параметара на већим задатим нивоима $\alpha = 4.7$ и $\beta = 5.6$. Повећање вредности једног или другог параметра који се варирају утиче генерално на побољшање параметара система при анализираној модулацији.



Слика 3.1.10. BER, QPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случај промене параметара α и β .

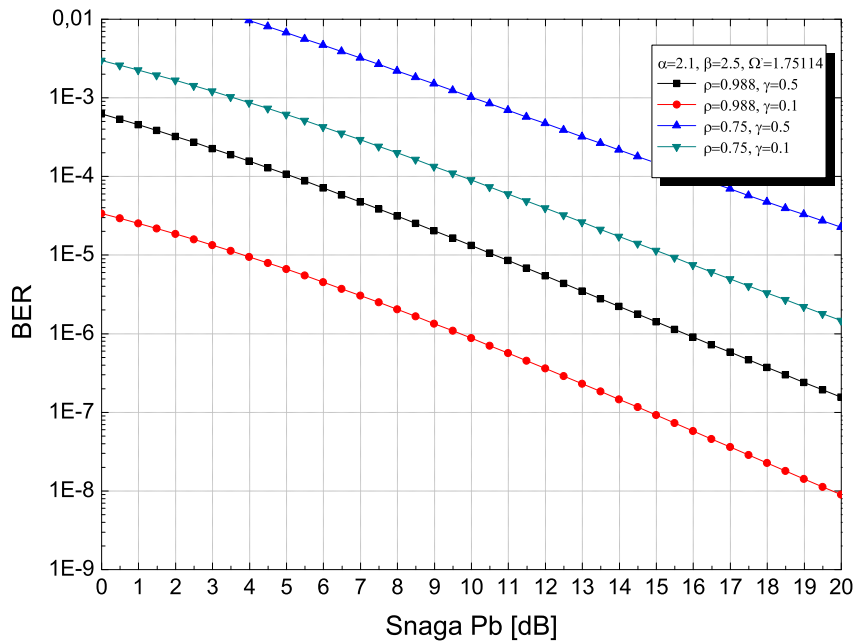
Слика 3.1.11. приказује утицај параметра Ω' и γ док су параметри $\alpha = 2.1$, $\beta = 2.5$ и $\rho = 0.988$ фиксирани. Са слике 3.1.11. се може уочити да систем има најлошије карактеристике при $\Omega' = 1.42016$ и $\gamma = 0.5$ а најбоље су при $\Omega' = 1.75114$ и $\gamma = 0.5$, док су вредности за BER при малим снагама на нивоу вредности при BPSK модулацији док се са повећањем снаге тај ниво смањује те генерално те вредности постају веће.

Варијација параметара ρ и γ док су параметри $\alpha = 2.1$, $\beta = 2.5$ и $\Omega' = 1.75114$, на задате вредности приказана је на слици 3.1.12.. Са слике 3.1.12. се закључује да систем има најлошије карактеристике при $\rho = 0.75$ и $\gamma = 0.5$, а најбоље при $\rho = 0.988$ и $\gamma = 0.1$, што је генерално и код BPSK модулације али су вредности за BER при овој модулацији веће за исти ниво снаге и исте вредности варираних параметара.

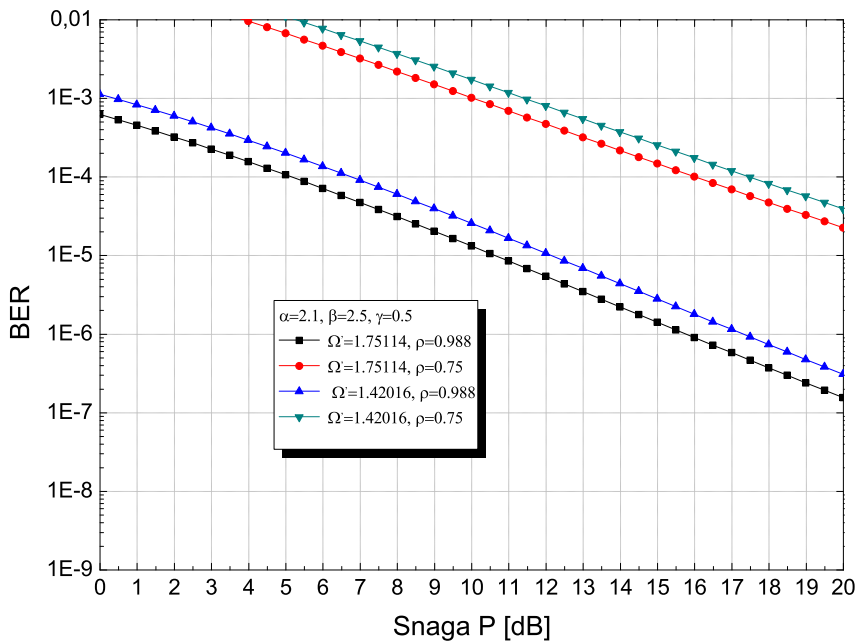


Слика 3.1.11. BER, QPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случај промене параметара Ω' и γ .

На крају, на слици 3.1.13. је приказан случај варијације параметара за QPSK модулацију, при варирању Ω' и ρ и фиксираним вредностима параметра $\alpha = 2.1$, $\beta = 2.5$ и $\gamma = 0.5$, на задате вредности. Са слике 3.1.13. се може уочити да систем има најслабије перформансе при $\Omega' = 1.42016$ и $\rho = 0.75$, а најбоље при $\Omega' = 1.75114$ и $\rho = 0.988$, док су уопштено перформансе система лошије у односу на BPSK модулацију што је такође очекивани резултат.



Слика 3.1.12. BER, QPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случај промене параметара ρ и γ .



Слика 3.1.13. BER, QPSK FSO система кроз M индуковани турбулентни фединг за случај промене параметара Ω' и ρ .

3.2 CC M модела атмосферског комуникационог канала

Да би се кроз комуникациони канал пренела велика количина података за пренос сигнала потребно је обезбедити довољно времена. Приликом преноса информација у реалном времену постоје ограничења која представљају капацитет канала, што значи да је теоријски, максимум броја битова који се могу пренети у јединици времена ограничен капацитетом канала, који се означава са C . Такође, капацитет се може када је изражен у броју битова у секунди, дефинисати као производ максималне брзине симбола у јединици времена и максималног броја бита који се могу пренети једним симболом. Коначно, може се констатовати да капацитет канала представља максимални дигитални проток који је могуће остварити у предвиђеном каналу у присуству шума и наравно уз оптимално кодовање. Када је реч о кодовању, применом савременог кодовања, до скоро недостижна вредност капацитета канала је остварљива у пракси.

Код комуникационих система са једним улазом и једним излазом тзв. SISO (*енгл.* Single-Input Single-Output) капацитет може бити одређен ако се знају карактеристике система на пријемнику и на предајнику. У циљу поједностављања рачунања и упрошћавања реализације погодна је канал моделовати ООК (*енгл.* On-Of-Kaying) модулационом шемом.

Усвајајући да је FSO канал меморијски, стационарни и у складу са перфектним стањем информације канала CSI (*енгл.* Channel State Information) доступним на обе стране трансмисионог ласера и отвора пријемника преносног ласера, капацитет канала може се дефинисати као:

$$\frac{C}{B_{FSO}} = \int_0^{+\infty} \log_2(1+I) f_I(I) dI \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (3.2.1)$$

где B_{FSO} представља проток канала.

У циљу добијања мере квалитета CC (*енгл.* Channel Capacity) FSO комуникационог система у M моделу индукованог турбулентног фединга интеграл из израза 3.2.23, могу бити изражени преко Meijer-ових G -функција

као $\ln(1+x) = G_{2,2}^{1,2} \left[x \mid \begin{matrix} 1,1 \\ 1,0 \end{matrix} \right]$ [73, (8.4.6/5)], $K_\nu(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \mid \begin{matrix} - \\ \frac{\nu}{2}, \frac{\nu}{2} \end{matrix} \right]$ [73, (8.4.23/1)],

тако да добијемо:

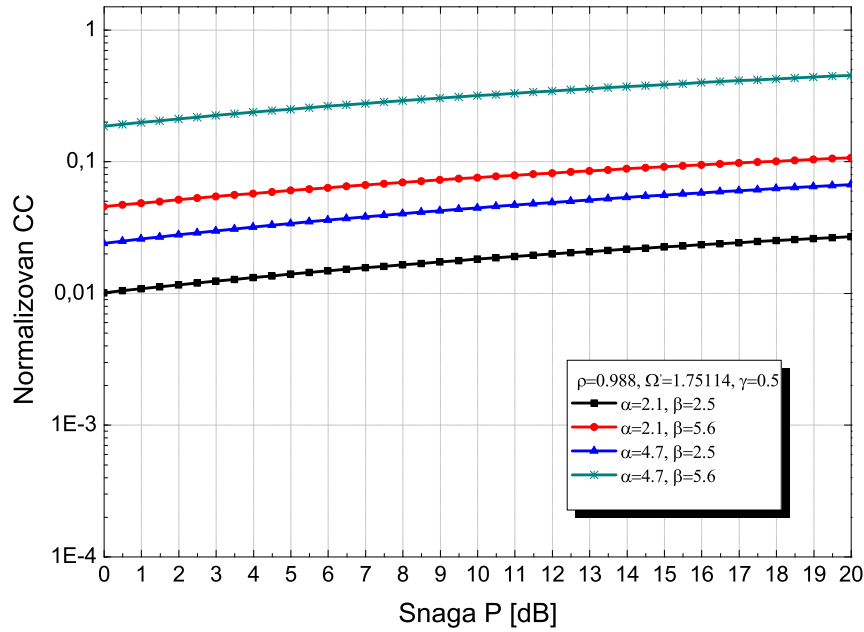
$$\frac{C}{B_{FSO}} = \frac{1}{8\pi \log 2} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k \int_{k=1}^{+\infty} I^{\frac{\alpha+k-1}{2}} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta + \Omega'} \mid \begin{matrix} - \\ \frac{\alpha-k}{2}, \frac{\alpha-k}{2} \end{matrix} \right] G_{2,2}^{1,2} \left[\frac{P_T}{\sigma_N} I^2 \mid \begin{matrix} 1,1 \\ 1,0 \end{matrix} \right] \quad (3.2.2)$$

Користећи [73, (2.24.1/1)] заједно са [73, (8.2.2/14)], затворени облик FSO CC у M индукованом турбулентном федингу може бити изражен као:

$$\frac{C}{B_{FSO}} = \frac{1}{8\pi \log 2} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k 2^{\alpha+k} \left(\frac{\alpha\beta}{\gamma\beta + \Omega'} \right)^{\frac{\alpha+\beta+1}{2}} G_{6,2}^{1,6} \left[16 \frac{P_T}{\sigma_N} \left(\frac{\gamma\beta + \Omega'}{\alpha\beta} \right)^2 \mid \begin{matrix} 1,1, \frac{1-2\alpha}{4}, \frac{2-2\alpha}{4}, \frac{1-2k}{4}, \frac{2-2k}{4} \\ 1,0 \end{matrix} \right] \quad (3.2.3)$$

Графички приказ анализе перформанси капацитета комуникационог система кроз M индуковани турбулентни фединг представљени су графички.

На слици 3.2.1 су представљене добијене вредности за CC FSO комуникационог система кроз M индуковани турбулентни фединг канал у односу на снагу P . На слици 3.2.1. је приказан утицај α и β на вредност добијеног CC. Видљиво је да су перформансе боље при већим вредностима параметра α и β , док су вредности капацитета мање када су за α и β узимане мање вредности. Линерна зависност при повећању параметара α и β је уочљива.



Слика 3.2.1. Нормализован CC FSO система кроз M турбулентни канал за случај промене параметара α и β .

Вредност за капацитет канала овог модела фединга приказана је на сликама 3.2.1. са које се јасно може закључити да су добијене вредности за капацитет канала у границама које су очекиване за параметре фединга средње до средње јаке турбуленције. Закључује се да се овај модел фединга изражен у затвореном облику приказанаом у једначини 3.2.3 може користити за математичко моделовање и описивање параметара FSO канала.

4. Модели преноса слике кроз атмосферски FSO канал

У циљу анализирања перформанси FSO комуникационог канала вршено је тестирање предложених модела за пренос података. Тестирање је вршено тако што је анализирани M модел комуникационог канала сведен на модел Рајсовог канала. За такав модел предложен је алгоритам за тестирање који је реализован у програмском пакету MATLAB. Како би реализација и тестирање канала било веродостојније и реалније реализовано није коришћен случајан број битова и мерена само грешка у броју пренесених битова већ је коришћена слика у различитим облицима, која је предложеним алгоритмима бинаризована како би се симулирао пренос моделованим FSO каналом. Коришћена је монохроматска слика у коју је различитим техникама инсертован дигитални водени жиг која је на пријемној страни реконструисана и провераван је утицај FSO канала на карактеристике слике и екстракованог дигиталног воденог жига. Такође, у циљу вршења експеримента преноса слике FSO каналом коришћена је и слика у боји која је у нашем случају представљала слику пожара. Слика пожара је такође бинаризована и пренешена FSO каналом, након чега је на пријемној страни реконструисана и онда су предложеним алгоритмом за детекцију пожара, вршена тестирања успешности детектовања пожара и упоређивана са детектовањем пожара у слици пре преноса FSO каналом.

4.1 Пренос слике са инсертованим воденим жигом кроз Рајсов FSO канал

Размена мултимедијалних података (слике, видео, аудио ...) је широко распрострањена и веома заступљена у савременом преносу података и услед брзог развоја бежичних технологија и дигитализације. Веома је битно и нарочито захтевно да се код овако распрострањеног и широко доступног

дигиталног садржаја заштите ауторска права. У циљу заштите ауторских права у мултимедијални садржај који се преноси, убацују се додатне информације које служе за доказивање и заштиту ауторских права. Убацивање скривених садржаја у дигиталне датотеке у циљу доказивања ауторских права назива се дигитални водени жиг [43, 44]. Неке основне карактеристике дигиталног воденог жига су неосетљивост, робусност, капацитивност, не-инверзност и могућност да се недвосмислено позитивно докаже (потврди) власништво [50]. За инсертовање дигиталног воденог жига у датотеке користе се многе трансформације као што су дискретна косинусна трансформација DCT (*енгл. Discrete Cosine Transformation*) [46, 47, 48], дискретна вавелет трансформација DWT (*енгл. Discrete Wavelet Transformation*) [48, 49], сингуларна декомпозиција вредности SVD (*енгл. Singular Value Decomposition*) [50, 51, 52] и многе друге комбинације наведених трансформација које се користе за инсертовање дигиталног воденог жига.

Развој система за пренос података је довео до коришћења FSO система за пренос. Ови системи за разлику од раније коришћених радио фреквентних RF система за пренос имају своје карактеристике које представљају њихову предност и огледају се у томе да је концентрација снаге у узаном снопу, одсуству таласних сметњи, непостојање френсел зоне, пуној могућности дуплекс преноса, малој комплексности за практичну реализацију, није потребна дозвола за пренос у опсегу функционисања и тд. Ове карактеристике фаворизују FSO пренос у односу на друге врсте преноса, нарочито за коришћење у "last mile" конекције, где је потребно јефтино, брзо и ефикасно успоставити пренос. Поред наведених предности, ови системи имају и своје недостатке који се огледају у компликованом усмеравању, смицању и слабљењу које може бити узроковано различитим атмосферским факторима (тј. турбуленција, сунце, магла, измаглица, киша, дима...).

Главни узрочник слабљења и оштећења линка у FSO комуникационим системима, нарочито ако се реализација ради на великим даљинама у преносу, јесу атмосферске турбуленције [66]. Временске и просторне флукуације ласерског снопа које се јављају као резултат варијације у индексу рефракције, изазване атмосферским турбуленцијама и које се

манифестују као флукуације ирадијације примљеног сигнала, представљају FSO фединг који се назива сцинтилација. Веома интензиван FSO пренос дигиталне слике и других мултимедијалних података при великој брзини преноса (до 10 Gb/s) за типичне фединге који трају до неколико милисекунди, може изазвати нетачан пренос или губитак великог броја узастопних битова, што би у крајњем случају довело до велике грешке BER. У циљу анализирања преноса података FSO комуникационим каналом извршен је пренос слике [75]. У циљу проверавања утицаја преноса FSO каналом на пренос слике са инсертованим дигиталним воденим жигом извршена је симулација.

4.1.1 Анализа перформанси преноса слике са воденим жигом кроз Рајсов фединг канал

У циљу потпуне анализе преноса слике FSO каналом и анализе перформанси екстракованог воденог жига извршен је пренос слике са инсертованим воденим жигом [79] применом DCT [45, 46] и SVD [49, 50, 51, 52] трансформације [58]. Робусност овако пренесене слике сагледана је кроз призму мера перформанси PSNR, MSE и BER, које су анализирани и приликом преноса слике са инсертованим двоструким воденим жигом.

4.1.1.1 Модел канала преноса

На пријемној страни система, примљени FSO сигнал је моделован као:

$$E_r(t, r) = u_s(t) \exp(j2\pi f_c t + \theta(t)) \exp[\chi(r) + j\phi(r)] \quad (4.1.1)$$

где: r -вектор позиције на пријемној страни, f_c - фреквенција оптичког носиоца, и $u_s(t) \exp(j\theta(t))$ - представља комплексну енвелопу модулисаниг сигнала. Параметар, $\chi(r)$ представља индуковану турбулентну амплитудну флукуацију и $\phi(r)$ - представља фазну варијацију канала.

Усвајајући да је пријемник интегрисан за сваки период бита и да занемарује негативан утицај позадинске илуминације [80], фотоелетрични сигнал на излазу је моделован као:

$$y_T(t) = x_T(t) + n_T(t) \quad (4.1.2)$$

где $n_T(t)$ - представља додати бели Гаусов шум AWGN (енгл. Additive White Gaussian Noise) са нултом средњом варијансом:

$$\sigma_n^2 = \frac{B_s e^2 \eta \pi}{2 h f_c} A^2 D^2 \quad (4.1.3)$$

где e - представља наелектрисање електрона, h - је Планкова константа, η - је квантна ефикасност фотодетектора, B_s - представља проток сигнала, D - представља пречник отвора пријемника, и A - представља амплитуду поља локалног осцилатора LO (енгл. Local Oscillator) на демодулатору.

Део носиоца сигнала моделован је као:

$$x_T(t) = \frac{e \eta \pi}{2 h f_c} A D^2 u_s(t) \operatorname{Re} \left\{ \alpha \exp(j 2 \pi f_{IF} t + \theta_{IF}(t)) \right\} \quad (4.1.4)$$

где: $f_{IF} = f_c - f_{LO}$ - представља еквивалентну фреквенцију сигнала, f_{LO} - је фреквенција локалног осцилатора, θ_{IF} - представља еквивалентну фазу сигнала и α представља ефективну флукуацију фединга канала. У радовима [81, 82], за моделовање истовремених ефеката индуковане турбуленције амплитудним осцилацијама и фазном аберацијом, функција вероватноће грешке PDF слабљења амплитуде FSO система моделована је Рајсовом дистрибуцијом., као:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\alpha^2} e^{-K-(1+K)\alpha^2/\bar{\alpha}^2} I_0 \left(2\alpha \sqrt{\frac{K(1+K)}{\alpha^2}} \right) \quad (4.1.5)$$

где $I_0(x)$ представља Bessel-ову функцију првог реда [72], док је параметар K , дат у раду [82], и представља однос снаге кохерентне и некохерентне компоненте представљен:

$$K = \left[\frac{\overline{\alpha}^2}{\sqrt{\overline{\alpha}_r^4 + 2\overline{\alpha}_r^2(\sigma_i^2 - \sigma_r^2) - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2}} - 1 \right] \quad (4.1.6)$$

и:

$$\overline{\alpha}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \overline{\alpha}_r^2 \quad (4.1.7)$$

$$\overline{\alpha}_r = \exp\left(-\frac{\sigma_\chi^2 + \sigma_\varphi^2}{2}\right) \quad (4.1.8)$$

$$\sigma_r^2 = (1/2G)\left(1 + \exp(-2\sigma_\varphi^2) - 2\exp(-2\sigma_\chi^2 - 2\sigma_\varphi^2)\right) \quad (4.1.9)$$

$$\sigma_i^2 = (1/2G)\left(1 - \exp(-2\sigma_\varphi^2)\right) \quad (4.1.10)$$

где σ_χ^2 представља Log-амплитудну варијансу која је дата изразом [91]

као:

$$\sigma_\chi^2 = 0.307k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (4.1.11)$$

σ_φ^2 - представља преостала фазна одступања изражена преко пречника пријемника D_k и представљена релацијом:

$$\sigma_\varphi^2 = \Delta J \left(\frac{D_k}{r_0} \right) \quad (4.1.12)$$

Параметар k изражени у зависности од таласног броја као $k = 2\pi / \lambda$, C_n^2 представља рефракциони структурни индекс преламања, а L - означава дужину пропационог пута [82].

Параметар G дат је изразом:

$$G = \left\{ 1.09 (\rho_0 / D_k)^2 \Gamma[1.2, 1.08] (\rho_0 / D_k)^{5/3} \right\}^{-1}. \quad (4.1.13)$$

где $\Gamma(\dots)$ представља некомплетну Гамма функцију, а параметар ρ_0 представља генерализовани Fried параметар [96]. Генерализовани Fried параметар дат је изразом:

$$r_o = 1.68 (C_n^2 L k^2)^{-3/5} \quad (4.1.14)$$

Коначно примљени однос сигнал шум SNR (*енгл.* Signal-to-Noise Ratio) система, након демодулације дат је изразом:

$$\gamma = \frac{P_x}{\sigma_n^2} = \frac{\eta I_s}{hf_c B_s} \frac{\pi D^2}{4} \alpha^2 \quad (4.1.15)$$

где $I_s = |u_s(t)|^2$ - предстаља средњи интензитет оптичког поља, и P_x - представља излазну снагу сигнала.

4.1.1.2 Алгоритми

Алгоритми за инсертовање и екстракцију воденог жига у слику који су коришћени за анализу преноса слике кроз Рајсов FSO канал са федингом реализовани су у следећим корацима:

Алгоритам 1, за инсертовање жига:

Корак 1: Примењена је DCT трансформација на оригиналну слику A димензија $M \times N$.

Корак 2: Коришћењем Цик-Цак трансформације извршено је мапирање DCT коефицијената у четири квадранта B_1 , B_2 , B_3 и B_4 .

Корак 3: Над сваким квадрантом је примењена SVD $A^k = U_A^k \Sigma_A^k V_A^{kT}$, $k = \{1, 2, 3, 4\}$, где k представља квадранте B_1 , B_2 , B_3 и B_4 .

Корак 4: Над сликом воденог жига примењена је DCT трансформација.

Корак 5: Слика воденог жига W која је трансформисана у кораку 4 трансформисана је SVD трансформацијом $W = U_W \Sigma_W V_W^T$.

Корак 6: Сингуларне вредности сваког квадранта B_k , $k = \{1,2,3,4\}$, трансформисане су са сингуларним вредностима DCT трансформисаног воденог жига $\lambda_i^{*k} = \lambda_i^k + \alpha_k \lambda_{wi}$, $i = 1, \dots, n$, где λ_i^k представљају сингуларне вредности Σ_A^k слике и λ_{wi} представљају сингуларне вредности Σ_w воденог жига.

Корак 7: Добијена су четири сета модификованих DCT коефицијената $A^{*k} = U_A^k \Sigma_A^{*k} V_A^{kT}$, $k = \{1,2,3,4\}$.

Корак 8: Извршено је мапирање модификованих коефицијената назад на њихове оригиналне позиције у циљу креирања слике са инсертованим воденим жигом.

Корак 9: Применом инверзне DCT трансформације добијена је оригинална слика са инсертованим воденим жигом A^* .

Алгоритам 2, за екстракцију жига:

Корак 1: На слику са инсертованим воденим жигом (која је преносом кроз атмосферски канал вероватно оштећена) примењена је DCT трансформација.

Корак 2: Извршено је мапирање коефицијената у четири квадранта B_1 , B_2 , B_3 и B_4 коришћењем Цик-Цак модификације (секвенце).

Корак 3: Над тако добијеним квадрантима примењена је SVD трансформација $A^{*k} = U_A^k \Sigma_A^{*k} V_A^{kT}$, где $k = \{1,2,3,4\}$ сада приликом екстракције представља квадранте пренесене слике (оштећене).

Корак 4: Из сваког квадранта B_k екстраковане су сингуларне вредности:
 $\lambda_{wi}^k = (\lambda_i^{*k} - \lambda_i^k) / \alpha_k$, $i = 1, \dots, n$.

Корак 5: Коришћењем сингуларних вектора $W_k = U_W^k \Sigma_W^k V_W^{kT}$, $k = \{1,2,3,4\}$ формирани су DCT коефицијенти сва четири квадранта.

Корак 6: Над сваким сетом креираним у кораку 5 примењена је инверзна DCT трансформација како би се добио видљиви екстраковани водени жиг.

Алгоритам, за симулацију преноса слике са воденим жигом путем FSO комуникационог канала извршава се у следећим корацима:

Корак 1: Из слике са инсертованим дигиталним воденим жигом A^* (8-битна) креиран је вектор.

Корак 2: Добијени вектор, са децималним елементима, је преведен у вектор D , са бинарним елементима димензија $24 \times M \times N$.

Корак 3: Над вектором D је примењена BPSK модулација $X = 2 \cdot D - 1$. (Ова модулација представља модулациону шему која преводи податке мењајући фазу таласа коришћењем две фазе које су међусобно подељене за 180°).

Корак 4: BPSK модулисани сигнал је пренесен кроз Рајсов турбулентни канал: $Y = h * X + n$, где h -представља вектор који обухвата утицај Рајсовог фединга, који је генерисан у складу са једначином (4.1.5), у складу са параметром K . Однос јачине кохерентне компоненте дефинисан је једначином (4.1.6). Вектор n представља утицај AWGN канала дефинисаног нивоа SNR.

Корак 5: Gray декодовање са крутим прагом одлучивања је примењено на Y како би на крају био добијен вектор \bar{D} .

Корак 6: Коначно резултујућа пренесена слика са инсертованим дигиталним воденим жигом \bar{A}^* добијена је из вектора \bar{D} .

4.1.1.3 Симулациони резултати и анализа

Експеримент који је изведен у циљу симулације преноса слике са дигиталним воденим жигом кроз FSO турбулентни канал реализован је у следећим корацима:

Корак 1: У оригиналну слику је инсертован дигитални водени жиг са коефицијентом инсертовања $\alpha = 0.25$.

Корак 2: BPSK модулациона шема је примењена над сликом са инсертованим дигиталним воденим жигом A^* .

Корак 3: Кроз Рајсов турбулентни фединг канал са додатим AWGN пренесен је BPSK модулисани сигнал.

Корак 4: На пријемној страни је извршена реконструкција слике, након примене Грау декодовања са крутим прагом одлучивања.

Корак 5: Коначно, из слике реконструисане на начин приказан у кораку 4 извршена је екстракција воденог жига.

Као мера квалитета пренесене слике и екстракованог дигиталног воденог жига примљене су мере квалитета PSNR, MSE и BER:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{2^n - 1}{MSE} \quad (4.1.16)$$

$$MSE = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - y_{ij})^2}{M \times N} \quad i = 1..M, \quad j = 1..N \quad (4.1.17)$$

$$BER = \frac{\sum_{ijl} [(x_{ij})_l]_2 \oplus [(y_{ij})_l]_2}{M \times N} \quad i = 1..M, \quad j = 1..N, \quad l = 1..n \quad (4.1.18)$$

где су: x_{ij} -пиксел оригиналне слике, y_{ij} -пиксел рестауриране слике, $M \times N$ - димензије слике и \oplus - означава EXOR оператор над сваким од n парова x_{ij} и y_{ij} битова.

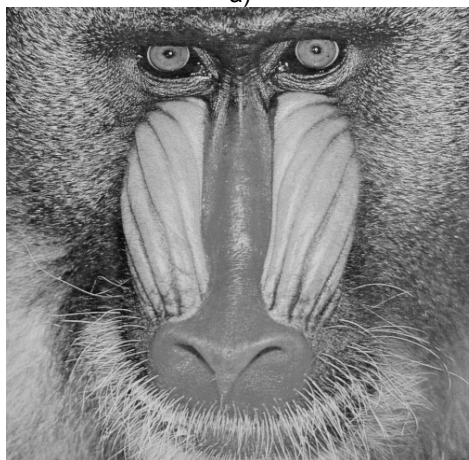
База слика, (димензија 512×512), које су коришћена у овом експерименту, (као слика у коју је инсертован водени дигитални жиг), приказана је на слици 4.1.1. где су: а) Лена, б) Девојка, в) Мајмун и г) Паприка.



а)



б)



в)



г)

Слика 4.1.1. Сlike коришћене у експерименту: а) Лена, б) Девојка, в) Мајмун и г) Паприка.

Као слика дигиталног воденог жига копишћна је слика (димензија 256×256) представљена на слици 4.1.2. Вредност коефицијента K варирана је у његовим теоретским границама.



Слика 4.1.2. Слика (публика) коришћена као водени жиг.

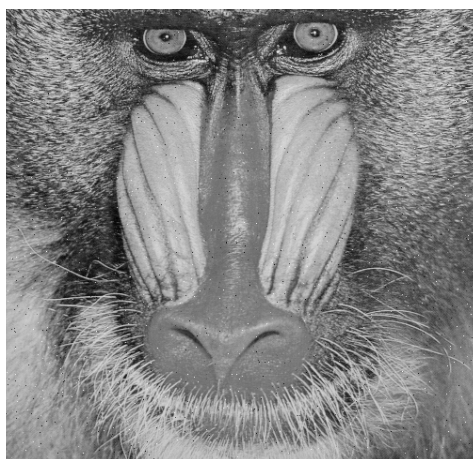
Након преноса слике кроз Рајсов FSO турбулентни канал на пријемној страни је извршена реконструкција слике. Реконструисана слика након преноса кроз канал са вредностима коефицијент $K = 1$ и $K = 10$, приказана је на слици 4.1.3.



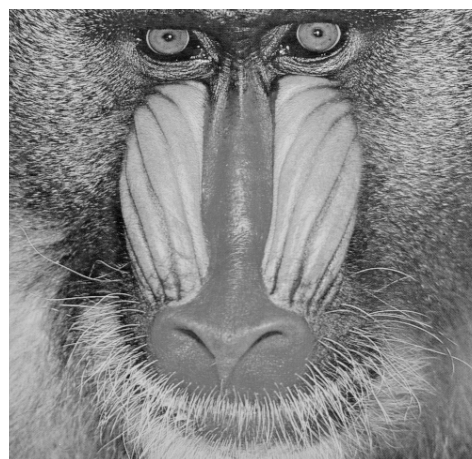
а)



б)



в)



г)

Слика 4.1.3. Сlike након преноса кроз Рајсов FSO турбулентни канал са параметром $K = 1$ (а, в) и $K = 10$ (б, г).

Табеле 4.1.1 и 4.1.2 су табеле са вредностима мера квалитета MSE и PSNR за екстраковани дигитални водени жиг и слике пренесене кроз канал [79].

На слици 4.1.4 приказан је изглед слика екстракованог жига након преноса кроз Рајсов FSO турбулентни канал са параметром $K = 1$ (а-жиг екстракован из слике Лена, в) жиг екстракован из слике Мајмун) и $K = 10$ (б-жиг екстракован из слике Лена, г) жиг екстракован из слике Мајмун).

Табела 4.1.1. MSE екстракованог жига и пренесених слика

K	ЛЕНА		ДЕВОЈКА	
	MSE _x	MSE _w	MSE _x	MSE _w
1	55.19	1922.5	55.50	2680
2	30.63	1174	33.00	1738
5	7.59	75.41	7.69	181
10	3.94	3.31	3.93	20.43
20	3.86	0.64	3.85	14.31
30	3.86	0.64	3.85	14.31
K	МАЈМУН		ПАПРИКА	
	MSE _x	MSE _w	MSE _x	MSE _w
1	54.47	856.27	54.92	2179
2	32.57	441.31	32.77	1398
5	7.40	48.64	7.34	98.17
10	4.36	12.18	4.00	3.50
20	4.34	10.77	3.86	0.88
30	4.34	10.77	3.86	0.88

Табела 4.1.2. PSNR екстракованог жига и пренесених слика

K	ЛЕНА		ДЕВОЈКА	
	PSNR _x [dB]	PSNR _w [dB]	PSNR _x [dB]	PSNR _w [dB]
1	30.71	15.29	30.89	13.85
2	33.27	17.43	32.95	15.73
5	39.33	29.36	39.27	25.55
10	42.18	42.94	42.19	35.03
20	42.26	50.06	42.28	36.57
30	42.26	50.06	42.28	36.57
K	МАЈМУН		ПАПРИКА	
	PSNR _x [dB]	PSNR _w [dB]	PSNR _x [dB]	PSNR _w [dB]
1	30.77	18.81	30.73	14.75
2	33.00	21.68	32.98	16.68
5	39.44	31.26	39.48	28.21
10	41.73	37.28	42.10	42.70
20	41.75	37.81	42.26	48.67
30	41.75	37.81	42.26	48.67



a)



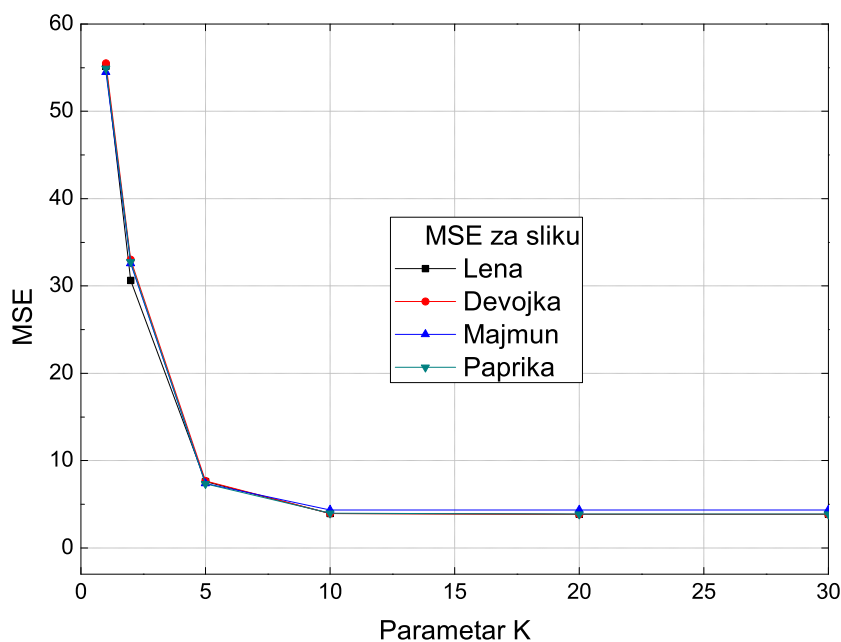
b)



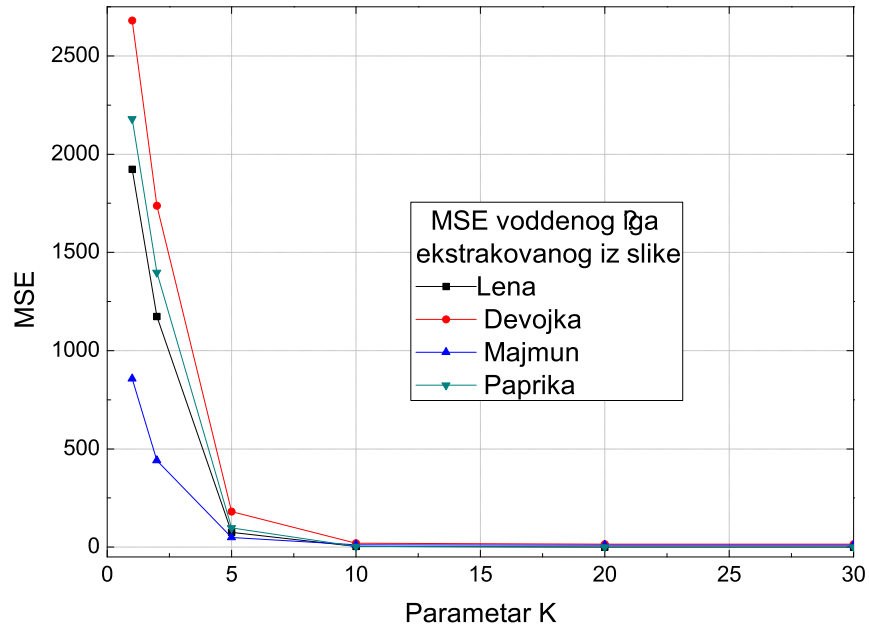
Слика 4.1.4. Сlike екстракованог жига након преноса кроз Рајсов FSO турбулентни канал са параметром $K = 1$ (а-из слике Лена, в из слике Мајмун) и $K = 10$ (б-из слике Лена, г из слике Мајмун).

На сликама 4.1.5 и 4.1.6 приказани су дијаграми за меру квалитета MSE за слике пренесених кроз Рајсов FSO турбулентни канал а) Лена, б) Девојка, б) Мајмун и г) Паприка и за жиг екстракован из анализираних слика.

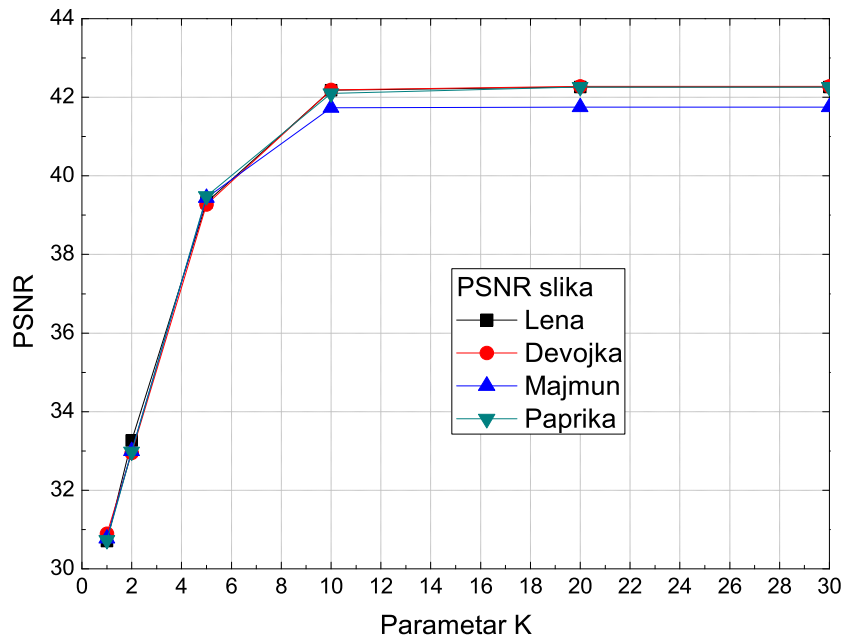
На сликама 4.1.7 и 4.1.8 приказани су дијаграми за меру квалитета PSNR за слике пренесених кроз Рајсов FSO турбулентни канал а) Лена, б) Девојка, б) Мајмун и г) Паприка и за жиг екстракован из анализираних слика.



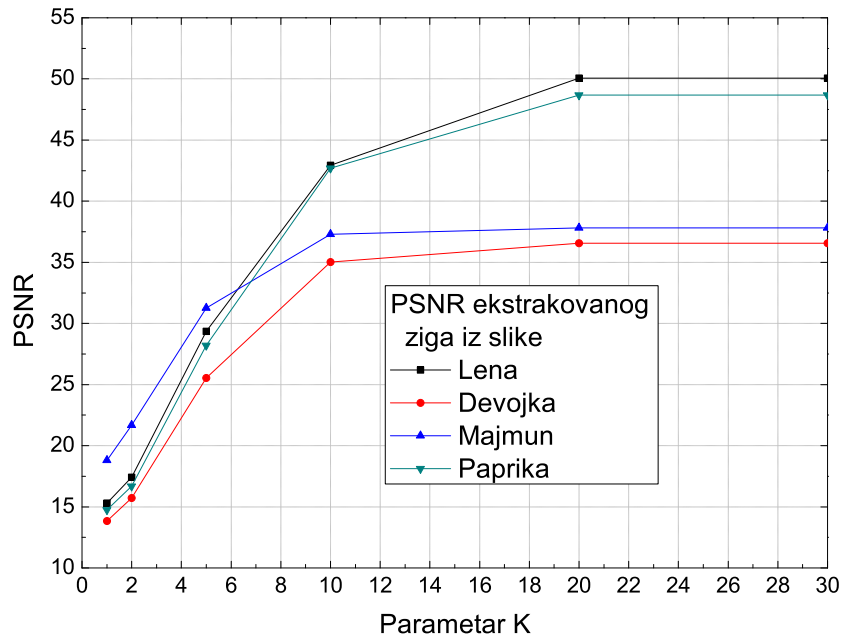
Слика 4.1.5. MSE пренесених слика кроз Рајсов FSO турбулентни канал а) Лена, б) Девојка, б) Мајмун и г) Паприка.



Слика 4.1.6. MSE екстракованог жига из пренесених слика кроз Рајсов FSO турбулентни канал, из слике: а) Лена, б) Девојка, в) Мајмун и г) Паприка.

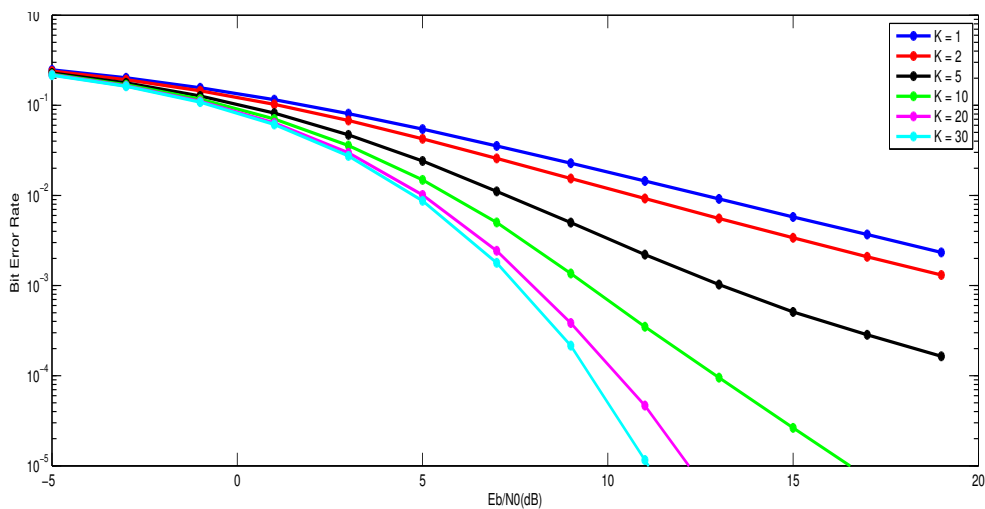


Слика 4.1.7. PSNR пренесених слика кроз Рајсов FSO турбулентни канал: а) Лена, б) Девојка, в) Мајмун и г) Паприка



Слика 4.1.8. PSNR екстракованог жига из пренесених слика кроз Рајсов FSO турбулентни канал, из слике: а) Лена, б) Девојка, в) Мајмун и г) Паприка

На слици 4.1.9 приказан је дијаграм за меру квалитета BER за пренесену слику Лена.



Слика 4.1.9. Дијаграм BER за пренесену слику Лена.

Анализом перформанси пренесених слика, у раду је коришћен велики број слика, Лена, Девојка, Мајмун и Паприка и упоређивањем вредности добијених за мере перформанси MSE, PSNR и BER за екстраковани водени жиг екстракован из слике која је пренесена кроз Рајсов турбулентни канал изведени су закључци:

а) При вредности параметра $K=10$ (dB) вредност MSE је око 5 пута већа него при екстракцији жига из слике одмах након инсертовања ($MSE=0.608$),

б) При вредности параметра $K=10$ (dB) вредност PSNR-а је за око 15% мања него при екстракцији жига из слике одмах након инсертовања ($MSE=50,29$),

в) При вредности параметра $K=10$ (dB) вредност за параметар BER је у границама задовољавајућих вредности, близу вредности 10^{-6} (што представља вредност при којој се на пријемној страни добија слика веома високог квалитета).

г) На пријемној страни се добијају слика и екстраковани жиг који имају преформансе које су субјективно, визуелно задовољавајућег квалитета при вредностима параметра $K=5$.

Из напред наведених закључака и карактеристика може се коначно закључити да овакав модел слике и система може да задовољавајуће карактеристике повећањем вредности параметра K што се може постићи повећањем снаге на пријемној страни, променом пропусног опсега, променом таласне дужине носиоца сигнала, променом дијамтера апертуре на пријемној и на страни емитовања. Повећањем вредности параметра K до вредности од 15 [dB] постиже се да су перформансе изузетно високог квалитета.

4.1.2 Анализа преноса слике са инсертованим двоструким воденим жигом кроз Рајсов FSO канал

У циљу тестирања преноса слике кроз атмосферски Рајсов FSO извршено је тестирање преноса слике са инсертованим двоструким воденим жигом у слику [79]. Успостављен је модел канала као и алгоритми за инсертовање и екстракцију воденог жига у слику применом DWT и SVD трансформације и на крају је утврђен утицај FSO канала на робусност тако инсертованог воденог жига.

4.1.2.1 Модели система

На пријемној страни система, примљени FSO сигнал је моделован у складу са изразом (4.1.1) и вредностима параметара приказаним у делу 4.1.1.1.

Пријемник је интегрисан за сваки период бита тако да занемарује негативан утицај позадинске илуминације [80], а фотоелектрични сигнал на излазу је моделован у складу са изразом (4.1.2), где је нулта средња варијанса шума дата изразом (4.1.3).

Моделовање носиоца сигнала урађено је у складу са иразом приказаним у једначини (4.1.5).

Моделовање ефеката индуковане турбуленције амплитудним осцилацијама и фазном аберацијом, функција густине вероватноће грешке амплитуде FSO сигнала моделована је Рајсовом дистрибуцијом у складу са изразом датим у једначини (4.1.6).

Параметар K из израза (4.1.6), дат у раду [82], представља однос снаге кохерентне и некохерентне компоненте представљен је изразом датим у једначини (4.1.7).

Параметари преко којих је изражен параметар K дати су изразима приказаним у једначинама (4.1.9), (4.1.10), (4.1.11), (4.1.12), (4.1.13) и (4.1.14).

На крају вредност примљеног односа сигнал шум SNR (*енгл.* Signal-to-Noise Ratio) система, након демодулације дата је изразом (4.1.15).

4.1.2.2 Алгоритам тестирања

Алгоритам за симулацију FSO преноса [83] слике са двоструко инсертованим воденим жигом реализован је у две фазе које су реализоване у следећим корацима:

Фаза 1:

Корак 1: Од слике са инсертованим дигиталним воденим жигом A^* (8-bit-на) креиран је вектор.

Корак 2: Добијени вектор, са децималним елементима, преведен је у вектор са бинарним елементима B димензија $24 \times M \times N$.

Корак 3: Над вектором B примењена је BPSK модулација $x = 2 \cdot B - 1$. BPSK је модулациона шема која конвертује податке тако што мења фазу носиоца таласа користећи две фазе које су међусобно одвојене за 180° . Ова модулација је најробуснија од свих PSK модулација, јер је потребан веома висок (највиши) ниво шума да би демодулатор дао погрешну одлуку.

Корак 4: Сигнал који је модуласан BPSK модулацијом пренесен је кроз Рајсов турбулентни канал: $y = h \times x + n$, где h -представља вектор који обухвата утицај Рајсовог слабљења, чији су узрочници генерисани у складу са иразом датим у једначини (4.1.6), а у складу са параметром K , однос јачине кохерентне компоненте, дефинисан је изразом датим у једначини (4.1.6). Вектор n обухвата AWGN канала дефинисаног нивоа SNR-а.

Корак 5: Grey декодовање са чврстим одлучивањем је примењено на вектору Y , и након тога је добијен вектор \bar{B} .

Корак 6: Као резултат реконструкције из вектора \bar{B} на крају је добијена реконструисана слика са дигиталним воденим жигом \bar{A}^* .

Фаза 2:

Корак 1: Од примљених података (8-битна слика са инсертованим дигиталним воденим жигом) X_1 креиран је вектор V са децималним елементима.

Корак 2: Добијени вектор је преведен у вектор са бинарним елементима B_1 димензија $24 \times M \times N$.

Корак 3: Над вектором V примењена је BPSK модулација $B_1 = 2 \times V - 1$. Бинаризовани вектор V је BPSK модулисан и добијен је вектор B_1 .

Корак 4: Вектор n обухвата AWGN шум канала са дефинисаним нивоом SNR-а, и у компонента је добијена у зависности од укупне снаге линије видљивости LOS (енгл. Line-of-Sight) пута и расејане компоненте дуж путање.

Корак 5: Вектор са додатим утицајем Рајсовог фединга h , чији су узорци генерисани у складу са изразом датим у једначини (4.1.5), а у складу са параметром K , и односом јачине кохерентне компоненте дефинисане изразом датим у једначини (4.1.6) добијен је као случајна компонента са следећим изразом: $h = \sigma \times n$.

Корак 6: Gray декодовање са чвстим одлучивањем је примењено на Y : $Y = h \times B_1 + n$, те је тако добијен вектор \bar{Y}_1 .

Корак 7: Резултујућа слика са дигиталним воденим жигом \bar{X}_2 је добијена из вектора \bar{Y}_1 .

Процес тестирања је изведен тако што су реализована четири алгорита описана у радовима [49, 84]:

Алгоритам 1 којим је вршено инсертовање секундарног воденог жига у примарни водени жиг, Алгоритам 2 којим је реализовано инсертовање примарног воденог жига (са инсертованим секундарним воденим жигом) у слику, Алгоритам 3 којим је вршена екстракција примарног жига из слике (пренесене FSO каналом) и Алгоритам 4 којим је вршена екстракција секундарног воденог жига из примарног.

Реализација примењених алгоритама извршава се у следећим корацима:

Алгоритам 1: Алгоритам инсертовања секундарног воденог жига у примарни реализује се у следећим корацима:

Корак 1: Над примарним жигом W_P , димензија $(M/2) \times (N/2)$ извршена је DWT трансформација.

Корак 2: На секундарном жигу W_S димензија $(M/4) \times (N/4)$, примењена је SVD трансформација.

Корак 3: Над сваким субквадрантом примарног жига (добијених DWT трансформациом) примењена је SVD трансформација $W_P^{*k} = U_{W_P}^k \Sigma_{W_P}^{*k} V_{W_P}^{kT}$ где $k \in \{1,2,3,4\}$ представља квадранте DWT трансформације примарног жига (LL, LH, HL и HH).

Корак 4: Сингуларне вредности свих субквадрната примарног жига су модификоване сингуларним вредностима секундарног воденог жига

$$\Sigma_{W_{PS}}^k = \Sigma_{W_P}^k + \alpha \times \Sigma_{W_S}.$$

Корак 5: Примењена је инверзна SVD трансформација како би се добили субквадранти.

Корак 6: Примењена је DWT трансформација да би се добио примарни водени жиг W_{PS} у којем је инсертован секундарни водени жиг.

Алгоритам 2: Алгоритам инсертовања примарног воденог жига у слику реализован је у следећим корацима:

Корак 1: Над оригиналном сликом A димензија $M \times N$ примењена је DWT трансформација.

Корак 2: Применом Цик-Цак (*енгл.* Zig-Zag) секвенце добијени су непреклапајући подквадранти.

Корак 3: Над квадрантима A_1, A_2, A_3, A_4 , $A^k = U_A^k \Sigma_A^k V_A^{kT}$, $k \in \{1,2,3,4\}$, добијених на начин наведен у кораку 3 примењена је SVD трансформација.

Корак 4: Над примарним воденим жигом W_{PS} , примењена је SVD трансформација, $W_{W_{PS}} = U_{W_{PS}} \Sigma_{W_{PS}} V_{W_{PS}}^T$.

Корак 5: Сингуларне вредности непреклапајућих правоугаоника модификоване су са сингуларним вредностима новог примарног воденог жига $\Sigma_{A_{PS}}^k = \Sigma_{A_P}^k + \alpha \cdot \Sigma_{W_{PS}}$.

Корак 6: Да би се добили подквадранти примењена је инверзна SVD трансформација.

Корак 7: Од добијених непреклапајућих правоугаоника креиран је вектор над којим је примењена инверзна Цик-Цак трансформација да би се добили непреклапајући квадранти.

Корак 8: Над квадрантима добијеним у кораку 7 примењена је инверзна DWT трансформација како би се добила слика са инсертованим дигиталним воденим жигом A_W .

Алгоритам 3: Реализација алгоритма екстракције примарног воденог жига из слике реализује се у следећим корацима:

Корак 1: Над сликом са инсертованим воденим жигом A_W димензија $M \times N$ примењена је DWT трансформација.

Корак 2: Примењене су Цик-Цак секвенце како би се добили непреклапајући подквадранти.

Корак 3: Над добијеним квадрантима A_1, A_2, A_3, A_4 , $A^k = U_A^k \Sigma_A^k V_A^{kT}$, $k \in \{1,2,3,4\}$ добијеним на начин приказан у кораку 2 примењена је SVD трансформација.

Корак 4: Из непреклапајућих квадраната екстраковане су сингуларне вредности.

Корак 5: Како би се добили подквадранти примењена је инверзна SVD трансформација.

Корак 6: Од добијених непреклапајућих правоугаоника креиран је вектор над којим је примењена инверзна Цик-Цак трансформација [85] како би се опет добили непреклапајући правоугаоници.

Корак 7: Над квадрантима добијеним у кораку 6 примењена је инверзна DWT трансформација како би се добио екстраковани примарни жиг W_{pe} .

Алгоритам 4: Реализација овог алгоритма за екстракцију секундарног воденог жига из примарног реализује се у следећим корацима:

Корак 1: Над примарним воденим жигом W_{pe} примењена је DWT трансформација.

Корак 2: Над подквадрантима добијеним из воденог жига W_{pe} примењена је SVD трансформација.

Корак 3: Сингуларне вредности секундарног воденог жига су екстраковане из сваког квадранта.

Корак 4: У циљу добијања екстракованог секундарног воденог жига W_{se} примењена је инверзна SVD трансформација.

4.1.2.3 Симулациони резултати и анализа перформанси

У циљу симулације FSO преноса слике са инсертованим воденим жигом кроз Рајсов турбулентни фединг канал извршена је симулација. Симулација је реализована у следећим корацима:

Корак 1: У оригиналну слику је инсертован водени жиг са коефицијентом инсертовања $\alpha_1 = 0.25$ (за примарни) и $\alpha_1 = 0.1$ (за секундарни).

Корак 2: BPSK модулација је примењена над таквом сликом (са инсертованим жигом) A^* .

Корак 3: Кроз Рајсов турбулентни канал са додатим AWGN пренесен је тако модулисани BPSK сигнал.

Корак 4: На пријемној страни извршена је реконструкција слике применом Gray декодовања са високом стопом одлучивања.

Корак 5: На крају је из реконструисане слике екстракован примарни и секундарни водени жиг.

На крају су примењене мере квалитета. Како би се утврдио квалитет пренесене слике и постојаност воденог жига, примењен је вршни однос сигнал шум PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{2^n - 1}{MSE}, \quad (4.1.20)$$

где је са MSE-означена средња квадратна грешка између слике са воденим жигом и пренесене слике:

$$MSE = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - y_{ij})^2}{M \times N} \quad i = 1 \dots M, \quad j = 1 \dots N \quad (4.1.21)$$

Сличност између оригиналне и пренесене слике и воденог жига одређивана је мером квалитета NC-нормализована корелација (енгл. **Normalized Correlation**):

$$NC = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} y_{ij})}{\sqrt{\sum_{ij} (x_{ij})^2} \sqrt{\sum_{ij} (y_{ij})^2}} \quad i=1\dots M, \quad j=1\dots N \quad (4.1.22)$$

и BER:

$$BER = \frac{\sum_{ijl} [(x_{ij})_l]_2 \oplus [(y_{ij})_l]_2}{M \times N}, \quad i=1\dots M, \quad j=1\dots N, \quad l=1\dots n. \quad (4.1.23)$$

где x_{ij} представља пиксел оригиналне слике, y_{ij} пиксел рестауриране слике, n -број битова, $M \times N$ -димензије слике, и \oplus означава EXOR оператор над сваком од n парова битова x_{ij} и y_{ij} .

У експерименту су коришћене слике представљене на наредним сликама: Слика 4.1.10. је коришћена као примарни жиг (слика лептира, димензија 256×256).



Слика 4.1.10. Слика примарног жига-Лептир.

Слика 4.1.11. је коришћена као секундарни жиг (слика Звезда, димензија 128 × 128).



Слика 4.1.11. Слика секундарног жига-Звезда.

На слици 4.1.12. представљене су слике коришћене као оригинална слика (Лена, Девојка, Мајмун и Паприке, димензија 512 × 512).



а)

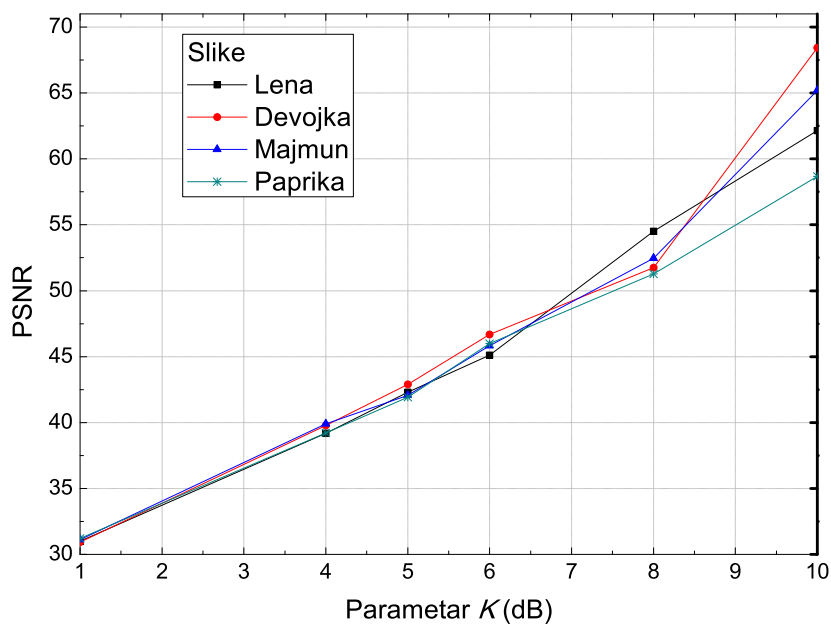


б)

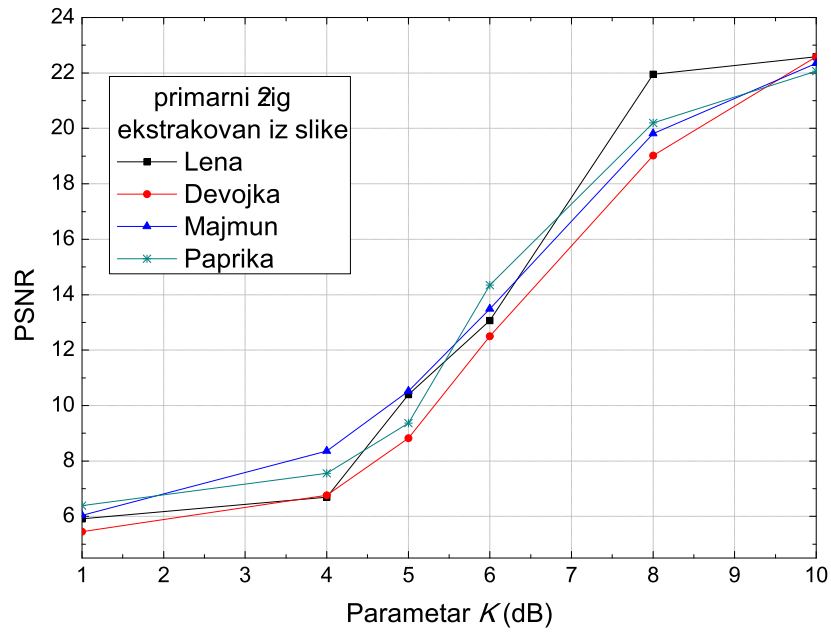


в) г)
Слика 4.1.12. Сlike базе: а) Лена, б) Девојка, в) Мајмун и г) Паприка.

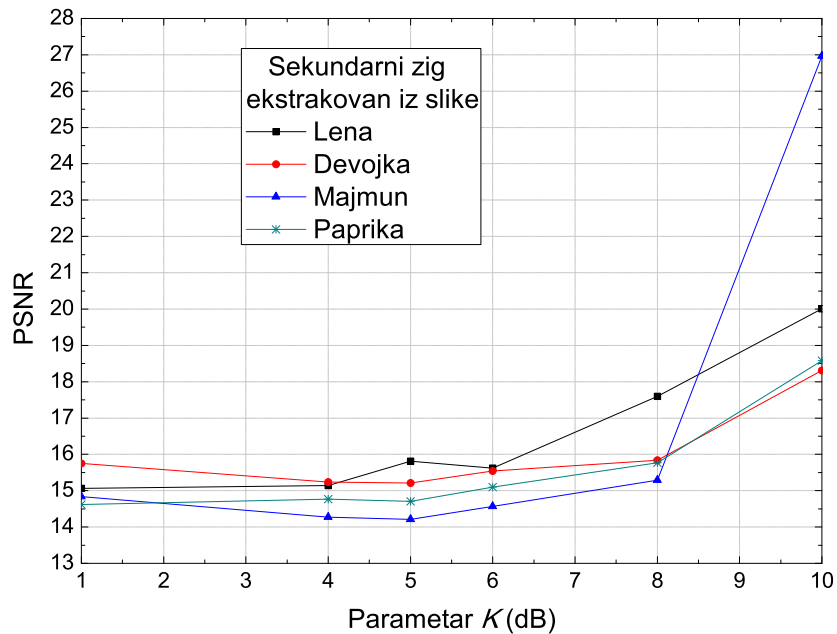
На сликама 4.1.13-4.1.15 представљен је PSNR за пренесене слике и екстраковани примарни и секундарни водени жиг:



Слика 4.1.13. PSNR пернесених слика: Лене, Девојке, Мајмуна и Паприка.

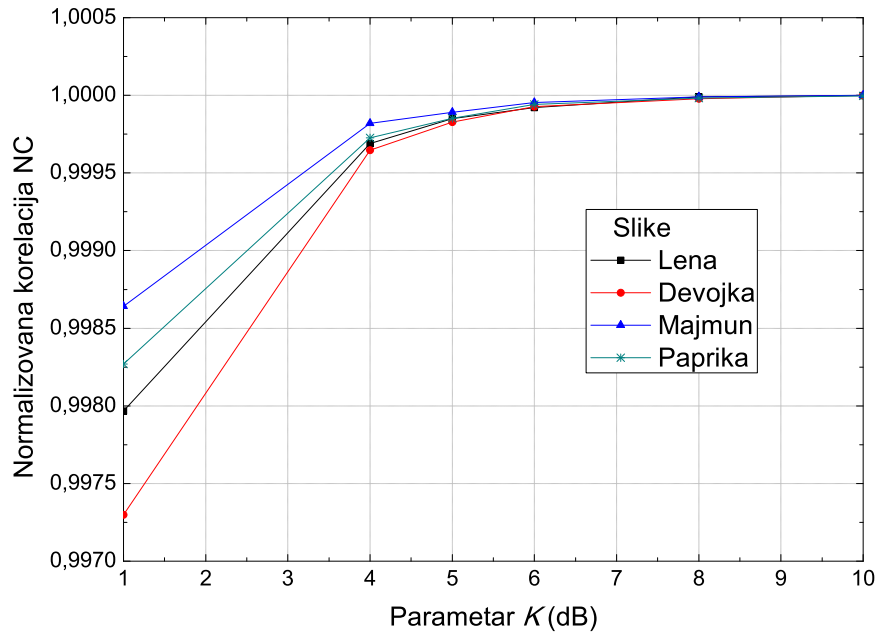


Слика 4.1.14. PSNR екстракованог примарног воденог жига из пернесених слика: Лене, Девојке, Мајмуна и Паприка.

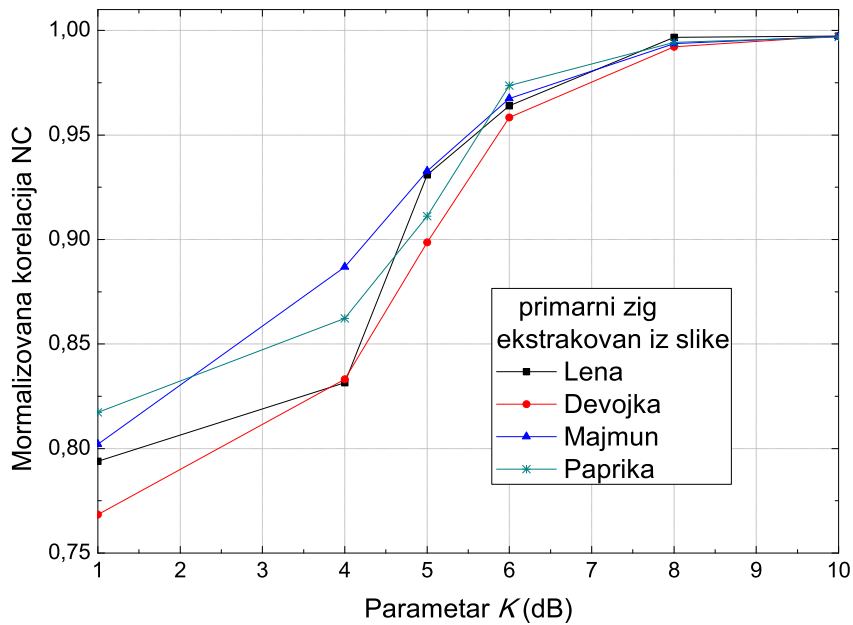


Слика 4.1.15. PSNR екстракованог секундарног воденог жига из пернесених слика: Лене, Девојке, Мајмуна и Паприка.

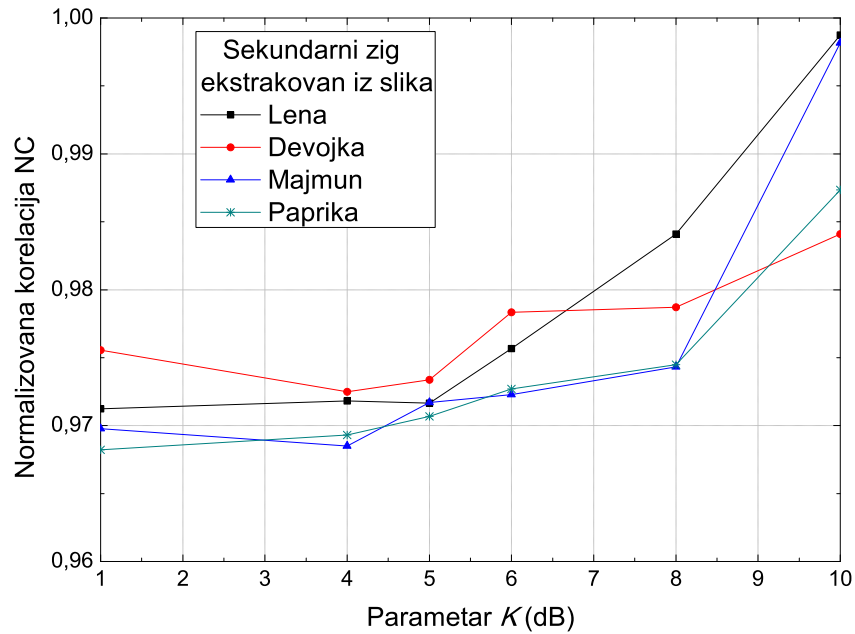
На сликама 4.1.16 - 4.1.18 представљена је нормализована корелација за различите пренесене слике и за екстраковани примарни и секундарни водени жиг из пренесених слика:



Слика 4.16. Нормализована корелација за пренесене слике: Лене, Девојке, Мајмуна и Паприка.

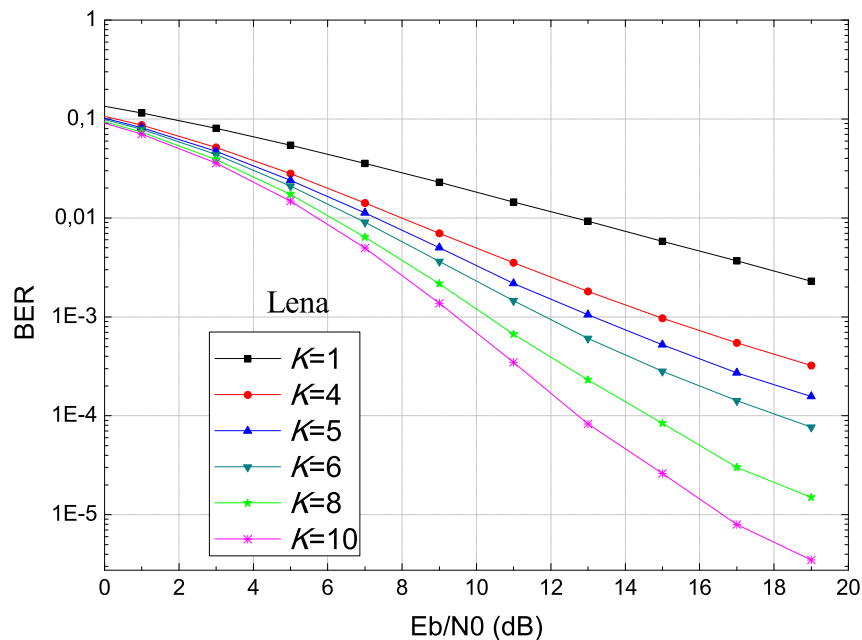


Слика 4.1.17. Нормализована корелација за екстраковани примарни водени жиг из пренесених слика: Лене, Девојке, Мајмуна и Паприка.

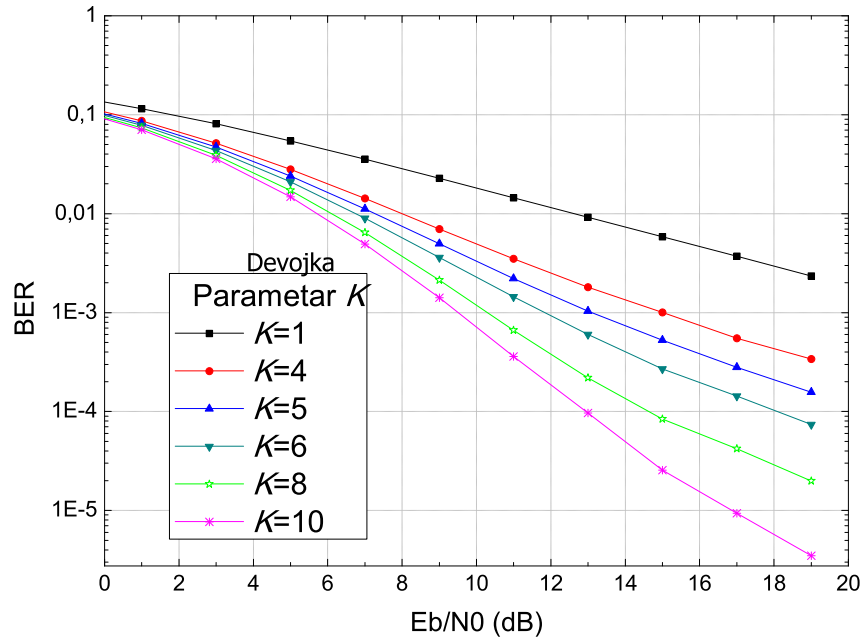


Слика 4.1.18. Нормализована корелација за екстраковани секундарни водени жиг из пренесених слика: Лене, Девојке, Мајмуна и Паприка.

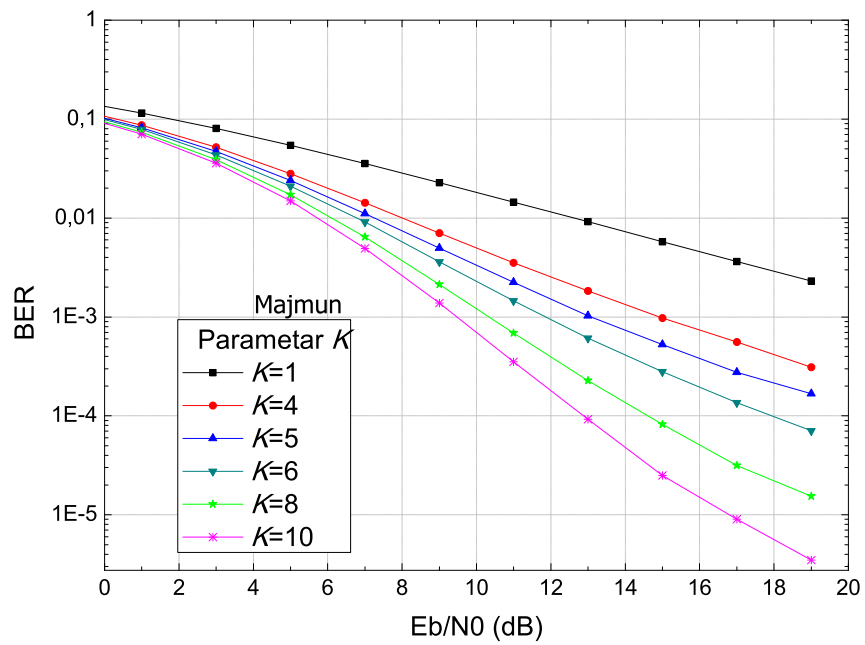
Мера квалитета BER за пренесене различите слике кроз симулирани канал за различите вредности параметра K , приказана је на сликама 4.1.19 - 4.1.22:



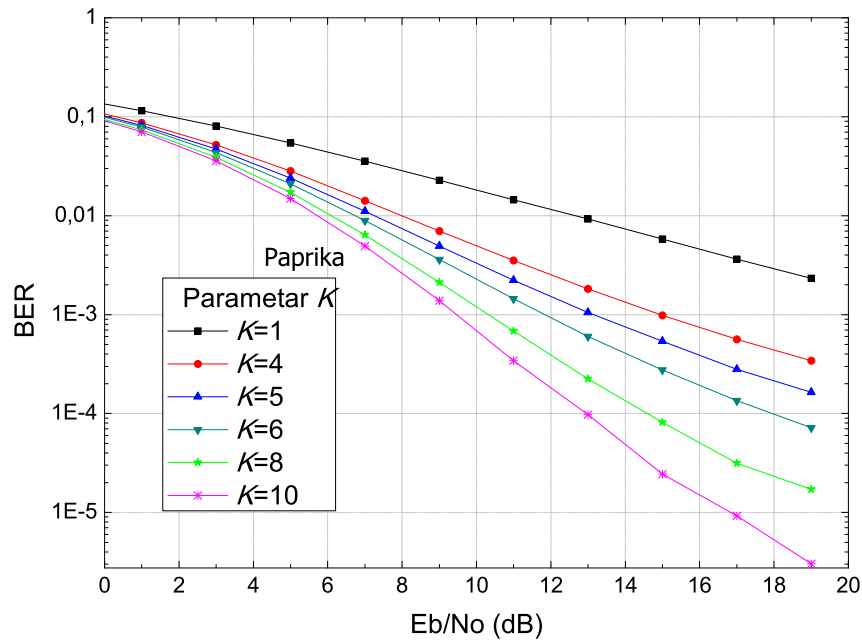
Слика 4.1.19. BER за пренесене слику Лена, за различите вредности параметра K .



Слика 4.1.20. BER за пренесене слику Девојка, за различите вредности параметра K .



Слика 4.1.21. BER за пренесене слику Мајмун, за различите вредности параметра K .



Слика 4.1.22. BER за пренесене слику Паприка, за различите вредности параметра K .

Анализом дијаграма представљених на сликама 4.1.23-4.1.26 може се закључити да су, у складу са очекивањима, FSO комуникациони канали склони да погрешно пренесу податке (информацију). Ова тенденција да се информације погрешно или непотпуно пренесу је последица утицаја временских услова који утичу на перформансе пренесене слике и робусност. На основу анализе дијаграма приказаних на сликама 4.1.23-4.1.26 примећује се да пренесена слика, односне мере квалитета пренесене слике и екстракованог воденог жига имају задовољавајуће вредности при вредности параметра $K = 4$. За ову вредност параметра K пренесена слика има и визуелно изузетно добар квалитет као и екстраковани водени жиг.

Извршена анализа преформанси преноса слике са инсертованим двоструким воденим жигом путем FSO система у "last mile" конекцији кроз Рајсов турбулентни канал показала је да при вредности параметра $K > 4$ на пријемној страни добија се слика задовољавајућег квалитета а мере перформанси слике и екстракованог воденог жига су у границама задовољавајућих. Мера перформанси, нормализована корелација има вредности $NC > 0.85$ што представља показатељ који нам говори да су пренесена слика и жиг врло слични оригиналу (без значајних деградација).

4.2 Пренос слике у боји кроз Рајсов турбулентни канал у присуству сцинтилације

Слика у боји представља комплекснији облик датотеке а уједно и врло заступљен. Приликом анализе слике у боји користи се неколико модела представљања слике. Најчешћи модели којима се представља слика у боји су RGB модел (*енгл.* **R**ed, **G**reen, **B**lue), YUV и YCrCb. Како је слика у боји такође представљена матрицом, односно трима матрица то приликом преноса слике у боји потребно је извршити разлагање слике на компоненте, тј. на три матрице. Такође, потребно је добијене матрице превести из декадног у бинарни систем како би се такав скуп података пренео кроз комуникациони канал.

4.2.1 Детекција пожара у слици

Пожар представља појаву која узрокује велике штете у свим сферама друштва, екологији, инфраструктури и људима, те је стога потребно што ефикасније деловати у циљу превентивне заштите [48, 86, 87, 88, 89]. У сврху заштите од пожара превенција је веома битна, такође врло је битно након самог настанка пожара извршити рану детекцију истог. Као потреба да се конвенционални системи замене савременим системима за заштиту од пожара а пре свега за рану детекцију пожара јавила се тенденција коришћења рачунарских система и у том контексту детекција пожара дигиталним процесирањем слике у боји [86, 88]. Детекција пожара у слици се врши тако што се изврши класификација пиксела. Многи радови су се бавили анализом слике у боји у циљу детекције пожара у слици те је тако у раду [87] коришћен YUV модел за детекцију пожара у видео секвенци. У раду [87] Y компонента је коришћена за идентификацију потенцијалног пиксела пожара, док је коначна одлука доношена након анализирања пиксела U компоненте и пиксела V компоненте слике. У раду [88] за детекцију пожара у слици коришћен је RGB модел. Детекција пожара у слици у наведеном моделу се врши тако што се формирају региони (R-G, R-B и G-B регион) а затим се статистичком анализом региона врши детекција пиксела пожара. Код овог модела пиксел је класификован као пожар ако се налази у троуглу

дефинисаном линијама региона. Рад [89] анализира детекцију пожара у слици предлажући алгоритам којим се анализирају $YCbCr$ компоненте слике. Овај алгоритам има веома висок степен детекције пожара. У раду [90] је предложен алгоритам за детекцију пожара у слици који је побољшан у односу на алгоритам за детекцију пожара у раду [91]. У циљу тестирања алгоритама за детекцију пожара у слици коришћена је база слика [93] како би се што ефикасније и за много различитих ситуација извршило тестирање. У циљу провере ефикасности детектовања пожара у слици извршено је креирање тест слике која се састоји од 36 поља груписаних у 3 секције: а) 12 сегмената пожара, б) 12 сегмената дима и в) 12 сегмената без пожара и дима.

Такође, приликом детекције је изузетно битно да се изврши исправна детекција пиксела пожара, међутим, веома је честа појава да се изврши погрешна детекција што може на крају довести и до погрешне детекције. У циљу провере детекције класификација је вршена на следећи начин: а) нема пожара и алгоритам је утврдио да нема пожара TP (*енгл.* **True Positive**), нема пожара али је алгоритам детектовао пожар FN (*енгл.* **False Negative**), в) има пожара али је алгоритам детектовао да пожара нема FP (*енгл.* **False Positive**) и г) нема пожара и алгоритам је детектовао да нема пожара TN (*енгл.* **True Negative**), табела 4.2.1. [91].

Табела 4.2.1. Принцип класификације грешке

		Реално	
		Пожар	Нема пожара
Детектовано	Пожар	(TP) Исправна позитивна детекција	(FN) Погрешна негативна детекција
	Нема Пожара	(FP) Погрешна позитивна детекција	(TN) Исправна негативна детекција

4.2.1.1 Алгоритам детекције пожара у слици

Алгоритам за детекцију пожара у слици реализован раду [94] извршава се у следећим корацима:

Улаз: Слика пожара димензија $M \times N$, $X_{M \times N}$.

Израз: Аларм пожара (1 пожар, 0 нема пожара).

Корак 1:

$R_1(1:M,1:N)=0;$

FOR $x=1:M$

FOR $y=1:N$

IF $(|C_b(x,y) - C_r(x,y)| \geq Th);$

$R_1(x,y)=1;$

ELSEIF $(R(x,y) < 1.3 * G(x,y)) \mid (C_r(x,y) > S_{cr2}) \mid (C_b(x,y) > S_{cb2});$

$R_1(x,y)=0;$

END

END

END_y

END_x

Корак 2:

Fire_Flag=0;

FOR $x=1:M$

FOR $y=1:N$

IF $R_1(x,y) == 1;$

 Fire_Flag=1;

END

END

END.

END.

Y , C_b и C_r су генерисане из RGB компоненти слике коришћењем следеће трансформације:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2568 & 0.5041 & 0.0979 \\ -0.1482 & -0.2910 & 0.4392 \\ 0.4392 & -0.3678 & -0.0714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix}, \quad (4.2.1)$$

где Y -представља луминантну компоненту, C_b Хроминантну компоненту плаве и C_r представља хроминантну компоненту црвене.

Вредности S_{r1} , S_{r2} , S_{g1} , S_{g2} , S_{b1} , S_{b2} , S_{cb} и S_{cr} су добијене коришћењем хистограма свих употребљених компоненти (R , G , B , C_r и C_b компоненте). Вредност параметра Th утврђена је експериментално. Ова вредност представља вредност у којој је избалансирана и у најбољој мери изабран однос релације између исправно детектованог пиксела пожара и погрешно детектованог пиксела пожара.

Средња вредност компоненти Y , C_b , C_r које су означене као Y_{mean} , C_{b_mean} и C_{r_mean} израчунате су на следећи начин:

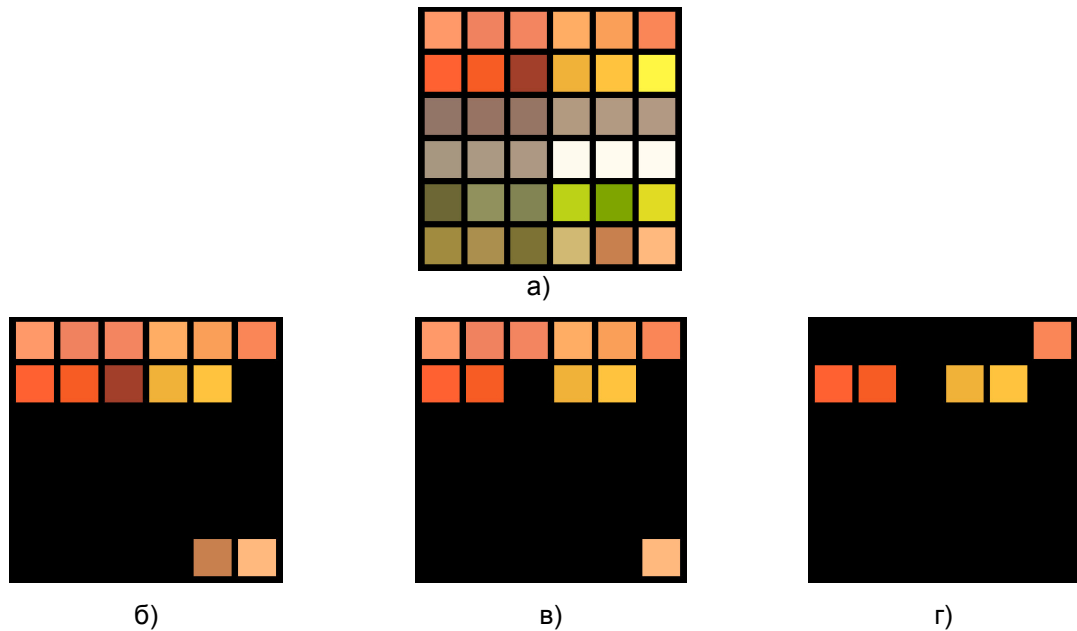
$$Y_{mean} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N Y(x, y), \quad (4.2.2)$$

$$C_{b_mean} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N C_b(x, y), \quad (4.2.3)$$

$$C_{r_mean} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N C_r(x, y). \quad (4.2.4)$$

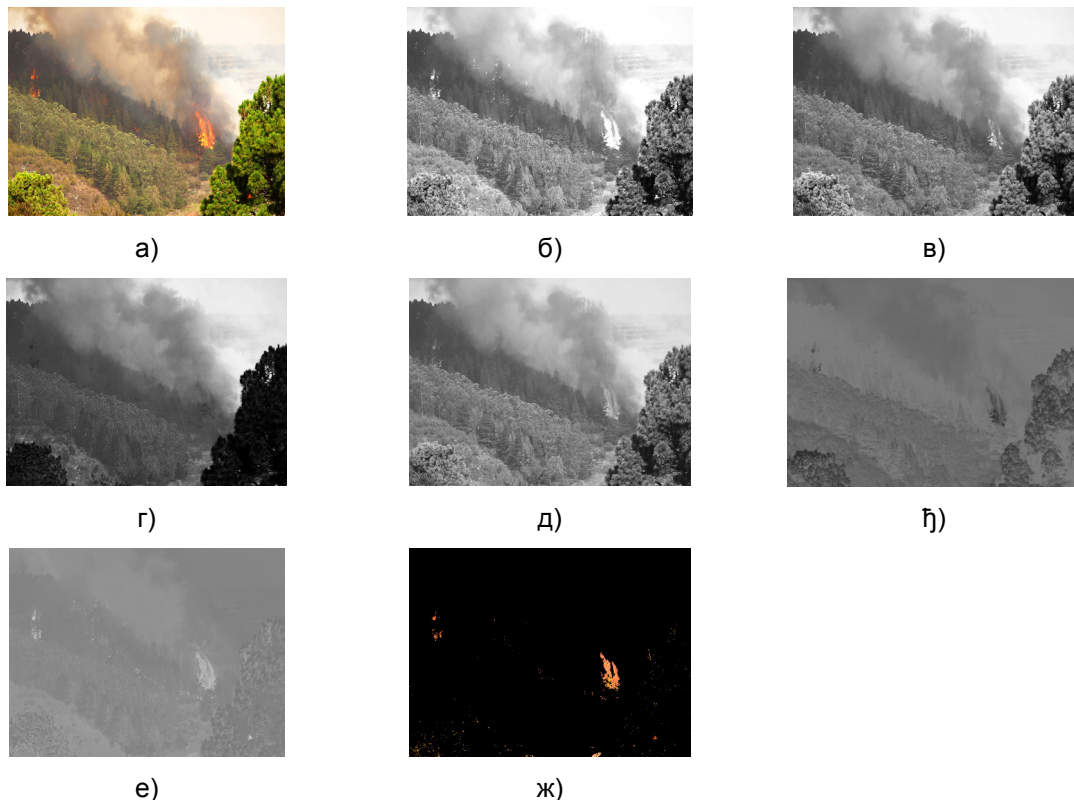
4.2.1.2 Резултати тестирања и анализа

На слици 4.2.1 представљена је тест слика која је коришћена за тестирање ефикасности алгоритма, и резултати тестирања алгоритма за различите вредности параметра Th : а) $Th=30$, б) $Th=65$ и в) $Th=90$.



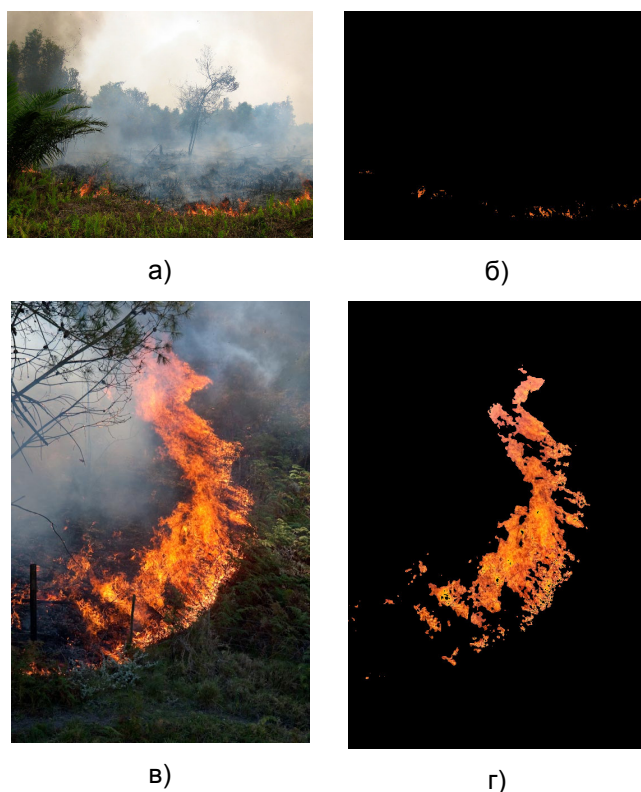
Слика 4.2.1. а) Тест слика и резултат процесања тест слике MIPFD алгоритмом: б) за $Th=30$, в) $Th=65$ и г) $Th=90$.

На слици 4.2.2. су приказани резултати детекције пожара који су видљиви и где се може уочити ефикасност алгоритма за детекцију пожара у слици над сликом X_1 из базе слика, као и R, G, B, Y, C_b и C_r компоненте слике пожара.



Слика 4.2.2. Резултати процесања слике X_1 : а) оригинална слика, б) R-компонента, в) G-компонента, г) B-компонента, д) Y-компонента, ђ) C_b -компонента, е) C_r -компонента, ж) слика детектованог пожара

На слици 4.2.3. приказани су резултати тестирања детекције пиксела пожара над сликама X_2 и X_3 , оригинална слика пожара и слика детектованог пожара предложеним алгоритмом.



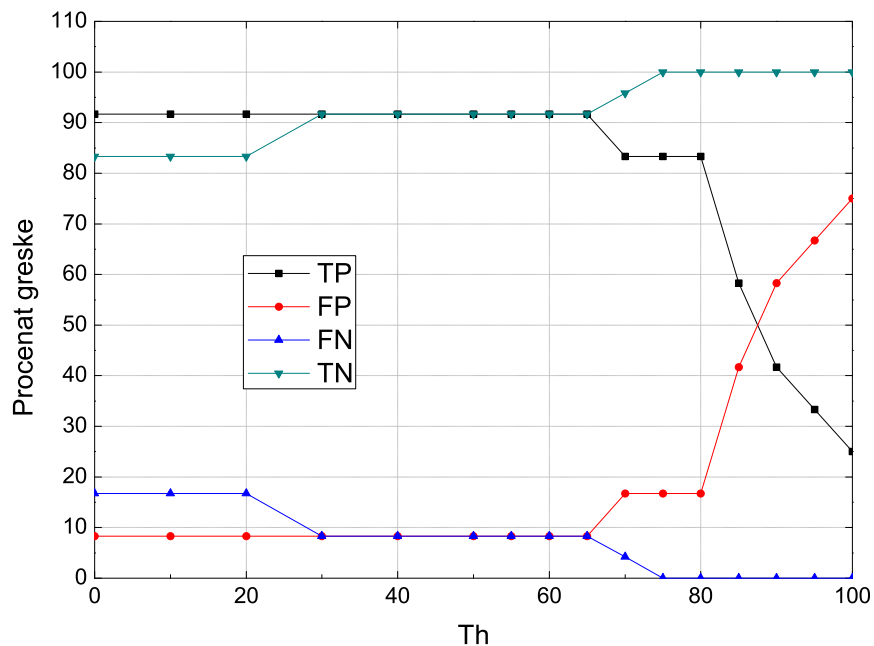
Слика 4.2.3. Резултати процесирања слике X_2 и X_3 : а) оригинална слика X_2 , б) Процесирана слика X_2 , в) оригинална слика X_3 , г) Процесирана слика X_3 ,

У табели 4.2.2. су приказане процентуалне вредности ефикасности исправног детектовања пожара у слици за предложени алгоритам у зависаности од параметра Th [90].

Табела 4.2.2. Процентуалне вредности TP, FP, TN и FN у зависности од Th

Грешка	Th														
	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
TP	91.7	91.7	91.7	91.7	91.7	91.7	91.7	83.3	83.3	83.3	58.3	41.7	33.3	25	
FP	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	16.7	16.7	16.7	41.7	58.3	66.7	75	
FN	16.7	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	4.2	0	0	0	0	0	0	
TN	83.3	91.7	91.7	91.7	91.7	91.7	91.7	95.8	100	100	100	100	100	100	

На слици 4.2.4. приказани су дијаграми зависности TP, FP, TN и FN у зависности од вредности параметра Th.



Слика 4.2.4. Процентуални резултати за грешку у зависности од вредности параметра Th.

У складу са резултатима приказаним у табели 4.4 и на дијаграму 4.26. може се закључити следеће:

- а) Оптимална вредност параметра Th је Th=65.

б) Процентуална вредност успешно детектованих пиксела пожара при $T_h=65$ јесте 91.7% што представља изузетно висок проценат прецизности (исправности),

в) Процентуална вредност исправно детектованих пиксела који не представљају пожар јесте 91.7% што је изузетно висок степен прецизности.

На основу анализе представљене напред може се закључити да овакав вид детектовања пожара у слици представља веома поуздан начин детектовања пожара (на шумским просторствима) и може се користити при детекцији пожара.

4.2.2 Пренос слике пожара кроз Рајсов FSO турбулентни канал у присуству сцинтилације и детекција пожара

У циљу превенције од пожара у природи и вањским срединама, потребно је да се пожар детектује на време. У летњим месецима, нарочито, је изражено нагло и брзо ширење пожара на отвореном. Детекција пожара најчешће обавља у центрима за детекцију и јављање, релативно далеко од места пожара. Један, за сада, неконвенционални начин за пренос слике пожара или самог аларма пожара јесте путем оптичког FSO преноса [94]. Овај начин преноса јесте погодан зато што се овакви комуникациони системи могу веома брзо, лако и једноставно а нарочито јефтино инсталирати на местима која су неприступачна. Још једна погодност оваквих комуникационих система јесте та што за њихову инсталацију није потребна посебна и нарочита дозвола нити лиценце за коришћење спектра. Наравно постоје и друге предности коришћења оваквих комуникационих система а то су: концентрација снаге снопа, отпорност на електромагнетна зрачења, није потребна слободна Fresnel зона, могућност потпуне дуплекс трансмисије. Такође, постоје и одређени недостаци за коришћење оваквих комуникационих система а најзначајнији је тај да услед атмосферских прилика може доћи до слабљења оптичког снопа и до потпуног губитка сигнала. Најзначајније оштећење FSO линка, за дистанце мање од 1 км настаје услед атмосферских турбуленција [66]. Временске и просторне

флукуације ласерског снопа се јављају као резултат снопа варијација индекса рефракције, изазване атмосферским турбуленцијама, познате су као флукуација и радијације примљеног сигнала. Овај феномен познат је као FSO фединг или сцинтилација [2, 15, 26, 42]. У FSO комуникацијама емитовање дигиталне слике (у боји) је веома интезивно. Типичан FSO фединг најчешће траје неколико ms док FSO комуникациони линк функционише са веома великим брзинама које достижу и до неколико Gb/s. При оваквом односу брзина фединга и комуникационог линка велики број пренесених бита може бити неисправно пренесен или чак изгубљен тако да примљени сигнал је ослабљен што у крајњем случају резултује великим нивоом односа грешке и бита, BER. Како би се што боље моделовали FSO комуникациони линкови а у циљу што ефикаснијег побољшања перформанси и анализе система развијени су многи модели турбуленција. Неки од веома заступљених модела [82] турбуленција који математички веома реално презентују физички комуникациони канал су: Log-normal турбулентни модел, К модел дистрибуције [76], Gamma-Gamma модел [41] и Рајсов модел [80, 81]. У раду [80] је показано да коришћење Рајсов модела за описивање утицаја комбинованих ефеката турбуленције изазваних фазном дисторзијом и амплитудном флукуацијом на перформансе кохерентних пријемника са деловима фазних компензација јесте веома слично реалном сценарију.

Успешност детекције пожара веома зависи од комуникационог канала, алгорита за побољшање сигнала и алгорита за детекцију пожара. Овде је реализован експеримент преноса слике пожара (у боји) кроз Рајсов FSO комуникациони канал и детекција пожара у слици након преноса исте.

4.2.2.1 Модел преноса и детекције пожара у слици кроз Рајсов FSO комуникациони канал

У циљу тестирања система за пренос слике кроз Рајсов FSO комуникациони систем и детекцију пожара у слици након преноса слике кроз канал извршена је симулација. Систем за пренос сигнала на пријемној страни је моделован као:

$$E_r(t, r) = u_s(t) \exp(j2\pi f_c t + \theta(t)) \exp[\chi(r) + j\phi(r)] \quad (4.2.5)$$

где r представља позицију вектора на страни пријемника, f_c је фреквенција носиоца оптичког сигнала и $u_s(t) \exp(j\theta(t))$ представља комплексну енвелопу пријемног сигнала. Такође $\chi(r)$ и $\theta(r)$ представљају амплитудне флукуације и фазне варијације изазване турбуленцијом.

Сигнал је на улазу фотодетектора моделован као:

$$y_T(t) = x_T(t) + n_T(t) \quad (4.2.6)$$

где члан AWGN $n_T(t)$ има нулту средњу вредност и варијансу:

$$\sigma_n^2 = \frac{B_s e^2 \eta \pi}{2 h f_c} A^2 D^2 \quad (4.2.7)$$

где e представља наелектрисање електрона, h означава Планк-ову константу, η је ефикасност фотодетектора, B_s је проток сигнала, D је пречник отвора пријемника и A је амплитуда локалног осцилатора (LO) на демодулатору.

Носиоц сигнала може бити моделован као:

$$x_T(t) = \frac{e \eta \pi}{2 h f_c} A D^2 u_s(t) \operatorname{Re} \left\{ \alpha \exp(j2\pi f_{IF} t + \theta_{IF}(t)) \right\} \quad (4.2.8)$$

где $f_{IF} = f_c - f_{LO}$ означава еквивалентну фреквенцију сигнала а α представља ефективну флукуацију моделованог FSO фединга. Као што је приказано у радовима [80, 81, 82], у циљу моделовања канала функција густине вероватноће грешке амплитуде FSO система моделована је Рајсовом дистрибуцијом као:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\alpha^2} e^{-K-(1+K)\alpha^2/\bar{\alpha}^2} I_0 \left(2\alpha \sqrt{\frac{K(1+K)}{\alpha^2}} \right) \quad (4.2.9)$$

где је $I_0(x)$ модификована Bessel функција нултог реда [73] док параметар K представља однос јачина кохерентне и некохерентне компоненте на пријемном пољу дат у [82] као:

$$K = \left[\frac{\overline{\alpha^2}}{\sqrt{\overline{\alpha_r^4} + 2\overline{\alpha_r^2}(\sigma_i^2 - \sigma_r^2)} - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2} - 1 \right] \quad (4.2.10)$$

и

$$\overline{\alpha^2} = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \overline{\alpha_r^2} \quad (4.2.11)$$

$$\overline{\alpha_r^2} = \exp\left(-\frac{\sigma_\chi^2 + \sigma_\phi^2}{2}\right) \quad (4.2.12)$$

$$\sigma_r^2 = (1/2G)\left(1 + \exp(-2\sigma_\phi^2) - 2\exp(-2\sigma_\chi^2 - 2\sigma_\phi^2)\right) \quad (4.2.13)$$

$$\sigma_i^2 = (1/2G)\left(1 - \exp(-2\sigma_\phi^2)\right) \quad (4.2.14)$$

где је σ_χ^2 представља Log-амплитудну варијансу, која је дефинисана у раду [82, 94] и дата изразом:

$$\sigma_\chi^2 = 0.307k^{7/6}L^{11/6}C_n^2 \quad (4.2.15)$$

Преостала фазна одступања дефинисана су параметром σ_ϕ^2 који је изражен преко пречника пријемника D_k и Зернике полинома ΔJ , и представљен релацијом:

$$\sigma_\phi^2 = \Delta J \left(\frac{D_k}{r_0} \right) \quad (4.2.16)$$

Параметар $k=2\pi/\lambda$ представља таласни број, L -означава дужину линка пропагације док је са C_n^2 означен рефракциони индекс.

Параметар G дат је изразом:

$$G = \left\{ 1.09 (\rho_0 / D_k)^2 \Gamma[1.2, 1.08] (\rho_0 / D_k)^{5/3} \right\}^{-1}. \quad (4.2.17)$$

где $\Gamma(.,.)$ представља некомплетну Гамма функцију, а ρ_0 генерализовани Fried параметар [95].

Вредност Fried параметра [94, 95] дата је изразом:

$$r_o = 1.68 (C_n^2 L k^2)^{-3/5} \quad (4.2.18)$$

Тренутни примљени однос сигнал шум (SNR) система након интензивне демодулације дат је као:

$$\gamma = \frac{P_x}{\sigma_n^2} = \frac{\eta I_s}{h f_c B_s} \frac{\pi D^2}{4} \alpha^2 \quad (4.2.19)$$

где $I_s = |u_s(t)|^2$ означава средњи интензитет оптичког поља и P_x представља снагу излазног сигнала.

Реализација симулације је симулирана коришћењем два алгорита, један којим је симулиран FSO пренос кроз Рајсов турбулентни канал и други алгоритам којим је симулирана детекција пожара у слици након преноса слике кроз канал.

Алгоритми су реализовани у следећим корацима:

Алгоритам 1:

Корак 1: Слика пожара је разложена на R, G, B компоненте од којих је креиран вектор.

Корак 2: Добијени вектор, преведен је у вектор са бинарним елементима B димензија $3 \times M \times N$.

Корак 3: Над вектором B примењена је BPSK модулација $x = 2 \cdot B - 1$. BPSK је модулативна шема.

Корак 4: Сигнал који је модуласан BPSK модулацијом пренесен је кроз Рајсов турбулентни канал: $y = h \times x + n$.

Корак 5: Grey декодовање са чврстом одлуком је примењено на вектору Y , и након тога је добијен вектор \bar{B} из којег је реконструисана слика пожара

Корак 6: Из реконструисане слике вршена је детекција пожара.

Процес тестирања је изведен тако што је након симулације преноса слике кроз канал реализован алгоритам за детекцију пожара у слици који је реализован у следећим корацима [78, 94]:

Корак 1: Слика пожара је разложена на R , G , B , Y , C_b и C_r компоненте.

Корак 2: Добијени елементи (матрице) R , G , B , Y , C_b и C_r слике проверавани су у MIPFD алгоритму да ли представљају елементе пожара.

Корак 3: У случају детектовања пожара сигнал пожара је алармиран.

Корак 4: Добијени резултати аларма (пожара) детектованог након преноса слике кроз канал упоређивани су са резултатима аларма детектованог пожара у слици из рада [89].

Код реализације алгоритма за детекцију пожара описан је у поглављу 4.2.1.1.

4.2.2.2 Симулациони резултати и анализа

Симулација је извршена у складу са корацима који су представљени у поглављу 4.2.2.1. Као мера квалитета реализоване симулације коришћене су MSE, PSNR и BER:

$$MSE = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - y_{ij})^2}{M \times N} \quad i = 1..M, \quad j = 1..N \quad (4.2.20)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{2^n - 1}{MSE} \quad (4.2.21)$$

$$BER = \frac{\sum_{ijl} [(x_{ij})_l]_2 \oplus [(y_{ij})_l]_2}{M \times N} \quad i = 1..M, j = 1..N, l = 1..n \quad (4.2.22)$$

где x_{ij} представља пиксел оригиналне слике, y_{ij} представља пиксел слике која је пренесена кроз канал (рестауриране), $M \times N$ - означава димензије слике, и ознаком \oplus је означен EXOR оператор који је примењен над свим n паровима битова x_{ij} и y_{ij} .

Слике представљене на слици 4.2.6. представљају део базе слика коришћених у симулацији [93, 94]. У циљу извршења симулације вредност параметра K је варирана и њеном теоретском опсегу $K=\{1,2,5,10,20,30\}$. За параметар T_h изабрана је најбоље избалансирана вредност $T_h=65$ оптимизована за алгоритам представљен у раду [89, 91, 92].



Слика 4.2.6. База слика (део).

Мере квалитета MSE и PSNR, њихове добијене вредности приказане су у табели 4.2.3. [94].

Табела 4.2.3. MSE и PSNR за слику пожара и детекцију пожара у слици пре и после преноса Рајсов FSO каналом

K	MSE	MSEr $\times 10^{-5}$	PSNR	PSNRr
1	50.85	58.8	31.07	80.44
2	28.74	32.5	33.55	83.01
5	3.31	3.47	42.93	92.73
10	0.727	0.14	59.52	106.88
20	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$
30	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$

На слици 4.2.7. приказане су реконструисане слике пренесене кроз Рајсов FSO турбулентни канал са примењеним вредностима параметра $K=1$ и $K=10$, дужином пропационог линка $L=1000$ m, пречником отвора апертуре $D=0.25$ m и индексом рефракције $C_n^2=2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$.



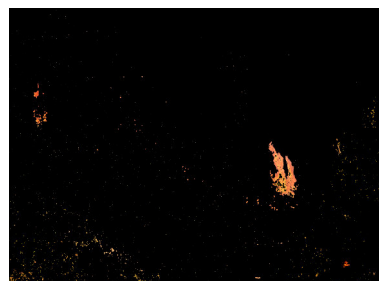
а)



б)



в)



г)

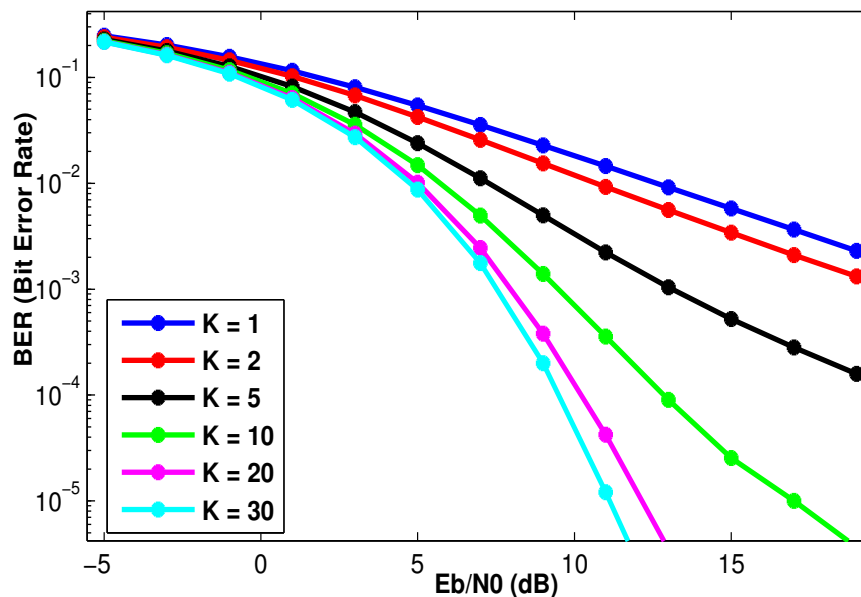


д)

ђ)

Слика 4.2.7. а) Слика пожара детектована на улазу у канал, б) Слика детектованог пожара у слици на месту детекције слике, в) слика пожара након преноса кроз канала (при $K=1$), г) слика детектованог пожара кроз канала након преноса (при $K=1$), д) слика након преноса кроз канал (при $K=10$) и ђ) слика детектованог пожара након преноса слике кроз канал (при $K=10$), дужином пропагације $L=1000$ m, пречником отвора апертуре $D=0.25$ m и индексом рефракције $C_n^2=2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$.

На слици 4.2.8. приказане су вредности за меру квалитета BER за слике пренесене кроз Рајсов FSO комуникациони канал при различитим вредностима параметра K , дужином пропагационог линка $L=1000$ m, пречником отвора бленде $D=0.25$ m и индексом рефракције $C_n^2=2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$.



Слика 4.2.8. BER за једну од слика пожара пренесених кроз Рајсов FSO комуникациони канал при различитим вредностима параметра K , дужином пропагације $L=1000$ m, пречником отвора апертуре $D=0.25$ m и индексом рефракције $C_n^2=2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$.

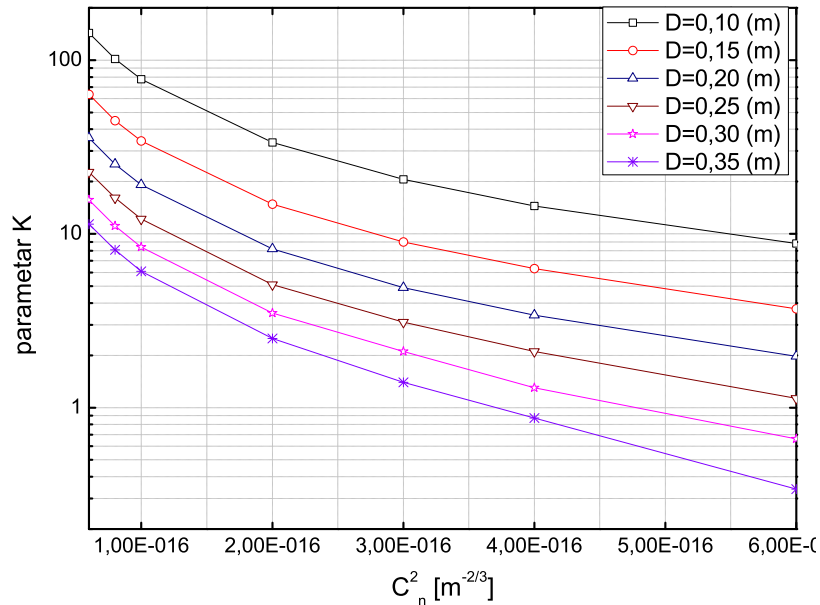
На слици 4.2.9. приказана је зависност параметра K у односу на индекс рефракције C_n^2 , при вредности параметра $G = 1$.

На слици 4.2.10. приказана је зависност параметра K у односу на дужину пропагационог линка L , при вредности параметра $G = 1$.

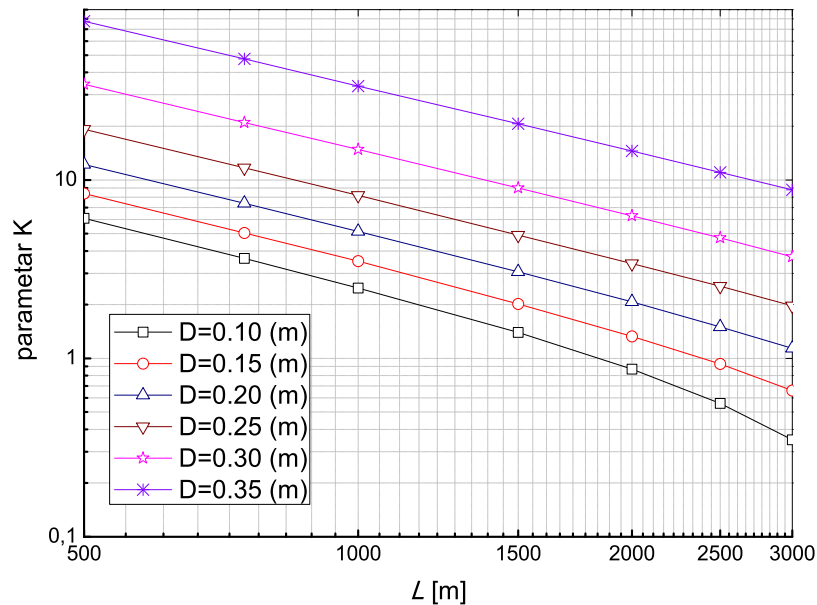
На слици 4.2.11. дат је приказ зависности индекса сцинтилације σ_i^2 у

односу на индекс рефракције C_n^2 , при вредности параметра $G = 1$.

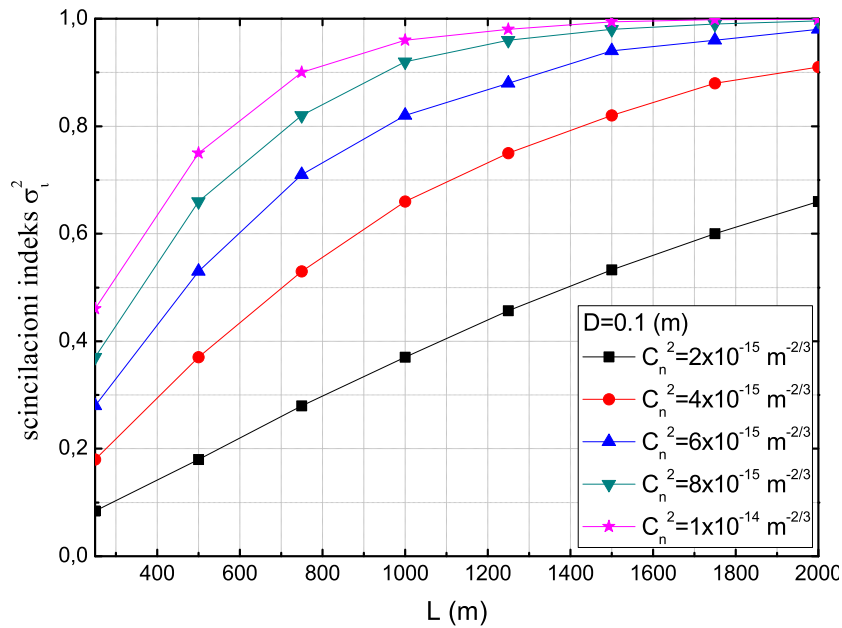
Слика 4.2.12. приказује зависност индекса сцинтилације σ_i^2 у односу на дијаметар аперетуре D и дужину пропационог линка L , при вредности параметра $G = 1$.



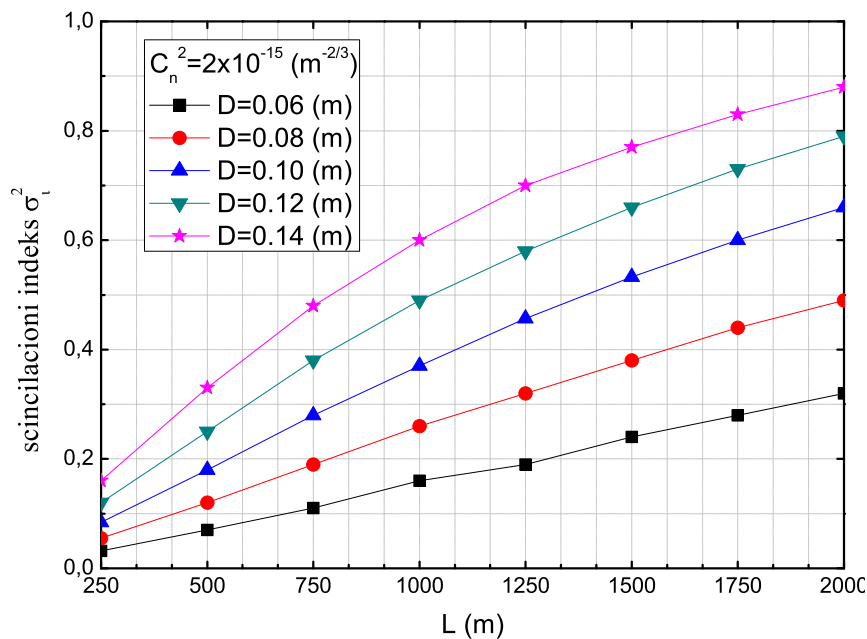
Слика 4.2.9. Зависност параметра K , у односу на индекс рефракције C_n^2 при константној дужини линка пропације $L = 1000$ m.



Слика 4.2.10. Зависност параметра K , у односу на дужину линка пропације L при константном индексу рефракције $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} m^{2/3}$.



Слика 4.2.11. Зависност индекса сцинтилације σ_i^2 , у односу на индекс рефракције C_n^2 и дужину линка пропагације L при константном дијаметру апертуре $D = 0.1$ (m).



Слика 4.2.12. Зависност индекса сцинтилације σ_i^2 , у односу на пречник дијаметра апертуре D и дужину линка пропагације L при константном рефракционом индексу $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$.

Анализирајући резултате добијене и приказане на дијаграмима 4.2.8-4.2.12 може се уочити да при вредностима параметра $K = 5$ пренос слике је задовољавајућег квалитета а при вредностима параметра $K \geq 10$ слика на пријемној страни је изузетног квалитета као вредности за $BER < 10^{-6}$. Са слике 4.2.9. може се закључити да при константној вредности дужине

пропагационог линка $L = 1000$ m, повећање рефракционог индекса утиче на смањење потребне вредности параметра K док повећање пречника отвора апертуре такође утиче на смањење потребне вредности параметра K . Дијаграм на слици 4.2.10. нам даје релацију између параметра K дужине пропагационог пута и пречника апертуре при константној вредности рефракционог индекса $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{2/3}$. Може се закључити да смањење пречника апертуре утиче на повећање потребне вредности параметра K док са друге стране повећање пропагационог пута такође утиче на смањење потребне вредности параметра K .

Детаљном анализом дијаграма приказаних на сликама 4.2.9., 4.2.10. и 4.2.12. може се закључити, са дијаграма на слици 4.2.9, такође да се изузетно добре вредности за BER добијају при вредности параметра $K > 10$ и при релативно ниским вредностима за SNR, које значајно опадају са повећањем вредности параметра K .

Дијаграм на слици 4.2.11. приказују однос индекса сцинтилације у зависности од дужине пропагационог пута и индекса рефракције, при константном пречнику апертуре $D = 0,1$ (m). Са дијаграма 4.2.11. може се закључити да сцинтилациони индекс расте са повећањем пропагационог пута а такође расте и са повећањем рефракционог индекса. Дијаграм на слици 4.2.12. приказује однос сцинтилационог индекса у зависности од дијаметра апертуре D и дужине пропагационог пута L при константном рефракционом индексу $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ (m}^{-2/3})$. Може се закључити да са повећањем пропагационог пута расте индекс сцинтилације, а такође индекс сцинтилације расте и са повећањем пречника дијаметра апертуре.

Анализирајући приказани модел долазимо до закључка да сцинтилациони индекс има вредност $\sigma_I^2 = 0.28$ при дијаметру апертуре $D = 0,1$ (m) и при дужини пропагационог пута $L = 750$ (m) што су вредности које се добијају при вредности параметра $K = 10$ за које се на пријемној страни добија слика задовољавајућег квалитета.

Дужине пропагационог пута које се у практичној реализацији FSO комуникационих система користе у "last mile" конекцији су реда величина анализираних и приказаних на дијаграмима.

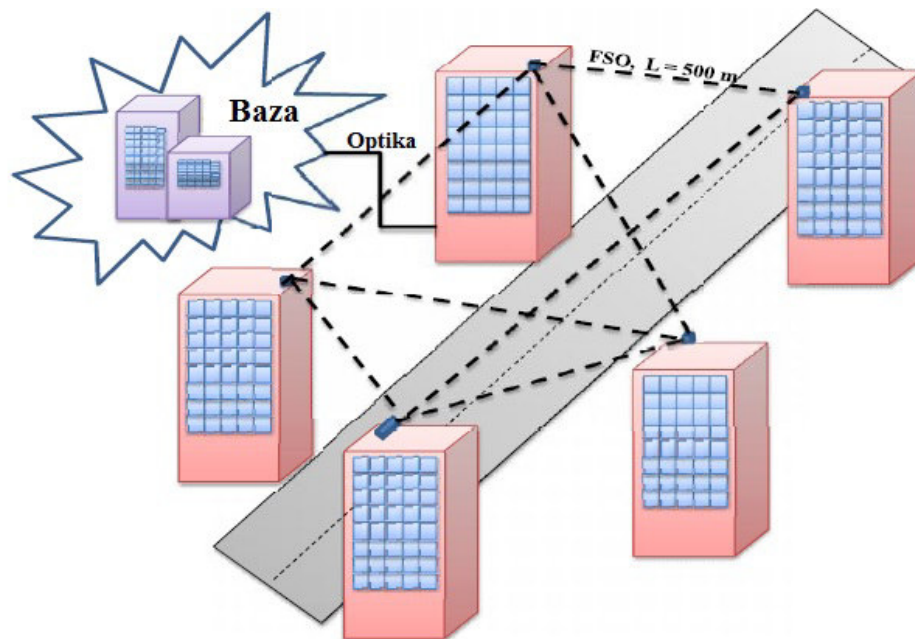
Може се закључити да се на перформансе FSO комуникационих система може значајно утицати променом дијаметра апертуре, променом дужине пропагационог линка при различитим атмосферским приликама исказаним кроз сцинтилациони индекс и индекс рефракције.

5. Примена FSO комуникационих система у "last mile" конекцији

Првобитна примена FSO комуникационих система остваривана је за пренос оптичког сигнала кроз земљину атмосферу, где је успешно реализована за релативно кратке пропационе дужине до 4 km [97]. Због својих предности које се огледају у могућности реализације на тешко приступачним локацијама, могућности коришћења без потребне лиценце, јефтине имплементације и реализације. Нарочито се предност FSO комуникационих система у односу на оптичка влакна огледа у томе да су знатно јефтинија, а такође често су и једино могуће практично решење за реализацију јер у градским срединама где је инфраструктура већ изграђена често не постоји никаква могућност реализације због немогућности копања [98-101] услед постојеће инфраструктуре. Предност у односу на друге системе за реализацију у руралним срединама је јефтина реализација, а у односу на радио фреквенте системе FSO системи су повољнији јер не користе лиценцирани спектар и могу да постигну знатно брже преносне брзине [97, 102]. Битно је поред предности навести и недостатке и проблеме који се јављају у реализацији FSO система а који су најчешће последица атмосферског слабљења и турбуленција индукованих сцинтилацијом [65, 97, 99, 102, 103] и који озбиљно ремете њихово функционисање.

FSO комуникациони системи се поред могућности за широку примену могу користити као наставак оптичке комуникационе мреже и то предстаља једно од најреалнијих решења у савременом добу за проблеме у "last mile" конекцији из разлога што оптички комуникациони системи и FSO комуникациони системи користе сличну технологију и врло блиске таласне дужине [65, 104, 105, 106]. Ово представља велику предност због које се интеграције ова два система може искористити да се добије веома поуздана мрежа која је економична, ефикасна и што је најбитније поуздана. Примена FSO комуникационих система у "last mile" конекцији експериментално је истраживана [105, 107, 108] у циљу проверавања перформанси оваквих

комуникационих система између две или више високих зграда на међусобној удаљености од 210 (m) [105].



Слика 5.1. Упростијени блок дијаграм "last mile" конекције у урбаној средини, између зграда.

Ови системи се могу користити и у реализацији хибридниh RF - FSO система. Због ограничења која се јављају у примени RF система, комбинација RF - FSO система представља могуће решење, чијом би се комбинацијом превазишли недостаци оба система [109, 110]. Комбинација ових система може дати изузетно добре резултате при реализацији где су временске прилике лоше, где имамо честе ситуације да атмосферске прилике магла, кише и дима (ефекат сцинтилације) знатно ометају FSO комуникацију [111]. RF комуникациони системи су осетљиви на кишу а са друге стране FSO системи су осетљивији на маглу и дим, због мале вероватноће да се све ове атмосферске турбуленције јаве истовремено комбинацијом истих где би један био резерва другом превазишла би се ограничења [112, 113, 114].

Такође једна од могућих примена је у целуларним комуникацијама код савремених 4G мрежа. FSO системи представљају алтернативу овом виду комуникације због могућности достизања великих брзина на релативно великим удаљеностима [115, 116, 117].

Значајну примену FSO системи, због своје једноставности инсталације и мале снаге потребне за реализацију могу наћи при појави природних катастрофа и катастрофа изазваних људском непажњом [118, 119]. Конкретно моге се користити код појаве великих шумских пожара који су све чешћа појава у скорије време као и код великих поплава где је такође потребно у кратком временском року инсталирати ефикасан комуникациони систем.

Могу се користити у хаварисјким ситуацијама када дође до физичког прекида оптичког линка а потребно је ефикасно премостити недостатак [120, 121].

FSO комуникациони системи се успешно и највише користе у војсци за комуникације између сателита, због немогућности прислушкивања користе се за обавештајну сврху, такође за комуникацију између земље и сателита, за надзор и извиђање [105, 122, 123].

6. Прилози

У циљу ефикасног симулационог тестирања и анализе FSO комуникационог канала развијени су алгоритми за тестирање.

6.1 Прилог 1

Код извршења алгоритма преноса слике у боји кроз Рајсов FSO комуникациони канал у циљу детекције пожара у слици (пренесеној кроз канал) реализован у раду [85, 94], приказан је испод.

```
function glavni

clc

    X=double(imread('sumskipozar1.jpg'));
    % X=double(imread('sumskipozar2-slican.jpg'));
    % X=double(imread('sumskipozar3.jpg'));
    % X=double(imread('sumskipozar4.jpg'));
    % X=double(imread('vatra2.jpg'));

    figure(1)
    imshow(uint8(X));
    [M,N,J]=size(X);
    [Mx,Nx]=size(X);
    % pause
    R=X(:,:,1);
    G=X(:,:,2);
    B=X(:,:,3);

    % ***** ovde se vrši detekcija požara pre prolaska kroz rajс
    kanal*****
    [Ymean,Cbmean,Crmean,Y,Cb,Cr]=srednje_vrednosti(R,G,B);

    [R1]=uporedi1(R,G,B);
    [R2]=uporedi2(R,G,B);
    [R3]=uporedi3(Y,Cb);
    [R4]=uporedi4(Cr,Cb);
    [R5]=uporedi5(Y,Ymean,Cb,Cbmean,Cr,Crmean);
    [R6,R6m]=uporedi6(Y,Cb,Cr,R,G,B);
    [R7]=uporedi7(Cb,Cr);

    [R22]=odluci(R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7);
    [R23]=odluci(R1,R2,R3,R4,R5,R6m,R7);

    disp('slike detektovanog požara');
    figure(103);
    imshow(R23);
    disp('slika 300 detektovani požar')
```

```
[Y3]=miks(X,R6m);
figure(300);
imshow(uint8(Y3));

[dr]=zigzag(R);
[dg]=zigzag(G);
[db]=zigzag(B);

[M201,N201]=size(dr);
[M202,N202]=size(dg);
[M202,N202]=size(db);
b=1;
for i=1:N201
    d1(b)=dr(i);
    d1(b+N201)=dg(i);
    d1(b+2*N201)=db(i);
    b=b+1;
end
[Mf,Nf]=size(d1);
d1=d1';
[M22,N22]=size(d1);
d1=d1';
u=1;
brojanje=0;
k=8;
n=0;
h=0;
prolaz=0;

for j=1:M22
    prolaz=prolaz+1;
    d3=de2bi_5(d1(j),8);
    [A,A1]=size(d3);
    d2((h*(k)+1):(k*j)) =d3;
    h=h+1;
    n=1;
end

[Md21,Nd21]=size(d2);
[M3,N3]=size(d2);
d=d2;
[M4,N4]=size(d);
EbN0dB=-5:2:20; %Eb/N0 u dB
totPower=1;
K=[1 2 5 10 20 30];
[R,T]=size(d);
k=1;
for i=1:T;
    x(k)=2*d(i)-1;
    k=k+1;
end
[R1,T1]=size(x);
simBER_ricean=zeros(1,length(EbN0dB));
plotStyle={'b*-','r*-','k*-','g*-','m*-','c*-'};
for index =1:length(K)
    k=K(index);
    s=sqrt(k/(k+1)*totPower);
    sigma=totPower/sqrt(2*(k+1));
    for i=1:length(EbN0dB)
```



```
noise=1/sqrt(2)*(randn(1,T)+1i*randn(1,T));
h=((sigma*randn(1,T)+s)+1i*(randn(1,T)*sigma+0));
n = noise*10^(-EbN0dB(i)/20);
y_ricean=h.*x+n;
y_ricean_cap=y_ricean./h;
[r_ricean]=proveri_fazni_stav(y_ricean_cap,T,R);
simBER_ricean(i)=sum(xor(d,r_ricean));
end
simBER_ricean=simBER_ricean/T;
k=1;
f=0;
g=0;
r_ricean;
[M31,N31]=size(r_ricean);
disp('r_ricean')
D8(1:M3,1:N3)=0;
br_bita=8;
[R8] =bin_u_dec_5(r_ricean,br_bita);
[Mr8,Nr8]=size(R8);
s=1;
for u=1:M*N
    Rr(u)=R8(s);
    Rg(u)=R8(s+M*N);
    Rb(u)=R8(s+2*M*N);
    s=s+1;
end
[Mrr,Nrr]=size(Rr);
[Mrg,Nrg]=size(Rg);
[Mrb,Nrb]=size(Rb);
R1=invzigzag(Rr,M,N);
G1=invzigzag(Rg,M,N);
B1=invzigzag(Rb,M,N);
A1=cat(3,R1,G1,B1);
disp('rekonstruisana slika posle ricean kanala')
figure(30001);
imshow(uint8(A1));
%detektovanje požara nakon prenosa slike
[Ymean,Cbmean,Crmean,Y,Cb,Cr]=srednje_vrednosti(R1,G1,B1);
[R101]=uporedi1(R1,G1,B1);
[R201]=uporedi2(R1,G1,B1);
[R301]=uporedi3(Y,Cb);
[R401]=uporedi4(Cr,Cb);
[R501]=uporedi5(Y,Ymean,Cb,Cbmean,Cr,Crmean);
[R601,R601m]=uporedi6(Y,Cb,Cr,R1,G1,B1);
[R701]=uporedi7(Cb,Cr);
[R202]=odluci(R101,R201,R301,R401,R501,R601,R701);
[R203]=odluci(R101,R201,R301,R401,R501,R601m,R701);
disp('slike detektovanog požara')
figure(1003);
imshow(R203);
[Y31]=miks(X,R601m);
figure(3001);
imshow(uint8(Y31));
%***** do ovde*****
% ovde se računaju mere performansi
[MSE,PSNR]=MSE_PSNR(X,A1);
[MSEc,PSNRc]=MSE_PSNR_COLOR(X,A1);
[MSEr,PSNRr]=MSE_PSNR(R23,R203);
MSEr;
PSNRr;
MSE;
```

```
MSEc;
PSNR;
PSNRc;

%рачунање симулираног BER;
figure(22);
EbN0=10.^(EbN0dB/10);
semilogy(EbN0dB, simBER_ricean, plotStyle(index), 'LineWidth', 2); hold on
legendInfo{index} = ['K = ' num2str(K(index))];
end

axis([-5 20 10^-5 10^0]);
legend(legendInfo);
title('Eb/N0 vs BER za BPSK kroz Rician sa dodatim AWGN');
xlabel('Eb/N0 (dB)');
ylabel('BER (Bit Error Rate)');
end

function [r_ricean]=proveri_fazni_stav(y_ricean_cap, T, R)
r_ricean(1:T)=0;
k=0;
for i=1:R
for j=1:T
if real(y_ricean_cap(j))>=0 & imag(y_ricean_cap(j))>=0
r_ricean(j)=1;
k=k+1;
elseif real(y_ricean_cap(j))<=0 & imag(y_ricean_cap(j))>=0
r_ricean(j)=0;
k=k+1;
elseif real(y_ricean_cap(j))<=0 & imag(y_ricean_cap(j))<=0
r_ricean(j)=0;
k=k+1;
elseif real(y_ricean_cap(j))>=0 & imag(y_ricean_cap(j))<=0
r_ricean(j)=1;
k=k+1;
end
end
end
end

function [B1,B2,B3,B4]=ispisi_blokove21(Zz,X)
k=1;
[M,N]=size(X);
for i=1:(M)/2
for j=1:(N)/2
B1(i,j)=Zz(k);
B2(i,j)=Zz(k+(M)*(M)/4);
B3(i,j)=Zz(k+(2*(M)*(M)/4));
B4(i,j)=Zz(k+(3*(M)*(M)/4));
k=k+1;
end
end
end

function [Zz1]=ispisi_red21(B1,B2,B3,B4,Y)
k=1;
[M,N]=size(B1);
for i=1:M
for j=1:N
```

```
Zz1(k)=B1(i,j);
Zz1(k+4*M*M/4)=B2(i,j);
Zz1(k+2*4*M*M/4)=B3(i,j);
Zz1(k+3*4*M*M/4)=B4(i,j);
k=k+1;
    end
end
end

function out=zigzag(in)
    [br_red br_kol]=size(in);
    out=zeros(1,br_red*br_kol);
    tren_red=1; tren_kol=1; tren_index=1;
while tren_red<=br_red & tren_kol<=br_kol
if tren_red==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_kol~=br_kol
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_kol=tren_kol+1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red==br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_kol~=br_kol
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_kol=tren_kol+1;
elseif tren_kol==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_red~=br_red
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red+1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol==br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_red~=br_red
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red+1;
elseif tren_kol~=1 & tren_red~=br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red+1;    tren_kol=tren_kol-1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red~=1 & tren_kol~=br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red-1;    tren_kol=tren_kol+1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red==br_red & tren_kol==br_kol
    out(end)=in(end);
    break
end
end
end

function out=invzigzag(in,br_red,br_kol)
ukup_elem=length(in);
if nargin>3
    error('previše ulaznih podataka');
elseif nargin<3
    error('premalo ulaznih podataka');
end

if ukup_elem~=br_red*br_kol
    error('Dimezije matrica se ne podudaraju');
end
out=zeros(br_red,br_kol);
tren_red=1; tren_kol=1; tren_index=1;

while tren_index<=ukup_elem
if tren_red==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_kol~=br_kol
    out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
```

```
tren_kol=tren_kol+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red==br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_kol~=br_kol
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_kol=tren_kol+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_red~=br_red
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol==br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_red~=br_red
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol~=1 & tren_red~=br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red+1;      tren_kol=tren_kol-1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red~=1 & tren_kol~=br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red-1;      tren_kol=tren_kol+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_index==ukup_elem
out(end)=in(end);
break
end
end
end
```

```
function [XX]=zaokruzi(X_1)
xmin=min(min(X_1));
xmax=max(max(X_1));
D=(xmax-xmin)/255;
for i=1:256
    T(i)=xmin+(i-1)*D;
end
[M,N]=size(X_1);
for i=1:M
    for j=1:N
        x=X_1(i,j);
        a=abs(T-x);
        [mm,poz]=min(a);
        XX(i,j)=poz-1;
    end
end
end
```

```
function [XX]=zaokruzi(X_1)
xmin=min(min(X_1));
xmax=max(max(X_1));
D=(xmax-xmin)/255;
for i=1:256
    T(i)=xmin+(i-1)*D;
end
[M,N]=size(X_1);
for i=1:M
    for j=1:N
        x=X_1(i,j);
        a=abs(T-x);
```

```
[mm,poz]=min(a);
XX(i,j)=poz-1;
end
end
end

function [MSE,PSNR]=MSE_PSNR_COLOR(A,B)
A=double(A);
B=double(B);
[M,N,L]=size(A);
MSE=0;
for i=1:M
for j=1:N
for k=1:L
MSE=MSE+(A(i,j,k)-B(i,j,k))^2;
end
end
end
MSE=MSE/(M*N*L);
PSNR=10*log10(255^2/MSE);
end

function [MSE,PSNR]=MSE_PSNR(A,B)
A=double(A);
B=double(B);
[M,N]=size(A);
MSE=0;
for i=1:M
for j=1:N
MSE=MSE+(A(i,j)-B(i,j))^2;
end
end
MSE=MSE/(M*N);
PSNR=10*log10(255^2/MSE);
end

function [R1]=uporedi1(R,G,B)
[MR,NR]=size(R);
R1(1:MR,1:NR)=0;
for i=1:MR
for j=1:NR
if (R(i,j)>G(i,j)) & (G(i,j)>B(i,j))
R1(i,j)=1;
else
end
end
end
end

function [R2]=uporedi2(R,G,B)
[MR,NR]=size(R);
R2(1:MR,1:NR)=0;
for i=1:MR
for j=1:NR
if ( R(i,j)>150 & R(i,j)<250 & G(i,j)>70 & G(i,j)<190 & ...
B(i,j)>10 & B(i,j)<150)
R2(i,j)=1;
else
end
end
end
```

```
        end
    end
end
end

function [X] =prvi_log_I(A,B)
[M,N]=size(A);
X(1:M,1:N)=0;
for i=1:M
for j=1:N
if A(i,j)==1 & B(i,j)==1
X(i,j)=1;
end
end
end
end

function [Ymean,Cbmean,Crmean,Y,Cb,Cr]=srednje_vrednosti(R,G,B)
[MR,NR]=size(R);
Y(1:MR,1:NR)=0;
Cb(1:MR,1:NR)=0;
Cr(1:MR,1:NR)=0;
for i=1:MR
for j=1:NR
Y(i,j)=16+(0.2568*R(i,j)+0.5041*G(i,j)+0.0979*B(i,j));
Cb(i,j)=128+(-0.1482*R(i,j)-0.2910*G(i,j)+0.4392*B(i,j));
Cr(i,j)=128+(0.4392*R(i,j)-0.3678*G(i,j)-0.0714*B(i,j));
end
end
[My,Ny]=size(Y);
[Mb,Nb]=size(Cb);
[Mr,Nr]=size(Cr);

Ymean=sum(sum(Y))/(My*Ny);
Cbmean=sum(sum(Cb))/(My*Ny);
Crmean=sum(sum(Cr))/(My*Ny);
end

function [R3]=uporedi3(Y,Cb)
[MY,NY]=size(Y);
R3(1:MY,1:NY)=0;
for i=1:MY
for j=1:NY
if Y(i,j)>=Cb(i,j)
R3(i,j)=1;
else
end
end
end
end

function [R4]=uporedi4(Cr,Cb)
[MC,NC]=size(Cr);
R4(1:MC,1:NC)=0;
for i=1:MC
for j=1:NC
if Cr(i,j)>=Cb(i,j)
R4(i,j)=1;
else
end
end
end
end
```

```
end
end
end
end

function [R5]=uporedi5(Y,Ymean,Cb,Cbmean,Cr,Crmean)
[MY,NY]=size(Y);
R5(1:MY,1:NY)=0;
for i=1:MY
for j=1:NY
if Y(i,j)>=Ymean & Cb(i,j)<=Cbmean & Cr(i,j)>=Crmean
R5(i,j)=1;
else
end
end
end
end

function [R6,R6m]=uporedi6(Y,Cb,Cr,R,G,B)
Th=65;
[M,N]=size(Cb);
R6(1:M,1:N)=0;
for i=1:M
for j=1:N
if abs(Cb(i,j)-Cr(i,j))>=Th
R6(i,j)=1;
else
end
end
end

for i=1:M
for j=1:N
if (R(i,j)<1.30*G(i,j) |
Cr(i,j)>210 | Cb(i,j)>125) % | G(i,j)<1.2*B(i,j) % abs(Y(i,j)-Cb(i,j))<Th
R6m(i,j)=0;
else
end
end
end
end
figure(16);
imshow(R6);
disp('slikavatra6');

end

function [R7]=uporedi7(Cb,Cr)
[M,N]=size(Cb);
R7(1:M,1:N)=0;
for i=1:M
for j=1:N
if (Cb(i,j)>60 & Cb(i,j)<100 & Cr(i,j)>150 & Cr(i,j)<200)
R7(i,j)=1;
else
end
end
end
end

function [Y]=drugi_log_I(A,B,C,D,E)
[M,N]=size(A);
```

```
Y(1:M,1:N)=0;
for i=1:M
    for j=1:N
        if A(i,j)==1 & B(i,j)==1 & C(i,j)==1 & D(i,j)==1 &
E(i,j)==1
            Y(i,j)=1;
        end
    end
end

function [R]=odluci(R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7)
[M,N]=size(R1);
[M6,N6]=size(R6);
R(1:M,1:N)=0;
for i=1:M
    for j=1:N
        if R1(i,j)==1 & R2(i,j)==1
            if R3(i,j)==1 & R4(i,j)==1 & R5(i,j)==1 & R6(i,j)==1 &
R7(i,j)==1
                R(i,j)=1;
            end
        else
            end
        end
    end
end

function [Y]=miks(X,R)
Y=X;
[M,N]=size(X);
[MR,NR]=size(R);
for i=1:MR
    for j=1:NR
        if R(i,j)==0
            Y(i,j)=0;
            Y(i,j+NR)=0;
            Y(i,j+2*NR)=0;
        end
    end
end

function [Test]=napravi_test_sliku(A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2,A3,B3,C3,D3)
Rp1=A1(:,:,1);
Gp1=A1(:,:,2);
Bp1=A1(:,:,3);

Rp2=B1(:,:,1);
Gp2=B1(:,:,2);
Bp2=B1(:,:,3);

Rp3=C1(:,:,1);
Gp3=C1(:,:,2);
Bp3=C1(:,:,3);

Rp4=D1(:,:,1);
Gp4=D1(:,:,2);
Bp4=D1(:,:,3);
```



```
Rd1=A2 (:, :, 1);  
Gd1=A2 (:, :, 2);  
Bd1=A2 (:, :, 3);
```

```
Rd2=B2 (:, :, 1);  
Gd2=B2 (:, :, 2);  
Bd2=B2 (:, :, 3);
```

```
Rd3=C2 (:, :, 1);  
Gd3=C2 (:, :, 2);  
Bd3=C2 (:, :, 3);
```

```
Rd4=D2 (:, :, 1);  
Gd4=D2 (:, :, 2);  
Bd4=D2 (:, :, 3);
```

```
Rdr1=A3 (:, :, 1);  
Gdr1=A3 (:, :, 2);  
Bdr1=A3 (:, :, 3);
```

```
Rdr2=B3 (:, :, 1);  
Gdr2=B3 (:, :, 2);  
Bdr2=B3 (:, :, 3);
```

```
Rdr3=C3 (:, :, 1);  
Gdr3=C3 (:, :, 2);  
Bdr3=C3 (:, :, 3);
```

```
Rdr4=D3 (:, :, 1);  
Gdr4=D3 (:, :, 2);  
Bdr4=D3 (:, :, 3);
```

```
B_max=max(max(B))
```

```
M=512;
```

```
N=512;
```

```
Test(1:M, 1:N)=0;
```

```
Test(14:84, 14:84, 1)=Rp1(1, 1);
```

```
Test(14:84, 14:84, 2)=Gp1(1, 1);
```

```
Test(14:84, 14:84, 3)=Bp1(1, 1);
```

```
Test(14:84, 97:167, 1)=Rp1(3, 4);
```

```
Test(14:84, 97:167, 2)=Gp1(3, 4);
```

```
Test(14:84, 97:167, 3)=Bp1(3, 4);
```

```
Test(14:84, 180:250, 1)=Rp1(7, 7);
```

```
Test(14:84, 180:250, 2)=Gp1(7, 7);
```

```
Test(14:84, 180:250, 3)=Bp1(7, 7);
```

```
Test(14:84, 263:333, 1)=Rp2(2, 2);
```

```
Test(14:84, 263:333, 2)=Gp2(2, 2);
```

```
Test(14:84, 263:333, 3)=Bp2(2, 2);
```

```
Test(14:84, 346:416, 1)=Rp2(5, 5);
```

```
Test(14:84, 346:416, 2)=Gp2(5, 5);
```

```
Test(14:84, 346:416, 3)=Bp2(5, 5);
```

```
Test(14:84, 429:499, 1)=Rp2(7, 8);
```

Перформансе преноса слике FSO каналом у "last mile" конекцији у присуству сцинтилације

Test (14:84, 429:499, 2) =Gp2 (7, 8) ;
Test (14:84, 429:499, 3) =Bp2 (7, 8) ;

Test (97:167, 14:84, 1) =Rp3 (1, 1) ;
Test (97:167, 14:84, 2) =Gp3 (1, 1) ;
Test (97:167, 14:84, 3) =Bp3 (1, 1) ;

Test (97:167, 97:167, 1) =Rp3 (4, 4) ;
Test (97:167, 97:167, 2) =Gp3 (4, 4) ;
Test (97:167, 97:167, 3) =Bp3 (4, 4) ;

Test (97:167, 180:250, 1) =Rp3 (8, 8) ;
Test (97:167, 180:250, 2) =Gp3 (8, 8) ;
Test (97:167, 180:250, 3) =Bp3 (8, 8) ;

Test (97:167, 263:333, 1) =Rp4 (1, 1) ;
Test (97:167, 263:333, 2) =Gp4 (1, 1) ;
Test (97:167, 263:333, 3) =Bp4 (1, 1) ;

Test (97:167, 346:416, 1) =Rp4 (8, 1) ;
Test (97:167, 346:416, 2) =Gp4 (8, 1) ;
Test (97:167, 346:416, 3) =Bp4 (8, 1) ;

Test (97:167, 429:499, 1) =Rp4 (8, 6) ;
Test (97:167, 429:499, 2) =Gp4 (8, 6) ;
Test (97:167, 429:499, 3) =Bp4 (8, 6) ;

Test (180:250, 14:84, 1) =Rd1 (1, 1) ;
Test (180:250, 14:84, 2) =Gd1 (1, 1) ;
Test (180:250, 14:84, 3) =Bd1 (1, 1) ;

Test (180:250, 97:167, 1) =Rd1 (3, 8) ;
Test (180:250, 97:167, 2) =Gd1 (3, 8) ;
Test (180:250, 97:167, 3) =Bd1 (3, 8) ;

Test (180:250, 180:250, 1) =Rd1 (8, 8) ;
Test (180:250, 180:250, 2) =Gd1 (8, 8) ;
Test (180:250, 180:250, 3) =Bd1 (8, 8) ;

Test (180:250, 263:333, 1) =Rd2 (1, 1) ;
Test (180:250, 263:333, 2) =Gd2 (1, 1) ;
Test (180:250, 263:333, 3) =Bd2 (1, 1) ;

Test (180:250, 346:416, 1) =Rd2 (4, 4) ;
Test (180:250, 346:416, 2) =Gd2 (4, 4) ;
Test (180:250, 346:416, 3) =Bd2 (4, 4) ;

Test (180:250, 429:499, 1) =Rd2 (8, 8) ;
Test (180:250, 429:499, 2) =Gd2 (8, 8) ;
Test (180:250, 429:499, 3) =Bd2 (8, 8) ;

Test (263:333, 14:84, 1) =Rd3 (1, 1) ;
Test (263:333, 14:84, 2) =Gd3 (1, 1) ;
Test (263:333, 14:84, 3) =Bd3 (1, 1) ;

Test (263:333, 97:167, 1) =Rd3 (4, 4) ;
Test (263:333, 97:167, 2) =Gd3 (4, 4) ;
Test (263:333, 97:167, 3) =Bd3 (4, 4) ;

Test (263:333,180:250,1)=Rd3 (8,8) ;
Test (263:333,180:250,2)=Gd3 (8,8) ;
Test (263:333,180:250,3)=Bd3 (8,8) ;

Test (263:333,263:333,1)=Rd4 (1,1) ;
Test (263:333,263:333,2)=Gd4 (1,1) ;
Test (263:333,263:333,3)=Bd4 (1,1) ;

Test (263:333,346:416,1)=Rd4 (4,4) ;
Test (263:333,346:416,2)=Gd4 (4,4) ;
Test (263:333,346:416,3)=Bd4 (4,4) ;

Test (263:333,429:499,1)=Rd4 (8,8) ;
Test (263:333,429:499,2)=Gd4 (8,8) ;
Test (263:333,429:499,3)=Bd4 (8,8) ;

Test (346:416,14:84,1)=Rdr1 (1,1) ;
Test (346:416,14:84,2)=Gdr1 (1,1) ;
Test (346:416,14:84,3)=Bdr1 (1,1) ;

Test (346:416,97:167,1)=Rdr1 (4,6) ;
Test (346:416,97:167,2)=Gdr1 (4,6) ;
Test (346:416,97:167,3)=Bdr1 (4,6) ;

Test (346:416,180:250,1)=Rdr1 (8,3) ;
Test (346:416,180:250,2)=Gdr1 (8,3) ;
Test (346:416,180:250,3)=Bdr1 (8,3) ;

Test (346:416,263:333,1)=Rdr2 (1,1) ;
Test (346:416,263:333,2)=Gdr2 (1,1) ;
Test (346:416,263:333,3)=Bdr2 (1,1) ;

Test (346:416,346:416,1)=Rdr2 (8,1) ;
Test (346:416,346:416,2)=Gdr2 (8,1) ;
Test (346:416,346:416,3)=Bdr2 (8,1) ;

Test (346:416,429:499,1)=Rdr2 (8,8) ;
Test (346:416,429:499,2)=Gdr2 (8,8) ;
Test (346:416,429:499,3)=Bdr2 (8,8) ;

Test (429:499,14:84,1)=Rdr3 (1,1) ;
Test (429:499,14:84,2)=Gdr3 (1,1) ;
Test (429:499,14:84,3)=Bdr3 (1,1) ;

Test (429:499,97:167,1)=Rdr3 (4,8) ;
Test (429:499,97:167,2)=Gdr3 (4,8) ;
Test (429:499,97:167,3)=Bdr3 (4,8) ;

Test (429:499,180:250,1)=Rdr3 (8,1) ;
Test (429:499,180:250,2)=Gdr3 (8,1) ;
Test (429:499,180:250,3)=Bdr3 (8,1) ;

Test (429:499,263:333,1)=Rdr4 (1,1) ;
Test (429:499,263:333,2)=Gdr4 (1,1) ;
Test (429:499,263:333,3)=Bdr4 (1,1) ;

Test (429:499,346:416,1)=Rdr4 (4,4) ;

```
Test (429:499, 346:416, 2)=Gdr4 (4, 4);  
Test (429:499, 346:416, 3)=Bdr4 (4, 4);  
  
Test (429:499, 429:499, 1)=Rdr4 (8, 8);  
Test (429:499, 429:499, 2)=Gdr4 (8, 8);  
Test (429:499, 429:499, 3)=Bdr4 (8, 8);
```

end

6.2 Прилог 2

Код извршења алгоритма преноса слике са инсертованим жигом (двоструким), реализованом у раду [80, 85], кроз Рајсов FSO комуникациони канал у циљу провере перформанси (пренесеној кроз овај канал) приказан је испод:

```
function glavni  
  
clc;clear all;  
X0=double(imread('LENA.JPG'));  
%X0=double(imread('girl.jpg'));  
%X0=double(imread('baboon.jpg'))  
%X0=double(imread('peppers.bmp'))  
figure(101)  
imshow(uint8(X0));  
pause  
[M1,N1]=size(X0);  
% koeficijenti insertovanja ziga  
  alfa1=0.25  
  alfa2=0.1  
  alfa3=alfa2  
  
Ws=double(imread('WS_zvezda.bmp'));  
[Ms,Ns,Ls]=size(Ws)  
  figure(2);  
  imshow(Ws);  
  pause  
Wp=double(imread('WP_leptir.bmp'));  
  figure(3);  
  imshow(Wp)  
  pause  
  
[Mp,Np,Lp]=size(Wp);  
[Wps,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1s,Vw1s,Sw1]=utisni_SVD_u_DWT(Wp,Ws,alfa3);  
[Mps,Nps,Lps]=size(Wps);  
[X1,S1,S2,S3,S4,Uwp,Vwp]=insertuj_zig_DWT(X0,Wps,alfa1,alfa2);  
% ***** ekstrakcija ziga***PRE KANALA*****
```

Перформансе преноса слике FSO каналом у "last mile" конекцији у присуству сцинтилације

```
[Wde1171,Wde2272,Wde3373,Wde4474,]=extratuj_zig_DWT(X1,...
    X1,S1,S2,S3,S4,Uwp,Vwp,alfa1,alfa2,Wps);

[Wse11,Wse12,Wse13,Wse14]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde1171,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1
s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[Wse21,Wse22,Wse23,Wse24]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde2272,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1
s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[Wse31,Wse32,Wse33,Wse34]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde3373,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1
s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[Wse41,Wse42,Wse43,Wse44]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde4474,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1
s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[d1]=zigzag(X1);
    [M21,N21]=size(d1);
    d1=d1';
    [M22,N22]=size(d1);
    d1=d1';
    u=1;
    brojanje=0;
    k=24;
    n=0;
    h=0;
    prolaz=0;
    for j=1:M22
        prolaz=prolaz+1;
        n;
        j;
        k;
        h;
        d1(j);
d3=de2bi_3(d1(j),M22,N22);
    d2((h*(k)+1):(k*j)) =d3;
    h=h+1;
    n=1;
end
d2;
    [Md21,Nd21]=size(d2)
disp('ovo je sada d2')
    [M3,N3]=size(d2);
    d=d2;
    [M4,N4]=size(d);
EbN0dB=-5:2:20;
totPower=1;
K=[1 2 3 5 8 10];
    [R,T]=size(d);
for i=1:T;
x(k)=2*d(i)-1;
k=k+1;
end
x;
[R1,T1]=size(x);

simBER_ricean=zeros(1,length(EbN0dB));
plotStyle={'b*-','r*-','k*-','g*-','m*-','c*-'};
for index =1:length(K)
k=K(index);
s=sqrt(k/(k+1)*totPower);
sigma=totPower/sqrt(2*(k+1));
for i=1:length(EbN0dB)
```

Перформансе преноса слике FSO каналом у "last mile" конекцији у присуству сцинтилације

```
        noise=1/sqrt(2)*(randn(1,T)+1i*randn(1,T));
        h=((sigma*randn(1,T)+s)+1i*(randn(1,T)*sigma+0));
n = noise*10^(-EbN0dB(i)/20);
y_ricean=h.*x+n;
y_ricean_cap=y_ricean./h;
[r_ricean]=proveri_fazni_stav(y_ricean_cap,T,R);
simBER_ricean(i)=sum(xor(d,r_ricean));
end
    simBER_ricean=simBER_ricean/T;
    f=0;
g=0;
r_ricean;
disp('r_ricean')
M3;
N3;
%pause
D8(1:M3,1:N3)=0;
[R8]=bin_u_dec_4(r_ricean,8,16);

D8=R8;
[MD,ND]=size(D8);
D28=D8;
A1=invzigzag(D28,M1,N1);
figure(301)
    imshow(uint8(A))

[Wde1811,Wde2822,Wde3833,Wde4844,]=extratuj_zig_DWT(A1,...
    X1,S1,S2,S3,S4,Uwp,Vwp,alfa1,alfa2,Wps);

[Wse181,Wse182,Wse183,Wse184]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde1811,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ
,Uw1s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[Wse281,Wse282,Wse283,Wse284]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde2822,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ
,Uw1s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[Wse381,Wse382,Wse383,Wse384]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde3833,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ
,Uw1s,Vw1s,Sw1,alfa3);
[Wse481,Wse482,Wse483,Wse484]=extrakuj_SVD_iz_DWT(Wde4844,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ
,Uw1s,Vw1s,Sw1,alfa3);

[MSE,PSNR]=MSE_PSNR(X1,A1);
[NC]=MERA_NC(X1,A1)
    disp('nc mera kvaliteta')
    MSE
    PSNR
disp('MSE,PSNR i NC u odnosu na sliku sa zigom posle ricean')
pause

[MSE1,PSNR]=MSE_PSNR(Wps,Wde1811);
[NC1]=MERA_NC(Wps,Wde1811);
    disp('nc mera kvaliteta')
    MSE1;
    PSNR;
disp('MSE,PSNR i NC prim ziga iz prvog kvadranta u odnosu na zig posle
ricean')
%pause
[MSE,PSNR]=MSE_PSNR(Ws,Wse181);
[NC]=MERA_NC(Ws,Wse181)
    disp('nc mera kvaliteta')
    MSE;
    PSNR;
```

```
disp('MSE i PSNR sek ziga iz prvog kvadranta u odnosu na zig posle
ricean')
pause

figure(22)
EbN0=10.^(EbN0dB/10);
semilogy(EbN0dB,simBER_ricean,plotStyle(index),'LineWidth',2);hold on
legendInfo{index} = ['K = ' num2str(K(index))];
end

axis([-5 20 10^-5 10^0]);
legend(legendInfo);
title('Eb/N0 Vs BER za BPSK kroz Rajsov feding kanal');
xlabel('Eb/N0 (dB)');
ylabel('BER');
%

end

function [r_ricean]=proveri_fazni_stav(y_ricean_cap,T,R)
r_ricean(1:T)=0;
k=0;
    for i=1:R
        for j=1:T

if real(y_ricean_cap(j))>=0 & imag(y_ricean_cap(j))>=0 % staviti vece ili
jednako oba
            r_ricean(j)=1;
            k=k+1;
elseif real(y_ricean_cap(j))<=0 & imag(y_ricean_cap(j))>=0
            r_ricean(j)=0;
            k=k+1;
elseif real(y_ricean_cap(j))<=0 & imag(y_ricean_cap(j))<=0
            r_ricean(j)=0;
            k=k+1;
else if real(y_ricean_cap(j))>=0 & imag(y_ricean_cap(j))<=0 %
stavit vece ili jednako real
            r_ricean(j)=1;
            k=k+1;
end

        end
    end
    k;
end

function [B1,B2,B3,B4]=ispisi_blokove21(Zz,X)

k=1;
[M,N]=size(X);
for i=1:(M)/2
    for j=1:(N)/2
```

```
B1(i,j)=Zz(k);
B2(i,j)=Zz(k+(M*(M)/4));
B3(i,j)=Zz(k+(2*(M)*(M)/4));
B4(i,j)=Zz(k+(3*(M)*(M)/4));
k=k+1;
end
end
function [Zz1]=ispisi_red21(B1,B2,B3,B4,Y)
k=1;
[M,N]=size(B1);
for i=1:M
for j=1:N
Zz1(k)=B1(i,j);
Zz1(k+4*M*M/4)=B2(i,j);
Zz1(k+2*4*M*M/4)=B3(i,j);
Zz1(k+3*4*M*M/4)=B4(i,j);

k=k+1;
end
end
end

function [X1,S1,S2,S3,S4,Uw,Vw,Sw]=insertuj_zig_DWT(X,W,alfal,alfa2)

[cA,cH,cV,cD] = dwt2(X,'dbl');;
[ZcA]=zigzag(cA);
[cA1]=ispisi_blokove_DWT(ZcA,cA);
[ZcH]=zigzag(cH);
[cH1]=ispisi_blokove_DWT(ZcH,cH);
[ZcV]=zigzag(cV);
[cV1]=ispisi_blokove_DWT(ZcV,cV);
[ZcD]=zigzag(cD);
[cD1]=ispisi_blokove_DWT(ZcD,cD);
[U1,S1,V1]=svd(cA1);
[U2,S2,V2]=svd(cH1);
[U3,S3,V3]=svd(cV1);
[U4,S4,V4]=svd(cD1);
[Uw,Sw,Vw]=svd(W);
S1w=S1+alfal*Sw;
S2w=S2+alfal*Sw;
S3w=S3+alfal*Sw;
S4w=S4+alfal*Sw;

cAw=U1*S1w*V1';
cHw=U2*S2w*V2';
cVw=U3*S3w*V3';
cDw=U4*S4w*V4';

[M,N]=size(cA);
[Zz1]=ispisi_red_DWT(cAw,cA);
[ZcAw1]=invzigzag(Zz1,M,N);
[Zz2]=ispisi_red_DWT(cHw,cA);
[ZcHw1]=invzigzag(Zz2,M,N);
[Zz3]=ispisi_red_DWT(cVw,cA);
[ZcVw1]=invzigzag(Zz3,M,N);
[Zz4]=ispisi_red_DWT(cDw,cA);
[ZcDw1]=invzigzag(Zz4,M,N);
```



```
X1=idwt2(ZcAw1,ZcHw1,ZcVw1,ZcDw1,'dbl');

end

function [Wde111,Wde211,Wde311,Wde411]=extratuj_zig_DWT(X1r,...
    X1,S1,S2,S3,S4,Uw,Vw,alfal,alfa2,Wps)

[Mw,Nw]=size(X1);
[cA,cH,cV,cD] = dwt2(X1r,'dbl');
[Mca,Nca]=size(cA);

    [ZcA]=zigzag(cA);
    [cA1]=ispisi_blokove_DWT(ZcA,cA);
    [ZcH]=zigzag(cH);
    [cH1]=ispisi_blokove_DWT(ZcH,cH);
    [ZcV]=zigzag(cV);
    [cV1]=ispisi_blokove_DWT(ZcV,cV);
    [ZcD]=zigzag(cD);
    [cD1]=ispisi_blokove_DWT(ZcD,cD);

    [U1e,S1e,V1e]=svd(cA1);
    [U2e,S2e,V2e]=svd(cH1);
    [U3e,S3e,V3e]=svd(cV1);
    [U4e,S4e,V4e]=svd(cD1);
    Sw1e=abs((S1-S1e)/alfal);
    Sw2e=abs((S2-S2e)/alfal);
    Sw3e=abs((S3-S3e)/alfal);
    Sw4e=abs((S4-S4e)/alfal);
    Wse1=Uw*Sw1e*Vw';
    Wse2=Uw*Sw2e*Vw';
    Wse3=Uw*Sw3e*Vw';
    Wse4=Uw*Sw4e*Vw';
    [XX]=zaokruzi(Wse1);
    Wde111=XX;
    [XX]=zaokruzi(Wse2);
    Wde211=XX;
    [XX]=zaokruzi(Wse3);
    Wde311=XX;
    [XX]=zaokruzi(Wse4);
    Wde411=XX;
end
```

```
function [Aw,Uz,Vz,Sx]= insertuj_zig_LiT(A,W,alfa)
```

```
    [U,Sx,V]=svd(A);
    SZ=Sx+alfa*W;
    [Uz,Sz,Vz]=svd(double(SZ));
    Aw=U*Sz*V';
```

```
end
function [Wi]=inverzna(W)
[M,N]=size(W);
Wi(1:M,1:N)=1;
for i=1:M
    for j=1:N
        if W(i,j)==1;
            Wi(i,j)=0;
        end
    end
end
```

```
        end
    end
end
end
function [Wps,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1,Vw1,Sw1]= utisni_SVD_u_DWT(Wp,Ws,alfa)
    [cA,cH,cV,cD] = dwt2(Wp,'dbl');
    [M3,N3,L3]=size(cA);
        [UA,SAx,VA]=svd(cA);
        [UH,SHx,VH]=svd(cH);
        [UV,SVx,VV]=svd(cV);
        [UD,SDx,VD]=svd(cD);
        [Uw1,Sw1,Vw1]=svd(Ws);

        SAZ=SAx+alfa*Sw1;
        SHZ=SHx+alfa*Sw1;
        SVZ=SVx+alfa*Sw1;
        SDZ=SDx+alfa*Sw1;
        cA1=UA*SAZ*VA';
        cH1=UH*SHZ*VH';
        cV1=UV*SVZ*VV';
        cD1=UD*SDZ*VD';
        Wps=idwt2(cA1,cH1,cV1,cD1,'dbl');

end
function
[Wse1,Wse2,Wse3,Wse4]=extrakuj_SVD_iz_DWT(We111,SAZ,SHZ,SVZ,SDZ,Uw1,Vw1,Sw1,alfa3);

    [Mw,Nw]=size(We111);
    [cA,cH,cV,cD] = dwt2(We111,'dbl');
    [Mca,Nca]=size(cA);

        [U1e,S1e,V1e]=svd(cA);
        [U2e,S2e,V2e]=svd(cH);
        [U3e,S3e,V3e]=svd(cV);
        [U4e,S4e,V4e]=svd(cD);
        Sw1e=abs((SAZ-S1e)/alfa3);
        Sw2e=abs((SHZ-S2e)/alfa3);
        Sw3e=abs((SVZ-S3e)/alfa3);
        Sw4e=abs((SDZ-S4e)/alfa3);
        Wse1=Uw1*Sw1e*Vw1';
        Wse2=Uw1*Sw2e*Vw1';
        Wse3=Uw1*Sw3e*Vw1';
        Wse4=Uw1*Sw4e*Vw1';
        [XX]=zaokruzi(Wse1);
        Wse1=XX;
        [XX]=zaokruzi(Wse2);
        Wse2=XX;
        [XX]=zaokruzi(Wse3);
        Wse3=XX;
        [XX]=zaokruzi(Wse4);
        Wse4=XX;

end
function [We]=extraktuj_zig_LiT(Aw,alfa,Sx,Uz,Vz)

    [Us,Ss,Vs]=svd(Aw);
    [M,N]=size(Aw);
    D=Uz*Ss*Vs';
```

```
[Mus, Nus]=size (Us);
[Mss, Nss]=size (Ss);
[Mvs, Nvs]=size (Vs);
We1=(1/alfa) * (D-Sx);
min (min (We1));
max (max (We1));
[M, N]=size (We1);
We=im2bw (We1, graythresh (We1));
graythresh (We1);
end

function [B1, B2, B3, B4]=ispisi_blokove (Zz, X)

k=1;
[M, N]=size (X);
for i=1: (M) / 2
    for j=1: (N) / 2
        B1 (i, j)=Zz (k);
        B2 (i, j)=Zz (k+ ((M) * (M) / 4));
        B3 (i, j)=Zz (k+ (2* (M) * (M) / 4));
        B4 (i, j)=Zz (k+ (3* (M) * (M) / 4));
        k=k+1;
    end
end

end

function [B1]=ispisi_blokove_DWT (Zz, X)
k=1;
[M, N]=size (X);
for i=1: (M)
    for j=1: (N)
        B1 (i, j)=Zz (k);
        k=k+1;
    end
end

end

function [Zz1]=ispisi_red (B1, B2, B3, B4, Y)
k=1;
[M, N]=size (B1);
for i=1: M
    for j=1: N
        Zz1 (k)=B1 (i, j);
        Zz1 (k+4*M*M/4)=B2 (i, j);
        Zz1 (k+2*4*M*M/4)=B3 (i, j);
        Zz1 (k+3*4*M*M/4)=B4 (i, j);
        k=k+1;
    end
end

end

function [Zz1]=ispisi_red_DWT (B1, Y)

k=1;
```

```
[M,N]=size(B1);
for i=1:M
    for j=1:N
        Zz1(k)=B1(i,j);
        k=k+1;
    end
end

function out=zigzag(in)
    [br_red br_kol]=size(in);
    out=zeros(1,br_red*br_kol);
    tren_red=1; tren_kol=1; tren_index=1;
while tren_red<=br_red & tren_kol<=br_kol
if tren_red==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_kol~=br_kol
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_kol=tren_kol+1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red==br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_kol~=br_kol
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_kol=tren_kol+1;
elseif tren_kol==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_red~=br_red
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red+1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol==br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_red~=br_red
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red+1;
elseif tren_kol~=1 & tren_red~=br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red+1;    tren_kol=tren_kol-1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red~=1 & tren_kol~=br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0
    out(tren_index)=in(tren_red,tren_kol);
    tren_red=tren_red-1;    tren_kol=tren_kol+1;
    tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red==br_red & tren_kol==br_kol
    out(end)=in(end);
    break
end
end
end

function out=invzigzag(in,br_red,br_kol)
ukup_elem=length(in);
if nargin>3
    error('previše ulaznih podataka');
elseif nargin<3
    error('premalo ulaznih podataka');
end

if ukup_elem~=br_red*br_kol
    error('Dimezije matrica se ne podudaraju');
end
out=zeros(br_red,br_kol);
tren_red=1; tren_kol=1; tren_index=1;

while tren_index<=ukup_elem
if tren_red==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_kol~=br_kol
    out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
```

```
tren_kol=tren_kol+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red==br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_kol~=br_kol
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_kol=tren_kol+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol==1 & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0 & tren_red~=br_red
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol==br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0 & tren_red~=br_red
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_kol~=1 & tren_red~=br_red & mod(tren_red+tren_kol,2)~=0
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red+1;      tren_kol=tren_kol-1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_red~=1 & tren_kol~=br_kol & mod(tren_red+tren_kol,2)==0
out(tren_red,tren_kol)=in(tren_index);
tren_red=tren_red-1;      tren_kol=tren_kol+1;
tren_index=tren_index+1;
elseif tren_index==ukup_elem
out(end)=in(end);
break
end
end
end

function [XX]=zaokruzi(X_1)
xmin=min(min(X_1));
xmax=max(max(X_1));
D=(xmax-xmin)/255;
for i=1:256
    T(i)=xmin+(i-1)*D;
end
[M,N]=size(X_1);
for i=1:M
    for j=1:N
        x=X_1(i,j);
        a=abs(T-x);
        [mm,poz]=min(a);
        XX(i,j)=poz-1;
    end
end
end

function [MSE,PSNR]=MSE_PSNR(A,B)
[M,N]=size(A);
Nb=1;
W=max(max(A))
disp('maksimalna vrednost bita')
pause
if W>2
    W=255
elseif W>255
    W=511
elseif W>512
    W=1023
else
    W=1;
```

```
end
disp('broj bitova i maks br bitova-1')
W;
%pause
A=double(A);
B=double(B);

MSE=0;
for i=1:M
    for j=1:N
        MSE=MSE+(A(i,j)-B(i,j))^2;
    end
end
MSE=MSE/(M*N);
PSNR=10*log10(W^2/MSE);
end
```

```
function [NC]=MERA_NC(A,B)

A=double(A);
B=double(B);
[M,N]=size(A);
NCX=0;
NCA=0;
NCB=0;
for i=1:M
    for j=1:N
        NCX=NCX+(A(i,j)*B(i,j));
        NCA=NCA+(A(i,j))^2;
        NCB=NCB+(B(i,j))^2;
    end
NC=NCX/(sqrt(NCA)*sqrt(NCB));

end

end
```

```
function [XX]=zaokruzi(X_1)
xmin=min(min(X_1));
xmax=max(max(X_1));
D=(xmax-xmin)/255;
for i=1:256
    T(i)=xmin+(i-1)*D;
end
T;
xmax;

[M,N]=size(X_1);
for i=1:M
    for j=1:N
        x=X_1(i,j);
        a=abs(T-x);
        [mm,poz]=min(a);
        XX(i,j)=poz-1;
    end
end
XX;
```

```
[H]=nas_histogram (XX);
    r=min (min (XX));
    t=max (max (XX));
    s=0;
    for i=1:M
        for j=1:N
            s=s+XX (i, j);
        end
    end
    p=(s/(M*N));
    for i=1:M
        for j=1:N
            if XX (i, j) >= (p)
                XX (i, j)=1;
            else
                XX (i, j)=0;
            end
        end
    end
    end
    XX;
end

function [H]=nas_histogram (A)

    [M,N]=size (A);
    if min (min (A)) < 0
        Amin=-127;
        Amax=128;
    else
        Amin=0;
        Amax=255;
    end
    korak=(-Amin+ Amax)/255;
    P=(round (Amin:korak:Amax));
    [M1,N1]=size (P);
    Temp (1:N1)=0;
    H (1:256)=0;
    for i=1:M
        for j=1:N
            Temp=abs (P-A (i, j)) ;

            [Min, poz]=min (Temp);
            Min;
            poz;
            H (poz)=H (poz)+1;
        end
    end
    end
    H;
end

function [X1r]=eliminsi_sum (X_corump, SUMN, X_sum, XZ, procenat, X)

    SUMN;
    pogodak=0;
    promasaj=0;

    K=1;
```

```
W(1:2*K+1,1:2*K+1)=0;
X1r=X;
[P,Q]=size(X1r);
for i=K+1:M-K
    % i
    for j=K+1:M-K

        f=1;
        for k=-K:K
            g=1;
            for l=-K:K

                W(f,g)=X_sum(i+k,j+1);

                W_sum(f,g)=SUMN(i+k,j+1);
                g=g+1;
            end
            f=f+1;
        end
        [Pmax,Pmin,Pmed]=sredi(W);
        [Y,grana]=da_li_si_sum(W,Pmax,Pmin,Pmed);%Y=1 smetnja

        if Y==1 & SUMN(i,j)==1
            pogodak=pogodak+1;
            if grana==1
                X_rest(i,j)=Pmed;
            else
                X_rest(i,j)=usrednji(W);
                X_sum(i,j)=X_rest(i,j);
            end
        elseif Y==1 & SUMN(i,j)==0
            promasaj=promasaj+1;
            if grana==1
                X_rest(i,j)=Pmed;
            else
                X_rest(i,j)=usrednji(W);
                X_sum(i,j)=X_rest(i,j);
            end
        elseif Y==0 & SUMN(i,j)==1
            promasaj=promasaj+1;
            X_rest(i,j)=X_sum(i,j);
        elseif Y==0 & SUMN(i,j)==0
            pogodak=pogodak+1;
            X_rest(i,j)=X_sum(i,j);
        else

            end
        pogodak;
        promasaj;

    end

    Pmax;
    Pmin;
    Pmed;

end

[M,N]=size(X_rest);
X1r(1:M+1,1:N+1)=0;
```



```
for i=1:M
    for j=1:N
        Xlr(i,j)=X_rest(i,j);
    end
end
[J,L]=size(Xlr);

end

function [sr]=sred_vr(W)

    [M,N]=size(W);
    s=0;
    for i=1:M
        for j=1:N
            s=s+W(i,j);
        end
    end

    W;
    sr=s/(M*N);
end
function [Pmax,Pmin,Pmed]=sredi(W)

W_temp=W(1,:);
W_temp=sort(W_temp)';
W(1,:)=W_temp;

W_temp=W(2,:);
W_temp=sort(W_temp)';
W(2,:)=W_temp;

W_temp=W(3,:);
W_temp=sort(W_temp)';
W(3,:)=W_temp;

W_temp=W(:,1)';
W_temp=sort(W_temp)';
W(:,1)=W_temp;

W_temp=W(:,2)';
W_temp=sort(W_temp)';
W(:,2)=W_temp;

W_temp=W(:,3)';
W_temp=sort(W_temp)';
W(:,3)=W_temp;

W_temp=W_temp';
W_temp(1)=W(1,3);
W_temp(2)=W(2,2);
W_temp(3)=W(3,1);

W_temp=sort(W_temp);
W(1,3)=W_temp(1);
```

```
W(2,2)=W_temp(2);  
W(3,1)=W_temp(3);
```

```
Pmin=W(1,1);  
Pmax=W(3,3);  
Pmed=W(2,2);
```

```
end
```

```
function [Y,grana]=da_li_si_sum(W,Pmax,Pmin,Pmed)
```

```
    if (Pmin<W(2,2)) & (W(2,2)<Pmax) & (Pmin>0) & (Pmax<255)  
        grana=1;  
        Y=0;  
    elseif ((Pmin==W(2,2)) & (Pmin==0)) | ((W(2,2)==Pmax) & (Pmax==255))  
        grana=2;  
        Y=1;  
    else  
        grana=3;  
        Y=0;
```

```
end
```

```
end
```

```
function [W_rest]=popravi_sliku(W,Y,Pmed,Pmin,Pmax)
```

```
[M,N]=size(W);  
for i=1:M  
    for j=1:N  
        if Y==1  
            W(i,j)=W(2,2);  
        elseif Y==0 & Pmin<Pmed<Pmax & 0<Pmed<255  
            W(i,j)=Pmed;  
        end  
        W_rest=W(i,j);  
    end  
end  
end  
end
```

```
function [Y]=usrednji(W)
```

```
[M,N]=size(W);  
s=0;  
p=0;  
for i=1:M  
    for j=1:N  
        if W(i,j)~=0 & W(i,j)~=255  
            s=s+W(i,j);  
            p=p+1;  
        end  
    end  
end  
  
if p==0  
    Y=sum(sum(W))/9;  
  
else  
    Y=s/p;  
end  
end
```

```
end
```

```
function
[SUMN,broj_tacaka_sa_sumom,piksel_smetnje]=matrica_suma(M,N,procenat)
LL=round((M*N/100)*procenat);
SUMN(1:M,1:N)=0;
load sumovi.mat kordinate_smetnji piksel_smetnje
[MM,NN]=size(kordinate_smetnji);
i=0;
j=0;
while (i <= LL) & j<NN
    j=j+1;
    ii=kordinate_smetnji(1,j);
    jj=kordinate_smetnji(2,j);
    if (ii <= M) & (jj <= N)
        i=i+1;
        SUMN(ii,jj)=1;
    end
end
broj_tacaka_sa_sumom=sum(sum(SUMN));

end
```

7. Закључак

Предмет дисертације јесте пренос слике бежичним оптичким комуникационим FSO каналом. Ова тема, преноса података (слике), бежичним FSO каналом је актуелна и њоме се бави велики број научних истраживача у европи и свету. У дисертацији је конкретно обрађен случај преноса слике кроз Рајсов FSO комуникациони канал. Утицај сцинтилације на пренос слике је анализиран кроз утицај на монохроматску слику са инсертованим дигиталним воденим жигом у циљу тестирања утицаја канала на осетљиве и поверљиве податке и на пренос слике у боји која представља комплекснији облик слике од монохроматске. Слика у боји и комплетна анализа преноса слике у боји кроз FSO комуникациони канал је урађена у циљу тестирања примене алгоритма за детекцију пожара у слици. Детекција пожара у слици је занимљив вид детекције пожара јер у савременом добу применом рачунарске технике може се врло лако и ефикасно вршити превентивна заштита од пожара. Најзначајнији научно-стручни доприноси изложени у овој дисертацији су:

- Развијен је ефикасан алгоритам за симулацију преноса слике кроз Рајсов FSO канал који се успешно може користити за добијање карактеристика оваквих система.
- Развој новог решења за детекцију пожара у слици који се може искористити у практичне сврхе у циљу заштите великих шумских пространа и других неприступачних.

Научно истраживачки рад који је претходио овој дисертацији приказан је стручној јавности излагањем на међународним и домаћим конференцијама и међународним и домаћим часописима. Број радова које је докторант објавио из области теме дисертације јесте 1 рад категорије M23, 1 рад категорије M24, 8 радова категорије M33.

У поглављу 1 дат је осврт на досадашња достигнућа у овој области и преглед очекиваних резултата.

У поглављу 2 дефинисани су појмови везано за FSO комуникационе системе, дат је преглед могућих атмосферских сметњи у пропагацији светлосног снопа као и преглед најчешће коришћених модулационих шема у FSO комуникацијама. Такође у овом поглављу описане су карактеристике слике, како монохроматске тако и слике у боји и дате су карактеристике дигиталних водених жигова.

Поглавље 3 садржи опис Малага модулационе шеме која представља општи облик модулационе шеме која се свођењем параметара може свести на најчешће коришћене модулационе.

У поглављу 4 дати су симулациони резултати тестирања преноса слике кроз Рајсов FSO канал. Приказани су резултати преноса слике са инсертованим дигиталним воденим жигом и анализа утицаја канала на слику и екстраковани жиг као и резултати преноса слике у боји у циљу детекције пожара у слици након преноса слике кроз канал.

Поглавље 5 даје преглед могућности примене FSO комуникационих система у "last mile" конекцији.

Правци будућих истраживања у овој области:

- Развоје ефикаснијих алгоритама симулације преноса података кроз FSO комуникациони канал.
- Развој алгоритама за детекцију пожара у слици у циљу што ефикасније примене овог начина детекције пожара.
- Развој практичног, лако покретљивог и преносивог, модела за FSO комуникацију у "last mile" конекцији у циљу ефикасне комуникације у ванредним ситуацијама.

Reference:

- [1] Juarez, J. C.; Dwivedi, A.; Hammons, A. R.; Jones, S. D. Weerackody, V. & Nichols, R.A., "Free-Space Optical Communications for Next-Generation Military Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 44, No. 11, Nov. 2006, pp. 46–51, ISSN 0163-6804.
- [2] Zhu, X. & Kahn, J.M., "Free-space Optical Communication through Atmospher Turbulence Channels", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, No.8, August 2002, pp. 1293-1300, ISSN 0090-6778.
- [3] K. Kazaura, K. Wakamori, M. Matsumoto, et. al. "RoFSO: A universal platform for convergence of fiber and free-space optical communication networks", *IEEE Comm. Mag.* **48**, 130, 2010.
- [4] R. Barakat, "Weak-scatter generalization of the K-density function with application to laser scattering in atmospheric", *J. Opt. Soc. Am. A.* 3, 1986, pp.401-409.
- [5] A. Abdi, & M. Kaveh, "K distrinution: an appropriate substitute for Rayleigh-lognormal distribution in fading-shadowed wireless channels", *IEEE Electronics Letters*, Vol. 34, No. 9, April 1998, pp. 851–852, ISSN 0013-5194.
- [6] E. Jakerman, "On the statistics of K-distributed noise", *Journal of Physics A*, Vol.13, No.1, January 1980, pp. 31–48, ISSN 0305-4470.
- [7] E. Bayaki, R. Schober, and R. K. Mallik, "*Performance analysis of free-space optical sytems in Gamma-Gamma fading*", in *IEEE Global Commun. Conf.*, 2008.
- [8] 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, may 2011, pp. 1368-1377.
- [9] W.Lim, "*BER analysis of coherent free space optical systems with BPSK over Gamma-Gamma channels*", *Journal of the optical society of Korea*, vol.19, No.3, June 2015, pp.237-240, DOI: 10.3807/JOSK.2015.19.3.237.
- [10] E.Zedini, I.S.Ansari and M.Alouini, "*Performance analysis of mixed Nakagami-m and Gamma-Gamma dual-Hop FSO transmission systems*", *IEEE Photon. J.* Vol.7, No.1, 2015, doi:10.1109/JPHOT.20142381657.

- [11] L. C. Andrews, & R. L. Phillips, "I-K distribution as a universal propagation model laser beams in atmospheric turbulence", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 2, No. 2., pp. 160–163, Feb. 1985, ISSN 0740-3232.
- [12] A. Abdi, C. Tepedelenlioglu, M. Kaveh, and G. Giannakis, "On the estimation of the K parameter for the Rice fading distribution", *IEEE Communications Letters*, Volume 5, Number 3, March 2001, Pages 92–94, ISSN 1089-7798, doi: [10.1109/4234.913150](https://doi.org/10.1109/4234.913150).
- [13] K. K. Talkudar, and Lawing, D. William, "Estimation of the parameters of the Rice distribution", *Journal of the Acoustical Society of America*, 89 (3), p.p 1193-1197.
- [14] K. P. Choi, "On the Medians of the Gamma Distributions and an Equation of Ramanujan", *Proceedings of the American Mathematical Society*, Vol. 121, No. 1, May 1994, pp. 245-251.
- [15] M.A. Al-Habash, L.C. Andrews and R.L. Phillips. "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media", *Opt. Engineering* **40**, 1554–1562, 2001, ISSN:0091-3286.
- [16] J. M. Garrido-Balsells, A. Juardo-Navas, J. F. Paris, M. Castillo-Vazquez, and A. Puerta-Notario, "Novel formulation of the *M* model trough generalized-K distribution for atmospheric optical channels", *Opticas Express (OSA)*, Vol. 23, No. 5, Mar. 2015, DOI: [10.1364/oe.23.006345](https://doi.org/10.1364/oe.23.006345).
- [17] A. K. Majumdar, "Advanced Free Space Optics (FSO)(a systems approach)", Springer 2015, ISSN: 0342-4111, doi: [10.1007/978-1-4939-0918-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0918-6).
- [18] W. K. Pratt, "Laser Communication Systems", 1st ed New York: John Wiley & Sons, Inc, 1969.
- [19] B. Naimullah, S. Hitam, N. Shah, M. Othman and S. Anas, "Analysis of the Effect of Haze on Free Space Optical Communication in the Malaysian Environment", *IEEE*; 2007.
- [20] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. DeFornel, and P. Favennec, "*Free-space optics: propagation and communications*", Wiley-ISTE Limited, London, 2006.
- [21] O. Bouchet, M. El Tabach, M. Wolf, D.C.O'Brien, G. E.Faulkner, J.W. Walewski, S. Randel et al. "Hybrid wireless optics (HWO): Building the next-generation home network", *Signal Processing, CNSDSP*, Graz, Austria, 2008, pp 283–287
- [22] R. M. Gagliardi and S. Karp, "Optical Communications", 2nd ed New York: John Wiley, 1995.

- [23] S Bloom, E Korevaar, J Schuster and H Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics", *Journal of Optical Networking*, 2, 2003, pp. 178–200.
- [24] J. Li, and M. Uysal, "Achievable Information Rate for Outdoor Free Space Optical", *Global Telecommunications Conference*, Vol.5, 2003, p.p. 2654-2658.
- [25] W. O. Popoola and Z.. Ghassemlooy, "BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, April15, 2009, p.p. 967 - 973.
- [26] G. C. Valley, "Isoplanatic Degradation of Tilt Correction and Short-term Imaging Systems", *Appl. Opt.* 19, 1980, pp. 574–577.
- [27] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Laser Beam Scintillation with Applications" Bellingham: SPIE, 2001.
- [28] J. W. Goodman, "Statistical Optics" New York: John Wiley, 1985.
- [29] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "*Optical networks- a practical perspective*", Second Edition, Academic Press, London, 2002.
- [30] M. J. Sibley, "*Optical communications*", Second Edition, Macmillian Press Limited, London, 1995.
- [31] W. O. Popoola, "*Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems*", Thesis report, p. 73, Sept. 2009.
- [32] G. P. Agrawal, "*Fibre - optic communication systems*", Third Editon, New York: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [33] J. R. Lesh, J. Katz, H. H. Tan, and D. Zwillinger, "2.5 bit/detected photon demonstration program, analysis and phase I results," *TDA Progress Rep., Jet propulsion Laboratory, Pasadena, CA, Oct. 1981*, pp. 115-132.
- [34] A. Biswas, V. Vilnrotter, W. Farr, D. Fort, and E. Sigman, "Pulse position modulated ground receiver design for optical communications from deep space," *Proc. SPIE, San Jose, CA*, vol. 4635, Jan. 2002, pp. 224-235.
- [35] R. Barrios, F. Dios, "Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves", *Opt. Express*, Vol. 20, Issue 12, 2012, 20, pp. 13055–13064.
- [36] R. Barrios, F. Dios, Exponentiated Weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence, *Optics & Laser Technol.*, Issue 45, 2013, pp. 13–20.

- [37] I. Garrett, "Pulse-position modulation for transmission over optical fibres with direct or heterodyne detection," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 31, no. 4, Apr. 1983, pp. 518-527.
- [38] I. I. Kim, B. McArthur and E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications", *SPIE Proceedings: Optical Wireless Communications III*, 2001, pp.4214, 26–37.
- [39] M. Nakagami, The m-distribution. "A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading", in Hoffman, W. C., *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, Pergamon Press, 1960.
- [40] J. H. Churnside, & S. F. Clifford, "Log-normal Rician probability-density function of optical scintillations in the turbulent atmosphere", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 4, No. 10, October 1987, pp. 1923–1930, ISSN 1084-7529.
- [41] Wang, T. & Strohbehn, J.W. "Perturbed log-normal distribution of irradiance fluctuations". *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 64, No. 7, July 1974, pp. 994–999, ISSN 0030-3941.
- [42] Churnside, J. H. & Frehlich, R. G., "Experimental evaluation of lognormally modulated Rician and IK models of optical scintillation in the atmosphere", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 6, No. 1, November 1989, pp. 1760–1766, ISSN 1084-7529.
- [43] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, J. F. Paris and A. Puerta-Notario "A Unifying Statistical Model for Atmospheric Optical Scintillation" *Communications Engineering Department, University of Malaga Campus de Teatinos Málaga, Spain*.
- [44] I. J. Cox, M.L. Miller and J.A. Bloom, "*Digital Watermarking*", Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [45] I J. Cox, M. L. Miller, J. A. Bloom, J. Fridrich, T. Kalker, "*Digital Watermarking and Steganography*", Morgan Kaufmann Publishers, 2008.
- [46] J. Hernandez, M. Amado, F. Perez-Gonzalez, "*DCT-domain watermarking techniques for still images: detector performance analysis and new structure*", *IEEE Trans. Image Process.* Vol. 9, No. 1, 2000, pp. 55-67.
- [47] W. Chu, "*DCT-based image watermarking using subsampling*", *IEEE Trans. Multimedia* Vol. 5, No. 1, pp. 34-38, 2003.

- [48] Z. Milivojevic, **B. Princevic**, D. Brodic, " *Performance of DDS Algorithm for Insertion of Double Watermark*", international scientific conference UNITECH 2014, Gabrovo, Vol. II , Bulgaria, ISSN: 1313-230X, 2014, pp. 122-127.
- [49] P. Kumsawat, K. Attakitmongcol, A. Srikaew, " *Multi wavelet-based image watermarking using genetic algorithm*", Proceedings of the IEEE TENCON Conference, 2004, pp. 275-278.
- [50] A. Mohammad, A. Alhaj, S. Shaltaf, " *An improved SVD-based vatermarking scheme for protecting rightful ownership*", Signal Processing Vol. 88, 2008, pp. 2158-2180.
- [51] R. Liu, T.Tan, " *A SVD based watermarking scheme for protecting rightful ownership*", IEEE Trans. Multimedia Vol. 4, No. 1, 2002, pp. 121-128.
- [52] J. Liu, X. Niu, W. Kong, " *Image watermarking based on singular value decomposition*", Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Pasadena, CA, USA, 2006, pp. 457-460.
- [53] **B. Princevic**, Z. Milivojevic, D. Brodic, " *Efficiency of MBD algorithm for filtering watermarked images*", XIX conference IT 2014, 24-28.02 2014, Montenegro 2014, pp. 244-247, ISBN:978-86-85775-15-4
- [54] A. Mohamed, " *A new digital image watermarking scheme based on Schur decomposition*", Multimed Tools Appl, Vol. 59, 2012, pp. 851-883.
- [55] **B. Princevic**, Z. Milivojevic, P. Spalevic, D. Brodic, " *Performance of the SD Algorithm for inserting Watermark in Image Based on the Schur Decomposition*" International Scientific Conference INFOTEH 2015, 18-20 March 2015, Jahorina, BiH, pp. 640-644, ISBN:978-99955-763-6-3.
- [56] **B. Princevic**, Z. Milivojevic, P. Spalevic, D. Brodic, " *Comparative Analysis of the MSD and MSDM Watermarking Algorithms Based on the Schur Decomposition*" 50th International Scientific Conference ICEST 2015, 24-26 June 2015, p.p. 258-261, Bulgaria, ISBN: 978-619-167-182-3.
- [57] Q. Su, Y. Niu, X. Liu, Y. Zhu, " *Embedding color watermarks in color images based on Schur decomposition*", Optics Communications, Vol. 285, 2012, pp. 1792-1802.
- [58] **B. Princevic**, Z. Milivojevic, D. Brodic " *The efficiency of MDB algorithm for elimination of impulse noise at images with watermark inserted by DCT-SVD algorithm* ", Internacional Scientific Conference, Vol.II Nov. 2014, pp. 89-94.

- [59] G.H. Golub, C.F. Van Loan, " *Matrix computations*", John Hopkins University Press, Baltimore 1998.
- [60] M. Abramowitz, and I. A. Stegun, (Eds.). "Probability Functions." Ch. 26 in *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th printing.*, New York: Dover, 1972, pp. 925-964.
- [61] M. Evans, N. Hastings, and B. Peacock, "Probability Density Function and Probability Function." §2.4 in *Statistical Distributions, 3rd ed.* New York: Wiley, 2000.
- [62] A. Papoulis, "*Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*", 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1984.
- [63] A. P. Prudnikov, O. I. Marichev,; and Yu. A. Brychkov, " *Integrals and Series*", Vol. 3: *More Special Functions*. Newark, NJ: Gordon and Breach, 1990.
- [64] J. Spanier, and K. B. Oldham, , " *An Atlas of Functions*", .Washington, DC: Hemisphere, 1987.
- [65] T. David, V. Pramod, "Fundamentals of Wireless Communication", Cambridge University Press, UK, 2005.
- [66] L. C. Andrews and R. L. Philips. "Laser Beam Propagation through Random Media", SPIE, 2nd ed., Press, Bellingham, Washington, 2005.
- [67] A. Juardo-Navas, J.M. Garrido-Balsells, J.F. Paris, et al. "A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation", invited chapter in "Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes," 2011, pp. 181-206.
- [68] N.D. Chatzidiamantis, H.G. Sandalis, G.K. "Karagiannidis, et al. Inverse Gaussian modeling of turbulence-induced fading in free-space optical systems", J. Lightwave Technol. 29, 2011, 1590-1596.
- [69] M. Hongqian, X. Haiyun, and Y. Jianping, "A frequency shift keying transmitter based on incoherent frequency-to-time mapping for free-space optical communications", IEEE conf. Microwave Photonic, Oct. 2010, pp. 208-211 5-9, ISBN 978-1-4244-7824-8.
- [70] D. Patel, J. More, and G. G. Soni, "Comparison of modulation formats for free space optics with SelC diversity", IEEE conf. Microwave Photonic, pp. 1-3, Dec. 2013, 13-15, ISBN 978-1-4799-2176-8.
- [71] S. J. Savage, B. S. Robinson, D.O. Caplan, J.J Carney, D. M. Boroson, F. Hakimi, S. A. Hamilton, J. D. Mores, and M. A. Albota, "Scalable modulator for frequency shift

- keying in free space optical communications", *Optics Express* vol. 21, No. 3, pp. 3342-3353, 2013.
- [72] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis, and M. Uysal, "BER Performance of FSO Links over Strong Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors", *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 1, Jan. 2008, p.p. 44-46.
- [73] I. S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, "Table of Integrals, Series and Products" eight edition, Elsevier, 2015, ISBN:978-0-12-384933-5.
- [74] A. P. Prudnikov, Y. A. Brychkov, and O. I. Marichev, "Integral and Series", 2nd edition, Vol. 3. Moskva, Fizmatlit 2003, ISBN 5-9221-0325-3.
- [75] S. Zhao, B. Wang, Li Zhou, L. Gong, W. Cheng, Y. Sheng, B. Zheng, "Turbulence Mitigation Scheme for Optical using Orbital Angular Momentum Multiplexing Based on Channel Coding and Wavefront Correction", *Physics. Optics*, Jan. 2014, doi: arXiv:1401.7558.
- [76] A. K. Dutta, K. V. Hari, L. Hanzo, "Channel estimation relying on the minimum bit-error-ratio criterion for BPSK and QPSK signals" *IET Communications*, Vol. 8 Iss. 1, 2014, pp. 69-76, doi: 10.1049/iet-com.2013.0173.
- [77] S. E. I. Baba, L. Z. Krikor, T. Arif, Z. Shaaban, "Watermarking of digital images in Frequency Domain", *International Journal of Automation and Computing*, vol. 7, no. 1, Feb. 2010, pp. 17-22.
- [78] C. C. Lai, "A digital watermarking scheme based on singular value decomposition and tiny genetic algorithm", *Digital Signal Processing*, vol. 21, no. 4, July 2011, pp. 522-527.
- [79] **B. Prlinčević**, B. Milovanović, P. Spalević, S. Panić, Z. Milivojević " *Performance analysis of FSO transmission of watermarked image over Rician fading channels*" TELSIKS 2015, october 14-17, Serbia, 2015, p.p. 72-75, ISBN: 978-1-4673-7515-3.
- [80] **B. P. Prlinčević**, S. R. Panić, P. Č. Spalević, M. A. Mišić, A. Amnisi, V. Stanojević, "On the Transmission of Double Watermarked Image over Rician FSO channel", *Elektronika ir Elektrotehnika*, ISSN:1392-1215, Vol. 22, No. 3, Jun 2016, pp. 83-88, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.22.3.15320>.
- [81] A. A. Farid, S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free space optical links with pointing errors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, July 2007.

- [82] A. Belmonte and J. M. Kahn, "Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques" *Optics Express*, vol. 16, no. 18, Sept. 2008, pp. 14151–14162.
- [83] S. M. Aghajanzadeh, M. Uysal "Diversity-Multiplexing Trade-Off in Coherent Free-Space Optical Systems With Multiple Receivers", *Journal of optical Communications and Networking*, vol. 2, no.12, Dec. 2010, pp. 1087-1094.
- [84] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications, system and channel modelling with MATLAB*, CRC press, Taylor&Francis Group, 2013, ISBN: 978-1-4398-5235-4.
- [85] <http://www.mathworks.com/>.
- [86] J.R. Gonzalez, M.Palahi, A.Trasebores, T.Pukkala, "a fire probability model for forest stands in Cataonia (north-east Spain)", *Annals of Forest Science*, 2006, pp.169-176.
- [87] E.Kuhrt, J.Knollenberg, V.mertens. "An Automatic Early Warning System for Forest Fires", *Annals of Burns and Fire Disasters*, vol. XIV, 2001, pp. 151-154.
- [88] G.Marbach, M.Leopfe, T.Brupbacher, "An image processing technique for fire detection in video images", *Fire Saf. J.* 41 (4), 2006, pp 285-289.
- [89] T.Celik, H.Demirel, H.Ozkaramanli, "Automatic Fire detection in video sequences", *Proceedings of European Signal Processing Conference*, September 2006.
- [90] T.Celik, H.Demirel, H.Ozkaramanli, "Fire and smoke Detection without Sensors: Image Processing Based Approach", *Proceedings of 15th European Signal Processing Conference*, Poland, September 3-7, 2007.
- [91] **B. Prlinčević**, Z. Milivojevic, D. Brodic, "*MIPFD Algorithm for Image Fire Detection*", XLIX international conference ICEST 2014 Nis, 25-27 june 2014, vol.II, pp. 373-376, Serbia, ISBN: 978-86-6125-109-2.
- [92] V.Vipin, "Image Processing Bassed Forest Fire Detection", *International Journal of Emeging Technology and Advanced Engineering*, Vol.2, Issue 2, February 2012, ISSN 2250-2459.
- [93] Forest fire images: <http://www.flickr.com>.
- [94] D. Vučković, **B. Prlinčević**, P. Spalević, S. PAnić, H. Škrijelj "*Performance analysis of FSO transmission of image processing fire detection over Rician fading channels*", Twenty-fourth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK, 21-23 sept. 2015, Slovenia, p.p.81-84 , ISSN 1581-4572.

- [95] G. R. Osche, "*Optical Detection Theory for Laser Applications Wiley*", New York, 2002.
- [96] D. L. Fried, "*Optical Resolution Through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures*". *Journal of the Optical Society of America* 56 (10), 1966: pp. 1372–1379.
- [97] M. Mišić, **B. Prlinčević**, S. Panić, P. Spalević, A. Amniesi, "*Zavisnost performansi prenosa slike požara od atmosferskih prilika u slučaju korišćenja Rician FSO kanala*", Infoteh , pp.329-333 16-18.03. 2016. ISBN: 978-99955-763-9-4.
- [98] T. H. Carbonneau and D. R. Wisely, "Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded marketplace," *Proc. SPIE Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical*, vol. 3232, Jan. 1998, pp. 119-128.
- [99] E. Leitgeb, M. Gedhart, and U. Birnbacher, "Optical networks, last mile access and applications," *J. Opt. Fiber Commun.*, pp. 56-85, 2005.
- [100] A. K. Majumdar, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel," *Journal of Optical and Fiber Communications Research*, vol. 2, 2005, pp. 345-396.
- [101] J. C. Ricklin, S. M. Hammel, F. D. Eaton, and S. L. Lachinova, "Atmospheric channel effects on free-space laser communication," *J. Opt. Fiber Commun.*, vol. 3, 2006, pp. 111-158.
- [102] H. A. Willebrand and B. S. Ghuman, *Free-space optics: enabling optical connectivity in today's networks*, Sams Publishing, Indianapolis, Indiana 46240 USA, 2002.
- [103] D. O. Caplan, "Laser communication transmitter and receiver design," *Journal of Optical Fibre Communication Report*, vol. 4, 2007, pp. 225-362.
- [104] E. Korevaar, I. Kim, and B. McArthur, "Atmospheric propagation characteristics of highest importance to commercial free space optics," *Proc. of SPIE, San Diego, CA*, vol. 4976, pp. 1-12, 2003.
- [105] S. Karp, R. M. Gagliardi, S. E. Moran, and L. B. Stotts, *Optical channels: fibers, clouds, water and the atmosphere*, New York: Plenum Press, 1988.
- [106] E. Ciaramella, Y. Arimoto, G. Contestabile, M. Presi, A. D'Errico, V. Guarino, and M. Matsumoto, "1.28 terabit/s (32x40 Gbit/s) WDM transmission system for free space optical communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, 2009, pp. 1639-1645.

- [107] T. Kamalakis, I. Neokosmidis, A. Tsipouras, S. Pantazis, and I. Andrikopoulos, "Hybrid free space optical / millimeter wave outdoor links for broadband wireless access networks," *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2007, pp. 1-5.
- [108] D. M. Forin, S. Di Bartolo, G. M. Toshi Beleffi, F. Curti, G. Cincotti, A. Vecchi, S. Ragana, and A. L. J. Teixeira, "Giga ethernet free-space passive optical networks," *Fibre and Integrated Optics*, vol. 27, Apr. 2008, pp. 229-236.
- [109] K. Wang, A. Nirmalathas, C. Lim, and E. Skafidas, "4X12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, July 2011, pp. 1988-1996.
- [110] O. Awwad, A. Al-Fuqaha, B. Khan, and G. B. Brahim, "Topology control schema for better qos in hybrid rf/fso mesh networks," *Communications , IEEE Transactions on*, vol. 60, 2012, pp. 1398-1406.
- [111] V. Vishnevskii, O. Semenova, and S. Y. Sharov, "Modeling and analysis of a hybrid communication channel based on free-space optical and radiofrequency technologies," *Automation and Remote Control*, vol. 74, 2013, pp. 521- 528.
- [112] J. Libich, M. Mudroch, P. Dvorak, and S. Zvanovec, "Performance analysis of hybrid FSO/RF link," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 6th European Conference on*, 2012, pp. 1235-1238.
- [113] F. Nadeem, V. Kvicera, M. S. Awan, E. Leitgeb, S. Muhammad, and G. Kandus, "Weather effects on hybrid FSO/RF communication link," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 27, 2009, pp. 1687-1697.
- [114] Z. Kolka, Z. Kincl, V. Biolkova, and D. Biolek, "Hybrid FSO/RF test link, " in *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT),4th International Congress on*, 2012, pp. 502-505.
- [115] Y. Tang, M. Brandt-Pearce, and S. Wilson, "Link Adaptation for Throughput Optimization of Parallel Channels with Application to Hybrid FSO/RF Systems," 2012.
- [116] F. Demers, H. Yanikomeroglu, and M. St-Hilaire, "A survey of opportunities for free space optics in next generation cellular networks," in *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2011 Ninth Annual*, 2011, pp. 210-216.

- [117] L. Hanzo, H. Haas, S. Imre, D. O'Brien, M. Rupp, and L. Gyongyosi, "Wireless myths, realities, and futures: from 3G/4G to optical and quantum wireless," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, 2012, pp. 1853-1888.
- [118] W. Hameed, S. S. Muhammad, and N. M. Sheikh, "Integration scenarios for free space optics in next generation (4G) wireless networks," *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 7th International Symposium on*, 2010, pp. 571-575.
- [119] J. Derenick, C. Thorne, and J. Spletzer, "On the deployment of a hybrid free space optic/radio frequency (FSO/RF) mobile ad-hoc network," in *Intelligent Robots and Systems, (IROS 2005), IEEE/RSJ International Conference on*, 2005, pp. 3990-3996.
- [120] Z. Dayong, H. H. Refai, P. G. LoPresti, and M. Atiquzzaman, "Control algorithm development for mobile FSO node alignment," in *Digital Avionics Systems Conference. DASC, IEEE/AIAA 28th*, 2009, pp. 6.A.3-1-6.A.3-12.
- [121] A. Sharma and R. Kaler, "Designing of high-speed inter-building connectivity by free space optical link with radio frequency backup," *IET Communications*, vol. 6, 2012, pp. 2568-2574.
- [122] H. A. Willebrand and B. S. Ghuman, "Fiber optics without fiber," *Spectrum, IEEE*, vol. 38, 2001, pp. 40-45.
- [123] T. L. Tidwell, J. T. Gregory, C. H. Chalfant III, F. J. Orlando, and M. Leftwich, "Rapid acquisition, pointing and tracking optical system for free space optical communications," ed: Google Patents, 2012.

Биографија

Бојан Прлинчевић, је рођен 14.07.1976. године у Приштини, Република Србија. Основну школу завршио је са одличним успехом у Српском Бабушу, код Урошевца. Гимназију, природно-математички смер, завршио је, такође са одличним успехом у Урошевцу 1994. године. Наставио је школовање на Електротехничком факултету у Приштини на смеру Енергетика где је одбранио дипломски рад на тему "Регулација фрекфениције у електроенергетском систему" и дипломирао 27.05.2008. године чиме је стекао звање дипломирани инжењер електротехнике.

Године 2012. уписао је последипломске докторске студије. Положио је све испите предвиђене Наставним планом и програмом, са просечном оценом у току студија 9,50 (одличан), одбранио научно истраживачки пројекат са методологијом за област комуникациони системи под називом "Бежични Оптички комуникациони системи-FSO". Кандидат је објавио радове потребне за испуњење услова предвиђених Статутом Универзитета Сингидунум за одбрану Докторске.

Од 2009-2012 године је по избору и уговору о делу радио на Високој техничкој школи струковних студија у Звечану, као Сарадник у настави на предметима Електране и разводна постројења 1, Електране и разводна постројења 2 и Дистрибуција и продаја електричне енергије.

У звање наставника стручне праксе и асистента на Високој Техничкој Школи Струковних Студија у Звечану, изабран је 01.06.2012. године.

Од 01.06.2012 године је у радном односу на одређено време на предмету Стручна пракса и на предметима:

Електране и разводна постројења 1 (Основне струковне студије)

Електране и разводна постројења 2 (Основне струковне студије)

Дистрибуција и продаја електричне енергије (Основне струковне студије)

Експлоатација ЕЕС-а (Основне струковне студије)

Заштита од пожара услед статичког електрицитета и атмосферских пражњења (Основне струковне студије)

Интернет бежичне и сензорске мреже (Специјалистичке струковне студије).

Од новембра 2015 године учесник међународноих ERASMUS+ пројеката DBBT и KLABS.

Бојан Прлинчевић је ожењен, има сина и ћерку и живи у Косовској Митровици, ул. Танаска Рајића 2/4.

У досадашњем раду објавио је следеће научне радове:

1.	B. Princevic , Z. Milivojevic, D. Brodic, " <i>Efficiency of MBD algorithm for filtering watermarked images</i> ", XIX conference IT 2014, 24-28.02 2014, Montenegro 2014, pp. 244-247, ISBN:978-86-85775-15-4	M33
2.	B. Stojcetovic, D. Lazarevic, B. Princevic , D. Stajcic, S. Miletic " <i>Project Managment: Cost, Time and Quality</i> ", 8 th international Quality Conference, 23.May 2014, Kragujevac, Serbia, ISBN:978-86-6335-004-5 pp 201-206	M33
3.	B. Princevic , Z. Milivojevic, D. Brodic, " <i>MIPFD Algorithm for Image Fire Detection</i> ", XLIX international conference ICEST 2014 Nis, 25-27 june 2014, vol.II, Serbia, pp. 373-376, ISBN: 978-86-6125-109-2	M33
4.	B. Princevic , Z. Milivojevic, D. Brodic, " <i>The Efficiency of MDB Algorithm for Elimination of Impulse Noise at Images with Watermark inserted by DCT-SVD Algorithm</i> ", international scientific conference UNITECH 2014, Gabrovo, Vol. II , Bulgaria, ISSN: 1313-230X, pp. 89-94	M33
5.	Z. Milivojevic, B. Princevic , D. Brodic, " <i>Performance of DDS Algorithm for Insertion of Double Watermark</i> ", international scientific conference UNITECH 2014, Gabrovo, Vol. II , Bulgaria, ISSN: 1313-230X, 2014, pp. 122-127	M33
6.	S. Bjelic, P. Spalevic, Z. Bogicevic, B. Princevic , " <i>Generating control signals in the electro-energy networks using passive elements</i> ", Journal of	M51

	Multidisciplinary Engineering Science and Technology-JMEST, Vol. 1, issue 4, nov. 2014, ISSN: 3159-0040	
7.	Z. Milivojevic, Z. Velickovic, B. Prlincevic , " <i>Inharmonicity of Contra Octave of the Piano Steinway B</i> ", XX conference IT 2015, 23-28.02 2015, Montenegro, ISBN:978-86-85775-16-1	M33
8.	M. Ilic, S. Ilic, M. Veinovic, Z. Milivojevic, B. Prlincevic , " <i>Data Mining Techniques For Student Timetable Optimization</i> " International Scientific Conference INFOTEH 2015, 18-20 March 2015, Jahorina, Bosnia nad Hecegovina, ISBN:978-99955-763-6-3	M33
9.	B. Prlincevic , Z. Milivojevic, P. Spalevic, D. Brodic, " <i>Performance of the SD Algorithm for inserting Watermark in Image Based on the Schur Decomposition</i> " International Scientific Conference INFOTEH 2015, 18-20 March 2015, Jahorina, BiH, pp. 640-644, ISBN:978-99955-763-6-3	M33
10.	B. Prlincevic , P. Spalevic, M. Mistic, G. Popovic " <i>The effect of installation On-grid PV systems to improve energy efficiency buildings in region Zvecan</i> " 6 th DQM International Scientific Conference ICDQM 2015, 25-26 Jun 2015, Prijedor, Serbia, ISBN: 978-86-86355-19-5, p.p.309-314	M33
11.	B. Prlincevic , Z. Milivojevic, P. Spalevic, D. Brodic, " <i>Comparative Analysis of the MSD and MSDM Watermarking Algorithms Based on the Schur Decomposition</i> " 50 th International Scientific Conference ICEST 2015, 24-26 June 2015, p.p. 258-261, Bulgaria, ISBN: 978-619-167-182-3.	M33
12.	D. Vučković, M. Petrović, B. Prlinčević " <i>Performance analysis of transmission of television signals through WDM network based on the proposed algorithm</i> ", TTEM Vol. 10, Nom. 3, 2015 , ISSN:1840-1503	M24
13.	D. Vučković, B. Prlinčević , P. Spalević, S. Panić, H. Škrijelj " <i>Performance analysis of FSO transmission of image processing fire detection over Rician fading channels</i> ", Twenty-fourth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK, 21-23 september 2015 Portorož Slovenia, p.p.81-84 , ISSN 1581-4572	M33
14.	B. Prlinčević , B. Milovanović, P. Spalević, S. Panić, Z. Milivojević " <i>Performance analysis of FSO transmission of watermarked image over</i>	M33

	<i>Rician fading channels</i> " TELSIS 2015, october 14-17, Niš, Serbia, p.p. 72-75, ISBN: 978-1-4673-7515-3	
15.	P. Spalević, B. Jakšić, B. Prlinčević , I. Dinić, M. Smilić " <i>Signal moments at the output from the macrodiversity system with three MRC micro diversity receivers in the presence of k-μ fading</i> " TELSIS 2015, october 14-17, Niš, Serbia, p.p. 271-274, ISBN: 978-1-4673-7515-3	M33
16.	M.Mišić, B.Prlinčević , S.Panić, P.Spalević, B.Milocavljević, " <i>Zavisnost performansi prenosa slike požara kroz Rician FSO kanal od indeksa scincilacija</i> ", IT Žabljak, 2016, 29.02-05.03.2016, p.p. 89-92, ISBN: 978-86-85775-18-5	M33
17.	M. Mišić, B. Prlinčević , S. Panić, P. Spalević, A. Amnesi, " <i>Zavisnost performansi prenosa slike požara od atmosferskih prilika u slučaju korišćenja Rician FSO kanala</i> ", Infoteh Jahorina 2016, pp.329-333 16-18.03. 2016. ISBN: 978-99955-763-9-4	M33
18.	B. Prlinčević , S. Panić, P. Spalević, M. Mišić, A. Amnesi, V. Stojanović, " <i>On the Transmission of Double Watermarked Image over Rician FSO Channel</i> ", Elektronika ir Elektrotehnika, ISSN 1392-1215, accepted for publishing. Lithuania 2016.	M23
19.	Mladen Radojković, Aleksandra Kokić-Arsić, Marijola Božović, Bojan Prlinčević ," <i>Circular Holes as Sources of Stress Concentration in the parts of Machines and Devices Used in Mining</i> ",Mining and Metallurgy Engineering, Bor, ISSN:2334-8836, vol. 1, no. 1, pp.81-88 . doi:10.5937/MMEB1601081R	M24
20.	A. Kokić Arsić, M. Mišić, M. Radojković, B. Prlinčević , "Social Aspects of Sustainable Development of Enterprises", 1 st International Conference on Quality of Life, p.p. 83-88, June 2016, ISBN: 978-86-6335-033-5	M33
21.	P. Spalević, B. Prlinčević , S. Panić, M. Veinović, A. Kokić Arsić, " Performance analysis of FSO transmission over M atmospheric turbulence channels", ICEST, Ohrid 2016.	M33