FULL-DUPLEX OPERATIONS AND RELIABILITY ENHANCEMENT IN INDOOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION NETWORKS

ANJALI GUPTA

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

May 2025

Full-duplex operations and reliability enhancement in indoor visible light communication networks

by

ANJALI GUPTA

Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi

May 2025

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Full-duplex operations and reliability enhancement in indoor visible light communication networks"**, submitted by **Anjali Gupta** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy in 2025** is a record of the original, bona fide research work carried out by her under my supervision and guidance. The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations related to the award of the degree.

The results in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for awarding any degree or diploma to the best of my knowledge.

Prof. Abhishek Dixit
Dept. of Electrical Engineering
IIT Delhi, 110016

Place: New Delhi

Date: May 2025

ACKNOWLEDGEMENTS

The PhD journey is a tough one, something that I was not fully aware of when I started. It has been challenging in many ways, but as I reach the end of this thesis, I feel nothing but grateful. The experiences, learnings, and growth that I have undergone during this time will remain with me forever.

The motivation to pursue a Ph.D. came from two remarkable women. The first is my dear friend from my bachelor's days, Ms. Swati Dandekar, who might still be unaware of the inspiration she has been to me. The second is my master's thesis co-supervisor, Prof. Carmen Mas Machuca, whose guidance and example deeply influenced my decision.

At the outset of this acknowledgment, I would like to express my heartfelt gratitude to my supervisor, Prof. Abhishek Dixit, who has been a tremendous support throughout my Ph.D. journey. I have been associated with him for more than eight years, and he has left a lasting impact on my critical thinking and research approach. I am truly thankful for the opportunity(ies) he gave me to work with him during my master's thesis and for enabling me to undertake my master's thesis under the guidance of Prof. Carmen Mas Machuca, an experience that ultimately paved the way for this Ph.D. thesis.

I am deeply grateful to my research committee members, Prof. Vivek Venkataraman, Prof. Swades De, and Prof. R.K. Varshney, for their valuable feedback and suggestions at various stages of my work. I also wish to express my sincere gratitude to Late Prof. Vinod Chandra for his unwavering support in research and for the life lessons he imparted; his influence will remain with me always.

I would like to thank my external examiners, Dr. Aravind Kumar Mishra and Dr. Majid Safari, for their valuable feedback on my thesis. A special note of thanks to Dr. Mishra for being available in person to formally confer the title of "Dr." upon me, an unforgettable moment.

The support of friends has always pushed me forward, and I consider myself fortunate to have known such good people in my life. Special thanks to Dr. Jagdeep Singh for his constant support throughout this journey. I am also thankful to my dear friends Nitin K. Lohar, Abhilasha Verma, Dr. Devika Dass, Shruti Jain, Chandan Kumar, Ruchi Gahlot, Vaibhav Singh, Resu Anwesh, and Vishal Shrivastava for helping me stay grounded and sane through the ups and downs of the Ph.D.

I appreciate the support and warmth provided by my seniors, Dr. Sonali and Dr. Rishu Raj, and my juniors, Vaishali, Sakshi, Tehreem, and Gourab, who contributed to creating an amiable and collaborative work environment. I also thank the lab staff Ms. Neeru Asihja, Mr. Rajesh Kumar, and Mr. Sunil Kumar, for their assistance in procuring equipment, supporting my experimental work, and handling the necessary administrative tasks.

Last but not least, I am deeply thankful to my family for their endless patience and understanding throughout this journey, especially my husband, who made countless sacrifices. I also owe a heartfelt thanks to my parents, who bore the weight of societal pressures so that I could pursue this path. I am truly grateful for their strength and belief in me. Finally, I thank God for granting me the strength, resilience, and opportunity to complete this Ph.D.

Anjali Gupta
2018EEZ8164
New Delhi, May 2025

ABSTRACT

This thesis explores novel methods to enhance indoor visible light communication (VLC) networks by leveraging their inherent full-duplex capabilities. Unlike traditional radio frequency (RF) networks, which primarily utilize half-duplex communication due to hardware constraints and self-interference issues, VLC networks employ directional transceivers that enable simultaneous two-way communication. This research aims to enhance VLC network throughput and tackle several challenges, including limited cell coverage areas and inter-cell interference, which arise from using the same wavelength in neighboring cells. It thoroughly examines indoor VLC media access control (MAC) protocols, typically contention-based and contention-free access methods. Contention-based access is simple to implement, does not require accurate device synchronization, and allows devices to freely join and leave the network. In contrast, contention-free access, suitable for deterministic traffic requiring high quality of service (QoS), is ideal for mission-critical applications.

This thesis first introduces a pioneering approach to enable full-duplex communication in the contention-free access of the MAC of the VLC standard IEEE 802.15.7. It compares the proposed full-duplex optical MAC (FD-OMAC) and IEEE 802.15.7 MAC to display enhanced throughput without compromising latency. Furthermore, it investigates the backward compatibility of the proposed full-duplex MAC to the standards and extends its functionality in multiple access point (AP) networks, tackling inter-cell interference. The proposed full-duplex MAC employs separate frequencies for upstream and downstream communication to enhance user convenience but can also support in-band full-duplex communication when required.

The dissertation then delves into the mathematical analysis of full-duplex contention-based schemes, focusing on the carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) MAC protocol of IEEE 802.15.7. While the prior works have performed the CSMA/CA

mathematical analysis using the Markov models, they display significant deviation from the simulation results. This thesis removes the analytical deviation from the simulation results by thoroughly reevaluating the Markov model. Furthermore, it performs the mathematical analysis of the network along with the hidden node problem, a significant challenge in VLC networks. This problem is solved in literature by using various full-duplex communication methods, such as bi-directional data transmission and the busy tone signal; the latter is utilized in the proposed FD-OMAC scheme. These techniques increase the coverage area of the nodes by utilizing an AP as a relay node. However, the AP response is delayed by the processing time, causing an unexpected network behavior. The quantitative effect of this delay remains unexplored, which is critical for optimizing the VLC network. The thesis bridges this gap by extending the proposed Markov analysis to model CSMA/CA for the aforementioned full-duplex techniques, particularly with busy tone.

This thesis presents the basic hardware blocks of a full-duplex VLC transceiver and the methodology to develop a primary full-duplex VLC link for video transmission. It further offers methods to enhance the reliability of full-duplex VLC AP transceivers and calculate their reliability parameters. Utilizing both mean time between failure (MTBF) calculations and Markov chain modeling, the study identifies failure-prone modules and assesses system downtime, facilitating fault-tolerant system designs. Additionally, a life cycle cost analysis aids decision-making for diverse application scenarios. This comprehensive analysis provides valuable insights into optimizing VLC networks, paving the way for enhanced performance and reliability in indoor wireless communication systems.

सार

यह थीसिस उनकी अंतर्निहित पूर्ण–द्वैध क्षमताओं का लाभ उठाकर इनडोर दृश्यमान प्रकाश संचार (वीएलसी) नेटवर्क को बढ़ाने के लिए उपन्यास विधियों की पड़ताल करता है। पारंपरिक रेडियो फ्रीक्वेंसी (आरएफ) नेटवर्क के विपरीत, जो मुख्य रूप से हार्डवेयर बाधाओं और आत्म–हस्तक्षेप के मुद्दों के कारण आधे–द्वैध संचार का उपयोग करते हैं, वीएलसी नेटवर्क दिशात्मक ट्रांससीवर्स को नियुक्त करते हैं जो एक साथ दो–तरफ़ा संचार को सक्षम करते हैं। इस शोध का उद्देश्य वीएलसी नेटवर्क थ्रूपुट को बढ़ाना और सीमित सेल कवरेज क्षेत्रों और अंतर–सेल हस्तक्षेप सहित कई चुनौतियों से निपटना है, जो पड़ोसी कोशिकाओं में एक ही तरंग दैर्ध्य का उपयोग करने से उत्पन्न होते हैं। यह पूरी तरह से इनडोर वीएलसी मीडिया एक्सेस कंट्रोल (एमएसी) प्रोटोकॉल, आमतौर पर विवाद–आधारित और विवाद–मुक्त पहुंच विधियों की जांच करता है। विवाद–आधारित पहुंच को लागू करने के लिए सरल है, सटीक डिवाइस सिंक्रनाइज़ेशन की आवश्यकता नहीं है, और उपकरणों को स्वतंत्र रूप से नेटवर्क में शामिल होने और छोड़ने की अनुमति देता है। इसके विपरीत, विवाद–मुक्त पहुंच, उच्च गुणवत्ता (क्यूओएस) की आवश्यकता वाले नियतात्मक यातायात के लिए उपयुक्त है, मिशन–क्रिटिकल अनुप्रयोगों के लिए आदर्श है।

यह थीसिस पहले वीएलसी मानक आईईईई 802.15.7 के मैक के विवाद–मुक्त पहुंच में पूर्ण–द्वैध संचार को सक्षम करने के लिए एक अग्रणी दृष्टिकोण का परिचय देता है। यह प्रस्तावित पूर्ण–डुप्लेक्स ऑप्टिकल मैक (एफडी–ओएमएसी) और आईईईई 802.15.7 मैक की तुलना विलंबता से समझौता किए बिना बढ़ाया थ्रूपुट प्रदर्शित करने के लिए करता है। इसके अलावा, यह प्रस्तावित पूर्ण–द्वैध मैक की पिछड़ी संगतता की जांच मानको के लिए करता है और इंटर–सेल हस्तक्षेप से निपटने के लिए कई एक्सेस पॉइंट (एपी) नेटवर्क में इसकी कार्यक्षमता का विस्तार करता है। प्रस्तावित पूर्ण–द्वैध मैक उपयोगकर्ता की सुविधा को बढ़ाने के लिए अपस्ट्रीम और डाउनस्ट्रीम संचार के लिए अलग–अलग आवृत्तियों को नियुक्त करता है, लेकिन आवश्यकता पड़ने पर इन–बैंड पूर्ण–द्वैध संचार का भी समर्थन कर सकता है।

शोध प्रबंध तब पूर्ण–द्वैध विवाद–आधारित योजनाओं के गणितीय विश्लेषण में देरी करता है, जो कि टक्कर से बचने के साथ कई बार एक्सेस (सीएसएमए/सीए) मैक प्रोटोकॉल के साथ कई एक्सेस पर ध्यान केंद्रित करता है। जबकि पूर्व कार्यों ने मार्कोव मॉडल का उपयोग करके सीएसएमए/सीए गणितीय विश्लेषण का प्रदर्शन किया है, वे सिमुलेशन परिणामों से महत्वपूर्ण विचलन प्रदर्शित करते हैं। यह थीसिस मार्कोव

मॉडल को अच्छी तरह से पुनर्मूल्यांकन करके सिमुलेशन परिणामों से विश्लेषणात्मक विचलन को हटा देता है। इसके अलावा, यह छिपे हुए नोड समस्या के साथ–साथ नेटवर्क के गणितीय विश्लेषण को वीएलसी नेटवर्क में एक महत्वपूर्ण चुनौती देता है। यह समस्या विभिन्न पूर्ण–द्वैध संचार विधियों, जैसे द्वि–दिशात्मक डेटा ट्रांसमिशन और व्यस्त टोन सिग्नल का उपयोग करके साहित्य में हल की जाती है; उत्तरार्द्ध को प्रस्तावित एफडी–ओएमएसी योजना में उपयोग किया जाता है। ये तकनीक एक रिले नोड के रूप में एपी का उपयोग करके नोड्स के कवरेज क्षेत्र को बढ़ाती हैं। हालांकि, एपी प्रतिक्रिया को प्रसंस्करण समय से देरी होती है, जिससे एक अप्रत्याशित नेटवर्क व्यवहार होता है। इस देरी का मात्रात्मक प्रभाव अस्पष्टीकृत रहता है, जो वीएलसी नेटवर्क के अनुकूलन के लिए महत्वपूर्ण है। थीसिस ने इस अंतराल को पूर्वोक्त पूर्ण–द्वैध तकनीकों के लिए सीएसएमए/सीए को मॉडल करने के लिए प्रस्तावित मार्कोव विश्लेषण का विस्तार करके इस अंतर को पुल किया है, विशेष रूप से व्यस्त टोन के साथ।

यह थीसिस एक पूर्ण–डुप्लेक्स वीएलसी ट्रांसीवर के मूल हार्डवेयर ब्लॉक और वीडियो ट्रांसमिशन के लिए एक प्राथमिक पूर्ण–द्वैध वीएलसी लिंक विकसित करने के लिए कार्यप्रणाली प्रस्तुत करता है। यह आगे पूर्ण–द्वैध वीएलसी एपी ट्रांसीवर्स की विश्वसनीयता को बढ़ाने और उनकी विश्वसनीयता मापदंडों की गणना करने के तरीके प्रदान करता है। विफलता (एमटीबीएफ) गणना और मार्कोव श्रृंखला मॉडलिंग के बीच दोनों माध्य समय का उपयोग करते हुए, अध्ययन विफलता–प्रवण मॉड्यूल की पहचान करता है और सिस्टम डाउनटाइम का आकलन करता है, गलती–सहिष्णु सिस्टम डिजाइनों की सुविधा देता है। इसके अतिरिक्त, एक जीवन चक्र लागत विश्लेषण विविध अनुप्रयोग परिदृश्यों के लिए निर्णय लेने में मदद करता है। यह व्यापक विश्लेषण वीएलसी नेटवर्क के अनुकूलन में मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करता है, इनडोर वायरलेस संचार प्रणालियों में बढ़ाया प्रदर्शन और विश्वसनीयता के लिए मार्ग प्रशस्त करता है।

Contents

List of Tables

List of Figures

List of Abbreviations

A

ACK	ACKnowledgement frame
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AP	Access Point

B

BI	Beacon Interval
BJT	Bipolar Junction Transistor
BO	Beacon Order

C

CAP	Contention Access Period
CDMA	Code Division Multiple Access
CFP	Contention Free Period
CSK	Color Shift Keying
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

D

DD	Direct Detection
DS	Down-Stream

F

FCFS	First Come First Serve
FCS	Frame Check Sequence

FD-OMAC	Full Duplex Optical Media Access Control
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FIT	Failure In Time
FPGA	Field Programmable Gated Array
FSO	Free Space Optical
FTTX	Fiber-to-the-X
FWA	Fixed Wireless Access

G

GPS	Global Positioning System
GTS	Guaranteed Time Slot

H

HFC	Hybrid Fiber-Coaxial
HPF	High Pass Filter

I

IC	Integrated Circuits
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IM	Intensity Modulation
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IR	Infra-Red

L

LAN	Local Area Network
LC	Light Communication
LDR	LightDependent Resistor
LED	Light Emitting Diode
Li-Fi	Light Fidelity
LIFS	Long Inter-Frame Space
LoS	Line of Sight

M

MAC	Media Access Control
MC	Master Controller
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLO	Multi-Link Operation
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTF	Mean Time To Failures
MTTR	Mean Time To Repair

N

NIC	Network Interface Card
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access

O

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK	On-Off Keying
OWC	Optical Wireless Communication

P

PAPR	Peak to Average Power Ratio
PD	Photo Detector
PHY	PHYsical layer
PoE	Power over Ethernet

Q

QoS	Quality of Service

R

RF	Radio Frequency
RM	Relation Matrix
RS	Reed Solomon

RTS/CTS	Request-To-Send/Clear-To-Send

S

SD	Superframe Duration
SDM	Space Division Multiplexing
SIC	Successive Interference Cancellation
SO	Superframe Order
SS	Superframe Slot

T

TDMA	Time Division Multiple Access
TIA	Trans Impedence Amplifier

U

UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
US	Up-Stream

V

VLC	Visible Light Communication

W

Wi-Fi	Wireless Fidelity