

# PERFORMANCE EVALUATION OF FSO AND UWOC COMMUNICATION SYSTEMS

PRAKRITI SAXENA



DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI  
JANUARY 2021

©Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2021

# PERFORMANCE EVALUATION OF FSO AND UWOC COMMUNICATION SYSTEMS

by

**PRAKRITI SAXENA**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**

Submitted

*in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy*

to the



**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**JANUARY 2021**

# Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**PERFORMANCE EVALUATION OF FSO AND UWOC COMMUNICATION SYSTEMS**" being submitted by **Ms. Prakriti Saxena** to the Department of Electrical Engineering, **Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is the record of the bona-fide research work carried out by her under my supervision. In my opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

(Prof. Manav Bhatnagar)

Professor

Department of Electrical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

# Acknowledgements

I would first like to thank my supervisor **Prof. Manav Bhatnagar** for his expert guidance, constant support, and immense encouragement throughout my Ph.D. program. His invaluable suggestions and insightful discussions made me enjoy my research. Also, his enormous enthusiasm, honest dedication, and the quest for knowledge are truly inspirational. My sincere appreciation also extends to Prof. Brejesh Lall, Prof. Monica Aggarwal, and Prof. Anuj Dhawan for their beneficial feedback and suggestions during my work.

Most importantly, I am indebted to my mother Mrs. Pooja Saxena, my father Prof. Rakesh Saxena, my mother-in-law Prof. Aruna Mathur, my father-in-law Prof. Man Mohan Swaroop Mathur, Prof. Bhim Singh, my husband Dr. Aashish Mathur, and my brother Vardan Saxena for supporting me to do Ph.D., consistently being with me at every phase, and understanding me in every situation. Whatever I have achieved so far, I owe it to their sacrifices.

I acknowledge my colleagues for helping me in various phases of my research work through numerous discussions and valuable inputs. I also thank my friends at IIT Delhi for sharing my joys and sorrows and the amazing time I spent with them. Without their help, I would have faced many difficulties in continuing my Ph.D. program. I feel obligated for having supportive supervisor and friends. I feel blessed for their unconditional care and concern. Finally, I would like to thank the almighty without whom my PhD would have been a distant reality.

Prakriti Saxena

# Abstract

Due to the rapid increase in the demand of high speed access to voice calls, video calls, and internet, there has been a tremendous growth in wireless communication. The demand for wireless communication has led to the congestion on the network and spectrum scarcity, thereby leading to the need to look for alternative communication technologies. One possible alternate is optical wireless communication (OWC). An OWC system uses a beam of light to transmit data in an unguided medium such as atmosphere, water, and vacuum. Line-of-sight (LOS) is a necessity for efficient communication in OWC. The optical carriers generally lie in the infra-red, ultra-violet, and visible range of the electromagnetic spectrum.

When the unguided medium is atmosphere, OWC systems are called as free space optical (FSO) communication systems. A typical FSO system deals with different kinds of noises such as shot noise, thermal noise, and background noise at the receiver (RX) side, which degrade the RX sensitivity. To overcome this issue, an optical pre-amplifier (OPA) is employed which suppresses the effect of thermal noise and background noise at the RX. However, OPA produces amplified spontaneous emission (ASE) noise, which in turn produces beat noises in the electrical domain of the RX. Generally in literature, either the effect of ASE noise is not considered at all or is approximated by Gaussian approximation which is not accurate. The received signal conditioned on a given irradiance in the presence of ASE noise is more accurately modeled using the Chi-square statistics. This dissertation provides an exact mathematical framework of a FSO system under the effect of ASE noise, atmospheric turbulence (AT), and pointing error (PE). Closed-form expressions of bit error rate (BER) for different AT models with and without PE and ASE noise are derived in this dissertation. To provide further

insights into the system design, asymptotic BER expressions for high signal-to-noise ratio (SNR) values under AT and PEs are provided and diversity analysis is performed.

Owing to the high data rate and high speed of communication, FSO communication systems can be used as backhaul in fifth generation (5G) communication systems. Since 5G communication systems deal with very large number of users which are connected to each other, a backhaul system should be able to manage this data traffic and to connect all users to the core network. Non-orthogonal multiple access (NOMA) is a technique which allows multiple users to transmit in the same time and frequency band. Using FSO with NOMA makes a competent backhaul technique. This dissertation provides a new beamforming based uplink NOMA technique for a  $2 \times 1$  multiple-input-single-output (MISO) FSO communication system for negative exponential (NE) AT with error-free feedback under the influence of successive interference cancellation (SIC) error. Closed-form average BER (ABER) expressions are derived for this system. An upper bound on the asymptotic ABER expression is also derived. The performance of this technique is further compared with 4-ary pulse amplitude modulation (PAM) single-input-single-output (SISO) system and an FSO NOMA system without feedback. A comparison of the proposed scheme for  $2 \times 1$ ,  $3 \times 1$ , and  $4 \times 1$  systems is also provided in this dissertation.

After studying the performance of OWC systems in atmosphere, this dissertation further studies the performance of OWC systems in underwater scenario. Due to the harsh and turbulent nature of underwater channel, underwater optical wireless communication (UWOC) can work efficiently only in the blue-green region window. Even in this region, optical beam suffers with a huge amount of scattering and absorption. Moreover, the transmitter (TX) and RX in turbulent water are always in a state of motion which further leads to misalignment loss. Beam spread function (BSF) is an equation which models both the effect of attenuation and misalignment loss in a single equation. The existing form of BSF function in literature includes multiple integrals which makes it difficult to use for mathematical analysis. In this dissertation, BSF equation is solved in the form of a simple series based expression. Further, several closed-form approximations of the derived BSF expression are evaluated. Many

insights regarding the nature of BSF equation are also provided on the basis of these approximations. Moreover, to further demonstrate the performance of UWOC systems, closed-form expressions of ABER, capacity, and outage probability are also obtained using BSF equation under the effect of oceanic turbulence.

## सार

वाँयस कॉल, वीडियो के लिए उच्च गति पहुंच की मांग में तेजी से वृद्धि के कारण कॉल, इंटरनेट और वायरलेस संचार में जबरदस्त वृद्धि हुई है। वायरलेस संचार की मांग के कारण नेटवर्क पर भीड़ बढ़ गई है और स्पेक्ट्रम की कमी, के कारण वैकल्पिक संचार प्रौद्योगिकियों की तलाश करने की आवश्यकता है। एक संभावित विकल्प ऑप्टिकल वायरलेस संचार (ओ.डब्ल्यू.सी) है। ओ.डब्ल्यू.सी प्रणाली एक अप्रकाशित माध्यम जैसे वातावरण, पानी और वैक्यूम में डेटा संचारित करने के लिए प्रकाश की किरण का उपयोग करती है। कुशल ओ.डब्ल्यू.सी संचार के लिए लाइन-ऑफ-विज़न (एल.ओ.एस) एक आवश्यकता है। ऑप्टिकल वाहक आमतौर पर विद्युत चुम्बकीय स्पेक्ट्रम के इन्फ्रा-रेड, अल्ट्रा-वायलेट, दृश्यमान सीमा में निहित होते हैं।

जब बिना मार्गदर्शन माध्यम वातावरण होता है, ओ.डब्ल्यू.सी प्रणाली को मुक्त स्थान प्रकाशिकी (एफ.एस. ओ) कहा जाता है। रिसीवर (आर.एक्स) पर एक विशिष्ट एफ.एस. ओ प्रणाली विभिन्न प्रकारों के शोर से संबंधित है जैसे, शॉट शोर, थर्मल शोर, और पृष्ठभूमि शोर जो आर.एक्स संवेदनशीलता को कम कर देता है। इस समस्या को दूर करने के लिए, एक ऑप्टिकल प्री-एम्पलीफायर (ओ. पी. ए) कार्यरत है जो थर्मल शोर और पृष्ठभूमि शोर के प्रभाव को आर.एक्स पर दबाता है। हालांकि, ओ. पी. ए प्रवर्धित सहज उत्सर्जन (ए. एस. ई) शोर पैदा करता है, जो बदले में, आरएक्स के विद्युत क्षेत्र में बीट शोर पैदा करता है। आम तौर पर साहित्य में, या तो ए. एस. ई शोर के प्रभाव को बिल्कुल भी नहीं माना जाता है या गौसियन सन्निकटन द्वारा अनुमानित किया जाता है जो सटीक नहीं है। ए.एस.ई शोर की उपस्थिति में दिए गए विकिरण पर वातानुकूलित संकेत को ची-स्कवायर का उपयोग करके अधिक सटीक रूप से मॉडल किया गया है। यह शोध ए.एस.ई शोर, वायुमंडलीय अशांति (ए.टी) के प्रभाव के तहत एक एफ.एस.ओ प्रणाली का सटीक गणितीय ढांचा प्रदान करता है, और त्रुटि को इंगित करता है। अलग-अलग ए.टी मॉडल के लिए बिट त्रुटि दर (बी.ई.आर) के बंद-प्रपत्र अभिव्यक्ति और पीई और ए.एस.ई शोर के बिना इस शोध प्रबंध में व्युत्पन्न हैं। सिस्टम डिजाइन में और अधिक जानकारी प्रदान करने के लिए, उच्च सिग्नल-टू-शोर के लिए असममित बी.ई.आर अभिव्यक्तियाँ

ए.टी और पी.ई के तहत अनुपात (एस.एन.आर) मान प्रदान किए जाते हैं और विविधता विश्लेषण किया गया है।

उच्च डेटा दर और संचार की उच्च गति के कारण, एफ.एस.ओ संचार पांचवीं पीढ़ी (5G) संचार प्रणालियों में बैकहॉल सिस्टम के रूप में उपयोग किया जा सकता है। क्यूकी 5G संचार प्रणाली बहुत बड़ी संख्या में उपयोगकर्ताओं के साथ काम करती है जो की एक दूसरे से जुड़े हुए हैं इसलिए बैकहॉल सिस्टम इस डेटा ट्रैफिक को प्रबंधित करने में सक्षम होना चाहिए और सभी उपयोगकर्ताओं को कोर नेटवर्क से कनेक्ट करना चाहिए। नॉन-ऑर्थोगोनल मल्टीपल एक्सेस (नोमा) एक तकनीक है जो एक ही समय और आवृत्ति बैंड में कई उपयोगकर्ताओं को संचारित करने की अनुमति देती है। नोमा के साथ एफ. एस.ओ का उपयोग एक सक्षम बैकहॉल तकनीक बनाता है। यह शोध प्रबंध 2X1 मल्टीपल-इनपुट एकल-आउटपुट (मीसो) के लिए एक नई बीमफॉर्मिंग आधारित अपलिक नोमा तकनीक प्रदान करता है-निगेटिव घातीय (एन. ई) ए.टी के लिए एफ. एस.ओ संचार प्रणाली क्रमिक हस्तक्षेप रद्दीकरण (एस.आई.सी) के प्रभाव में त्रुटि मुक्त प्रतिक्रिया बताया गया है। इस सिस्टम के लिए बंद-फॉर्म औसत बी.ई.आर (ए .बी.ई.आर) अभिव्यक्तियाँ हैं। एक स्पर्शोन्मुख ए .बी.ई.आर अभिव्यक्ति पर ऊपरी सीमा भी व्युत्पन्न है। प्रदर्शन इस तकनीक को 4-एरी पल्स एम्प्लीट्यूड मॉड्यूलेशन (पी.ए. एम) के साथ तुलना तथा एकल-इनपुट-एकल-आउटपुट (सी. सौ) प्रणाली और प्रतिक्रिया के बिना एक एफ. एस. ओ नोमा प्रणाली के साथ तुलना की गई है। 2X1, 3X1, और 4X1 सिस्टम के लिए प्रस्तावित योजना की तुलना भी इस शोध प्रबंध में की गई है।

वातावरण में ओ.डब्ल्यू.सी प्रणालियों के प्रदर्शन का अध्ययन करने के बाद, यह शोध प्रबंध पानी के नीचे के परिदृश्य में ओ.डब्ल्यू.सी सिस्टम के प्रदर्शन का आगे का अध्ययन करता है। पानी के भीतर चैनल की कठोर और अशांत प्रकृति कि वजह से, पानी के नीचे ऑप्टिकल वायरलेस संचार (यू. डब्ल्यू. ओ. सी) केवल नीले-हरे क्षेत्र की खिड़की में कुशलता से काम कर सकता है। यहाँ तक की इस क्षेत्र में भी, ऑप्टिकल किरण बिखरने और अवशोषण की एक बड़ी मात्रा के साथ ग्रस्त है। इसके अलावा, अशांत पानी में ट्रांसमीटर और हमेशा एक लाइन में नहीं होते हैं जो आगे मिसलिग्न्मेंट हानि की ओर जाता है। बीम प्रसार समारोह (बी.एस.एफ) एक समीकरण है जो क्षीणन और मिसलिग्न्मेंट लॉस के प्रभाव को एकल समीकरण

में मॉडल करता है । साहित्य में बी.एस.एफ फंक्शन के मौजूदा रूप में कई इंटीग्रल शामिल हैं जो गणितीय विश्लेषण के लिए उपयोग करना मुश्किल बनाता है। इस शोध प्रबंध में, बी.एस.एफ समीकरण को सरल श्रृंखला आधारित अभिव्यक्ति के रूप में हल किया गया है। इसके अलावा, व्युत्पन्न बी.एस.एफ अभिव्यक्ति के कई बंद-रूप अनुमानों का मूल्यांकन किया गया है। बी.एस.एफ समीकरण सन्निकटन की प्रकृति के बारे में कई जानकारीयां भी इनके आधार पर दी गई हैं। इसके अलावा, यू.डब्ल्यू.ओ.सी प्रणालियों के प्रदर्शन को आगे बढ़ाने के लिए, ए.बी.ई.आर, क्षमता और आउटपुट प्रायिकता के बंद-रूप भाव भी प्राप्त किया गया है।

# Table of Contents

<b>Certificate</b>	<b>i</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>List of Figures</b>	<b>xi</b>
<b>List of Tables</b>	<b>xii</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>2</b>
1.1 Free-Space Optical Communication Systems . . . . .	3
1.1.1 Amplified Spontaneous Emission Noise . . . . .	6
1.1.2 NOMA Technique in FSO . . . . .	7
1.2 Underwater Wireless Optical Communication Systems . . . . .	8
1.2.1 Advantages and Challenges of UWOC . . . . .	8
1.2.2 Modeling of Geometric Misalignment for UWOC . . . . .	10
1.3 Motivation . . . . .	11
1.4 Key Contributions . . . . .	12
1.5 Organization of Thesis . . . . .	13
<b>2 Performance Analysis of Optically Pre-amplified FSO system with ASE Noise</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction . . . . .	15

2.1.1	System Description . . . . .	16
2.1.2	Characterization of the Decision Variable . . . . .	18
2.2	Performance under Different AT Regimes and ASE Noise . . . . .	18
2.2.1	AT Model . . . . .	19
2.2.2	Computation of BER . . . . .	21
2.2.3	Weak Turbulence . . . . .	22
2.2.4	Moderate to Strong Turbulence . . . . .	24
2.2.5	Saturation Turbulence . . . . .	26
2.3	Performance Analysis under the Combined Effect of AT, PE, and ASE Noise . . . . .	28
2.3.1	Channel Model under the Combined Effect of Turbulence and PE	28
2.3.2	Computation of BER . . . . .	29
2.3.3	Weak Turbulence . . . . .	30
2.3.4	Moderate to Strong Turbulence . . . . .	32
2.3.5	Strong Turbulence . . . . .	35
2.3.6	Convergence Test . . . . .	37
2.4	Performance Analysis under Generalised Turbulence Model with PE . .	38
2.4.1	Computation of BER . . . . .	40
2.5	Numerical Results . . . . .	43
2.6	Summary . . . . .	48

**3 Uplink Non-Orthogonal Multiple Access Technique for FSO Commu-  
nication System** **50**

3.1	Introduction . . . . .	50
3.1.1	Preliminaries . . . . .	51
3.1.2	Decoding of the Received Symbols . . . . .	53
3.2	Computation of Performance Metrics . . . . .	56
3.2.1	Computation of Instantaneous BER . . . . .	56
3.2.2	Computation of ABER . . . . .	58
3.2.3	Diversity and Coding Gain Analysis . . . . .	63

3.3	Numerical Results . . . . .	64
3.4	Numerical Results over GG and LN Fading Channels . . . . .	69
3.5	Summary . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Beam Spread Function in Underwater Wireless Optical Communication</b>	<b>72</b>
4.1	Introduction . . . . .	72
4.1.1	Motivation . . . . .	73
4.2	BSF Preliminaries . . . . .	74
4.2.1	Motivation for the Simplified Form of BSF . . . . .	77
4.3	Computation of BSF . . . . .	78
4.3.1	Special Cases . . . . .	83
4.4	Computation Of Performance Metrics . . . . .	86
4.4.1	Turbulence in UWOC . . . . .	86
4.4.2	Calculation of SNR . . . . .	86
4.4.3	BER Calculation . . . . .	87
4.4.4	Computation of Capacity . . . . .	88
4.4.5	Outage Probability Calculation . . . . .	88
4.5	Numerical Results . . . . .	90
4.6	Summary . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Conclusions and Future Scope</b>	<b>99</b>
5.1	Conclusions . . . . .	99
5.2	Future Scope of Work . . . . .	101
	<b>Bibliography</b>	<b>102</b>
<b>A</b>	<b>Proof of Eq. (2.49)</b>	<b>113</b>
<b>B</b>	<b>Proof of Eq. (3.13)</b>	<b>115</b>
<b>C</b>	<b>Proof of Eq. (3.18)</b>	<b>117</b>

<b>D Convergence test of infinite series in Eq. (4.28)</b>	<b>120</b>
<b>Publications</b>	<b>122</b>
<b>Technical Biography of Author</b>	<b>124</b>

# List of Figures

2.1	Receiver block diagram. . . . .	17
2.2	Performance of optically pre-amplified FSO system for LN turbulence (a) without the effect of PE and (b) with the effect of PE. . . . .	43
2.3	Performance of optically pre-amplified FSO system for GG turbulence (a) without the effect of PE and (b) with the effect of PE. . . . .	44
2.4	Performance of optically pre-amplified FSO system for NE turbulence (a) without the effect of PE and (b) with the effect of PE. . . . .	46
2.5	Comparison of BER under GG turbulence for different values of $a$ and $b$ with and without pre-amplifier. . . . .	47
2.6	Comparison of simulated ( $\circ$ ) and analytical ( $-$ ) BER under $\mathcal{M}$ -distributed turbulence and ASE noise for (a) different values of $\zeta$ and fixed $\alpha$ and $\beta$ and (b) different values of $\alpha$ and $\beta$ and fixed $\zeta = 1.23$ . . . . .	48
3.1	System model for FSO-NOMA system with one-bit beamforming scheme	52
3.2	Flow chart of the proposed scheme . . . . .	54
3.3	ABER versus $w_1$ plots of the one-bit feedback based beamforming FSO- NOMA scheme over NE fading channel. . . . .	65
3.4	BER versus SNR plot of the proposed system for (a) different values of $I_0$ with fixed beamforming weights and for (b) different beamforming weights with fixed $I_0$ . . . . .	66
3.5	Comparison of one-bit-feedback based beamforming FSO-NOMA scheme with 4-PAM SISO and FSO-NOMA without feedback and beamforming.	67
3.6	Comparison of $N \times 1$ MISO FSO-NOMA system, $N = 2, 3, 4$ . . . . .	68

3.7	BER versus SNR plot of the proposed system with (a) GG fading and (b) LN fading. . . . .	69
3.8	Comparison of different fading channels for the proposed scheme . . . .	70
4.1	Geometry to define inherent optical properties. . . . .	75
4.2	Geometry to compute BSF function . . . . .	76
4.3	Comparison of BSF plotted by (4.1) and (4.28) w.r.t. RX position $\delta$ for different values of attenuation coefficient. . . . .	90
4.4	Comparison of analytical BSF w.r.t. link length $\zeta_{rec}$ for different values of attenuation coefficient. . . . .	91
4.5	Comparison of (a) high asymptote approximation and (b) low asymptote approximation for different values of $\delta$ . . . . .	92
4.6	SNR plot for for varying values of $\delta$ and $\zeta_{rec}$ . . . . .	93
4.7	Comparison of analytical BER for different water types. . . . .	94
4.8	Comparison of analytical average channel capacity for different water types. . . . .	95
4.9	Comparison of outage probability of the considered system for (a) different water types and (b) different values of $\gamma_{th}$ for turbid water. . . .	96
4.10	Convergence of $S(\nu, \zeta_{rec})$ for different values of $\zeta_{rec}$ . . . . .	97

# List of Tables

2.1	Parameter values used for simulations . . . . .	42
3.1	List of mathematical notations . . . . .	55
4.1	Values of absorption, scattering and attenuation constant for different water types taken at blue/green wavelength [31] . . . . .	89
4.2	SNR loss for turbid harbour water with respect to other water types . . . . .	94
4.3	Values of $m_u$ for different values of $\zeta_{rec}$ . . . . .	98

# Abbreviations

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
ABER	Average Bit Error Rate
AOP	Apparent Optical Properties
ASE	Amplified Spontaneous Emission
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AT	Atmospheric Turbulence
BER	Bit Error Rate
BSF	Beam Spread Function
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CSI	Channel State Information
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FSO	Free Space Optical
GG	Gamma-Gamma
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
HG	Henye-Greenstein
IC	Interference Cancellation
i.i.d.	independent and identically distributed

IM/DD	Intensity-Modulation/Direct-Detection
IOP	Inherent Optical Properties
LN	Log-Normal
$\mathcal{M}$	Malaga
MA	Multiple Access
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
MLD	Maximum Likelihood Detector
mmw	millimeter wave
NE	Negative Exponential
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
NU	Near User
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OOK	On-Off Keying
OPA	Optical Pre-Amplifier
OWC	Optical Wireless Communication
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PDF	Probability Density Function
PE	Pointing Error
RF	Radio-Frequency
RV	Random Variable
RX	Receiver
SAA	Small Angle Approximation
SIC	Successive Interference Cancellation
SIM	Subcarrier Intensity Modulation
SISO	Single-Input-Single-Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPF	Scattering Phase Function
TDMA	Time Division multiple Access
TX	Transmitter

UWOC Underwater Wireless Optical Communication  
VSF Volume Scattering Function