

**BUFFER-AIDED COOPERATIVE RELAYING  
SCHEMES FOR RF AND FSO SYSTEMS**

**ASHISH KANT SHUKLA**



**BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION  
TECHNOLOGY AND MANAGEMENT  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI  
DECEMBER 2023**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2023

# BUFFER-AIDED COOPERATIVE RELAYING SCHEMES FOR RF AND FSO SYSTEMS

by

ASHISH KANT SHUKLA

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION  
TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Submitted

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

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI  
DECEMBER 2023

# Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**BUFFER-AIDED COOPERATIVE RELAYING SCHEMES FOR RF AND FSO SYSTEMS**" being submitted by **Mr. Ashish Kant Shukla** to the Bharti School of Telecommunication Technology and Management, **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 him 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.

Date:  
New Delhi

(Prof. Manav Bhatnagar)  
Professor  
Department of Electrical Engineering  
Indian Institute of Technology Delhi

# Acknowledgements

First and foremost, I would like to thank my supervisor, Prof. Manav Bhatnagar, for his immense encouragement, expert guidance, and unwavering support throughout my Ph.D. program. His invaluable suggestions and insightful discussions made my research more enjoyable. Also, his honest dedication, boundless energy, and quest for knowledge are truly inspiring. My heartfelt gratitude also goes to Prof. Brejesh Lall, Prof. Seshan Srirangarajan, and Prof. Mahesh P. Abegaonkar for their valuable feedback and suggestions throughout my work.

Most importantly, I am grateful to my mother, Mrs. Usha Shukla, my father, Ravi Kant Shukla, my brother, Dr. Piyush Kant Shukla, my M Tech mentor, Dr. Suneel Yadav, my senior, Dr. Anshul Pandey, and my friends, Dr. Pritesh Kumar Yadav, Rajneesh Kumar Saini, and Anand Jee, for encouraging me to pursue my Ph.D. I owe everything I have achieved so far to them.

I want to thank my colleagues for their continuous support throughout my Ph.D., which involved valuable input and insightful discussions. I also like to thank my IIT friends for being there for me through the good and bad times. Without their support, I would have faced many difficulties finishing my Ph.D. program.

Ashish Kant Shukla

# Abstract

Cooperative relaying has gained significant interest due to its ability to increase the network coverage and reliability of wireless communication systems. In conventional cooperative networks, the source node communicates with the destination node via relay node(s) by following a pre-fixed schedule of transmitting or receiving data packets, irrespective of channel qualities. Due to this pre-fixed scheduling of data transmission/reception, at any given time instant, we might not be using the best available link (source-relay ( $S$ - $R$ ) or relay-destination ( $R$ - $D$ )), which might lead to performance degradation. Because of this constraint, buffer-aided relaying has gained significant traction as it helps us to schedule the data packets over S-R or R-D links based on channel quality and buffer status. It helps with achieving a higher diversity order and throughput. Motivated by this, in this thesis, we present a detailed analysis of the buffer-aided relaying for different setups, like differential modulation (DM), double differential modulation (DDM), and free space optical (FSO) networks.

In the beginning, we propose a buffer-aided cooperative relaying for multi-relay scenario using the DM technique. A decode-and-forward (DF) relaying setup is considered, where each relay node consists of a finite-size buffer. All the nodes apply DM for the transmission or the reception of the data; hence channel state information (CSI) is not required at any of the receiving nodes for decoding the transmitted symbols. A priority-based max-link approach is adopted to select the best available link, and then the state transition matrix ( $\mathbf{A}$ ) of the system is obtained by using Markov chain (MC) approach. We then obtain analytical expressions of average bit error rate (ABER) and outage probability (OP). Numerical results demonstrate that the considered setup outperforms the non-buffer-aided (NBA) differential DF and amplify-and-forward (AF)

systems. Also, in comparison to coherent counterparts, the proposed configuration suffers negligible signal-to-noise-ratio (SNR) penalty.

DM approach assumes that the channel remains static for at least two consecutive intervals. However, most practical wireless systems consist of mobile nodes, and due to the relative movement of these nodes, the problem of carrier frequency offset (CFO) arises. Due to this, the channel state does not remain constant over two consecutive time intervals, and hence DM suffers huge performance loss; for such systems, DDM comes in handy as it avoids the need for CSI and CFO. Therefore, we analyzed a multi-relay buffer-aided system using DD encoding and decoding. Similar to DM-based scheme, the link selection is performed using the priority-based max link approach, and then the steady-state probability (SSP) of the system is developed using the MC approach, and then the expressions of the OP and ABER are derived. The obtained numerical results are compared to those of the coherent buffer-aided system, and it is observed that the proposed scheme narrows down the existing SNR gap of 6 dB between NBA coherent and DDM systems.

In the next work, we focus on FSO networks, which despite having several advantages, find limited usage because of the effects of atmospheric turbulence (AT). Also, in two-hop FSO cooperative networks, both the hops suffer from AT independently, and even if one of the two hops observes high AT, the end-to-end communication gets disrupted. Therefore, we introduce buffer-aided relaying for the FSO systems to overcome this limitation. The system is assumed to suffer from path loss and AT-induced fading, and the performance is evaluated for weak and high AT regimes. Similar to DM and DDM-based analysis of buffer-aided systems, the MC approach is used to develop the matrix  $\mathbf{A}$ , and the expressions of OP and ABER are obtained with the help of that. The average packet delay (APD) of the system is also evaluated with the help of OP. Numerical results demonstrate that the proposed setup outperforms its NBA counterparts.

FSO communication networks offer limited wavelength and large field-of-view (FoV). Hence, FSO networks are susceptible to jamming; to overcome this, we propose a buffer-aided relaying setup for an FSO system suffering from jamming attacks. We

employ a buffer at the relay node, and data transmission or reception occurs through the designated max-link. The system's performance is evaluated using OP and ABER. Numerical results demonstrate that the considered buffer-aided setup outperforms the NBA cooperative FSO systems affected by jamming.

## सार

नेटवर्क कवरेज और वायरलेस संचार प्रणालियों की विश्वसनीयता बढ़ाने की क्षमता के कारण सहकारी रिलेइंग ने महत्वपूर्ण रुचि प्राप्त की है। पारंपरिक सहकारी नेटवर्क में, स्रोत नोड, चैनल गुणवत्ता के बावजूद, डेटा पैकेट संचारित करने या प्राप्त करने के पूर्व-निर्धारित शेड्यूल का पालन करके रिले नोड के माध्यम से गंतव्य नोड के साथ संचार करता है। डेटा ट्रांसमिशन/रिसेप्शन की इस पूर्व-निर्धारित शेड्यूलिंग के कारण, किसी भी समय तत्काल, हम सर्वोत्तम उपलब्ध लिंक (स्रोत-रिले (एस-आर) या रिले-गंतव्य (आर-डी)) का उपयोग नहीं कर रहे होंगे, जिससे प्रदर्शन में गिरावट आ सकती है। इस बाधा के कारण, बफर-एडेड रिलेइंग ने महत्वपूर्ण कर्षण प्राप्त किया है क्योंकि यह हमें चैनल गुणवत्ता और बफर स्थिति के आधार पर एस-आर या आर-डी लिंक पर डेटा पैकेट शेड्यूल करने में मदद करता है। यह उच्च विविधता क्रम और थ्रूपुट प्राप्त करने में मदद करता है। इससे प्रेरित होकर, इस थीसिस में, हम विभिन्न सेटअपों, जैसे डिफरेंशियल मॉड्यूलेशन (डीएम), डबल डिफरेंशियल मॉड्यूलेशन (डीडीएम), और फ्री स्पेस ऑप्टिकल (एफएसओ) नेटवर्क के लिए बफर-एडेड रिलेइंग का विस्तृत विश्लेषण प्रस्तुत करते हैं।

शुरुआत में, हम डीएम तकनीक का उपयोग करके मल्टी-रिले परिदृश्य के लिए बफर-सहायता प्राप्त सहकारी रिले का प्रस्ताव करते हैं। एक डिकोड-एंड-फॉरवर्ड (डीएफ) रिलेइंग सेटअप पर विचार किया जाता है, जहां प्रत्येक रिले नोड में एक सीमित आकार का बफर होता है। सभी नोड डेटा के प्रसारण या रिसेप्शन के लिए डीएम लागू करते हैं; इसलिए प्रेषित प्रतीकों को डिकोड करने के लिए किसी भी प्राप्तकर्ता नोड पर चैनल स्थिति सूचना (सीएसआई) की आवश्यकता नहीं है। सर्वोत्तम उपलब्ध लिंक का चयन करने के लिए प्राथमिकता-आधारित अधिकतम-लिंक दृष्टिकोण अपनाया जाता है, और फिर मार्कोव श्रृंखला (एमसी) दृष्टिकोण का उपयोग करके सिस्टम का राज्य संक्रमण मैट्रिक्स (A) प्राप्त किया जाता है। फिर हम औसत बिट

त्रुटि दर (एबीईआर) और आउटेज संभावना (ओपी) की विश्लेषणात्मक अभिव्यक्ति प्राप्त करते हैं। संख्यात्मक परिणाम दर्शाते हैं कि माना गया सेटअप नॉन-बफर-एडेड (एनबीए) डिफरेंशियल डीएफ और एम्प्लीफाई-एंड-फॉरवर्ड (एएफ) सिस्टम से बेहतर प्रदर्शन करता है। इसके अलावा, सुसंगत समकक्षों की तुलना में, प्रस्तावित कॉन्फिगरेशन को नगण्य सिग्नल-टू-शोर-अनुपात (एसएनआर) दंड का सामना करना पड़ता है।

डीएम दृष्टिकोण मानता है कि चैनल कम से कम दो लगातार अंतरालों तक स्थिर रहता है। हालाँकि, अधिकांश व्यावहारिक वायरलेस सिस्टम में मोबाइल नोइस होते हैं, और सापेक्ष के कारण इन नोइस के हिलने से कैरियर फ्रीक्वेंसी ऑफसेट (सीएफओ) की समस्या उत्पन्न होती है। इसके कारण, चैनल की स्थिति लगातार दो समय अंतरालों पर स्थिर नहीं रहती है, और इसलिए डीएम को भारी प्रदर्शन हानि का सामना करना पड़ता है; ऐसी प्रणालियों के लिए, डीडीएम काम आता है क्योंकि यह सीएसआई और सीएफओ की आवश्यकता से बचाता है। इसलिए, हमने डीडी एन्कोडिंग और डिकोडिंग का उपयोग करके एक मल्टी-रिले बफर-एडेड सिस्टम का विश्लेषण किया। डीएम-आधारित योजना के समान, लिंक चयन प्राथमिकता-आधारित अधिकतम लिंक दृष्टिकोण का उपयोग करके किया जाता है, और फिर सिस्टम की स्थिर-स्थिति संभावना (एसएसपी) एमसी दृष्टिकोण का उपयोग करके विकसित की जाती है, फिर ओपी और एबीईआर की अभिव्यक्तियां निकाली गई हैं। प्राप्त संख्यात्मक परिणामों की तुलना सुसंगत बफर-सहायता प्राप्त प्रणाली से की जाती है, और यह देखा गया है कि प्रस्तावित योजना एनबीए सुसंगत और डीडीएम प्रणालियों के बीच 6 डीबी के मौजूदा एसएनआर अंतर को कम करती है।

अगले काम में, हम एफएसओ नेटवर्क पर ध्यान केंद्रित करते हैं, जो कई फायदे होने के बावजूद, वायुमंडलीय अशांति (एटी) के प्रभावों के कारण सीमित उपयोग पाते हैं। इसके अलावा, दो-हॉप एफएसओ सहकारी नेटवर्क में, दोनों हॉप स्वतंत्र रूप से

एटी से पीड़ित होते हैं, और यहां तक कि अगर दो हॉप्स में से एक उच्च एटी देखता है, तो एंड-टू-एंड संचार बाधित हो जाता है। इसलिए, हम इस सीमा को पार करने के लिए एफएसओ सिस्टम के लिए बफर-एडेड रिलेइंग की शुरुआत करते हैं। माना जाता है कि सिस्टम पथ हानि और एटी-प्रेरित फ़ेडिंग से ग्रस्त है, और प्रदर्शन का मूल्यांकन कमजोर और उच्च एटी शासन के लिए किया जाता है। बफर-एडेड सिस्टम के डीएम और डीडीएम-आधारित विश्लेषण के समान, मैट्रिक्स A विकसित करने के लिए एमसी दृष्टिकोण का उपयोग किया जाता है, और इसकी मदद से ओपी और एबीईआर की अभिव्यक्ति प्राप्त की जाती है। ओपी की मदद से सिस्टम के औसत पैकेट विलंब (एपीडी) का भी मूल्यांकन किया जाता है। संख्यात्मक परिणाम दर्शाते हैं कि प्रस्तावित सेटअप अपने एनबीए समकक्षों से बेहतर प्रदर्शन करता है।

एफएसओ संचार नेटवर्क सीमित तरंग दैर्घ्य और बड़े क्षेत्र-दृश्य (एफओवी) प्रदान करते हैं। इसलिए, एफएसओ नेटवर्क जाम होने के प्रति संवेदनशील हैं; इसे दूर करने के लिए, हम जैमिंग हमलों से पीड़ित एफएसओ सिस्टम के लिए बफर-एडेड रिलेइंग सेटअप का प्रस्ताव करते हैं। हम रिले नोड पर एक बफर नियोजित करते हैं, और डेटा ट्रांसमिशन या रिसेप्शन निर्दिष्ट मैक्स-लिंक के माध्यम से होता है। सिस्टम के प्रदर्शन का मूल्यांकन ओपी और एबीईआर का उपयोग करके किया जाता है। संख्यात्मक परिणाम दर्शाते हैं कि माना गया बफर-एडेड सेटअप जैमिंग से प्रभावित एनबीए सहकारी एफएसओ सिस्टम से बेहतर प्रदर्शन करता 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>Notations</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Cooperative Relaying System . . . . .	2
1.2 Buffer-Aided Cooperative Relaying System . . . . .	4
1.2.1 Multi-Relay Buffer-Aided Cooperative System . . . . .	5
1.2.2 State Transition Matrix . . . . .	6
1.2.3 Average Packet Delay . . . . .	7
1.3 Differential Modulation . . . . .	8
1.4 Double Differential Modulation . . . . .	8
1.5 Free Space Optical Communication . . . . .	9
1.5.1 Cooperative FSO Networks . . . . .	13
1.6 Jamming Attacks in FSO networks . . . . .	14
1.7 Literature Survey: . . . . .	15

1.7.1	Cooperative Relaying Network . . . . .	15
1.7.2	Buffer-Aided Cooperative Relaying . . . . .	15
1.7.3	Differential Modulation Based Relaying . . . . .	16
1.7.4	Double Differential Modulation Based Relaying . . . . .	17
1.7.5	FSO Cooperative Relaying Networks . . . . .	17
1.7.6	Jamming Attacks in FSO Cooperative Networks . . . . .	19
1.8	Motivation . . . . .	19
1.9	Key Contributions . . . . .	21
1.10	Outline of Thesis . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Differential Modulation-Based Buffer-Aided Cooperative Relaying</b>	<b>25</b>
2.1	Introduction . . . . .	25
2.2	System Model for Buffer-Aided Differential Relaying . . . . .	26
2.2.1	Differential Modulation Based Relaying . . . . .	28
2.2.2	Proposed Link Selection Scheme . . . . .	30
2.3	Performance Analysis . . . . .	31
2.3.1	Steady State Probability . . . . .	31
2.3.2	ABER Analysis . . . . .	34
2.3.3	Formation of <b>A</b> and <b>E</b> matrices . . . . .	37
2.3.4	Coding Gain Calculations . . . . .	38
2.4	Numerical Results . . . . .	41
2.5	Summary . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Priority-Based Max Link Selection for Double Differential Modulation Based Buffer-Aided Relaying with Offsets</b>	<b>48</b>
3.1	Introduction . . . . .	48
3.2	DDM-Based Buffer-Aided Relaying . . . . .	49
3.2.1	Double Differential Modulation . . . . .	51
3.2.2	Proposed Transmission-Reception Protocol . . . . .	53
3.3	Performance Analysis . . . . .	54
3.3.1	Steady State Probability . . . . .	55

3.3.2	ABER Analysis . . . . .	57
3.3.3	Development of <b>A</b> and <b>E</b> matrices . . . . .	61
3.3.4	Asymptotic ABER Analysis . . . . .	62
3.4	Numerical Results . . . . .	65
3.5	Summary . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Buffer-Aided Max-Link Relaying for Free Space Optical Communication with Delay Constraints</b>	<b>71</b>
4.1	Introduction . . . . .	71
4.2	System Model For Buffer-Aided FSO Cooperative Network . . . . .	72
4.2.1	FSO Channel model . . . . .	74
4.3	Performance Analysis . . . . .	77
4.3.1	Outage Analysis . . . . .	77
4.3.2	ABER Analysis . . . . .	86
4.3.3	Average Packet Delay Analysis . . . . .	89
4.4	Numerical Results . . . . .	90
4.5	Summary . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Mitigating Jamming in FSO Cooperative Networks: A Buffer-Aided Relaying Approach</b>	<b>99</b>
5.1	Introduction . . . . .	99
5.2	System Model For Buffer-Aided FSO Cooperative Network Affected By Jamming . . . . .	100
5.3	Performance Analysis . . . . .	103
5.3.1	Outage Analysis . . . . .	103
5.3.2	Asymptotic Outage Probability . . . . .	105
5.3.3	ABER Analysis . . . . .	106
5.4	Numerical Results . . . . .	109
5.5	Summary . . . . .	113

<b>6</b>	<b>Conclusions and Future Scope</b>	<b>114</b>
6.1	Conclusions . . . . .	114
6.2	Future Scope of Work . . . . .	116
	<b>Bibliography</b>	<b>117</b>
<b>A</b>	<b>Derivations of <math>\bar{P}_{e_{RD}}^1(m, n), \bar{P}_{e_{RD}}^2(m, n), \bar{P}_{e_{RD}}^3(m, n)</math> and <math>\bar{P}_{e_{RD}}^4(m, n)</math> for DM- Based Buffer-Aided System</b>	<b>128</b>
<b>B</b>	<b>Derivations of <math>\bar{P}_{e_{RD}}^1(m, n), \bar{P}_{e_{RD}}^2(m, n), \bar{P}_{e_{RD}}^3(m, n)</math> and <math>\bar{P}_{e_{RD}}^4(m, n)</math> for DDM- Based Buffer-Aided System</b>	<b>132</b>
	<b>Publications</b>	<b>136</b>
	<b>Technical Biography of Author</b>	<b>138</b>

# List of Figures

1.1	A simple cooperative relaying setup. . . . .	2
1.2	Multi-relay cooperative relaying setup with $R_k^*$ being selected relay. . .	3
1.3	A single relay buffer-aided cooperative system. . . . .	4
1.4	Multi-relay buffer-aided system. . . . .	5
1.5	A simple FSO cooperative system. . . . .	13
2.1	Buffer-aided cooperative network with differential modulation. . . . .	26
2.2	ABER versus $P_T$ plots for proposed DM buffer-aided system. . . . .	41
2.3	OP against $P_T$ for considered setup. . . . .	42
2.4	ABER comparison between proposed and existing DM protocols. . . . .	43
2.5	ABER versus $L$ for DM-based buffer-aided system. . . . .	44
2.6	OP against $L$ for DM-based buffer-aided system. . . . .	45
2.7	ABER plots . . . . .	46
3.1	Double differential-based buffer-aided cooperative system. . . . .	49
3.2	DDM encoder. . . . .	51
3.3	DDM decoder. . . . .	52
3.4	ABER versus total power at fixed $L$ and varying $K$ . . . . .	66
3.5	ABER versus total power for varying $K$ in presence of CFO. . . . .	67
3.6	OP versus total power at varying $K$ . . . . .	68
3.7	ABER plots for different system parameters. . . . .	69
4.1	Buffer-aided FSO cooperative networks with $K$ relay nodes. . . . .	73
4.2	OP versus total power for negative exponential fading. . . . .	91

4.3	Outage versus total power for Gamma-Gamma fading. . . . .	92
4.4	OP versus total power for log-normal fading. . . . .	93
4.5	OP versus total power for asymmetric channels. . . . .	94
4.6	ABER versus total power. . . . .	95
4.7	OP and ABER versus $L$ for negative exponential fading . . . . .	96
4.8	Average packet for negative exponential fading. . . . .	97
5.1	A single relay FSO cooperative network affected by jamming. . . . .	100
5.2	Outage versus total available power for fixed $\rho$ and variable $\mathcal{B}$ . . . . .	109
5.3	ABER versus total available power at a fixed $\rho$ and variable $\mathcal{B}$ . . . . .	110
5.4	Outage versus $P_T$ for variable $L$ and $\rho$ . . . . .	111
5.5	ABER versus $P_T$ for variable $\mathcal{B}$ and $\rho$ . . . . .	112

# List of Tables

2.1	Coding gain comparison. . . . .	40
3.1	comparison of coding gain of the proposed DDM buffer-aided scheme with the coherent buffer-aided cooperative relaying system. . . . .	65
4.1	Parameters for buffer-aided FSO cooperative relaying network. . . . .	91
5.1	Comparison of ABER performance for different configurations. . . . .	112

# Abbreviations

ABER	Average Bit Error Rate
AF	Amplify-and-Forward
APD	Average Packet Delay
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AT	Atmospheric Turbulence
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDF	Cumulative Density Function
CFO	Carrier Frequency Offset
CSI	Channel State Information
DD	Double Differential
DDM	Double Differential Modulation
DF	Decode-and-Forward
DM	Differential Modulation
FoV	Field-of-View
FSO	Free Space Optical
HD	Half-Duplex
IM/DD	Intensity-Modulation/Direct-Detection
i.i.d.	independent and identically distributed
LED	Light Emitting Diode
LLR	Log Likelihood Ratio
MC	Markov Chain
ML	Maximum Likelihood

NBA	Non-Buffer-Aided
OOK	On-Off Keying
OP	Outage Probability
PDF	Probability Density Function
PL	Piece-wise Linear
R-D	Relay-to-Destination
RF	Radio Frequency
S-D	Source-to-Destination
SJNR	Signal-to-Jamming-Noise-Ratio
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
S-R	Source-to-Relay
SSP	Steady-State Probability

# Notations

$\bar{P}^A$	Outage probability for single link in absence of jammer
$\bar{P}^P$	Outage probability for single link in presence of jammer
$\bar{D}_k$	Average packet delay occurring due to the $k$ -th relay node
$\bar{P}_{ew}(\mathcal{M})$	ABER for selected $w$ link when $\mathcal{M}$ links are available
$L_k$	Average queuing length
$\bar{P}_{\mathcal{M}}$	Probability of unsuccessful transmission when total $\mathcal{M}$ links are available
$P_{\mathcal{M}}$	Probability of successful transmission when total $\mathcal{M}$ links are available
$P_e^A$	BER for single link in absence of jammer
$P_e^P$	BER for single link in presence of jammer
$R_K^*$	Selected best relay
$d_{RD}$	Relay to destination distance
$d_{SD}$	Source to destination distance
$d_{SR}$	Source to relay distance
$\text{erfc}(\cdot)$	Complimentary error function
$P_{\text{out}}$	Overall outage probability of the setup
$s_g$	$g$ -th state of the MC
$\tau_k$	Average throughput for $k$ -th relay
<b>A</b>	State transition matrix
$b$	Column matrix having all entries as unity
<b>B</b>	Square matrix having all entries as unity
<b>E</b>	Error matrix
$L$	Buffer size
$\ln(\cdot)$	Natural logarithm

$K$	Number of relay nodes
$Q_k$	Buffer of $k$ -th relay node
$\Pr(\cdot)$	Probability of an event
$Q(\cdot)$	Q-function
$N_0$	Noise variance
$w$	Selected best link
$\mathcal{CG}_w$	Coding gain of link $w$
$\mathcal{DO}_w$	Diversity order of link $w$
$\pi$	Steady state probability
$\delta$	Power allocation factor
$\epsilon_m$	ABER of the $S$ - $R$ link for $m$ available links
$\alpha$	Path loss exponent for RF link
$\sigma$	Path loss exponent for FSO link
$\sigma_w^2$	Variance of channel $w$
$\lambda$	Optical wavelength
$\psi(Q_k)$	Number of data packets in buffer $Q_k$