



**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE POLITEHNICA
BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației
Decizie nr. SD04-64 -2021**

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Rasha Shamat AL HASNAWI

**INTEGRAREA COMUNICAȚIILOR FOLOSIND LUMINA
VIZIBILĂ CU APLICATII VEHICULARE BAZATE PE
TEHNICI MULTI-HOP**

**INTEGRATION OF VISIBLE LIGHT COMMUNICATION
WITH MULTI-HOP TECHNIQUES-BASED VEHICULAR
APPLICATIONS**

Conducător de doctorat

Prof. Ion MARGHESCU
Politehnica of Bucharest

BUCHAREST 2025

Cuprins

Conținut.....	i
Lista figurilor.....	iv
Lista abrevierilor.....	v
Capitolul 1	1
Introducere.....	1
1.1 Arhitecturi VLC.....	1
1.2 Avantaje și provocări ale comunicației VLC vehiculare.....	2
1.3 Problema de cercetare, obiective și limitări.....	3
1.4 Conținutul tezei.....	4
Capitolul 2	5
Stadiul actual al tehnologiei VLC și VLC vehicular.....	5
2.1 Avantajele VLC.....	6
2.2 Provocările VLC.....	6
2.3 Provocări și soluții în VLC vehicular.....	6
2.3.1 Impactul reflexiilor.....	6
2.3.2 Interferențe din surse de lumină ambientală.....	6
2.3.3 Condiții meteorologice.....	6
2.4 Aplicații VLC vehiculare.....	6
2.5 Parametri critici în VLC vehicular.....	7
2.5.1 Model de radiație asimetric.....	7
2.5.2 Mobilitate.....	7
2.5.3 Condiții atmosferice.....	7
2.5.4 Dimensiunea aperturii receptorului.....	7
2.6 Concluzii.....	7
Capitolul 3	8
Evaluarea performanței V2V-VLC în funcție de condițiile de mediu: Teorie și simulare.....	8
3.1 Modelarea sistemului, canalului și a zgomotului.....	8
3.1.1 Modelarea sistemului.....	8
3.1.2 Modelarea canalului.....	8
3.1.3 Modelarea zgomotului.....	8
3.2 Măsurători de performanță.....	9
3.2.1 Performanța SNR.....	9
3.2.2 Performanța BER.....	9

3.2.3 Performanța capacității.....	9
3.3 Rezultate numerice și discuții analitice.....	9
3.3.1 Rezultate SNR.....	9
3.3.2 Rezultate BER.....	9
3.3.3 Rezultate privind capacitatea atinsă.....	10
3.4 Concluzii.....	11
Capitolul 4.....	12
Evaluarea comparativă a modelelor de canal pentru sisteme V2V-VLC realiste.....	12
4.1 Modelul sistemului.....	12
4.2 Modelul canalului.....	12
4.2.1 Modelul cuprinzător.....	12
4.2.2 Modelul exponențial.....	12
4.2.3 Modelul liniar.....	12
4.2.4 Modelul Lambertian.....	12
4.2.5 Modelul empiric.....	12
4.3 Rezultate și discuții.....	12
4.3.1 Rezultate BER.....	12
4.3.2 Rezultate capacitate.....	13
4.3.3 Evaluarea modelelor empiric și cuprinzător.....	13
4.4 Concluzii.....	14
Capitolul 5.....	15
Evaluarea performanței multi-hop în sistemele VLC vehiculare.....	15
5.1 Modelul sistemului.....	15
5.2 Criterii de performanță.....	15
5.2.1 Legătura directă.....	15
5.2.2 Legătura cu relee multiple.....	16
5.3 Impactul condițiilor atmosferice.....	17
5.3.1 Scenariu cu legătură directă.....	17
5.3.2 Scenarii cu relee multiple.....	17
5.3.3 Evaluarea modelelor pentru legături directe și cu relee.....	17
5.4 Impactul diferitelor deschideri ale receptorului.....	17
5.5 Impactul numărului de relee, capacitate și BER.....	17
5.5.1 Impactul numărului de relee asupra distanței maxime.....	17
5.5.2 Influența capacității și BER asupra distanței maxime.....	17
5.6 Concluzii.....	19

Capitolul 6.....	20
Concluzii generale.....	20
6.1 Lista publicațiilor originale.....	20
6.2 Direcții viitoare de cercetare.....	21
Bibliografie.....	22

Lista Figurilor

Figura 1.1	Regiunea spectrului de lumină vizibilă.....	1
Figura 3.1	Sistem V2V-VLC (vehicul-la-vehicul).....	9
Figura 3.2	SNR în funcție de distanță pentru: (a) condiții meteorologice, (b) deplasări laterale, (c) lumini ambientale.....	10
Figura 3.3	BER în funcție de distanță pentru: (a) condiții meteorologice, (b) deplasări laterale, (c) lumini ambientale.....	10
Figura 3.4	Capacitatea în funcție de distanță pentru: (a) condiții meteorologice, (b) deplasări laterale, (c) lumini ambientale.....	11
Figura 4.2	Rezultate BER în diverse condiții meteorologice.....	13
Figura 4.3	Capacitatea sistemului în diferite condiții meteorologice.....	13
Figura 4.4	Comparație: modelul cuprinzător vs. modelul empiric în (a) cer senin și (b) ceață densă.....	14
Figura 5.1	Legătură multi-hop pentru sistemul VLC vehicul-la-vehicul.....	15
Figura 5.2	Distanța maximă a legăturii directe vs. capacitate în condiții diferite....	18
Figura 5.3	Distanța maximă a legăturii multi-relay vs. capacitate în condiții diferite.....	18
Figura 5.4	Distanța maximă pentru modelele propus și Lambertian: pentru legături directe și multi-relay.....	18
Figura 5.5	Distanța maximă vs. capacitate pentru deschideri diferite: (a) legătură directă, (b) legătură multi-relay.....	18
Figura 5.6	Distanța maximă vs. (a) Capacitate și (b) BER pentru un număr variat de relee (M).....	19
Figura 5.7	Distanța maximă vs. număr de relee pentru: (a) Capacități, (b) BER.....	19

Lista Abrevierilor

V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2X	Vehicle-to-Everything
VLC	Visible Light Communication
LED	Light Emitting Diode
SNR	Signal-to-Noise Ratio
BER	Bit Error Rate
LOS	Line of Sight
DSRC	Dedicated Short-Range Communication
ITS	Intelligent Transportation Systems
Li-Fi	Light Fidelity
IM/DD	Intensity Modulation and Direct Detection
PD	Photodetector
FOV	Field of View
RF	Radio Frequency
MHz	Megahertz
Tx	Transmitter
Rx	Receiver

Capitolul 1

Introducere

Comunicarea vehiculară este esențială pentru avansarea sistemelor de transport inteligente (ITS), permițând schimbul de date între vehicule și infrastructură pentru a îmbunătăți siguranța și eficiența traficului. Comunicarea infrastructură-vehicul (I2V) sprijină planificarea rutelor și actualizările de servicii, în timp ce comunicarea vehicul-vehicul (V2V) este vitală pentru funcții de siguranță precum avertizările de frânare și evitarea coliziunilor. Deși tehnologiile bazate pe frecvență radio (RF), cum ar fi comunicațiile dedicate pe distanțe scurte (DSRC), au susținut aceste aplicații, ele se confruntă cu limitări în ceea ce privește fiabilitatea și performanța, mai ales în condiții de trafic dens și medii obstrucționate. Pentru a răspunde acestor provocări, comunicațiile optice au apărut ca o alternativă solidă. Dintre tehnicile optice, comunicația prin lumină vizibilă (VLC) se remarcă prin lățimea mare de bandă, imunitatea la interferențele RF și potențialul de a oferi rețele vehiculare rapide și sigure [1], [2], [3], [4]. VLC este o tehnologie wireless emergentă care utilizează LED-uri albe pentru a transmite atât informație, cât și iluminare. Ea operează în cadrul spectrului luminii vizibile (380–750 nm; 430–790 THz), așa cum este ilustrat în Figura 1.1[1]. VLC oferă avantaje față de comunicațiile RF, inclusiv utilizarea în condiții de siguranță a frecvențelor pentru oameni, lipsa interferenței cu echipamentele electronice sensibile și o lățime de bandă gratuită, neînregistrată. Este eficientă energetic, utilizând LED-uri compacte și cu cost redus [1], [5], [6]. VLC este potrivită atât pentru mediile interioare, cât și pentru cele exterioare. După succesul tehnologiei Li-Fi [7], VLC pentru interior a cunoscut o dezvoltare semnificativă. VLC vehiculară, deși promițătoare, evoluează mai lent din cauza provocărilor de mediu. În ITS, LED-urile susțin atât iluminatul, cât și comunicarea [8], [9]. VLC permite legături V2V și V2I folosind infrastructura LED existentă [1], [10]. Obiectivele includ îmbunătățirea siguranței, reducerea accidentelor și creșterea eficienței. Cu toate acestea, există provocări precum limitările de linie de vizibilitate (LOS), efectele meteorologice, reflexiile și variația intensității LED-urilor.



Figura 1.1 Regiunea spectrului luminii vizibile

1.1 Arhitecturi VLC

Sistemul VLC include un transmițător, un receptor și un canal de comunicație. Lumina albă emisă de LED-uri este modulată și transmisă prin canalul wireless optic. La receptor, un fotodetector (PD) detectează lumina modulată. Cea mai frecvent utilizată tehnică este Modulația în Intensitate și Detectia Directă (IM/DD) [1], [6], [11], [12]. Conexiunea dintre transmițător și receptor are loc prin canalul optic în spațiu liber. Lumina, fiind o undă electromagnetică, scade în intensitate proporțional cu pătratul distanței, la fel ca în alte sisteme wireless. În proiectarea sistemelor VLC,

factorii de influență diferă între mediile interioare și cele exterioare. Interferențele din interior provin din reflexiile pereților sau ale obiectelor și din prezența altor utilizatori din apropiere. Comunicarea VLC în exterior este afectată de factori de mediu precum lumina solară și lumina artificială, zgomotul optic, atenuarea cauzată de condițiile meteorologice, mișcarea utilizatorilor, traficul rutier și densitatea utilizatorilor [1], [13], [14], [12].

1.2 Avantaje și provocări ale comunicațiilor VLC vehiculare

VLC oferă mai multe avantaje distincte:

- Spectrul său de frecvență nu prezintă niciun risc pentru sănătatea umană [1].
- Asigură performanță fiabilă fără a interfera cu dispozitivele electronice.
- Funcționează într-un spectru nelicențiat, oferind o lățime de bandă vastă fără restricții legale [1].
- Îndeplinește simultan funcțiile de comunicare și iluminare.
- Este eficient din punct de vedere energetic comparativ cu sistemele RF, utilizând LED-uri compacte, economice și cu consum redus de energie [1].

Totuși, sistemele VLC pentru vehicule se confruntă cu mai multe provocări:

- Dependentă de linia de vedere (LOS), deoarece conexiunea LOS nu este întotdeauna disponibilă de-a lungul drumului.
- Efectele condițiilor meteorologice, inclusiv ploaie, ninsoare, ceață și gheață.
- Interferența din partea surselor de lumină naturale și artificiale [1].

Pentru legături VLC vehiculare precise, modelele realiste de canal ar trebui să încorporeze următorii parametri cheie:

- **Model asimetric:** Modelul Lambertian este utilizat pe scară largă pentru aplicațiile în interior [14], [15] și presupune radiație luminoasă simetrică. Cu toate acestea, în VLC vehicular, modulele de iluminat sunt faruri și stopuri asimetrice care îndeplinesc roluri diferite [1].
- **Mobilitate:** Linia de vedere (LOS) între transmitător și receptor face ca alinierea spațială precisă să fie critică. Mișcarea poate perturba legăturile între vehicule sau cu infrastructura [1].
- **Condiții meteorologice:** Condițiile meteorologice nefavorabile, precum ninsoarea, ceața și ploaia, degradează comunicațiile VLC vehiculare. Lumina interacționează cu particulele atmosferice prin difracție, împrăștiere și absorbție, reducând puterea și calitatea semnalului [1].

Prin urmare, implementarea sistemelor vehiculare VLC asistate de relee este esențială pentru extinderea intervalului de comunicare. Aceste arhitecturi multi-hop sunt deosebit de utile în platoanele vehiculare emergente, facilitând comunicarea continuă între vehiculul principal și cel care îl urmează. Performanța legăturilor VLC vehiculare este influențată de mai mulți factori cheie, iar vizibilitatea joacă un rol crucial în determinarea distanței maxime posibile.

1.3 Problema de cercetare, obiectivele și limitările

Conceptul de VLC vehicular este esențial pentru sistemele de transport inteligente (ITS) pentru a îmbunătăți siguranța rutieră, fluxul de trafic și eficiența combustibilului. Pentru a studia performanța sistemelor VLC pentru vehicule, modelele realiste de canal reprezintă primul pas.

- Rezultatele anterioare sau concentrat pe modelarea canalelor din interior, ceea ce nu se aplică sistemelor VLC vehiculare, care au caracteristici fundamental diferite. De exemplu, studiile anterioare au presupus un model idealizat Lambertian pentru sursele de lumină ale vehiculului, care nu se potrivește cu caracteristicile de iluminare ale farurilor și stopurilor vehiculului, semafoarelor și iluminatului stradal, cu distribuțiile lor asimetrice de intensitate. Orice modificare a modelului de antenă va afecta semnificativ performanța comunicării.
- Performanța sistemelor VLC vehiculare poate fi semnificativ influențată de factori precum reflectivitatea suprafeței drumului, tipul de drum, condițiile meteorologice, echipamentele vehiculului și infrastructura, dimensiunea deschiderii receptorului și iluminarea ambientală. Prin urmare, există o nevoie urgentă de cercetare aprofundată în acest domeniu, cu un accent deosebit pe aplicațiile sale specifice în siguranța rutieră, utilizând metode realiste și practice de modelare a canalului.
- Lipsa liniei de vedere (LOS) în sistemele VLC vehiculare reprezintă o provocare majoră. Comunicarea multi-hop rezolvă această problemă prin transmiterea datelor de la vehiculul sursă prin unul sau mai multe vehicule intermediare, denumite „releu”, până când ajung la vehiculul destinație.

Prin urmare, principalele obiective ale tezei mele sunt următoarele:

- Se examinează performanța sistemelor VLC vehiculare utilizând modele de canal realiste care iau în considerare influența tuturor factorilor menționați anterior.
- Se investighează performanța sistemelor VLC vehiculare bazate pe tehnici de retranslație multi-hop pentru a aborda problema indisponibilității legăturii directe LOS în diferite aplicații și pentru a crește raza de transmisie.
- În primul rând, dezvoltăm o expresie analitică completă pentru distanța maximă de comunicație a sistemelor V2V-VLC cu retranslație multi-hop, ca funcție de obiectivele de capacitate ale sistemului, integrând toți parametrii esențiali ai emițătorului, sistemului, retranslațiilor și mediului. Expresia propusă ia în considerare modelul asimetric al farurilor vehiculului și este o funcție de următorii factori:
 - a. Puterea de transmisie P_t
 - b. Lățimea de bandă a sistemului B
 - c. Numărul de retranslații M
 - d. Coeficientul de extincție al condițiilor meteorologice c
 - e. Dimensiunea deschiderii detectorului D_r
 - f. Capacitatea țintă a sistemului C

- Ulterior, analizăm modul în care diverși parametri influențează distanța de comunicație realizabilă, luând în considerare diferite scenarii și condiții.
- Comparăm apoi rezultatele expresiei propuse, bazată pe modelul asimetric al farurilor, cu cele obținute pe baza modelului ideal Lambertian.
- În plus, comparăm performanța sistemelor V2V-VLC cu retranslație multi-hop propuse cu performanța sistemelor fără tehnici de retranslație.
- Pentru modelarea precisă a canalului, utilizăm funcționalitatea de ray tracing non-secvențial oferită de simulatorul OpticStudio®, conform lucrărilor anterioare [16], [17]. Performanța generală a sistemului este evaluată prin simulări realizate în MATLAB (MathWorks), permițând o analiză detaliată a sistemului VLC vehicular în diverse condiții de mediu și geometrie.

1.4 Conținutul tezei de doctorat

Capitolul Doi oferă o revizuire cuprinzătoare a arhitecturii VLC în contexte vehiculare, acoperind aplicații precum platooning, gestionarea intersecțiilor și coordonarea schimbării benzilor. Sunt evidențiate provocările precum reflexiile de pe drum, interferența luminii solare și artificiale, și impactul condițiilor meteorologice, abordând, de asemenea, parametrii cheie de modelare VLC precum asimetria iluminării, mobilitatea și efectele atmosferice.

Capitolul Trei explorează performanța V2V VLC utilizând urmărirea razelor nesecvențială pentru modelarea precisă a canalului, luând în considerare emisiile inegale ale farurilor. Analizează efectele deplasării laterale, condițiilor meteorologice și luminii ambientale asupra SNR, BER și capacității, demonstrând că acești factori influențează semnificativ puterea semnalului, ratele de eroare și debitul de date.

Capitolul Patru prezintă o evaluare detaliată a performanței V2V VLC sub modele realiste de canal și condiții de mediu, comparând modelele Lambertian, Linear, Exponential și Comprehensive în diferite scenarii meteorologice. Se evaluează BER, SNR și capacitatea, cu modelul comprehensiv validat folosind date empirice pentru acuratețea în condiții reale.

Capitolul Cinci investighează performanța V2V VLC cu multi-releu în condiții reale, introducând un model în formă închisă pentru a estima distanța maximă pe baza capacității. Se analizează efectele condițiilor meteorologice și ale parametrilor transceiverului, comparând rezultatele cu modelul Lambertian pentru a dezvălui limitările acestuia. Studiul evidențiază avantajele configurațiilor multi-releu în îmbunătățirea razei și fiabilității în condiții de vizibilitate scăzută.

Capitolul Șase încheie teza, rezumând principalele concluzii și contribuții ale cercetării.

Capitolul 2

Starea actuală a tehnologiei în VLC și VLC vehiculare

Congestia traficului reprezintă o problemă majoră la nivel global, în special în țările în curs de dezvoltare, cauzând întârzieri, consum crescut de combustibil și poluare. Creșterea numărului de vehicule duce și la o rată mai mare a accidentelor. Conform [18], eroarea umană este responsabilă pentru aproximativ 75% dintre accidentele rutiere. Implementarea sistemelor de avertizare rutieră poate reduce coliziunile. Sistemele Inteligente de Transport (ITS) abordează aceste provocări, sprijinind aplicații de siguranță precum alertele de pre-coliziune, frânarea de urgență, avertismentele de schimbare a benzii și încălcările semnalizării rutiere [19]. ITS permite schimbul de date în timp real între vehicule, incluzând viteza, locația, accelerația și starea motorului, îmbunătățind siguranța și gestionarea traficului. ITS reprezintă un domeniu prioritar de cercetare datorită importanței sale în orașele inteligente ale viitorului [12], [20], facilitând comunicarea în timp real între vehicule și infrastructură pentru a reduce congestia și a spori siguranța și confortul. Companii precum Google, Tesla și Uber dezvoltă vehicule autonome ca parte a avansului în ITS. Acest progres a fost sprijinit de tehnologii emergente care permit soluții avansate pentru transport. Exemple importante includ comunicațiile între vehicule (V2V) și comunicațiile vehicul-infrastructură (V2I), cunoscute împreună sub numele de sisteme V2X (vehicle-to-everything) [1], [2]. ITS trebuie să utilizeze soluții scalabile, flexibile și fiabile. În ultima perioadă, cercetarea și standardizarea tehnologiilor V2X, în special bazate pe frecvențe radio (RF), au crescut semnificativ. Acestea includ comunicațiile dedicate pe rază scurtă (DSRC), adoptate de mai mulți producători auto [21], și tehnologiile V2X bazate pe rețele celulare 5G (C-V2X) [22]. Deși sistemele RF sunt în prezent adecvate pentru ITS, densitatea traficului din viitor ar putea cauza interferențe, limitări de bandă, latență crescută și rate de transmisie reduse, afectând performanța comunicațiilor. Pentru a aborda aceste provocări, comunicarea folosind lumina vizibilă (VLC) a apărut ca o alternativă sau completare promițătoare la tehnologiile RF [1], [23], [12]. VLC valorifică infrastructura de iluminat existentă, cum ar fi semafoarele, farurile și stopurile echipate cu LED-uri. LED-urile oferă luminozitate mai mare, comutare mai rapidă, durată de viață mai lungă și degajare mai mică de căldură comparativ cu lămpile cu halogen [24], ceea ce le face ideale pentru sistemele inteligente de transport. Deși cercetarea în domeniul VLC pentru medii interioare este avansată, VLC-ul vehicular în exterior se află încă într-un stadiu incipient și necesită cercetări și dezvoltare suplimentare [1], [8], [6]. VLC-ul vehicular permite iluminatul și transmiterea de date prin LED-urile din vehicule. Acesta oferă avantaje față de RF, precum rezistența la interferențe, bruij și atacuri de tip spoofing, și utilizează un spectru larg și nelicențiat.

Comunicarea în linie directă de vizibilitate (LOS) oferă conexiuni sigure și eficiente, susținând aplicații de siguranță precum detectarea prezenței vehiculelor și evitarea coliziunilor. Totuși, menținerea LOS este dificilă din cauza obstacolelor precum suprafețele rutiere, clădirile, alte vehicule și elementele reflectorizante. Factorii de mediu precum ceața, ploaia, zăpada și gheața degradează, de asemenea, fiabilitatea legăturii și performanța sistemului [1], [25], [26].

2.1 Avantajele VLC

- Lățime de bandă mare și nelicențiată
- Sigur pentru sănătatea umană
- Securitate și rezistență la interferențe
- Eficiență energetică și costuri reduse.

2.2 Provocările VLC

- Obstrucția liniei de vizibilitate (LoS)
- Domeniu limitat de comunicare
- Interferențe cauzate de zgomotul ambiental

2.3 Provocări și soluții în VLC vehicular

2.3.1 Impactul reflexiei

Condițiile meteorologice precum zăpada, ploaia și gheața afectează și mai mult reflectivitatea suprafeței și stabilitatea legăturii NLOS (fără linie de vizibilitate directă) [30], [31]. Suprafețele drumurilor pot amplifica semnalele reflectate, în special la anumite unghiuri. Distorsiunea semnalelor optice prin reflexie, dispersie și atenuare influențează canalul VLC vehicular, afectând performanța acestuia [1], [10], [30], [31].

2.3.2 Interferența din surse de lumină ambientală

O problemă majoră pentru sistemele VLC vehiculare este interferența provenită de la sursele de lumină artificială și naturală, care degradează performanța. Surse precum stâlpii de iluminat stradal, semafoarele, panourile publicitare și lumina solară contribuie la această interferență. Lumina solară directă poate provoca efectul de retroiluminare, saturând receptorul și afectând detectarea semnalului [1], [23], [32].

2.3.3 Condiții meteorologice

Ploaia degradează comunicația V2V prin împrăștierea, difracția și absorbția semnalelor optice, ducând la o atenuare și o dispersie semnificativă. Cercetările au arătat că ceața are cel mai mare impact asupra performanței VLC, evaluările simulate și experimentale indicând că aceasta provoacă o degradare mai accentuată decât ploaia și ninsoarea [1], [23], [33], [34], [35].

2.4 Aplicații ale VLC vehicular

Tehnologia VLC permite diverse aplicații pentru transportul inteligent, valorificând sistemele de iluminat bazate pe LED-uri. Această tehnologie este deosebit de utilă pentru îmbunătățirea siguranței rutiere și a eficienței traficului, prin aplicații precum comunicațiile vehicul-la-vehicul (V2V), care sprijină avertizările privind coliziunile, schimbările cooperative de bandă și coordonarea între vehicule. Comunicațiile vehicul-la-infrastructură (V2I) permit vehiculelor

să primească date de la semafoare, indicatoare rutiere LED și stâlpi de iluminat. VLC facilitează, de asemenea, aplicații precum alertele pentru vehiculele de urgență și coordonarea în intersecții. Avantajele sale, precum latența redusă, rezistența la interferențe electromagnetice și precizia comunicației direcționale, o fac ideală pentru scenarii de vizibilitate pe distanță scurtă, în medii de trafic dinamice. Aplicații esențiale ale VLC vehicular [1], [5], [36]:

- Schimbarea benzii de circulație
- Asistență în intersecții
- Plutonare (Platooning)

2.5 Parametri critici în VLC vehicular

2.5.1 Model asimetric

Legăturile VLC vehiculare sunt asimetrice din cauza puterii mai mari emise de faruri comparativ cu stopurile [1], [39], [40].

2.5.2 Mobilitatea

Alinierea legăturii VLC este dificilă din cauza mișcării vehiculelor și a câmpului vizual (FOV) îngust al receptorilor bazați pe fotodiodă. Lentilele cu un câmp vizual mai larg ajută, dar cresc și zgomotul de fond, reducând astfel claritatea semnalului [1], [38], [41].

2.5.3 Condițiile atmosferice

Condițiile atmosferice precum ploaia, ceața și ninsoarea atenuează semnalele VLC vehiculare prin dispersia luminii și blocarea fotonilor din cauza picăturilor dense de apă [1], [42], [35], [43], [44].

2.6.4 Dimensiunea deschiderii receptorului

Aperturile mai mari ale receptorului îmbunătățesc puterea semnalului, în special în condiții de vizibilitate redusă, dar cresc și sensibilitatea la lumina ambientală și la alinierea greșită [1], [12], [10].

2.6 Concluzii

Comunicarea prin lumină vizibilă (VLC) joacă un rol esențial în sistemele inteligente de transport (ITS), facilitând schimbul de informații între vehicule și infrastructură. Această tehnologie contribuie la atingerea obiectivelor cheie ale ITS, precum îmbunătățirea siguranței rutiere, sporirea confortului pasagerilor și optimizarea fluxului de trafic. În acest capitol, am revizuit mai întâi cele mai recente tehnologii în domeniul VLC și al comunicațiilor VLC vehiculare, precum și aplicațiile lor variate, incluzând controlul traficului, asistența în intersecții și suportul pentru schimbarea benzii de circulație. Am evidențiat apoi principalele provocări ale sistemelor VLC, precum impactul reflexiilor de pe suprafața drumului, interferențele cauzate de lumina solară și iluminatul artificial, precum și efectele variațiilor meteorologice. În plus, am discutat parametrii esențiali pentru modelarea canalelor VLC, incluzând factori precum natura asimetrică a surselor de lumină de pe vehicule, mișcarea vehiculului și caracteristicile mediului de propagare atmosferic. Pe baza cercetărilor prezentate în acest capitol, am publicat următoarea lucrare :

[1] Al Hasnawi, R., & Marghescu, I. "A Survey of Vehicular VLC Methodologies" *Sensors* 24(2), 598, (2024). (WOS:001151044400001).

Capitolul 3

Evaluarea performanței V2V-VLC în funcție de condițiile de mediu: abordare teoretică și prin simulare

3.1 Modelarea sistemului și a canalului și a zgomotului

3.1.1 Modelarea sistemului

În scenariul prezentat în Figura 3.1, este investigat un sistem V2V VLC. Două vehicule circulă pe un drum cu două benzi, cu o lățime de W_r . Acestea sunt separate de o distanță longitudinală d , cu o posibilă deplasare laterală dh . Vehiculul transmițător (V1) este echipat cu două faruri (TX1 și TX2) cu modele asimetrice și o putere de transmisie P_t . Vehiculul receptor (V2) este echipat cu un fotodetector (RX) cu un răspuns r și un diametru al deschiderii D_r , esențial pentru captarea semnalului luminos. Acest scenariu ia în considerare caracteristicile drumului, configurațiile emițătorului și receptorului și poziționarea celor două vehicule pentru a evalua performanța comunicației dintre ele [43], [44], [45].

3.1.2 Modelarea canalului

Răspunsul canalului pentru canalele VLC poate fi exprimat conform [16], [45], [46], [47].

$$h_i(t) = \sum_{k=1}^{k_i} P_i(k) \delta(t - \tau_i(k)) \quad (3.1)$$

Un model de canal cuprinzător poate fi oferit în [17], [16], [45], [46], [16]:

$$H_{Comprehensive\ model} = \left(\frac{D_r \left(\frac{d}{\sqrt{d^2 + d_{h_i}^2}} \right)^{\frac{1}{\epsilon}}}{\zeta \sqrt{d^2 + d_{h_i}^2}} \right)^2 \exp \left(-c \sqrt{d^2 + d_{h_i}^2} \left[\frac{D_R}{\zeta \sqrt{d^2 + d_{h_i}^2}} \right]^{\frac{\epsilon}{2}} \right) \quad (3.2)$$

3.1.3 Modelarea zgomotului

Pentru modelarea zgomotului, sistemele V2V VLC sunt susceptibile la zgomotul de fundal (reprezentat prin zgomot termic și zgomot de tip shot). Prin urmare, variația totală a sistemului V2V VLC poate fi exprimată conform [48], [49], [45], [46].

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2, \quad (3.3)$$

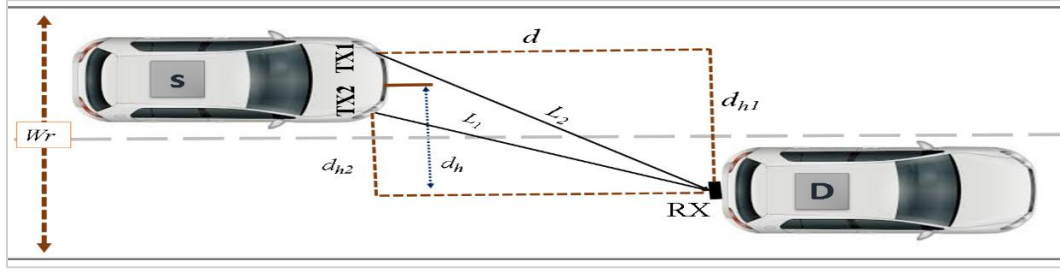


Figura 3.1. Sistem VLC Vehicul-la-Vehicul (V2V)

3.2 Metrice de performanță

3.2.1 Performanța SNR

SNR pentru scenariul V2V VLC poate fi dată de [43], [44].

$$SNR_i = \sum_{i=1}^2 \frac{(R P_t H_i)^2}{\sigma_{total}^2}, \quad (3.3)$$

3.2.2 Performanța BER

BER pentru scenariul V2V VLC este descrisă de [50], [43], [44]:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2\sqrt{2}} \right), \quad (3.4)$$

3.2.3 Performanța Capacității

Capacitatea sistemului pentru scenariul V2V VLC este descrisă de [43], [44]:

$$C \approx \frac{B}{2} \ln \left(1 + \frac{\exp(1)\gamma}{2\pi} \right), \quad (3.5)$$

3.3 Rezultate Numerice și Discuție Analitică

3.3.1 Rezultate SNR

1. Impactul condițiilor meteorologice

Figura 3.2(a) investighează relația dintre SNR și distanță. Ceața degradează semnificativ performanța din cauza absorbției și împrăștierii luminii.

2. Impactul deplasării laterale

Figura 3.2(b) prezintă variația raportului semnal-zgomot (SNR) în funcție de distanță pentru deplasări laterale de 0 m, 1 m, 2 m și 3,75 m. Deplasările laterale mici au un impact redus, însă deplasările laterale mai mari degradează semnificativ performanța [43].

3. Impactul interferenței luminii ambientale

Figura 3.2(c) arată că efectul interferențelor artificiale este redus în comparație cu zgomotul produs de lumina solară.

3.3.2 Rezultate BER

1. Impactul condițiilor meteorologice

Figura 3.3 (a) arată că ceața moderată și cea densă au un efect relativ mare.

2. Impactul deplasării laterale

Figura 3.3(b) arată că la o deplasare laterală de $d_h = 3.75$ m, performanța sistemului începe să se deterioreze semnificativ [44].

3. Impactul interferenței luminii ambientale

În Figura 3.3 (c), se observă că zgomotul produs de iluminatul stradal are un efect mai redus comparativ cu zgomotul produs de lumina solară.

3.3.3 Rezultate privind Capacitatea Realizabilă

1.Impactul condițiilor meteorologice

Figura 3.4 (a) arată că ceața moderată și cea densă au un efect relativ mare.

2.Impactul deplasării laterale

Figura 3.4 (b) arată că la o deplasare laterală $d_h = 3.75$ m, performanța sistemului începe să se deterioreze semnificativ [44].

3.Impactul iluminatului ambiental

În Figura 3.4 (c), se observă că zgomotul produs de iluminatul stradal pe timp de noapte are un efect mai redus comparativ cu zgomotul solar din timpul zilei [44].

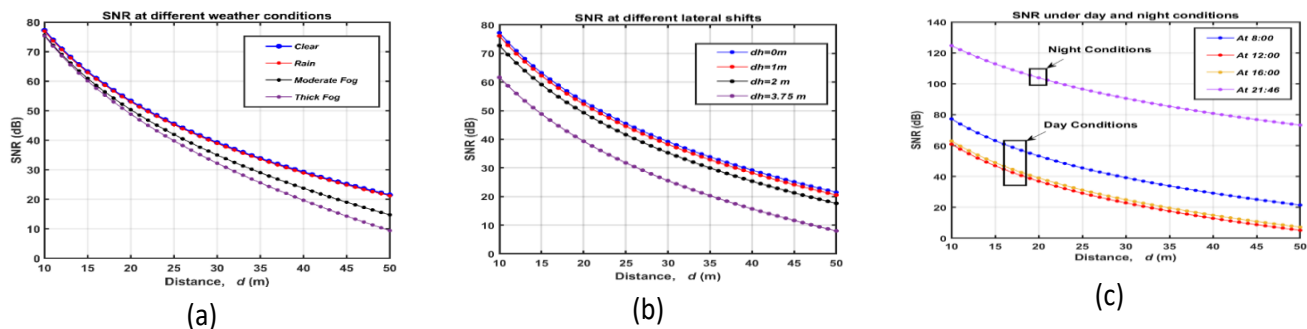


Figura 3.2 SNR în funcție de distanță : (a) condiții meteorologice, (b) deplasări laterale, (c) surse de lumină ambientală.

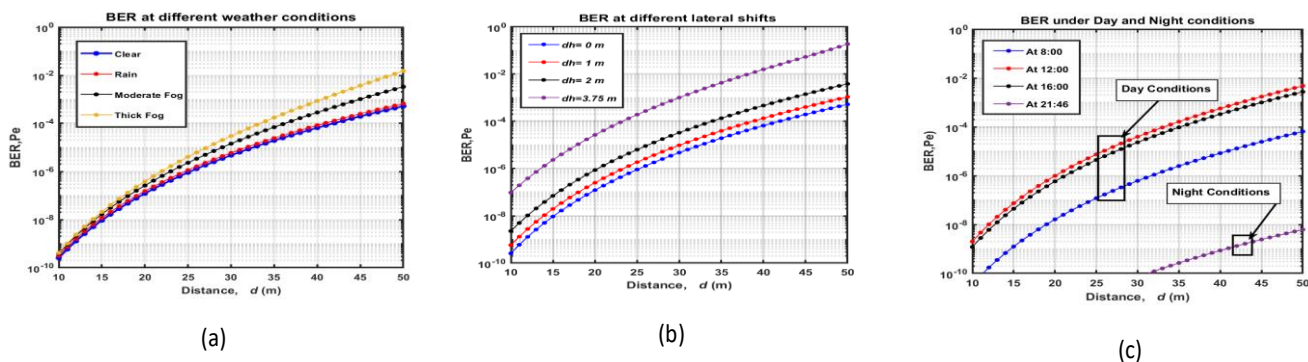


Figura 3.3. BER în funcție de distanță pentru: (a) condiții meteorologice, (b) deplasări laterale, (c) iluminat ambiental.

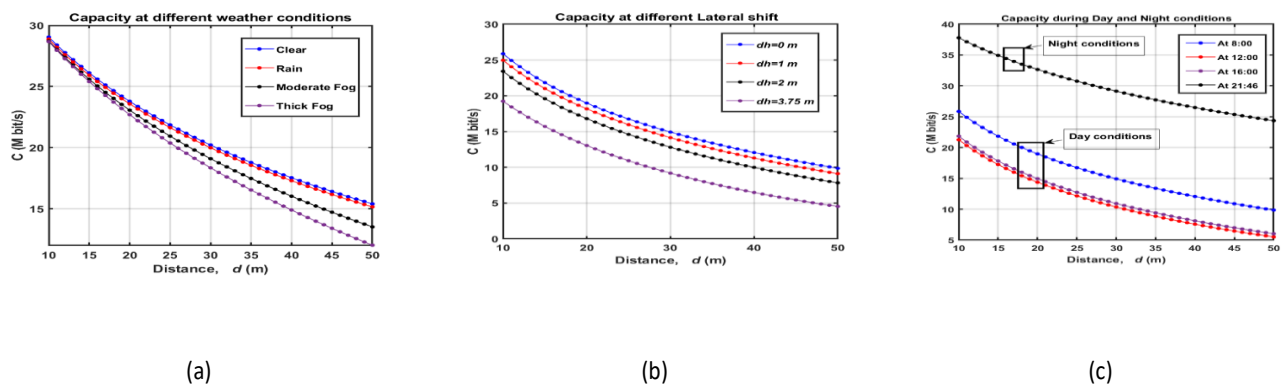


Figura 3.4 Capacitatea în funcție de distanță: (a) condiții meteorologice, (b) deplasări laterale, (c) iluminat ambiental.

3.4 Concluzii

Acest capitol oferă o evaluare cuprinzătoare a performanței unui sistem V2V-VLC. Analiza utilizează o metodă de trasare de raze non-secvențială care ia în considerare distribuția neuniformă a emisiilor farurilor. Sunt examinați în detaliu indicatorii cheie de performanță, cum ar fi raportul semnal-zgomot (SNR), rata de eroare a bitului (BER) și capacitatea sistemului. Studiul analizează efectele deplasării laterale, ale condițiilor meteorologice variabile și ale interferențelor din iluminatul ambiental. Rezultatele subliniază rolul critic al condițiilor meteorologice, în special densitatea ceții, în degradarea performanței sistemului V2V-VLC. Ceața deasă provoacă atenuări semnificative din cauza dispersiei și absorbției, reducând considerabil numărul de fotoni care ajung la receptor. Studiul confirmă, de asemenea, că deplasările laterale influențează direct performanța. În timp ce devierile mici provoacă degradări minore, cele mari reduc semnificativ raportul SNR și raza de comunicare. Analiza arată că lumina solară directă are un impact mai mare decât iluminatul stradal artificial. Lumina solară induce un zgomot spectral de intensitate ridicată care poate satura fotodetectorii, degradând semnificativ integritatea semnalului. În schimb, iluminatul stradal prezintă o intensitate mai scăzută și, prin urmare, are un impact relativ mic asupra performanței sistemului.

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în:

- 1.[44] Al Hasnawi, R., Marghescu, I., & Rusu-Casandra, A. “*Reliability and Capacity Evaluation for Vehicle-to-Vehicle VLC*”. In 15th International Conference on Communications (COMM 2024, October)(pp. 1-6). IEEE xlore, (DOI :10.1109/COMM62355.2024.10741390).
- 2.[43] Al Hasnawi, R., Marghescu, I., & Amjed A Al-Mudhafar. “*Comprehensive Evaluation of Environmental Impact on the Performance of V2V Visible Light Communication*”. In 5th Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM 2025)(pp.1-6). IEEE xlore, (DOI:10.1109/MENACOMM62946.2025.10911014).

Capitolul 4

Evaluarea comparativă a modelelor de canal pentru sisteme V2V-VLC realiste

4.1 Modelul Sistemului

Pentru modelul sistemului, luăm în considerare scenariul V2V-VLC prezentat în Capitolul Trei (Figura 3.1).

4.2 Modelul canalului

4.2.1 Model cuprinzător

Pentru modelul cuprinzător, așa cum am explicat anterior în capitolul 3 (Ecuția 3.2) .

4.2.2 Model Exponențial

Câștigul canalului este scris ca [45], [46], [53]:

$$H_{Exponential\ model} = P_t \underbrace{Ad^{-2B} \exp(-cd)}_p \quad (4.1)$$

4.2.3 Model Liniar

Câștigul canalului este scris ca [45], [46], [53]:

$$H_{Linear\ model} = P_t(\alpha d + \beta), \quad (4.2)$$

4.2.4 Model Lambertian

Câștigul canalului este exprimat astfel: [55], [14], [45]:

$$H_{Lambertian\ Model} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\frac{\pi D_R^2}{4} (m+1)}{2\pi \sqrt{d^2 + d_{hi}^2}} \cos^m(\theta_i) \cos(\phi_i) \right) \exp \left(-c \sqrt{d^2 + d_{hi}^2} \right) \right), \quad (4.3)$$

4.2.5 Model Empiric

Formula modelului de canal din [38], derivată prin ajustare de curbă la date empirice, este exprimată astfel: [43], [45]:

$$H_{Empirical} = \alpha + \beta 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{d+\gamma} \right) \quad (4.4)$$

4.3 Rezultate și discuții

4.3.1 Rezultatele BER

Figura 4.1 arată BER în funcție de distanță. Modelul cuprinzător se potrivește bine pentru toate tipurile de vreme. Modelul Lambertian se abate în condiții meteo nefavorabile, iar modelul liniar ignoră efectele vremii. Modelul exponențial se potrivește îndeaproape cu modelul cuprinzător[45].

4.3.2 Rezultatele capacității

Figura 4.3 arată capacitatea sistemului în funcție de distanță pentru patru condiții meteorologice. Modelul cuprinzător funcționează fiabil, în timp ce modelul Lambertian se abate în condiții meteo nefavorabile. Modelul liniar ignoră efectele vremii, iar modelul exponențial se potrivește bine. Capacitatea scade în ceață din cauza pierderii fotonilor.

4.3.3 Evaluarea modelelor empirice și cuprinzătoare

Această secțiune compară modelele cuprinzător și empiric. În condiții de vreme senină, Figura 4.2, acestea sunt foarte apropiate; totuși, în ceață densă, modelul cuprinzător se abate din cauza împrăștierii, în timp ce modelul empiric rămâne neschimbat.

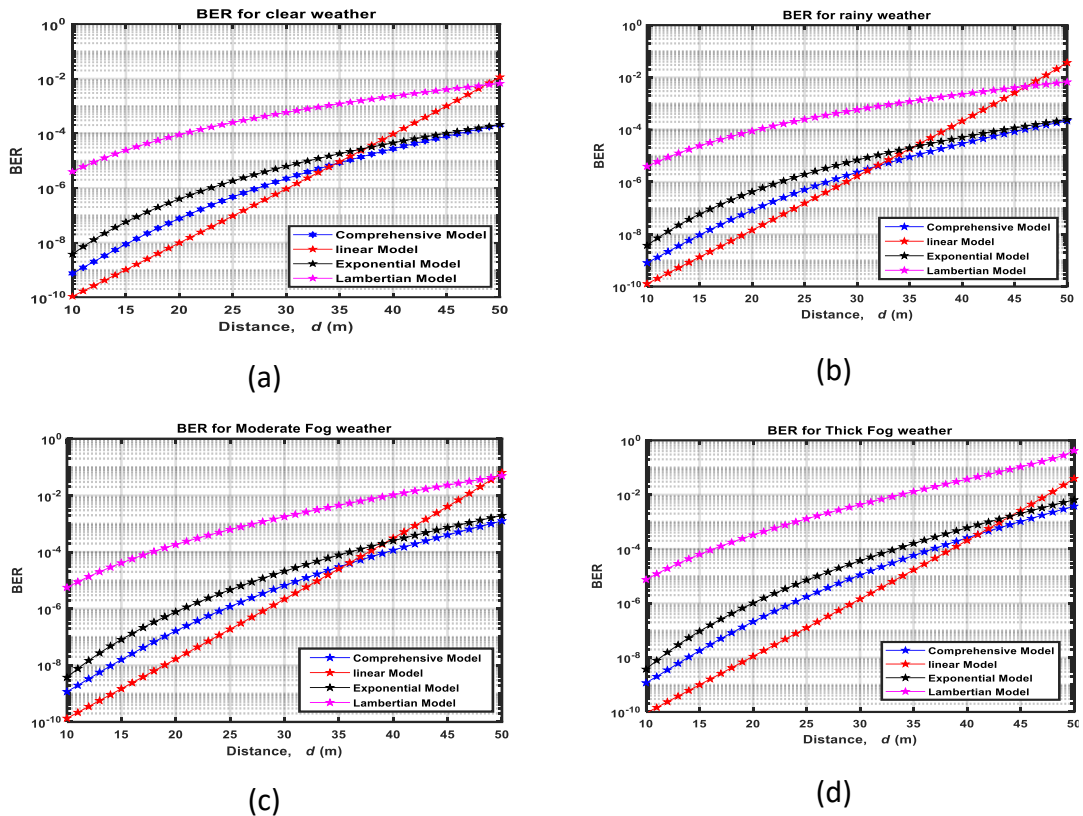


Figura 4.1 Rezultatele BER în condiții meteorologice diferite

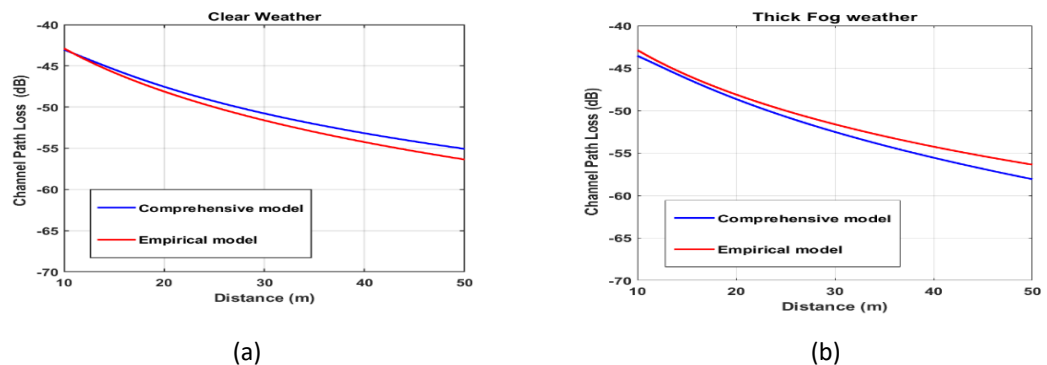


Figura 4.2 Comparare: Model Cuprinzător vs. Model Empiric în (a) Vreme Clară și (b) Ceață Densă

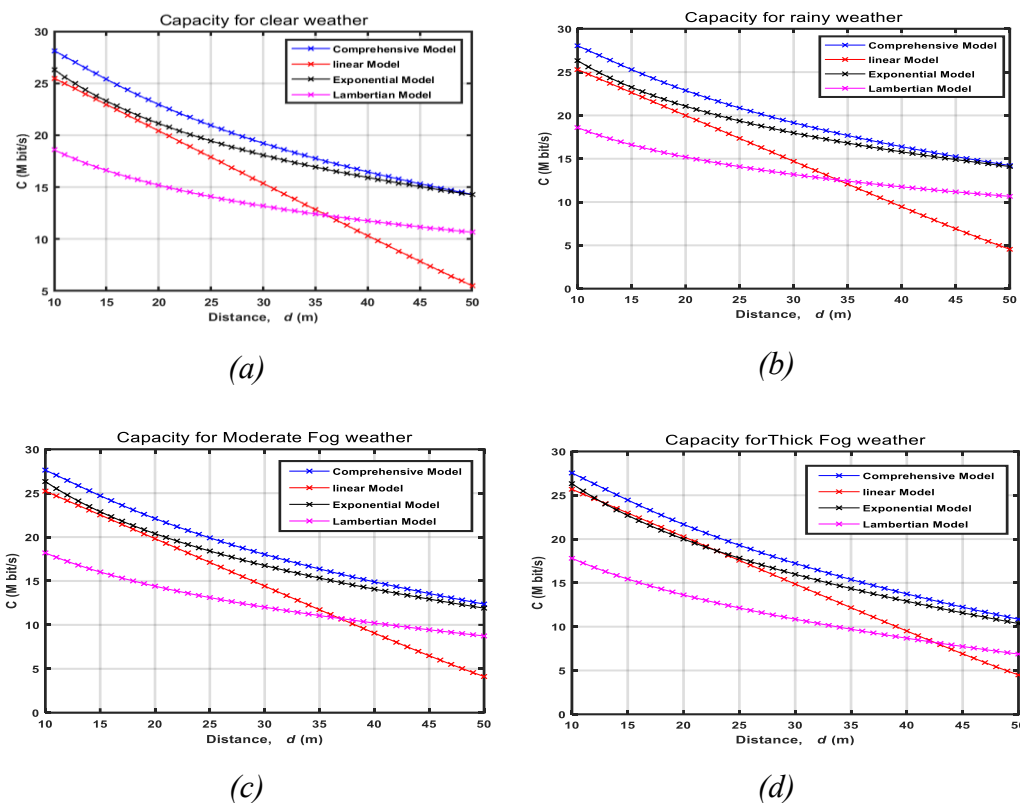


Figura 4.3 Capacitatea sistemului în condiții meteorologice diferite

4.5 Concluzii

Acest capitol prezintă o analiză cuprinzătoare a sistemelor V2V-VLC utilizând patru modele de canal în diferite condiții de mediu. Modelul cuprinzător a demonstrat cea mai mare acuratețe, deși ceața i-a redus performanța. Modelul Lambertian a avut rezultate slabe în condiții meteorologice nefavorabile, în timp ce modelul liniar a ignorat efectele mediului. Modelul exponențial s-a potrivit foarte bine cu modelul cuprinzător, demonstrând o bună adaptabilitate. În condiții clare, modelul cuprinzător s-a aliniat bine cu datele empirice, care au rămas neafectate de schimbările meteorologice. Constatările discutate în acest capitol au fost publicate în următorul articol:

[45] Al Hasnawi, R., Militaru, N., & Rusu-Casandra, A. “*Influence of Channel Modeling and Atmospheric Conditions on the Reliability and Capacity of V2V VLC Systems*”. In 15th International Conference on Communications (COMM 2024, October), (pp. 1-6). IEEE xplora (DOI: 10.1109/COMM62355.2024.10741462).

Capitolul 5

Evaluarea Performanței Multi-Hop în Sistemele VLC Vehiculare

5.1 Modelul sistemului

Considerăm un sistem V2V-VLC multi-hop (Figura 5.1) în care vehiculele se deplasează pe o singură bandă de-a lungul unei drumuri de lățime W . Sursa (**S**) și destinația (**D**) sunt separate de o distanță dx , cu M vehicule intermediare de relay (**V1**, **V2**, ..., **VR**) distanțate de d_{Relay} . Fiecare vehicul utilizează două faruri (HL) ca transmișoare VLC și un fotodetector posterior cu răspuns r și diametru al deschiderii Dr [53]. Răspunsul la impuls al canalului VLC (CIR) poate fi descris ca [47], [53]:

$$h(t) = \sum_{m=1}^M P_m \delta(t - \tau_m), \quad (5.1)$$

Câștigul canalului între transmitere și recepție este dat de [47], [53]:

$$H = \left(\frac{Dr}{\zeta dx}\right)^2 \exp\left(-cdx \left(\frac{Dr}{\zeta dx}\right)^{\varepsilon/2}\right), \quad (5.2)$$

5.2 Criterii de Performanță

Evaluăm performanța V2V-VLC în două scenarii: legături directe și legături cu releu multi-hop.

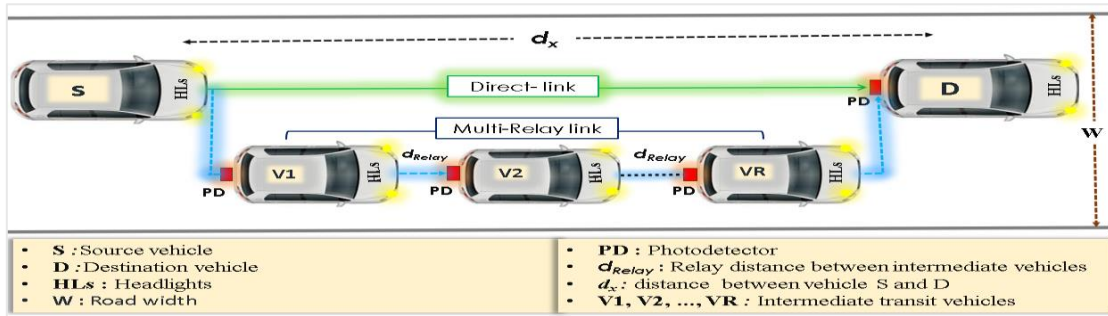


Figura 5.1 Legătură multi-hop cu releu pentru sistemul VLC vehicul-la-vehicul.

5.2.1 Legătură directă

Considerăm o conexiune directă (adică, $M=0$), derivăm expresia matematică pentru distanța de transmisie dx care poate fi determinată din (5.1) folosind funcția Lambert W [47], [53].

$$d_x = \left(\frac{W \left(\frac{c}{4} (2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right)^{\frac{\varepsilon-2}{4}} H \left(\frac{\varepsilon-2}{4} \right) \right)}{\frac{c}{4} (2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}}} \right)^{\frac{2}{2-\varepsilon}}, \quad (5.3)$$

Mai mult, capacitatea sistemului și BER sunt date de :

$$C \approx \frac{B}{2} \ln \left(1 + \frac{\exp(1)\gamma}{2\pi} \right), \quad (5.4)$$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2\sqrt{2}} \right), \quad (5.5)$$

Unde γ denotă raportul semnal-la-zgomot (SNR), care poate fi scris ca :

$$SNR = \frac{(\eta r H)^2 P_t}{\sigma_n^2}, \quad (5.6)$$

unde variația zgomotului este $\sigma_n^2 = N_0 B$, prin înlocuirea (5.6) în (5.4), rezolvând pentru H , putem obține apoi :

$$H = \sqrt{\frac{2\pi\sigma_n^2}{\exp(1)P_t\eta^2 r^2}} \left(\exp\left(\frac{2C}{B}\right) - 1 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.7)$$

Din (5.3) și (5.7), derivăm distanța maximă de comunicare care satisface un obiectiv de capacitate, astfel cum este dată de :

$$d_{Cx} = \left(\frac{w \left(\frac{c}{4}(2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right) \left(\sqrt{\frac{2\pi\sigma_n^2}{\exp(1)P_t\eta^2 r^2}} \left(\exp\left(\frac{2C}{B}\right) - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\left(\frac{\varepsilon-2}{4} \right)} \right)}{\frac{c}{4}(2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}}} \right)^{\frac{2}{2-\varepsilon}}, \quad (5.8)$$

În mod similar, distanța maximă de comunicare care satisface un obiectiv BER este dată de [57]:

$$d_{ex} = \left(\frac{w \left(\frac{c}{4}(2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right) \left(2\sqrt{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma_n^2}{P_t\eta^2 r^2}} \right) \left(\operatorname{erfc}^{-1}(2P_e) \right)^{\left(\frac{\varepsilon-2}{4} \right)} \right)}{\frac{c}{4}(2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}}} \right)^{\frac{2}{2-\varepsilon}}, \quad (5.9)$$

5.2.2 Legătură multi-relay

Considerăm o legătură multi-relay bazată pe implementarea a M relays intermediare (vezi Figura 5.1) cu distanță de separare egală (d_{relay}), astfel că capacitatea pentru toate relays C_{relay} este dată aproximativ de :

$$C_{\text{relay}} \approx \frac{C_T}{M+1}, \quad (5.10)$$

Din (5.8) și (5.10), distanța maximă pentru legătura multi-relay bazată pe capacitatea țintă este dată de :

$$d_x < (M+1) \left(\left(\frac{w \left(\frac{c}{4}(2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right) \left(\sqrt{\frac{2\pi\sigma_n^2(M+1)}{\exp(1)P_t\eta^2 r^2}} \left(\exp\left(\frac{2C}{B(M+1)}\right) - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\left(\frac{\varepsilon-2}{4} \right)} \right)}{\frac{c}{4}(2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}}} \right)^{\frac{2}{2-\varepsilon}} \right), \quad (5.11)$$

În mod similar, distanța maximă pentru legătura multi-relay ca funcție a obiectivului BER este derivată ca [57]:

$$d_x < (M + 1) \left(\frac{W \left(\frac{c}{4} (2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right) \left(2\sqrt{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma_n^2 (M+1)}{P_t \eta^2 r^2}} \right) \left(\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{2P_e}{(M+1)} \right) \right)^{\left(\frac{\varepsilon-2}{4} \right)} \right)}{\frac{c}{4} (2-\varepsilon) \left(\frac{Dr}{\zeta} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}}} \right)^{\frac{2}{2-\varepsilon}}, \quad (5.12)$$

5.3 Impactul condițiilor atmosferice

5.3.1 Scenarii Multi-Relay

Figura 5.2 arată distanța maximă pentru o legătură directă ($M = 0$). Observăm că ploaia are un impact minor, în timp ce ceața moderată și cea densă reduc semnificativ raza de acțiune. Puterea mai mare îmbunătățește raza, dar ceața încă degradează performanța.

5.3.2 Scenarii cu mai mulți rele

Figura 5.3 arată distanța maximă pentru un sistem cu mai mulți rele ($M = 3$) în diferite condiții meteorologice și niveluri de putere. Observăm că ploaia are un efect minor, în timp ce ceața reduce semnificativ raza de acțiune din cauza dispersiei și absorbției fotonilor.

5.3.3 Evaluarea modelelor de legătură directă și multi-relay

Figura 5.4 prezintă distanța maximă pentru legături directe și cu mai mulți rele în condiții de vreme clară și ceață densă, comparând modelul propus cu modelul Lambertian. Rezultatele arată că modelul Lambertian subestimează distanța deoarece ignoră factori importanți precum efectele atmosferice, alinierea unghiulară și divergența fasciculului.

5.4 Impactul diferitelor deschideri ale receptorului

Figura 5.5 analizează distanța maximă în funcție de capacitate pentru diferite dimensiuni ale aperturii (1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm). Rezultatele arată că mărirea diametrului îmbunătățește semnificativ distanța maximă, datorită suprafeței de recepție mai mari, care permite receptorului să capteze mai mulți fotoni.

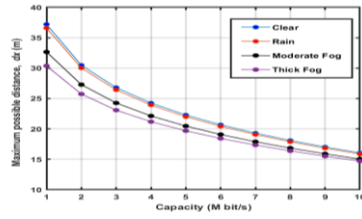
5.5 Impactul numărului de rele, capacitate, BER

5.5.1 Impactul numărului de rele asupra distanței maxime

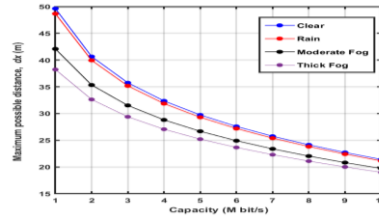
Figura 5.6 arată că efectul creșterii numărului de rele îmbunătățește semnificativ distanța de transmisie. Aceste constatări confirmă că includerea unui număr mai mare de rele sporește fiabilitatea sistemului și extinde acoperirea.

5.5.2 Influența capacității și a BER asupra distanței maxime.

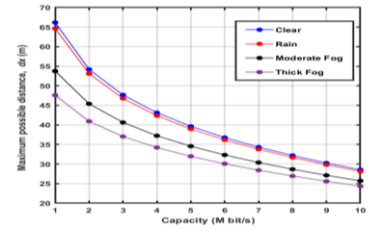
Figura 5.7 analizează impactul nivelurilor de capacitate asupra distanței maxime. Se observă că distanța de transmisie se îmbunătățește pe măsură ce crește numărul de rele intermediare. De asemenea, se constată că o cerință mai strictă privind rata de eroare pe bit (BER) duce la o reducere a distanței de transmisie. Această tendință evidențiază compromisul dintre obținerea unor valori BER mai mici și scăderea corespunzătoare a distanței maxime de transmisie.



(a)

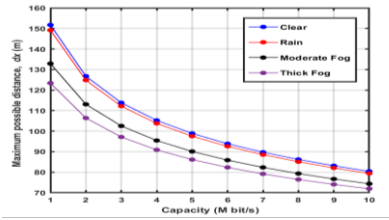


(b)

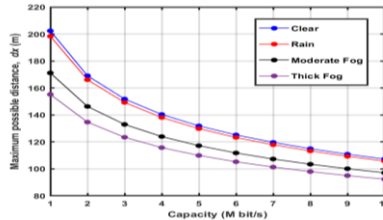


(c)

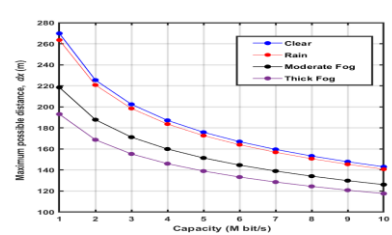
Figura 5.2 Distanța maximă a legăturii directe vs. capacitatea în condiții diferite



(a)



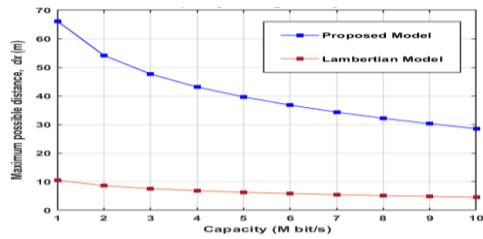
(b)



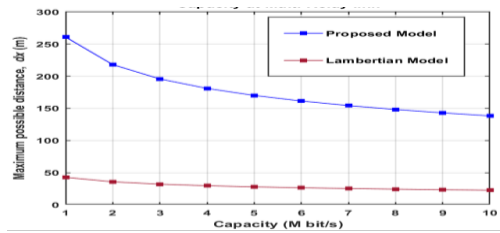
(c)

Figura 5.3 Distanța maximă a multi-relay vs. capacitatea în condiții diferite

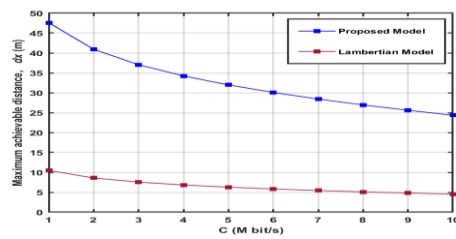
(a) Clear weather, direct link



(b) Clear weather, multi-relay link



(c) Thick fog, direct link



(d) Thick fog, multi-relay link

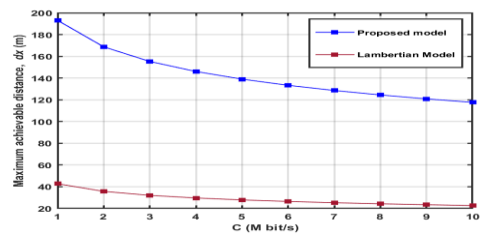
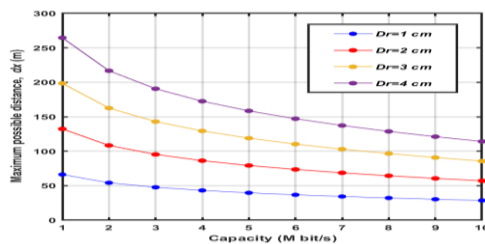
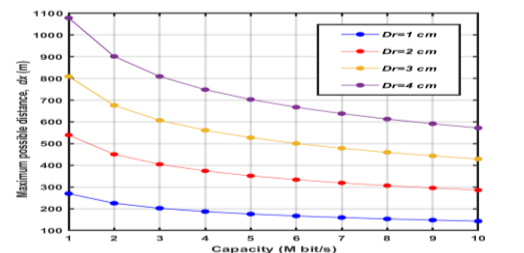


Figura 5.4 Raza maximă pentru modelele propus și Lambertian: pentru legături directe și multi-relay



(a)



(b)

Figura 5.5 Distanța maximă vs. capacitate la aperturi variabile (a) legătură directă (b) legătură multi-relay.

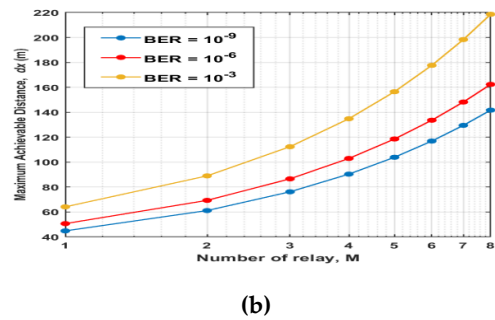
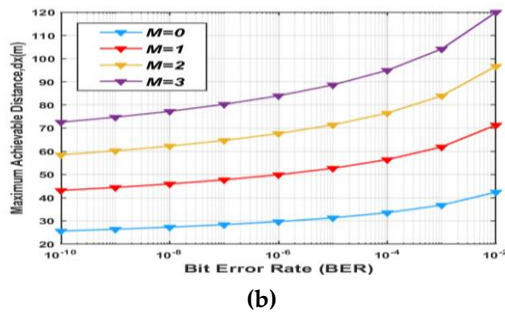
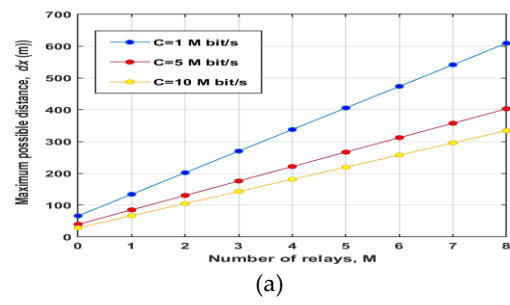
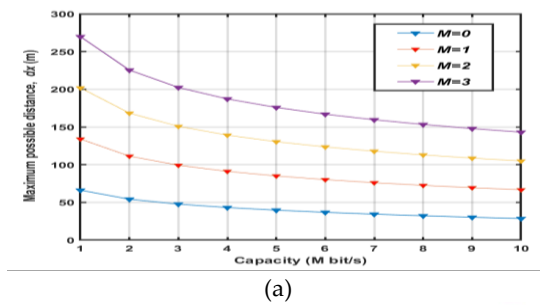


Figura 5.6 Distanța maximă vs. (a) Capacitate și (b) BER la diferite numere de rele (M).

Figura 5.7 Distanța maximă vs. numărul de rele pentru (a) Capacități (b).

5.6 Concluzii

Acest capitol evaluează performanța comunicațiilor V2V-VLC cu rele multiple în condiții realiste de canal, ținând cont de modelele asimetrice ale farurilor. Un model în formă închisă estimează distanța maximă de comunicare în funcție de capacitatea sistemului, luând în considerare diverse condiții meteorologice și parametri de sistem. Rezultatele arată că ceața densă reduce raza de acțiune directă cu aproximativ 19,5% (până la 33 m la 25 dBm), în timp ce utilizarea a trei rele o extinde până la 140 m în condiții de ceață și 170 m în condiții de vreme clară. Comparativ cu modelul Lambertian, modelul propus oferă o acuratețe mai ridicată. O apertură de 4 cm permite o acoperire de până la 700 m, iar șapte rele ating 358 m la 5 Mbps. Relele multi-hop îmbunătățesc semnificativ acoperirea și fiabilitatea în medii dificile. Aceste constatări evidențiază eficiența strategiilor multi-hop în îmbunătățirea performanței și fiabilității sistemelor V2V-VLC în condiții reale diverse. Rezultatele discutate în acest capitol au fost publicate în următorul articol:

[53] Al Hasnawi, R., Marghescu, C. I., & Rusu-Casandra, A. "Enhancing Vehicular VLC Systems with Multi-Relay Techniques: A Performance Evaluation". Electronics, 14(6), 1170. (2025). (WOS: 001453878700001).

Capitolul 6

Concluzii

Tehnologia Comunicării prin Lumină Vizibilă (VLC) a apărut ca o alternativă promițătoare la comunicațiile tradiționale prin radio, în special în rețelele vehiculare. Prin facilitarea schimbului de date între vehicule și infrastructură, VLC joacă un rol crucial în sistemele de transport inteligent (ITS), susținând obiective cheie, cum ar fi îmbunătățirea siguranței rutiere, îmbunătățirea experienței pasagerilor și optimizarea managementului traficului. Această teză se concentrează pe integrarea VLC cu tehnici multi-hop bazate pe aplicații vehiculare, o abordare inovativă care vizează îmbunătățirea performanței, acoperirii și fiabilității sistemelor vehiculare, în special în medii provocatoare și scenarii de tip non-line-of-sight. Această lucrare contribuie la dezvoltarea unor sisteme de comunicare robuste și eficiente între Vehicule (V2V). Teza este structurată în șase capitole:

- **Capitolul unu** oferă o prezentare generală introductivă a tezei, care include o definiție a comunicațiilor prin lumină vizibilă „VLC” și aplicațiile sale în comunicațiile vehiculare, descriind principalele caracteristici ale VLC, obiectivele principale ale tezei și scopul studiului.
- **Capitolul doi** oferă o revizuire detaliată a literaturii privind arhitecturile VLC vehiculare, concentrându-se pe aplicațiile VLC vehiculare, cum ar fi platooning-ul, navigarea în intersecții și schimbarea benzilor. Capitolul explorează, de asemenea, principalele provocări cu care se confruntă sistemele VLC vehiculare, inclusiv reflexiile de pe drum, zgomotul generat de lumina naturală și artificială și efectele vremii. Capitolul definește criteriile cheie pentru modelarea canalelor VLC vehiculare, acoperind asimetria luminilor vehiculului, mobilitatea vehiculului și propagarea atmosferică.
- **Capitolul trei** explorează performanța sistemelor V2V-VLC, utilizând o abordare de trasare a razelor pentru a obține o modelare precisă a canalului, având în vedere distribuția neuniformă a emisiunilor farurilor. Studiul oferă o evaluare detaliată a modului în care deplasarea laterală, condițiile atmosferice și sursele de lumină ambientale afectează indicatorii cheie de performanță, cum ar fi „raportul semnal-la-zgomot (SNR)”, „rata de eroare a bitilor (BER)” și capacitatea sistemului.
- **Capitolul patru** prezintă un studiu cuprinzător asupra performanței sistemelor „V2V-VLC”, incluzând modele de canal realiste și condiții practice. Acest studiu evaluează mai multe modele de canal, inclusiv modelul Lambertian, modelul liniar, modelul exponențial și modelul cuprinzător, și evaluează comportamentul acestora în diferite condiții meteorologice, cum ar fi vremea clară, ploaia, ceața moderată și ceața densă. Metricile cheie de performanță, inclusiv „rata de eroare a bitilor (BER)”, „raportul semnal-la-zgomot (SNR)” și capacitatea sistemului, sunt analizate pentru a compara punctele forte și slăbiciunile fiecărui model. Modelul cuprinzător este validat folosind datele de canal realiste obținute din măsurători experimentale.

- **Capitolul cinci** examinează performanța unui sistem „multi-relay V2V-VLC” în condiții realiste de canal, având în vedere efectul iluminării asimetrice a farurilor. A fost dezvoltat un model în formă închisă pentru a determina distanța maximă posibilă de comunicare pe baza cerințelor de capacitate ale sistemului. Studiul a evaluat efectele diferitelor condiții meteorologice, inclusiv vremea clară, ploaia și ceața, împreună cu parametrii cheie ai transceptorilor, cum ar fi puterea de transmisie, numărul de relee și dimensiunea deschiderii receptorului. O comparație între modelul propus și modelul Lambertian relevă variații substanțiale ale performanței, demonstrând limitările modelelor convenționale. În plus, studiul evidențiază avantajele strategiilor multi-relay în extinderea distanței de comunicare, mai ales în condiții de vizibilitate dificilă. Prin încorporarea releelor intermediare, sistemul îmbunătățește acoperirea, conectivitatea și fiabilitatea, sporind eficiența transmisiunii de date.

6.1 Lista publicațiilor originale

- Articole publicate în timpul etapei de doctorat

- 1- Al Hasnawi, R., & Marghescu, I. “*A survey of vehicular VLC methodologies*”. Sensors, 24(2), 598,(2024). (WOS:001151044400001), [1].

- 2- Al Hasnawi, R., Marghescu, I., & Rusu-Casandra, A.“*Reliability and Capacity Evaluation for Vehicle-to-Vehicle VLC* ”.In 15th International Conference on Communications (COMM 2024, October)(pp. 1-6). IEEE xplore,(DOI :10.1109/COMM62355.2024.10741390), [46].

- 3- Al Hasnawi, R., Marghescu, I., & Amjed A Al-Mudhafar.“*Comprehensive Evaluation of Environmental Impact on the Performance of V2V Visible Light Communication*”.In 5th Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM 2025)(pp.1-6).IEEE xplore, (DOI:10.1109/MENACOMM62946.2025.10911014) [45].

- 4- Al Hasnawi, R., Militaru, N., & Rusu-Casandra, A.“ *Influence of Channel Modeling and Atmospheric Conditions on the Reliability and Capacity of V2V VLC Systems*”. In 15th International Conference on Communications (COMM 2024, October), (pp. 1-6). IEEE xplore, (DOI: 10.1109/COMM62355.2024.10741462), [47].

- 5- Al Hasnawi, R., Marghescu, C. I., & Rusu-Casandra, A. “*Enhancing Vehicular VLC Systems with Multi-Relay Techniques: A Performance Evaluation*”. Electronics, 14(6), 1170,(2025).(WOS:001453878700001), [53].

6.2 Lucrări viitoare

În viitor, o explorare mai aprofundată a tehnologiilor și aplicațiilor de comunicații vizibile în interiorul vehiculelor ar putea îmbunătăți semnificativ siguranța în cadrul sistemelor inteligente de transport (ITS). Direcțiile cheie de cercetare includ:

- 1.Inteligența artificială și învățarea automată: Aplicarea algoritmilor de inteligență artificială și învățare automată în comunicațiile vizibile în vehicul oferă un potențial promițător pentru îmbunătățirea performanței sistemului și sporirea siguranței, făcând sistemele vizibile din vehicul mai adaptabile și mai robuste.

- 2.Integrarea comunicațiilor hibride: Explorarea integrării comunicațiilor "dedicate short-range communications (DSRC)" și "cellular V2X (C-V2X)" cu VLC pentru a îmbunătăți eficiența comunicațiilor vehiculare. Abordarea hibridă ar putea spori atât fiabilitatea comunicației, cât și capacitatea de date, în special în medii cu cerințe variate de comunicare.

- 3.Validare experimentală în scenarii reale: Realizarea de experimente pe teren în medii urbane și rurale este esențială pentru a evalua performanța practică a sistemelor V2V-VLC. Testele practice vor oferi date valoroase pentru optimizarea sistemului și orientări pentru îmbunătățiri viitoare.

Bibliography

- [1] Al Hasnawi, R., & Marghescu, I. , "A Survey of Vehicular VLC Methodologies," *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 598, 2024.
- [2] MacHardy, Z., Khan, A., Obana, K., & Iwashina, S., "V2X access technologies: Regulation, research, and remaining challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1858-1877, 2018.
- [3] Ghafoor, K. Z., Guizani, M., Kong, L., Maghddid, H. S., & Jasim, K. F., " Enabling efficient coexistence of DSRC and C-V2X in vehicular networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 134-140, 2019.
- [4] Xu, Z., Li, X., Zhao, X., Zhang, M. H., & Wang, Z., "DSRC versus 4G-LTE for connected vehicle applications: A study on field experiments of vehicular communication performance," *Journal of advanced transportation*, 2017.
- [5] Gerhátné Udvary, E., " Visible light communication survey," *Infocommunications journal*, vol. 11, no. 2, pp. 22-31, 2019.
- [6] Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P., & Mohapatra, P. , "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges.," *IEEE communications surveys & tutorials.*, vol. 17, no. 4, pp. 2047-2077, 2015.
- [7] H. Haas, "LiFi: Conceptions, misconceptions and opportunities," in *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2016.
- [8] Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V., & Parthiban, R., "LED based indoor visible light communications: State of the art," *EEE communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649-1678, 2015.
- [9] Cailean, A. M., & Dimian, M., "Impact of IEEE 802.15. 7 standard on visible light communications usage in automotive applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 4, pp. 169-175, 2017.
- [10] Liu, C. B., Sadeghi, B., & Knightly, E. W., "Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks.," in *Vehicular inter-networking* , 2011, September.
- [11] Matheus, L. E. M., Vieira, A. B., Vieira, L. F., Vieira, M. A., & Gnawali, O, "Visible light communication: concepts, applications and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204-3237, 2019.
- [12] Căilean, A. M., & Dimian, M., "Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, , vol. 19, no. 4, pp. 2681-2703, 2017.
- [13] Kashef, M., Abdallah, M., Qaraqe, K., Haas, H., & Uysal, M., "Coordinated interference management for visible light communication systems," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 17, no. 11, pp. 1098-1108, 2015.
- [14] Eldeeb, H. B., Selmy, H. A., Elsayed, H. M., & Badr, R. I., "Co-channel interference cancellation using constraint field of view ADR in VLC channel," in *2017 IEEE Photonics Conference (IPC) Part II*, 2017.
- [15] Eldeeb, H. B., Eso, E., Uysal, M., Ghassemloooy, Z., Zvanovec, S., & Sathian, J., "Vehicular visible light communications: The impact of taillight radiation pattern," in *2020 IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2020.
- [16] Eldeeb, H. B., Miramirkhani, F., & Uysal, M., "A path loss model for vehicle-to-vehicle visible light communications," in *In 2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, 2019.

- [17] Karbalayghareh, M., Miramirkhani, F., Eldeeb, H. B., Kizilirmak, R. C., Sait, S. M., & Uysal, M., "Channel modelling and performance limits of vehicular visible light communication systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, pp. 6891-6901, 2020.
- [18] Malta, L., Miyajima, C., & Takeda, K., "A study of driver behavior under potential threats in vehicle traffic," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 201-210, 2009.
- [19] A. Carter, "The status of vehicle-to-vehicle communication as a means of improving crash prevention performance," *Tech. Rep. 05-0264*, 2005.
- [20] Meneguet, R. I., De Grande, R., & Loureiro, A. A., "Intelligent transport system in smart cities. Cham:," Springer International Publishing, 2018.
- [21] "DSRC, Toyota commits big to," [Online]. Available: <https://www.gardnerweb.com/automotive>.
- [22] "V2X, Cellular," [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/invention/5g/0%20cellular-v2x/ecosystem>.
- [23] Uysal, M., Ghassemlooy, Z., Bekkali, A., Kadri, A., & Menouar, H., "Visible light communication for vehicular networking: Performance study of a V2V system using a measured headlamp beam pattern model," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 45-53, 2015.
- [24] "Car Lighting District. Halogen vs. HID vs. LED—Which is Best?," 2019. [Online]. Available: <https://www.carlightingdistrict.com/>.
- [25] Memedi, A., & Dressler, F., "Vehicular visible light communications: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 161-181, 2020.
- [26] Sharda, P., Bhatnagar, M. R., & Ghassemlooy, Z., "communication system under shadowing and investigation of the diversity-multiplexing tradeoff," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 9, pp. 9460-9474, 2022.
- [27] Vieira, M. A., Vieira, M., Louro, P., & Vieira, P., "Connected cars: road-to-vehicle communication through visible light," in *Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems VIII*, 2019, February.
- [28] Eso, E., Ghassemlooy, Z., Zvanovec, S., Gholami, A., Burton, A., Hassan, N. B., & Younus, O. I., "Experimental demonstration of vehicle to road side infrastructure visible light communications," in *2019 2nd West Asian Colloquium on Optical Wireless Communications (WACOWC)*, 2019.
- [29] Amjad, M. S., Tebruegge, C., Memedi, A., Kruse, S., Kress, C., Scheytt, C., & Dressler, F., "An IEEE 802.11 compliant SDR-based system for vehicular visible light communications," in *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019.
- [30] TEBRUEGGE, Claas; ZHANG, Qiaoshuang; DRESSLER, Falko., "Optical interference reduction with spatial filtering receiver for vehicular visible light communication," in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2019.
- [31] Yahia, S., Meraihi, Y., Ramdane-Cherif, A., Ho, T. D., & Eldeeb, H. B., "Enhancement of Vehicular Visible Light Communication Using Spherical Detector and Custom Lens Combinations," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21600-21611, 2023.
- [32] Luo, P., Ghassemlooy, Z., Le Minh, H., Bentley, E., Burton, A., & Tang, X., "Performance analysis of a car-to-car visible light communication system," *Applied Optics*, vol. 54, no. 7, pp. 1696-1706, 2015.

- [33] Tebruegge, Claas, Agon Memedi, and Falko Dressler, "Empirical characterization of the NLOS component for vehicular visible light communication.," in 2019 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2019.
- [34] K. Cui, "Physical layer characteristics and techniques for visible light communications," University of California, Riverside, 2012.
- [35] Singh, G., Srivastava, A., & Bohara, V. A., "Impact of Weather Conditions and Interference on the Performance of VLC based V2V Communication," in 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2019.
- [36] Eldeeb, H. B., Mana, S. M., Jungnickel, V., Hellwig, P., Hilt, J., & Uysal, M., "Distributed MIMO for Li-Fi: Channel measurements, ray tracing and throughput analysis," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 16, pp. 916-919, 2021.
- [37] Eldeeb, H. B., Elamassie, M., & Uysal, M., "Vehicle-to-infrastructure visible light communications: Channel modelling and capacity calculations," in 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing(CSNDSP), 2020.
- [38] Eldeeb, H. B., Sait, S. M., & Uysal, M., "Visible light communication for connected vehicles: How to achieve the omnidirectional coverage?," IEEE Access, vol. 9, pp. 103885-103905, 2021.
- [39] Tseng, H. Y., Wei, Y. L., Chen, A. L., Wu, H. P., Hsu, H., & Tsai, H. M., "Characterizing link asymmetry in vehicle-to-vehicle visible light communications," in 2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2015.
- [40] Memedi, A., Tsai, H. M., & Dressler, F., "Impact of realistic light radiation pattern on vehicular visible light communication.," in GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, 2017.
- [41] Ashraf, K., Islam, S. T., Hosseini, A. S., & Ashok, A., "Motion characterization for vehicular visible light communications," in 2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS), 2019, January.
- [42] Singh, G., Srivastava, A., & Bohara, V. A., "On feasibility of vlc based car-to-car communication under solar irradiance and fog conditions.," in Proceedings of the 1st International Workshop on Communication and Computing in Connected Vehicles and Platooning, 2018.
- [43] Danys, L., Martinek, R., Slanina, Z., Kolarik, J., & Jaros, R., "The impact of rain on performance of visible light communication.," in Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 2019.
- [44] Eldeeb, H. B., Eso, E., Jarchlo, E. A., Zvanovec, S., Uysal, M., Ghassemloooy, Z., & Sathian, J., "Vehicular VLC: A ray tracing study based on measured radiation patterns of commercial taillights," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 16, pp. 904-907, 2021.
- [45] Al Hasnawi, R., Marghescu, I., & Amjed A Al-Mudhafar, "Comprehensive Evaluation of Environmental Impact on the Performance of V2V Visible Light Communication," in 2025 5th IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM),(pp. 1-6). IEEE., 2025.
- [46] Al Hasnawi, R., Marghescu, I., & Rusu-Casandra, A., "Reliability and Capacity Evaluation for Vehicle-to-Vehicle VLC," in 2024 15th International Conference on Communications (COMM) , 2024.
- [47] Al Hasnawi, R., Militaru, N., & Rusu-Casandra, A., "Influence of Channel Modeling and Atmospheric Conditions on the Reliability and Capacity of V2V-VLC Systems," in 2024 15th International Conference on Communications (COMM) (pp. 1-6). IEEE., 2024, October.

- [48] Yahia, S., Meraihi, Y., Refas, S., Gabis, A. B., Ramdane-Cherif, A., & Eldeeb, H. B., "Performance study and analysis of MIMO visible light communication-based V2V systems," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 9, p. Optical and Quantum Electronics, 2022.
- [49] Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S., "Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®," CRC press, 2019.
- [50] Refas, S., Acheli, D., Yahia, S., Meraihi, Y., Eldeeb, H. B., Ho, T. D., ... & Shimamoto, S., "Analysis of Communication Distance and Energy Harvesting for Vehicular VLC Using Commercial Taillights," in 2023 5th International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI), 2023.
- [51] Yin, L., & Haas, H., "Physical-layer security in multiuser visible light communication networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 1, pp. 162-174, 2017.
- [52] Chaaban, A., Morvan, J. M., & Alouini, M. S., "Free-space optical communications: Capacity bounds, approximations, and a new sphere-packing perspective," *IEEE Transactions on communications*, vol. 64, no. 3, pp. 1176-1191, 2016.
- [53] Al Hasnawi, R., Marghescu, C. I., & Rusu-Casandra, A. , "Enhancing Vehicular VLC Systems with Multi-Relay Techniques: A Performance Evaluation.," *Electronics*, vol. 14, no. 6, p. 1170, 2025.
- [54] Elamassie, M., Karbalayghareh, M., Miramirkhani, F., Kizilirmak, R. C., & Uysal, M., "Effect of fog and rain on the performance of vehicular visible light communications," in 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2018.
- [55] Akanegawa, M., Tanaka, Y., & Nakagawa, M., "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 197-203, 2001.
- [56] Lee, I. E., Sim, M. L., & Kung, F. W. L. , "Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver," *IET optoelectronics*, vol. 3, no. 1, pp. 30-39, 2009.
- [57] Refas, S., Acheli, D., Yahia, S., Meraihi, Y., Ramdane-Cherif, A., Gabis, A. B., & Eldeeb, H. B., "Performance Analysis of Multi-Hop V2V VLC System under Atmospheric Weather Conditions," in 2022 IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), 2022.