UNIVERSITATEA "ȘTEFAN CEL MARE" SUCEAVA FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR Domeniul Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

CONTRIBUȚII PRIVIND DEZVOLTAREA SISTEMELOR INTELIGENTE DE COMUNICAȚII PRIN LUMINĂ VIZIBILĂ PENTRU SIGURANȚA AUTOVEHICULELOR

- Rezumatul tezei -

Îndrumător: *Prof. univ. dr. ing. Valentin POPA*

> Doctorand: Drd. ing. Sebastian-Andrei AVĂTĂMĂNIŢEI

Suceava 2022

Cuprins

Introducere	1
Capitolul I. Stadiul actual al dezvoltării sistemelor de comunicații prin lumină vizibilă	4
1.1 Istoric	4
1.2 Aplicații și performanțe actuale	5
1.2.1 Comunicații optice fără fir dedicate mediului interior	6
1.2.2 Comunicații optice fără fir dedicate mediului exterior	7
1.3 Aspecte legate de comunicații prin lumină vizibilă în domeniul auto	9
1.3.1 Particularități specifice utilizării tehnologiei VLC în aplicații rutiere	9
1.3.2 Progrese recente în aplicațiile VLC auto	11
1.3.3 Sisteme VLC auto rezistente la zgomot	13
1.3.4 Sisteme VLC auto cu rază mare de acoperire	14
1.3.5 Sisteme VLC auto cu rată mare de transfer al datelor	15
1.4 Rezumatul și concluziile privind evoluția sistemelor VLC destinate aplicațiilor rutier	e 16
Capitolul II. Analiza și definirea comunicațiilor prin lumină vizibilă în mediul ambiant	23
2.1 Caracteristicile comunicațiilor prin lumină vizibilă	24
2.2 Caracteristicile emițătorului VLC	24
2.3 Caracteristicile canalului de comunicații VLC	26
2.4 Efectul zgomotului asupra canalului de comunicații	26
2.5 Atenuarea dată de diferitele fenomene meteo	28
2.5.1 Atenuarea pe timp senin	28
2.5.2 Atenuarea dată de ploaie	29
2.5.3 Atenuarea dată de ninsoare	29
2.5.4 Atenuarea dată de ceață	30
2.6 Caracteristicile receptorului VLC	31
2.7 Rezumatul și concluziile privind influența mediului ambiant asupra sistemelor VLC.	32
Capitolul III: Provocări asociate utilizării VLC în mediul auto	33
3.1 Modelul matematic ce definește un sistem de comunicații de tip infrastructură-vehicu	ul 33
3.2 Condiții meteorologice: Probleme și soluții asociate	35
3.3 Aspecte legate de dezvoltarea amplificatorului de transimpedanță	37
3.3.1 Fotodetectorul	37

3.3.2 Etajul de preamplificare. Amplificatorul de transimpedanță	38
3.4 Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar continuu (ATCLC)	40
3.4.1 Modelul amplificatorului propus	40
3.4.1.1 Structura bloc a receptorului VLC	41
3.4.1.2 Descrierea circuitului propus	43
3.4.2 Analiza performanțelor amplificatorului de transimpedanță	47
3.4.2.1 Scenariul de simulare	47
3.4.2.2 Modelul de simulare	51
3.4.2.2.1 Determinarea distanței maxime de transmisie-recepție	52
3.4.2.2.2 Determinarea comportamentului generat de prezența luminii ambient nivelul canalului de comunicație	ale la:53
3.4.2.2.3 Determinarea comportamentului generat de prezența directă a luminii pe suprafața fotosensibilă a fotodiodei PIN	solare 53
3.4.2.3 Rezultatele simulării ATCLC	53
3.4.2.4 Concluzii privind simularea utilizării ATCLC în sisteme VLC destinate aplic rutiere	ațiilor 56
3.5 Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar în trepte (ATCLT)	57
3.5.1 Schema electrică a ATCLT	57
3.5.2 Analiza performanțelor ATCLT	59
3.5.2.1 Scenariul de simulare	59
3.5.2.2 Rezultatele simulării	59
3.5.2.3 Concluzii privind simularea utilizării ATCLT în sisteme VLC destinate aplic rutiere	ațiilor 62
3.5.2.3.1 Comparația ATCLC cu ATCLT	63
3.6 Amplificatorul de transimpedanță logaritmic (ATL)	65
3.6.1 Structura bloc a receptorului VLC	65
3.6.2 Schema electrică a ATL	66
3.6.3 Analiza performanțelor ATL	67
3.6.3.1 Scenariul de simulare	67
3.6.3.2 Rezultatele simulării	67
3.6.3.3 Concluzii privind simularea utilizării în sisteme VLC a ATL	70
3.7. Recapitulare și Concluzii	70

Capitolul IV: Descrierea prototipului propus pentru un nou sistem de comunicații prin lumină vizibilă destinat aplicațiilor rutiere
4.1 Aspecte legate de proiectarea și implementarea hardware a emițătorului VLC 73
4.1.1 Tehnici de modulație și codare75
4.2 Aspecte legate de proiectarea și implementarea hardware a receptorului VLC77
4.2.1 Unghiul de vizibilitate (FOV-ul)
4.2.2 Filtrele optice
4.2.3 Detectorul VLC
4.2.4 Amplificatorul de transimpedanță
4.2.4.1 Amplificatorului de transimpedanță cu câștig liniar continuu
4.2.4.2 Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar în trepte
4.2.4.3 Amplificatorul de transimpedanță logaritmic
4.2.5 Filtru adaptiv pasiv trece-bandă
4.2.6 Amplificator cu control automat al câștigului
4.2.7 Triggerul Schmitt
4.2.8 Arhitectura software a receptorului VLC
4.3 Rezumatul și concluziile privind proiectarea unui sistem VLC
Capitolul V: Evaluarea experimentală a amplificatoarelor de transimpedanță propuse
5.1 Testarea în condiții de noapte a amplificatoarelor de transimpedanță propuse. Determinarea distanței maxime
5.2 Testarea în condiții de zgomot puternic a amplificatoarelor de transimpedanță propuse: stabilirea limitelor de saturație
Capitol VI: Testarea experimentală, în condiții reale, pe baza unor scenarii, a sistemului VLC dezvoltat
6.1 Configurație experimentală nr. 1 - Distanță medie de comunicație în condiții de SNR ridicat
6.2 Configurație experimentală nr. 2 - Distanță medie de comunicație în condiții de SNR mediu
6.3 Configurație experimentală nr. 3 - Distanță lungă de comunicație în condiții de SNR scăzut
6.4 Configurație experimentală nr. 4 - Distanță mare de comunicație în condiții de soare puternic
6.5 Configurația experimentală nr. 5 - Distanță mare de comunicație în condiții de ninsoare 110
6.6 Evaluarea latenței sistemului de comunicație

6.7 Observații finale privind evaluarea experimentală a receptorului VLC și compa	atibilitatea
acestuia cu aplicațiile rutiere. Dezbatere privind performanțele sistemului VLC propu	ıs 115
Concluzii, contribuții proprii și cercetări viitoare	118
Bibliografie	126

Lista de figuri

Figura 1. Integrarea surselor de lumină LED în domeniul transporturilor ca parte a sistemelor de iluminat ale vehiculelor și a infrastructurii de transport
Figura 2. Tehnologiile de comunicații optice fără fir și aplicațiile lor
Figura 3. Tehnologia Li-Fi în viziunea Oledcomm [41]
Figura 4 . Arhitectura de baza a unui sistem VLC
Figura 5. Arhitectura sistemului propus de comunicații prin lumină vizibilă cu funcții adaptive la context
Figura 6. Schema de principiu a unui emițător VLC utilizat în infrastructura rutieră
Figura 7. Modelul emisiei Lambertiene a LED-urilor, respectiv aria de acoperire, reprezentată de $\phi_{1/2}$ și parametrul m [115]
Figura 8. Modelul canalului de comunicații
Figura 9. Schema bloc generală a unui receptor VLC pentru aplicații rutiere
Figura 10. Geometria unui model de sistem cu 2 benzi(plecând de la [9])
Figura 11. Schema bloc a unui receptor optoelectronic din punct de vedere electric
Figura 12. Structura fotodiodei PIN
Figura 13. Configurația prim etajului de amplificare (preamplificator)
Figura 14. Schema bloc a receptorului VLC propus
Figura 15. Schema generală a unui amplificator de transimpedanță
Figura 16. Schema unui ATCLC
Figura 17. Capacitățile aferente intrării inversoare prezente în circuitul de transimpedanță propus
Figura 18. Reprezentarea scenariului de evaluare prevăzut: în timp ce se primesc date de la emițătorul VLC, receptorul VLC este mai mult sau mai puțin influențat de soare. Această influență crește atunci când unghiul θ scade, în timp ce pe măsură ce θ crește, receptorul VLC face trecerea de la lumina directă a soarelui la condițiile difuze ale soarelui ($\theta > \psi c$)
Figura 19. Ilustrație schematică a caracteristicilor aditive a surselor de zgomot optic în receptoarele VLC. Se poate observa că fotodioda însumează toate sursele de lumină incidente.49
Figura 20. Modelul de simulare utilizat în analizarea amplificatoarelor de transimpedanță propuse
Figura 21. Rezultatul ATCLC. Acesta prezintă evoluția tensiunii de ieșire în funcție de intensitatea luminoasă de intrare, punctând limita sa de saturație în contextul utilizării unui FOV larg de $\pm 55^{\circ}$

Figura 22. Rezultatele simulării ATCLC ce prezintă efectul scăderii FOV-ului pentru: a. ± 30°; b. ± 15°; c. ± 7,5°
Figura 23. Rezultatele simulării ce prezintă efectul expunerii directe la soare a fotodiodei PIN pe măsură ce unghiul incident crește (soarele răsare)
Figura 24. Schema electrică a ATCLT comandat de microcontroler
Figura 25. Rezultatele simulării ATCLT. Figura prezintă evoluția tensiunii de ieșire în funcție de lumina de intrare, prezentând și limitele sale de saturație în contextul utilizării unui FOV larg de $\pm 55^{\circ}$
Figura 26. Rezultatele simulării ATCLT ce prezintă efectul scăderii FOV-ului pentru: $a. \pm 30^{\circ}$; $b. \pm 15^{\circ}$; $c. \pm 7,5^{\circ}$
Figura 27. Compararea rezultatelor simulării ATCLT cu cele ale ATCLC. Acesta prezintă evoluția tensiunii de ieșire în funcție de lumina de intrare în contextul utilizării unui FOV larg de $\pm 55^{\circ}$
Figura 28. Comparația rezultatelor simulării ATCLT cu cele ale ATCLC, ce analizează efectul scăderii FOV-ului pentru: a). $\pm 30^{\circ}$; b). $\pm 15^{\circ}$; c). $\pm 7,5^{\circ}$
Figura 29. Schema electrică a ATL
Figura 30. Rezultatele evaluării unui ATL. Rezultatele arată variația valorii tensiunii de ieșire atunci când este luat în considerare un FOV larg $(\pm 55^{\circ})$
Figura 31. Rezultatele simulării care prezintă efectul scăderii FOV-ului pentru: a). $\pm 30^{\circ}$; b). $\pm 15^{\circ}$; c). $\pm 7,5^{\circ}$
Figura 32. Emițătorul VLC implementat utilizând un semafor standard de 200 mm
Figura 33. Diagrama construirii cadrului de date la nivelul emițătorului VLC
Figura 34. Reprezentarea schematică a receptorului VLC
Figura 35. Funcționarea sistemului de control al unghiului de recepție al receptorului VLC 78
Figura 36. Schema bloc a FOV-ului adaptiv
Figura 37. Filtre optice Celestron
Figura 38. a) Spectrul luminos pe timp de zi la o expunere indirectă la lumina soarelui. b) Spectrul luminos pe timp de zi la o expunere indirectă la lumina soarelui utilizând un filtru de culoare roșie
Figura 39. Fotodioda BPX61 utilizată în implementările hardware realizate
Figura 40. Implementarea hardware a ATCLC (chenarul portocaliu nr.1)
Figura 41. Implementarea hardware a ATCLT. 1. Chenarul portocaliu - amplificatorul operațional al amplificatorului de transimpedanță. 2. Chenarul albastru – circuitele de comandă a rezistenței de sarcină aferentă amplificatorului de transimpedanță. 3. Chenarul verde – alte etaje de amplificare ce succed amplificatorul de transimpedanță. 4. Chenarul turcoaz - circuit de

	1
mediere a componentei continue. 5. Chenar galben-muștar – circuit de mediere a semnalului	i de
date după primele etaje de amplificare	. 83
Figura 42. Schema unui ATCLT cu potențiometru digital	. 84
Figura 43. Implementarea hardware a ATL	. 85
Figura 44. Sistemul de filtrare adaptiv	. 86

Figura 50. Capturile de osciloscop care ilustrează procesul de reconstrucție a semnalului la nivelul diferitelor blocuri ale receptorului VLC: Canalul 1 (portocaliu) arată semnalul de la ieșirea circuitului de transimpedanță logaritmic; Canalul 2 (albastru) arată semnalul de la ieșirea circuitului de transimpedanță după o amplificare de 24x; Canalul 3 (violet) arată semnalul de la ieșirea blocului de filtrare; Canalul 4 (verde) arată semnalul de date reconstruit.

Figura 57. BER-ul în funcție de SNR...... 109

Figura 58. Evaluarea experimentală a sistemului VLC auto propus, în condiții de ninsori exterioare pe o distanța de comunicație de 50 metri între semafor (emițătorul VLC) și receptorul VLC. În această configurație, canalul VLC este perturbat de episoade de ninsori și viscol. 112

Lista de tabele

Tabel 1. Rezumatul performanțelor unor sisteme VLC auto concentrate pe rezistența la zgomot.
Tabel 2. Rezumatul performanțelor unor comunicații VLC pentru aplicații rutiere cu rază mare de acoperire
Tabel 3. Rezumatul performanțelor unor sisteme VLC auto concentrate pe obținerea de rate maride transfer al datelor.19
Tabel 4. Parametrii de atenuare corespunzători ploii. 29
Tabel 5. Parametrii A și B de atenuare corespunzători ninsorii
Tabel 6. Parametrii sistemului propus în [9]
Tabel 7. Rezumatul surselor de perturbație și efectul acestora asupra sistemelor VLC pentruaplicații rutiere
Tabel 8. Scenarii pentru perturbarea canalului de comunicații cu lumină solară
Tabel 9. Parametrii de intrare principali avuți în vedere în procesul de testare și simulare a amplificatorului de transimpedanță propus
Tabel 10. Rezumatul rezultatelor simulării privind limitele de transmisie-recepție a circuitului de transimpedanță cu câștig liniar continuu și limitele de saturare în diverse condiții
Tabel 11. Rezumatul rezultatelor simulării privind limitele de transmisie-recepție a ATCLT șilimitele de saturare în diverse condiții.60
Tabel 12. Rezumatul rezultatelor simulării privind limita de transmisie-recepție a ATL și limitelede saturare în diverse condiții.67
Tabel 13. Compararea rezultatelor simulării în vederea identificării celui mai potrivit amplificator operațional pentru receptoarele VLC dedicate mediului rutier
Tabel 14. Parametrii fotodiodei alese
Tabel 15. Rezumatul parametrilor experimentali
Tabel 16. Rezumatul parametrilor comuni ai receptorului VLC folosit în timpul testelor
Tabel 17. Rezultatele testelor de determinare a distanței maxime de transmisie-recepție. Distanța marcată cu * prezintă un grad de acuratețe mai scăzut în raport cu celelalte valori determinate.
Tabel 18. Rezultatele testelor de determinare a limitei de saturație.
Tabel 19. Rezumatul rezultatelor experimentale pentru configurația nr. 1. 99
Tabel 20. Rezumatul rezultatelor experimentale pentru configurația nr. 2. 100
Tabel 21. Rezumatul rezultatelor experimentale pentru configurația nr. 3. 103
Tabel 22. Rezumatul evaluării experimentale a sistemului VLC în diferite condiții exterioare. 108

Tabel 23. Rezumatul condițiilor meteorologice în timpul testelor în aer liber	0
Tabel 24. Rezumatul configurației sistemului VLC în timpul testelor realizate în aer liber îcondiții de ninsoare	'n 0
Tabel 25. Rezumatul rezultatelor experimentale în condiții de ninsoare. 11	1
Tabel 26. Rezumatul rezultatelor experimentale care arată performanțele de latență al prototipului VLC pentru diferite tehnici de modulare, tehnici de codare și diferite rate a transfer al datelor	le le 4

Lista de abrevieri

3D	en.: Three Dimensional
5G	en.: The Fifth Generation of wireless technology
6G	en.: The Sixth Generation of wireless technology
ASCII	en.: American Standard Code for Information Interchange
ATCLC	Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar continuu
ATCLT	Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar în trepte
ATL	Amplificatorul de transimpedanță logaritmic
BER	en.: Bit Error Ratio
CMOS	en.: Complementary Metal Oxide Semiconductor
DC	en.: Direct Current
DEVAPS	en.: Distance Estimation via Asynchronous Phase Shift
DMT	en.: Discrete Multitone
DPSK	en.: Differential Phase Shift Keying
DSRC	en.: Dedicated Short-Range Communications
DSSS	en.: Direct Sequence Spread Spectrum
FOV	en.: Field Of View
FPGA	en.: Field Programmable Gate Array
GBP	en.: Gain Bandwidth Product
GPS	en.: Global Positioning System
I2V	en.: Infrastructure-to-Vehicle
ID	en.: Identification
LCD	en.: Liquid Crystal Display
LED	en.: Light Emitting Diode
Lidar	en.: Light Detection and Ranging
Li-Fi	en.: Light Fidelity
LoS	en.: Line of Sight
MIMO	en.: Multiple Input Multiple Output
Ν	en.: Negative
NE	Nord Est
OFDM	en.: (optical) Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK	en.: On Off Keying
Р	en.: Positive
PCB	en.: Printed Circuit Board
PDR	en.: Packet Delivery Ratio
PIN	en.: Positive Intrinsic Negative (photodiode)
QAM	en.: Quadrature Amplitude Modulation
RF	en.: Radio Frequency
RFID	en.: Radio-Frequency Identification
RLL	en.: Run Lenght Limited

RVR	en.: Runway Visual Range
SIK	en.: Sequence Inverse Keying
SNR	en.: Signal to Noise Ratio
SWOT	en.: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
UV	Ultraviolet
V2V	en.: Vehicle to Vehicle
VICS	en.: Vehicle Information and Communication System
VLC	en.: Visible Light Communication
VLP	en.: Visible Light Position
VSCC	en.: Vehicle Safety Communications Consortium
Wi-Fi	en.: Wireless Fidelity

Introducere

Analiza ultimilor ani a scos la iveală faptul că societatea a prezentat și prezintă un interes aparte în ceea ce privește tehnologiile de comunicații fără fir. Ca aspect notabil, de la începutul pandemiei până în prezent, traficul susținut de către acestea a crescut cu peste 50%, prognozându-se creșteri substanțiale și în viitorul apropiat [1]. Comisia Europeană estimează că numai la nivelul Europei volumul total de servicii ce depind de spectrul radio disponibil acoperă o cotă de cel puțin 200 de miliarde de euro anual, de unde reiese că digitalizarea și automatizarea celor mai multe sectoare de activitate generează și o creștere importantă a cererii de comunicații fără fir [2]. În aceste circumstanțe, organizațiile guvernamentale și comunitatea științifică depun eforturi considerabile într-o încercare comună de a identificarea atât noi soluții cu privire la gestionarea mai eficientă a spectrului radio, cât și cu privire la dezvoltarea de noi tehnologii de comunicații.

În contextul celor de mai sus, comunicațiile prin lumină vizibilă (VLC - Visible Light Communications) reprezintă o astfel de soluție. Această tehnologie propune utilizarea luminii vizibile (380-780 nm) ca purtătoare a datelor, beneficiind astfel de o lățime de bandă de aproximativ 400 THz [3], ce facilitează creșterea vitezei de comunicație până la valori de ordinul zecilor sau chiar sutelor de gigabiți pe secundă [4]-[6].

O analiză SWOT (en.: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats, însemnând o analiză a punctelor forte, punctelor slabe, oportunităților și riscurilor) a sistemelor de comunicații prin lumină vizibilă oferă o imagine extrem de favorabilă pentru acest gen de comunicații. Totuși, tehnologia în cauză este departe de un produs comercial funcționabil. O serie de impedimente și provocări frământă zilnic comunitatea științifică implicată în acest demers, impulsionând astfel apariția constantă de noi și noi soluții. Chiar și așa, aceste soluții sunt încă departe de a rezolva în modul cel mai simplu problemele specifice. Dinamica grupurilor de cercetare ce abordează acest domeniu se caracterizează printr-o creștere constantă a numărului celor implicați, acest aspect fiind evident în special în ultimii 5-6 ani. Abordările sunt multiple și se evidențiază unele direcții pe care grupurile implicate aleg să le dezvolte, ca de exemplu grupuri ce se axează pe creșterea vitezei de transfer al datelor, centre orientate spre îmbunătățirea mobilității, echipe dedicate creșterii imunității la condițiile de mediu, în timp ce sunt și unele grupuri ce prezintă noi aplicații ale acestui gen de comunicații, ca de exemplu determinarea distanței dintre mașini, prin calculul diferenței de fază, sau înlocuirea etichetelor RFID (en.: Radio-Frequency Identification) active pe autostrăzi și sectoare de drum de mare viteză.

În acest context, prezenta lucrare se concentrează pe analiza detaliată a factorilor perturbatori, încercând să îmbunătățească imunitatea sistemului la aceștia, în diferite condiții de mediu, plecând de la o analiză detaliată a tot ce definește acest tip de comunicații din punct de vedere teoretic și practic. În acest demers au fost selectate cele mai bune, explicite și detaliate articole științifice ce abordează în detaliu subiecte ca *analiza și definirea canalului de comunicații, analiza și definirea geometriei caracteristice infrastructurii rutiere, analiza și detalierea factorilor de mediu perturbatori în anumite circumstanțe date.* O înțelegere cât mai amplă a tuturor acestor aspecte ușurează identificarea de noi metode și soluții în vederea dezvoltării de sisteme de comunicații prin lumină vizibilă și totodată poate contribui substanțial

și la îmbunătățirea tuturor celorlalte soluții identificate anterior. Așadar, o astfel de analiză este mai mult decât justificată.

Comunicațiile prin lumină vizibilă reprezintă o tehnologie de comunicații fără fir aflată încă în dezvoltare, ce folosește spectrul luminii vizibile simultan pentru iluminare și pentru transmisia de date [7]. VLC este o tehnologie relativ nouă, a cărei dezvoltare a pornit la începutul anilor 2000 [8], [9]. Inițial, progresul în zona VLC a decurs destul de lent, principala cauză reprezentând-o numărul limitat de grupuri de cercetare implicate în dezvoltarea noii tehnologii. Începând cu anul 2006, au început să fie prezentate mai multe prototipuri VLC, iar din acel moment performanțele tehnologiei VLC în ceea ce privește ratele de transfer de date realizabile au crescut aproape exponențial. Astfel, sistemele VLC actuale sunt capabile să ofere rate de transfer de date de până la câteva zeci de gigabiți pe secundă [10], [11], [12], [13]. Ca atare, deși VLC a avut un start relativ lent, se pare că tehnologia a început să se dezvolte foarte rapid în ultimii ani și, pe baza acestui potențial ridicat, este considerată potrivită pentru utilizare în viitoarele aplicații 5G/6G [10].

Pe lângă faptul că are un potențial extraordinar în aplicațiile de interior cu o rată mare de transfer de date, integrarea largă a dispozitivelor LED (Figura 1) în sisteme de iluminat pentru vehicule și ca parte a infrastructurii de transport (de exemplu, sistemul de iluminat stradal, semafoarele, panourile de trafic etc.) face ca utilizarea VLC în aplicatiile auto să pară potrivită [4]. Astfel, tehnologia VLC poate contribui la îmbunătățirea siguranței rutiere împreună cu alte echipamente de ultimă generatie [14]-[16]. În acest scenariu, sistemele VLC sunt adecvate pentru comunicații de trafic Infrastructură-Vehicul (en.: Infrastructure-to-Vehicle - I2V) [17], [18] și Vehicul-cu-Vehicul (en.: Vehicle-to-Vehicle - V2V) [19], sau chiar pentru determinarea distantei dintre vehicule [20]. Cu toate acestea, chiar dacă în ultimii ani performanțele sistemelor VLC pentru autovehicule s-au îmbunătătit semnificativ, numeroase probleme încă trebuie abordate pentru a permite tehnologiei să satisfacă toate cerințele impuse de utilizarea sa în aplicațiile rutiere [4]. Astfel, fenomenele meteorologice [21], sursele puternice de lumină perturbatoare [22], mobilitatea vehiculului [23] și limitele puterii de transmisie a datelor [24] influențează performanțele de comunicație, afectând fiabilitatea, mobilitatea, rata de eroare de bit (en.: Bit Error Ratio - BER) și raportul de livrare a pachetelor de date (en.: Packet Delivery Ratio - PDR). Astfel, studiile existente prognozează că sistemele VLC destinate aplicațiilor rutiere vor fi utilizate împreună cu sistemele bazate pe comunicații în radio frecvență (en.: Radio Frequency -RF) [25]-[27].



Figura 1. Integrarea surselor de lumină LED în domeniul transporturilor ca parte a sistemelor de iluminat ale vehiculelor și a infrastructurii de transport. Distribuția largă facilitează utilizarea tehnologiei VLC.

Capitolul I. Stadiul actual al dezvoltării sistemelor de comunicații prin lumină vizibilă

Istoric

Ideea utilizării unui semnal luminos cu scopul de a transmite informații nu este chiar nouă, Alexander Graham Bell propunând și patentând această idee încă din 1880, denumind-o pe atunci Transmițător de Foto-Telefonie. Pe 3 iunie 1880, acesta reușește să transmită sunete între două clădiri aflate la o distanță de 213 metri una de alta, prin intermediul luminii solare modulate în amplitudine cu ajutorul unei oglinzi flexibile, decodarea acestor informații realizându-se prin intermediul unei celule cu seleniu. Cu toate acestea, invenția nu a căpătat aplicabilitate practică, din cauza lipsei de componente optice avansate necesare asigurării unei comunicații fiabile la aceea vreme [28], [29].

În comunitatea stiintifică modernă, unii cercetători ai acestui domeniu afirmă că primele articole referitoare la posibilitatea transmiterii de informații prin intermediul luminii ar fi apartinut unei universităti din Japonia [4], [30], [31], comunitatea stiintifică preluând ideea si dezvoltând-o ulterior. Însă, analizând cronologic evenimentele legate de VLC, descoperim că primele articole apartin lui Grantham Pang, Hugh Liu, Chi-Ho Chan si Thomas Kwan membri ai departamentului de Inginerie Electrică și Electronică al Universității Hong Kong din China. Aceste articole, publicate începând cu anul 1998, pun bazele conceptului VLC [8], [32]. Acest grup era de părere că, plecând de la capacitatea de comutare rapidă, respectiv de la puterea de emisie ridicată a noilor LED-uri, se pot obtine comunicații fără fir pe distante scurte. O serie de caracteristici definitorii, precum cantitatea de lumină ridicată, rezistența la umiditate, durata mare de viată sau costul mic de achiziție, îi determină pe acestia să creadă că în viitorul apropiat majoritatea surselor de iluminat clasice vor fi înlocuite cu cele de tip LED. Domeniul spre care aceștia și-au îndreptat atenția în urma unor experimente a fost cel rutier, unde considerau că utilizând o sursă de lumină cu acoperire redusă, ca de exemplu un semafor, poate fi asigurată comunicatia dintre vehicul si infrastructura rutieră, dar si invers, transmitând date, cum ar fi locația, informații de identificare a vehiculului sau de administrare rutieră [8], [32].

Mai târziu, în decembrie 2001, un grup de cercetători japonezi publică un articol [31] în cadrul căruia este descrisă o alternativă a Sistemului de Informare și Comunicație a Vehiculelor (en.: Vehicle Information and Communication System - VICS) ce la vremea respectivă se dovedea a fi mult prea costisitor și greu de implementat. Acest sistem dorea să furnizeze pe o hartă informații cu privire la starea actuală a traficului pe acel segment de drum, cu scopul de a identifica posibile ambuteiaje. Sistemul avea în componență un emițător și un receptor în infra-roșu capabil să detecteze vehiculele ce traversau acel segment de drum. Deși implementarea acestuia a început în anul 1992, a fost dat în folosință abia la sfârșitul anului 1997 când poliția națională japoneză deținea aproximativ 14.000 de astfel de sisteme. Cu toate că în anul 2000 numărul acestora a crescut până la 30.000 de unități, raportat la cele 1 milion de semafoare cu LED prezente în Tokushima, această tehnologie pierdea semnificativ interes din partea dezvoltatorilor, atenția îndreptându-se către comunicațiile prin lumină vizibilă [31]. Această schimbare punea bazele unei noi tehnologii, mult mai ușor de implementat pe scară largă, cu costuri mult mai reduse, ce avea să aducă multe elemente de noutate chiar dacă folosirea

semafoarelor LED cu scopul de a transmite informație fusese deja patentată [33]-[35], fără a se oferi prea multe detalii cu privire la această idee.

Câțiva ani mai târziu, comunitatea științifică realizează că din cauza factorilor perturbatori importanti, nu mediul exterior este cel mai propice dezvoltării acestei tehnologii, ci cel interior, unde unele colaborări internationale aduc progrese spectaculoase într-un timp relativ scurt. O astfel de colaborare dintre diferiți cercetători, apartinând universității Oxford din Marea Britanie și centrului de telecomunicații Samsung Electronics din Coreea de Sud, a făcut posibilă implementarea unui sistem VLC care la nivelul anului 2008 atingea viteze de transfer de 80 Mb/s [36]. Autorii pun în evidență un aspect important al comunicatiilor realizate prin lumină vizibilă în interiorul unei clădiri, acela că lumina albă a LED-urilor se obține în două moduri, fie din 3 leduri separate, unul de culoare rosie, unul de culoare albastră și unul de culoare verde, fie din LED-uri albastre peste care se depune un strat de fosfor galben. LED-ul cu fosfor galben implică un proces de fabricatie mai simplu comparativ cu utilizarea a 3 diode. De vreme ce caracteristicile de iluminat ale acestora sunt asemănătoare, acestea se bucură de popularitate în rândul corpurilor de iluminat. Un mare dezavantaj al acestor LED-uri este legat de viteza de comutare, ce este limitată la aproximativ 10 Mb/s din cauza stratului de fosfor [37]. Soluția propusă de acestia constă în filtrarea și utilizarea exclusivă a culorii albastre ce nu suferă astfel de limitări. Astfel, receptorul VLC a fost dotat cu un filtru de culoare albastră, restul spectrului fiind neglijat pe partea de comunicatie, având rol doar de iluminare [36].

Aplicații și performanțe actuale

În prezent, în privința comunicațiilor optice fără fir (Figura 2), s-au evidențiat cel puțin două domenii de aplicabilitate. Un prim domeniu îl reprezintă interiorul clădirilor unde grupurile implicate s-au concentrat atât pe dezvoltarea de comunicații de mare viteză cu scopul de a facilita o bună conexiune la internet [38], cât și pe dezvoltarea de sisteme de localizare de interior [39]-[41]. În ceea ce privește utilizarea acestui tip de comunicații în afara clădirilor, eforturile s-au canalizat în special spre mediul rutier unde dezvoltarea acestei noi tehnologii ar putea susține atât comunicația dintre vehicule și/sau dintre infrastructura rutieră și vehicule, cât și localizarea acestora în raport cu ceilalți participanți la trafic. Deși primele încercări practice ale tehnologiei VLC s-au orientat către segmentul rutier, pe care l-au găsit a fi foarte potrivit, la scurt timp, din cauza dificultăților specifice acestui mediu, atenția comunității științifice s-a reorientat către mediul interior ce s-a dovedit a fi mult mai facil dezvoltării de comunicații optice fără fir.



Figura 2. Tehnologiile de comunicații optice fără fir și aplicațiile lor.

Comunicații optice fără fir dedicate mediului interior

Dezvoltarea de legături de mare viteză, ce permit conectarea la internet, în mediul interior, domeniu cunoscut sub numele de Li-Fi (en.: Light – Fidelity) sau Wi-Fi Optic (en.: Wireless Fidelity) [42] reprezintă de departe cea mai însemnată realizare a demersului de implementarea a acestui nou tip de comunicații în viața cotidiană. Li-Fi-ul reprezintă o nouă tehnologie de comunicații ce oferă posibilitatea conectării fără fir, în mediul interior, a dispozitivelor mobile prin intermediul luminii. Compania Oledcomm, una dintre cele mai importante companii ce activează în acest domeniu, oferă în prezent sisteme VLC comerciale capabile de a asigura viteze de transfer de până la 1 Gb/s bidirecțional, pe o distanță variabilă cuprinsă între 1 și 5 m, în timp ce testele de laborator ale acestora indică posibilitatea creșterii acestei valori până la 224 Gb/s [43].



Figura 3. Tehnologia Li-Fi în viziunea Oledcomm [41].

Cea de-a două provocare de natură tehnico-științifică la care conceptul de VLC a adus contribuții semnificative o reprezintă localizarea tridimensională (3D) în cadrul unui spațiu închis, precum un spital, un muzeu, o bibliotecă sau chiar un vas de croazieră, unde sistemul clasic de localizare GPS (en.: Global Positioning System) nu poate furniza performanțe acceptabile. Localizarea în spații închise se realizează cu ajutorul a două sau mai multor surse de iluminat și un receptor. Sursele de iluminat își transmit constant ID-ul asociat unei anumite locații. Receptorul aflat în vizibilitate directă cu aceste emițătoare reușește să ofere informații precise cu privire la locația curentă [39]-[41] plecând de la o serie de informații-cheie.

Dincolo de cele două mari inițiative descrise generic anterior, s-au evidențiat și o serie de cercetători interesați de a folosi sursa de lumină generată în interiorul unui spațiu închis cu scopul secundar de a alimenta diferiți senzori fără fir sau dispozitive cu un consum redus de energie, dând naștere astfel ideii de a folosi tehnologia VLC în cadrul conceptului de *energy harvesting* (recuperare de energie) [45], [46].

Comunicații optice fără fir dedicate mediului exterior

Mediul exterior considerat de asemenea ca fiind un mediu propice dezvoltării și implementării tehnologiei VLC, nu denotă o evoluție similară tehnologiilor de interior conform rezultatelor consemnate perioadei 1998 – 2018. Fie că analizăm sistemele de localizare [48], [49], fie că analizăm sistemele de comunicație, constatăm că acestea s-au bucurat de un interes semnificativ mai scăzut, dar chiar și așa rezultatele ultimilor ani reconfirmă potențialul anterior preconizat, reorientând parțial atenția comunității științifice și atrăgând o parte din noii cercetători [4].

În prezent, cel mai comun instrument de localizare a unui vehicul este GPS-ul, însă, în ciuda popularității acestuia, performanțele sale urbane sunt considerate destul de scăzute pe străzile înguste delimitate de clădiri înalte sau chiar nule în interiorul tunelurilor sau a șoselelor subterane [50]. Pe lângă acest sistem, în vederea determinării poziției unui vehicul se mai utilizează o serie de senzori de proximitate (ex: radar, LiDAR, ultrasunete) din dorința obținerii unor informații precise cu privire la distanța față de care acesta este poziționat în raport cu elementele din jur. Totuși, o parte din cercetători sunt de părere că determinarea distanței dintre vehicule se poate realiza cu dispozitive VLC instalate în sistemele de iluminat ale autovehiculelor. O astfel de tehnologie poate furniza informații precise cu privire la distanță [55].

Comunicațiile neghidate realizate prin lumină vizibilă în mediul exterior, abordările și provocărilor actuale, dar și reacțiile generate de către acestea, urmează a fi detaliate în secțiunea următoare.

Aspecte legate de comunicații prin lumină vizibilă în domeniul auto Particularități specifice utilizării tehnologiei VLC în aplicații rutiere

Comunicațiile prin lumină vizibilă în general și aplicațiile VLC auto în special pot fi definite ca o zonă de cercetare generos de provocatoare, cu numeroase impedimente generate de condițiile de mediu ce influențează performanțele generale ale acestor sisteme de comunicații.

Figura 4 exemplifică forma de bază a unui sistem de comunicație prin lumină vizibilă. După cum se poate observa, un astfel de sistem este condiționat de prezența unui emițător VLC, a unui receptor VLC și a canalului de comunicații dintre acestea.



Figura 4 . Arhitectura de baza a unui sistem VLC.

Emițătorul VLC are în componența sa o unitate de calcul, un etaj de comandă și o sursă de iluminat LED. Sistemul de calcul este reprezentat cel mai adesea de un microcontroler sau un FPGA (en.: Field Programmable Gate Array) și rareori de un microprocesor. Rolul acestuia este de a prelua, structura și converti corespunzător informația ce se dorește a fi emisă.

Canalul de comunicație este constrâns de prezența vizibilității directe dintre emițător și receptor. Receptorul VLC este un dispozitiv electronic capabil să recepționeze și să decodeze informația transmisă. În componența acestuia regăsim cel puțin un senzor optic, un bloc de amplificare, un bloc de filtrare și unul de decodare. Din dorința îmbunătățirii performanțelor senzorului optic, acestuia i se pot atașa diferite elemente de filtrare optică și/sau sisteme optice cu scopul de a facilita recepția luminii purtătoare de date.

Progrese recente în aplicațiile VLC auto

În ultimii ani s-au înregistrat progrese importante în domeniul aplicațiilor VLC auto. Cu toate acestea, mai sunt necesari câțiva pași înainte de a avea un sistem VLC complet compatibil cu acest tip de utilizare. Rezultatele simulărilor [66]-[69] indică faptul că sistemele VLC ar putea fi capabile să îndeplinească aceste cerințe, existând posibilitatea de a oferi rate de transfer al datelor de până la 50 Mb/s și distanțe de comunicație de până la 70 de metri [70]. Cu toate

acestea, în prezent sistemele existente nu sunt capabile încă să demonstreze astfel de performanțe.

Procesul de cercetare-dezvoltare al unui produs sau al unei tehnologii impune parcurgerea unor pași, fiecare dintre acești pași semnalând o serie de probleme sau bariere tehnologice, cunoscute de comunitatea științifică drept provocări. În general, cu cât tehnologia sau produsul se află într-un stadiu mai incipient, cu atât numărul acestor provocări este mai ridicat. În prezent, conform [4], dezvoltarea tehnologiei comunicațiilor prin lumină vizibilă dedicate domeniului rutier a semnalat nouă astfel de provocări semnificative:

- Provocarea nr.1 *Creșterea rezistenței la zgomot*;
- Provocarea nr.2 Creșterea distanței de comunicație;
- Provocarea nr. 3 Îmbunătățirea mobilității;
- Provocarea nr.4 Determinarea distanței dintre autovehicule;
- Provocarea nr.5 Creșterea vitezei de transfer al datelor;
- Provocarea nr.6 Dezvoltarea de comunicații paralele;
- Provocarea nr.7 *Rețele eterogene DSRC și VLC*;
- Provocarea nr.8 Adaptivitatea la context a sistemelor VLC;
- Provocarea nr.9 *Standardizarea*;

În acest context, următoarele subsecțiuni vor exemplifica unele dintre cele mai promițătoare sisteme VLC destinate aplicațiilor rutiere, subliniind atât punctele lor forte cât și vulnerabilitățile acestora.

Sisteme VLC auto rezistente la zgomot

Robustețea la zgomot este cea mai importantă caracteristică a sistemelor VLC auto, dar și cel mai dificil de realizat. Cu toate acestea, comunitatea științifică a depus eforturi semnificative în această direcție. Cel mai simplu mod de a îmbunătăți rezistența la zgomot constă în îngustarea unghiului de receptie (FOV-ului - en.: Field of View) al receptorului VLC [4], [81]. Această măsură limitează cantitatea de lumină perturbatoare prezentă pe extremitățile câmpului vizual, împiedicând saturația senzorului și îmbunătățind SNR-ul, dar afectând mobilitatea sistemului. Utilizarea filtrelor optice este, de asemenea, o soluție foarte eficientă pentru a îmbunătăți rezistența la zgomot. După cum se arată în [65], o filtrare optică eficientă ar putea permite unui sistem VLC să mențină comunicații expuse la o lumină directă care poate ajunge până la 50.000 de lucsi. O altă abordare de filtrare optică în vederea îmbunătățirii performantelor sistemelor VLC se găsește în [82]. În acest caz, este propusă utilizarea unor filtre optice cu bandă de 40 nm împreună cu un circuit de combinare selectivă care selectează filtrul adecvat pe baza unei analize a SNR-ului. O metodă avansată de îmbunătățire a SNR-ului bazată pe filtre optice este, de asemenea, propusă în [83], [84]. În acest caz sunt utilizate filtre optice nanometrice pe mai multe elemente fotosensibile ale aceluiași cip, obținându-se, practic, un mini-spectrometru care analizează mai multe lungimi de undă ale semnalului luminos recepționat, ulterior semnalul fiind reconstruit în funcție de ponderea individuală a fiecărei componente a spectrului dorit. O altă

metodă de filtrare optică foarte promițătoare este propusă în [85]. În această lucrare s-a optat pentru izolarea spațială a surselor de zgomot optic și suprimarea interfețelor optice folosindu-se sisteme de focalizare și filtrare optică cu cristale lichide (en.: Liquid Crystal Display - LCD). O astfel de abordare, în anumite condiții, permite sistemelor VLC auto să diminueze semnificativ efectul acestor surse.

Rezistența la zgomot de asemenea poate fi îmbunătățită și pe baza tehnicilor de procesare a semnalului. Astfel, s-a constatat că prelucrarea digitală a semnalului furnizează o legătură de comunicație robustă chiar și în condiții de SNR scăzut [87], în timp ce circuitele histerezice adaptive la zgomot îmbunătățesc, de asemenea, SNR-ul și BER-ul [88].

Sisteme VLC auto cu rază mare de acoperire

Abilitatea de a furniza comunicații pe distanțe lungi este o altă provocare importantă pentru sistemele VLC auto. Utilizarea tehnologiei în acest domeniu necesită o distanță de comunicație variabilă de la unu la câteva zeci de metri sau chiar mai mult. Astfel, în interiorul orașelor, o distanță de comunicație cuprinsă între 35 și 66 m pare rezonabilă [73], în timp ce pentru exteriorul orașelor ar trebui să se prevadă o distanță de comunicație de până la 100 de metri [4], [73]. Deși 100 de metri ar putea părea mult, există surse [67], [69], [77], [89] ce prevăd utilizarea tehnologiei VLC în aplicațiile de tip convoi într-o primă fază. În acest caz, distanțele de comunicație de 10-20 de metri ar fi suficiente. Compatibilitatea VLC cu aplicațiile de tip convoi a fost confirmată experimental în [90], [91], de unde reiese că sistemele VLC sunt în măsură să respecte cerințele de latență, ceea ce le oferă posibilitatea de a distribui o informație vitală într-un timp util.

În contextul menționat mai sus, gama de comunicații a sistemelor VLC auto a crescut treptat, luând în considerare și cerințele de mobilitate [92], [93]. Înainte de 2010, sistemele VLC auto au putut atinge distanțe de comunicație de peste 50 de metri numai cu un FOV extrem de redus (mai mic de 1,3°). Un astfel de FOV elimină mare parte din zgomotul ambiant [94], [95], împiedicând astfel saturarea amplificatorului de transimpedanță cu factor de amplificare crescut, însă limitează considerabil mobilitatea sistemului. Din 2010 până în prezent au fost identificate treptat și alte metode prin care se poate îmbunătăti rezistenta la zgomot și, astfel, au apărut sisteme VLC capabile să atingă distanțe de comunicație de până la 50 metri cu un FOV mult mai generos (de peste ±20°) [78], [96]. Acest lucru este deosebit de important de vreme ce îmbunătățește sesizabil mobilitatea sistemului VLC. S-au raportat, de asemenea, performanțe îmbunătățite și în ceea ce privește distanța de comunicații și mobilitatea sistemelor VLC dezvoltate pe baza camerelor video de mare viteză [97]. În acest caz, a fost atinsă o distanță de comunicatie de până la 110 metri într-un scenariul de testare I2V definit de conditii de mobilitate scăzută și viteze de comunicații variabile. Cu toate acestea, pentru moment, utilizarea sistemelor cu camere video de mare viteză în aplicațiile VLC este destul de dificilă, deoarece implică costuri ridicate și tehnici complexe de procesare a imaginilor utilizate. Astfel, sistemul prezentat în [98] a atins o distantă de comunicație de 100 m, dar în condiții de prelucrare a datelor offline. Un sistem VLC compatibil cu standardul IEEE 802.15.7 [99] este prezentat în [91]. Acest sistem are o rază de acoperire de 50 m, având în același timp un raport de livrare a pachetelor (PDR) de 99,99%, respectând totodată și cerințele de latentă. Astfel, dacă un asemenea sistem ar putea să îndeplinească și cerintele de rezistentă la zgomot optic, s-ar putea realiza compatibilitatea cu aplicațiile auto. O distanță de comunicație de 50 de metri în expunere directă la soare este

raportată în [17], [100], iar cea mai însemnată legătura VLC de tip I2V, raportată în [100], s-a realizat pe o distanță de 130 de metri. De menționat că în acest caz, emițătorul VLC (un semafor rutier) avea o putere optică mai mare decât semafoarele standard. Chiar și așa, aceste rezultate sunt încurajatoare, deoarece sugerează că valori comparabile ar putea fi obținute în legăturile V2V folosind luminile de întâlnire ale automobilelor.

Sisteme VLC auto cu rată mare de transfer al datelor

Deși în aplicațiile VLC auto rata de transfer al datelor este mai puțin importantă decât rezistența la zgomot [4], viitoarele sisteme VLC vor trebui să își îmbunătățească și această componentă. În prezent, ratele preconizate de transfer al datelor ajung până la câteva zeci de megabiți pe secundă (adică 20-50 Mb/s), așa cum este specificat în standardul 5,9 GHz IEEE 802.11p ce definește comunicațiile fără fir în domeniul auto [26], [73], [101]. Cu toate acestea, sistemele VLC existente care furnizează rate de transfer al datelor de zeci de megabiți pe secundă nu sunt capabile să le mențină pe măsură ce distanța crește, prezentând o sensibilitate ridicată la zgomot. Așadar, pentru moment, astfel de rate de transfer al datelor pot fi obținute doar în aplicațiile de tip convoi VLC.

Evoluția către sisteme VLC auto cu viteze de transfer de ordinul megabiților pe secundă este rezultatul mai multor ani de cercetare. Din cauza numărului limitat de cadre pe secundă ale receptoarelor VLC bazate pe sisteme cu camere video standard, prima generație de sisteme VLC auto cu rată mare de transfer al datelor a folosit fotodiode PIN ca element fotosensibil. Astfel, aceste sisteme au reușit să atingă rate de transfer al datelor de câțiva megabiți pe secundă [95]. Mai târziu, când sistemele cu camere video de mare viteză au fost introduse în sistemele VLC auto, această abordare a permis atingerea unor valori ale ratelor de transfer al datelor de 10-20 Mb/s [97], [102], [75] și distanțe de comunicație de 10-20 de metri, ajungându-se într-un final la rate de transfer al datelor de până la 55 Mb/s [76].

În paralel, dezvoltarea sistemelor VLC auto bazate pe fotodiode a continuat, deoarece acest subiect de cercetare este motivat de costurile reduse și de timpii de comutație foarte mici. Cu toate acestea, cu doar câteva excepții [103], sistemele VLC auto care vizează distanțe de comunicație de zeci de metri ating în mare parte rate de transfer al datelor cuprinse între câteva zeci de kilobiți pe secundă și câteva sute de kilobiți pe secundă [20], [91]. Așadar, cei 10 Mb/s raportați [103] în 2019 revitalizează aceasta componentă și încurajează semnificativ această tehnologie.

Pe lângă utilizarea în aplicațiile de siguranță rutieră, în ultimii ani a apărut și conceptul de internet al vehiculelor. Astfel, sistemele VLC preconizate pentru acest concept au obținut rate de transfer al datelor de 315 Mb/s [104], 375 Mb/s [105], respectiv 425 Mb/s [106], dar doar pentru distanțe de comunicație de 1-3 metri. Ca atare, astfel de sisteme VLC pot fi potrivite pe moment doar pentru aplicații de tip convoi, cu rază scurtă de acțiune.

În contextul celor prezentate mai sus, această teză își propune dezvoltarea unui sistem VLC îmbunătățit ce abordează provocările legate de creșterea rezistenței la zgomot, creșterea distanței de comunicație și îmbunătățirea capacităților de autoadaptare la context. Așadar, o primă etapă în acest demers constă în definirea și analizarea aspectelor-cheie ce caracterizează acest tip de comunicații dedicat mediului exterior.

Capitolul II. Analiza și definirea comunicațiilor prin lumină vizibilă în mediul ambiant

În scenariul comunicațiilor realizate în mediul exterior, lumina incidentă pe senzorul VLC conține nu numai semnalul optic de date, ci și semnale perturbatoare [30]. Astfel, în cel mai rău caz, atunci când senzorul VLC este orientat direct către soare, intensitatea luminii incidente poate atinge un nivel foarte ridicat (până la 100.000 lx), afectând semnificativ performanțele conexiunii. Deși influența luminii perturbatoare poate fi redusă folosind diferite soluții [4], [31], [87], [111], o componentă de zgomot proporțională cu intensitatea acesteia este totuși introdusă în sistem. În consecință, în condiții de zi, lumina de fundal reprezintă cel mai important element perturbator pentru utilizarea VLC în aplicații rutiere.

Caracteristicile comunicațiilor prin lumină vizibilă

Indiferent de lungimea de undă a luminii, aceasta este definită de aceleași caracteristici: este absorbită de suprafețele închise la culoare, este reflectată difuz de obiectele deschise la culoare și este reflectată direcțional de suprafețele strălucitoare/lucioase. Totodată, această formă de energie poate penetra doar suprafețele transparente fiind complet blocată de cele opace, caracteristică ce în cazul comunicațiilor poate fi interpretată atât ca un avantaj, cât și ca un dezavantaj. Din punct de vedere al puterii optice recepționate, aceasta scade direct proporțional cu pătratul distanței, caracteristică întâlnită și în cazul componentelor electromagnetice din spectrul radio. În vederea definirii unui sistem de comunicații funcțional, avem nevoie de cel puțin un emițător, de cel puțin un receptor și de un canal de comunicații dintre acestea.

Caracteristicile emițătorului VLC

Emițătorul sau transmițătorul VLC este un convertor optoelectronic capabil să transmită informații la distanță, printr-un mediu transparent liber, denumit canal de comunicații, către un receptor VLC. După cum se poate observa în Figura 5, în cazul emițătoarelor VLC dedicate segmentului auto, rolul acestora se rezumă la a procesa și converti informația ce se vrea a fi trimisă. În vederea transmiterii acesteia prin canalul optic, sunt parcurse succesiv o serie de etape. Așadar, semnalul electric aferent informației este procesat, modulat, codat și convertit într-un semnal optic prin intermediul diferitelor blocuri componente ale emițătorului VLC.



Figura 5. Schema de principiu a unui emițător VLC utilizat în infrastructura rutieră.

Utilizarea semafoarelor LED ca emițător optiv VLC aduce în vedere o serie de caracteristici specifice. Conform standardelor rutiere, diametrul semaforului poate fi de 200 mm sau 300 mm [21]. Indiferent de generație, semafoarele LED sunt proiectate generic după un model de emisie a luminii de tip lambertian [113], [21]. Modelul matematic cu ajutorul căruia se poate determina distribuția iradianței (μ W/cm²) a emițătorului LED, notată cu $P_{em}(\varphi)$, este descris în [21], [114], folosind ecuația (1).

$$P_{em}(\varphi) = \left(\frac{m+1}{2\pi}\right) P_t \cos^m \varphi, \tag{1}$$

unde $P_{em}(\varphi)$ reprezintă intensitatea radiației de tip lambertian, P_t este puterea optică totală de emisie, iar *m* este determinat de unghiul $\phi_{1/2}$, la care puterea de emisie e la jumătate (vezi Figura 6), conform ecuației (2) [21], [114].

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos\phi_{1/2})} \tag{2}$$

Unghiul $\phi_{1/2}$ are un impact notabil în descrierea formei modelului pe care o ia aria de acoperire a unei surse de emisie Lambertiană, conform Figura 6 și ecuației 2 [21], [115].



Figura 6. Modelul emisiei Lambertiene a LED-urilor, respectiv aria de acoperire, reprezentată $de \phi_{1/2}$ și parametrul m [115].

În acest caz, modelul iradierii emițătorului VLC , notat cu R_E , este dat de ecuația (3) [115].

$$R_E = P_t P R_0(\varphi) \tag{3}$$

Iar de vreme ce lumina scade direct proporțional cu pătratul distanței, iradierea receptorului plasat pe același unghi și în vizibilitate directă cu emițătorul este stabilită conform ecuației (4).

$$I_s(d,\varphi) = \frac{P_t R_0(\varphi)}{d^2},\tag{4}$$

unde d reprezintă distanța dintre emițător și receptor.

Așadar, un semafor rutier utilizat ca emițător VLC nu este limitat doar din punct de vedere al puterii optice de emisie, ci totodată acesta este caracterizat de un model al iradierii de tip lambertian ce influențează distanța de comunicație a unui sistem VLC.

Caracteristicile canalului de comunicații VLC

Modelul matematic ce descrie din punct de vedere comportamental un sistem VLC ține cont de o serie de caracteristici-cheie, precum tipul de modulație a luminii sau vizibilitatea optică dintre emițător și receptor. Un astfel de sistem este descris în [113], unde din motive de performanță s-a considerat a fi optim un sistem VLC cu vizibilitate directă și modulație în amplitudine. În cadrul modelului matematic, puterea optică instantanee a formei de undă transmise se notează cu X(t), curentul instantaneu dat de forma de undă recepționată prin integrarea puterii optice totale instantanee de pe suprafață fotodetectorului este notat cu Y(t), iar răspunsul la impuls al canalului de comunicatii cu h(t), după cum se poate vedea în ecuatia (5).

$$Y(t) = RX(t)\otimes h(t) + Z(t),$$
(5)

unde *R* reprezintă responsivitatea fotodetectorului măsurată în A/W, Z(t) zgomotul optic total, iar \otimes indică convoluția.



Figura 7. Modelul canalului de comunicații.

După cum se poate observa acest model matematic stabilește o relație de liniaritate între valoarea lui Y(t) și valoarea lui X(t). Deoarece X(t) reprezintă puterea optică instantanee a formei de undă transmise, rezultă că valoarea de intrare a canalului nu poate fi negativă, $X(t) \ge 0$ [113].

Efectul zgomotului asupra canalului de comunicații

În majoritatea aplicațiilor din mediul exterior, comunicațiile fără fir realizate prin lumină se desfășoară într-un mediu plin de zgomot optic, fie că vorbim de radiația vizibilă ambientală, fie că vorbim de cea infraroșie. În timp ce o mare parte din aceasta poate fi limitată prin utilizarea de filtre optice care permit trecerea unei anumite lungimi de undă sau care elimină radiația infraroșie, rămâne totuși o cantitate importantă de zgomot ce ajunge pe suprafața fotosensibilă a receptorului. În funcție de natura zgomotului, acesta poate fi produs atât de surse de iluminat naturale, cât și zgomot optic produs de surse de iluminat artificiale. Zgomotul natural este dat de lumina de la soare, fie în mod direct, fie în mod indirect prin lumina ambientală de fundal regăsită în timpul zilei, indiferent dacă vorbim de o zi însorită sau de una înnorată. Zgomotele artificiale sunt date de totalitatea surselor de iluminat artificial. În cazul surselor incandescente și fluorescente, acestea sunt caracterizate în principal de o lumină modulată pe 100 Hz, cu componente spectrale secundare ce ajung la frecvențe de câțiva MHz.

Atenuarea dată de diferitele fenomene meteo

Nu doar soarele afectează canalul de comunicații, ci și precipitațiile atmosferice sau vântul, prin încărcarea canalului de comunicații cu particule de apă și uneori de praf. Aceste particule, indiferent că sunt picături de ploaie, fulgi de zăpadă sau praf, atenuează semnificativ transparența canalului de comunicații, ceea ce duce la o scădere în intensitate a luminii recepționate. Din acest motiv, recepția mesajului transmis este afectată de înrăutățirea raportului dintre numărul de erori și numărul de biți recepționați, ajungându-se chiar la întreruperea totală sau parțială a acestui tip de comunicații. Modelul matematic ce stabilește modul în care lumina este împrăștiată și absorbită de atmosferă, conform [21], [116], este stabilit de ecuația (11).

$$\tau(d) = e^{-\gamma(\lambda)d},\tag{11}$$

unde $\tau(d)$ este factorul de transmisie raportat la distanța d (în km) calculată de la emisie, iar $\gamma(\lambda)$ reprezintă coeficientul de extincție sau de atenuare raportat la lungime (pe unitatea de lungime). În funție de particularitățile mediului ambiant putem defini:

- Atenuarea pe timp senin;
- Atenuarea dată de ploaie;
- Atenuarea dată de ninsoare;
- Atenuarea dată de ceață.

Toate aceste situații sunt detaliate în cadrul tezei.

Caracteristicile receptorului VLC

Receptorul VLC este un convertor optoelectronic prevăzut cu unul sau mai mulți fotodetectori, o serie de etaje de amplificare, un etaj de filtrare trece bandă, etaje de reconstrucție a semnalului, respectiv etaje logice de procesare, demodulare, decodare și conversie a informației recepționate. Principalul său rol este acela de a extrage informația optică și de a o transforma într-o formă de semnal procesabil. În cadrul sistemului de comunicații prin lumină vizibilă, receptorul necesită cea mai multă atenție din partea dezvoltatorilor și cercetătorilor, deoarece la nivelul acestuia se întrunesc toate elementele perturbatoare descrise anterior.



Figura 8. Schema bloc generală a unui receptor VLC pentru aplicații rutiere.

După cum se poate observa și în Figura 8, informația transmisă prin intermediul emițătorului este preluată la nivelul sistemului de recepție de către fotodetectorul montat la nivelul unui autovehicul. Acesta realizează conversia optoelectrică a luminii incidente pe suprafața fotosensibilă. Plecând de la ecuația (4), putem afirma că în acest caz P_r , puterea optică recepționată pe suprafața fotodetectorului, este dată de ecuația (19), ce stabilește relația de proporționalitate dintre P_r și suprafața fotosensibilă $A_{eff}(\psi)$, conform [115]

$$P_r = I_s(d,\varphi)A_{eff}(\psi), \tag{19}$$

unde ψ reprezintă unghiul de incidență în raport cu suprafața fotosensibilă, iar A_{eff} este dată de ecuația (20).

$$A_{eff}(\alpha) = \begin{cases} A\cos\psi, & \psi < FOV\\ 0, & \psi > FOV \end{cases}, \quad FOV < \frac{\pi}{2} ,$$
 (20)

unde FOV reprezintă unghiul de vizibilitate.

Valoarea lui A_{eff} poate fi crescută prin utilizarea de concentratoare optice ce aduc un câștig considerabil atât în privința semnalului util, cât și a zgomotului. În lipsa unui concentrator, câștigul în curent continuu este dat de ecuația (21), conform [9].

$$H(0)_{c} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^{2}} \cos^{m} \varphi F_{s}(\psi) \cos(\psi), & 0 < \psi < FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases},$$
(21)

unde A este aria de detecție a fotodiodei, iar $F_s(\psi)$ este funcția de transfer a filtrului către receptor.

Din ecuația (21) se poate observa că prin modificarea parametrului m (definit de ecuația (2)) și implicit a modelului de emisie a luminii, se poate mări distanța de comunicație prin reducerea unghiului de emisie și concentrarea radiației luminoase, crescându-se astfel eficiența comunicației.

Capitolul III: Provocări asociate utilizării VLC în mediul auto

Modelul matematic ce definește un sistem de comunicații de tip infrastructurăvehicul

Din punct de vedere aplicativ, sistemele de comunicații prin lumină vizibilă dedicate domeniului rutier, pot fi definite ca fiind de tip Infrastructură-Vehicul (I2V), când schimbul de informații se realizează între infrastructura rutieră și vehicul, și/sau de tip Vehicul-Vehicul (V2V), când schimbul de informații se realizează între două sau mai multe vehicule. În cadrul sistemului propus, în Figura 9 este descrisă geometria unui sistem de comunicații de tip infrastructură-vehicul.



Figura 9. Geometria unui model de sistem cu 2 benzi(plecând de la [9]).

Parametru	Simbol	Valoarea
Lungimea brațului semaforului	L	2,0 m
Înălțimea semaforului	H_{I}	5,3 m
Înălțimea receptorului	H_R	1,0 m
Distanța pe direcția benzii	Х	m
Distanța între vehicule	У	m
Diferența de înălțime dintre emițător și receptor	Z	4,3 m
Distanța directă dintre emițător și receptor	d	m
Semiunghiul emițătorului	$\theta_{1/2}$	15°
Înclinația verticală	Θ	$0^{\circ} \le \theta \le 90^{\circ}$
Unghiul de vizibilitate al receptorului	$\Psi_{\rm c}$	$0^{\circ} \leq \Psi_c \leq 90^{\circ}$
Lățimea de bandă		3,5 m
Lățimea autoturismului		1,8 m

Tabel 1. Parametrii sistemului propus în [9].

Condiții meteorologice: Probleme și soluții asociate

Pe lângă interferențele optice, sistemele VLC pentru aplicații rutiere sunt de asemenea influențate și de mobilitatea și imprevizibilitatea canalului VLC aflat în aer liber [4], din cauza naturii sale intrinseci și a faptului că în cazul aplicațiilor auto apar schimbări de direcție dese și neanticipabile, distanțe permanent variabile între vehicule, viteze variabile și așa mai departe. Astfel, deoarece tehnologia VLC impune vizibilitate directă (en.: Line of Sight - LoS), ar putea apărea probleme de conectivitate. În plus, distanța variabilă dintre receptor și emițător influențează semnificativ puterea semnalelor optice primite. Pentru a compensa variația puterii de intrare, receptoarele VLC pentru automobile integrează de obicei un bloc de control automat al câștigului (en.: Automatic Gain Control - AGC) [4]. În plus, imprevizibilitatea canalului VLC este amplificată și de imprevizibilitatea multitudinii de condiții meteorologice. Astfel, particulele de apă ale ploii sau ceții pot influența trecerea luminii prin combinarea fenomenelor de reflecție, refracție, absorbție și împrăștiere [4], [21], [61], [122], [124], în timp ce zăpada sau praful greoi blochează o parte a canalului optic [4], [21], [123]. Toate aceste fenomene duc în cele din urmă la o putere optică mai mică detectată de receptorul VLC [4], [122] - [124], care la rândul său afectează SNR-ul, distanța de comunicație și BER-ul.

Aspecte legate de dezvoltarea amplificatorului de transimpedanță

Conform [127], din punct de vedere electric, un receptor optoelectronic poate fi împărțit în patru mari structuri componente: fotodetectorul, preamplificatorul, amplificatorul și unitatea de extragere a datelor. Figura 10 ilustrează relația de interconectare a schemei bloc ce descrie un astfel de sistem.



Figura 10. Schema bloc a unui receptor optoelectronic din punct de vedere electric.

Fotodetectorul

În ceea ce privește fotodetectorii activi, atunci când o joncțiune p-n este iluminată, impactul fotonilor determină ruperea legăturilor covalente. În acest mod se creează o pereche de tip electron-gol. Câmpul electric aferent regiunii sărăcite de acești fotoni separă perechea electron-gol, electronii trecând în regiunea N, iar golurile în regiunea P. Acest fenomen poartă numele și de efect fotovoltaic [128]. În cele mai multe dintre aplicațiile de detecție optică, viteza de răspuns a fotodetectorilor este capitală. Dintre toți fotodetectorii cunoscuți, fotodiodele se caracterizează prin răspunsul cel mai prompt la variația luminii.

În vederea utilizării fotodiodelor în receptoare optice, fotodiodele PIN sunt de departe cele mai potrivite, capacitatea lor scăzută permițându-le să perceapă frecvențe ale variației luminii de ordinul sutelor de MHz.

Etajul de preamplificare. Amplificatorul de transimpedanță

În vederea extragerii informației modulate optic, curentul generat de fotodetector trebuie să fie convertit într-o formă de semnal procesabilă, cu un adaos cât mai mic de zgomot. Primul pas în acest proces este realizat de etajul de preamplificare.

Din punct de vedere electric există trei configurații în care poate fi proiectat acest etaj de preamplificare: folosind un amplificator cu impedanță mică de intrare, un amplificator cu impedanță mare de intrare sau utilizând un amplificator de transimpedanță, conform [62]. O descriere generală a acestor trei tipuri de amplificatoare se poate vedea în Figura 11, unde C_d simbolizează capacitatea fotodiodei, R_r – rezistența de reacție, în timp ce R_d reprezintă rezistența echivalentă de intrare. În funcție de funcționalitatea circuitului, R_d poate lua valori de la câțiva ohmi (50 Ω) până la zeci sau chiar sute de M Ω , în vreme ce modificarea valorii R_r conduce la modificarea sensibilității circuitului de transimpedanță, o valoarea mai mare echivalând cu o sensibilitate mai mare.



Figura 11. Configurația prim etajului de amplificare (preamplificator).

Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar continuu (ATCLC)

Structura bloc a receptorului VLC propus este ilustrată în Figura 12. După cum se poate observa, în vederea extragerii informației utile, semnalul de date parcurge o serie de etape succesive. Într-o primă etapă, cantitatea de lumină recepționată depinde atât de unghiul de vizibilitate (FOV), cât și de filtrul optic. Alegerea acestora trebuie să țină cont de lungimea de undă a luminii transmise, de valoarea intensității acesteia, de valoarea intensității luminii ambientale, de unghiul dintre emițător și receptor, dar și de parametrii fotodetectorului. Așadar,

alegerea unui FOV generos se va traduce la nivelul receptorului printr-o cantitate de zgomot puternică, dată de lumina ambientală, crescând riscul de a duce detectorul în zona de saturație (în bătaia directă a soarelui, de exemplu), ceea ce ar conduce la întreruperea comunicației. Un FOV îngust reduce semnificativ nivelul de zgomot optic la nivelul fotodetectorului, însă în cazul comunicațiilor auto acest lucru se traduce și printr-o limitare a mobilității sistemului.



Figura 12. Schema bloc a receptorului VLC propus.

Descrierea circuitului propus

Amplificatorul de transimpedanță împreună cu fotodioda realizează conversia semnalelor luminoase într-o formă de tensiune dependentă de acestea. De vreme ce se urmărește atingerea unor distanțe de comunicație cât mai mari, cu aceeași putere de emisie, este evident că etajul de amplificare trebuie să realizeze o conversie cât mai fidelă a unor curenți cu valori cât mai mici, până la limita la care nivelul perturbațiilor exterioare ar crește prea mult nivelul de zgomot și riscul saturării. Ca atare, se impune un compromis al sensibilității pentru o distanță acceptabilă de comunicație și pentru un nivel tolerabil de zgomot.

În vederea proiectării unui ATCLC este necesară stabilirea unor cerințe de referință, ca de exemplu tensiunea de alimentare, curentul de intrare, valoarea pragurilor tensiunii de ieșire. Valoarea tensiunii de alimentare se determină în funcție de proprietățile amplificatorului operațional ales, respectiv valoarea tensiunii blocului de procesare numerică (de exemplu a microcontrolerului). În cazul de față, aceasta este de 5 V. Plaja curentului de intrare se definește în funcție de fotocurentul fotodiodei utilizate (date de catalog). Valoarea fotocurentului este exprimată în raport cu o intensitate luminoasă de 1.000 lx, lumină standard de tip A, alimentând

fotodioda cu o tensiune inversă de 5 V. În cazul fotodiodei PIN, model BPX 61 de la Osram, datele de catalog ale acesteia indică un fotocurent de 70 μ A la 1.000 lx. În contextul în care o zi luminoasă de vară poate prezenta o intensitate luminoasă chiar și de 100.000 lx la nivelul fotodiodei, în urma proceselor de natura optică (filtrare/limitare) aceasta valoare poate fi redusă la aproximativ 10.000 lx. Totuși din dorința de a nu diminua considerabil distanța de comunicație a fost aleasă o plajă de intrare a ansamblului fotodiodă - amplificator cuprinsă între 0 și 8.000 lx, echivalentul unui curent de 0-560 μ A. În vederea distribuirii cât mai largi a valorilor de intrare este recomandată alegerea nivelurilor de tensiune minimă și maximă cât mai aproape de limitele valorii tensiunii de ieșire, așadar, acestea vor lua valori între 100 mV și 4,9 V.



Figura 13. Schema generală a unui amplificator de transimpedanță.



Figura 14. Schema unui ATCLC.

Așadar, ATCLC propus, Figura 14, este proiectat să funcționeze cu o plajă de valori de intrare cuprinsă între 0-8.000 lx. Acesta este alimentat la 5 V, beneficiază de o lățime de bandă limitată la 474 kHz, o sensibilitate crescută, protecție la principalele surse de zgomot și este accesibil.

Scenariul de simulare

Procedura de simulare își propune să ia în considerare mai multe scenarii, pornind de la un canal VLC ideal, fără lumină solară și îndreptându-se către cel mai rău scenariu, cu soare puternic direct incident pe receptorul VLC. Descrierea acestor situații este sintetizată în Tabel 2 și ilustrată în Figura 15. Așadar, aceasta presupune prezența unui receptor VLC pe vehiculul ce se apropie de emițătorul VLC (indiferent că vorbim de comunicație de tip I2V sau V2V) și urmărește determinarea comportamentului amplificatorului de transimpedanță analizat. Pentru a evalua efectul condițiilor de iluminare asupra distanței de transmisie-recepție VLC, puterea perturbatoare a luminii este crescută treptat, în timp ce unghiul de incidență este modificat pentru a simula efectul soarelui pe măsură ce acesta se deplasează de la răsărit spre apus. În vederea evaluării influenței luminii solare asupra performanțelor unui receptor VLC în aer liber, se are în vedere simularea și evaluarea mai multor soluții de amplificare de transimpedanță în raport cu scenariul prezentat în Figura 15.



Figura 15. Reprezentarea scenariului de evaluare prevăzut: în timp ce se primesc date de la emițătorul VLC, receptorul VLC este mai mult sau mai puțin influențat de soare. Această influență crește atunci când unghiul θ scade, în timp ce pe măsură ce θ crește, receptorul VLC face trecerea de la lumina directă a soarelui la condițiile difuze ale soarelui ($\theta > \psi c$).

Tabel 2. Scenarii pentru perturbarea canalului de comunicații cu lumină solară.

Canalul VLC	Caracteristici	
Canal ideal VLC	Întuneric, fără surse de lumină perturbatoare. Acest scenariu este utilizat pentru a determina distanța maximă de comunicație în condiții ideale.	
Condiții cu lumină difuză	Acest scenariu presupune suprapunerea pe canalul de comunicație a unei lumini variabile perturbatoare fără a implica o expunere directă la soare a receptorului.	
Cel mai defavorabil scenariu	Acest scenariu testează sensibilitatea la zgomot a receptorului VLC. Presupune iluminarea receptorului VLC cu lumină solară direct	

	incidentă. În cele mai multe cazuri, astfel de circumstanțe conduc la întreruperea comunicației din cauza saturației circuitului de transimpedanță.
Scenariul ce definește condițiile reale	Scenariul ce definește condițiile reale presupune că receptorul VLC este expus constant la condiții de lumină difuză, în timp ce ocazional (de exemplu la răsărit, la apus sau când automobilul urcă o pantă) este expus și la lumina directă a soarelui.

După cum am menționat anterior în cadrul subcapitolului dedicat proiectării amplificatorului de transimpedanță și după cum reiese și din schema bloc a receptorului VLC (Figura 12), simularea și analizarea unui amplificator de transimpedanță VLC fără interconectarea sa cu fotodetectorul și subansamblele optice nu este adecvată. Din acest motiv, în cadrul simulării se va avea în vedere analizarea parametrilor de ieșire în funcție de cantitatea de lumină incidentă pe suprafața fotodetectorului și nu în funcție de curentul de intrare în amplificator. Parametrii fotodetectorului, utilizat atât în procesul de proiectare a circuitelor de amplificare de transimpedanță propuse, cât și în modelele de simulare a acestora, sunt descriși în Tabel 3.

Tabel 3. Parametrii de intrare principali avuți în vedere în procesul de testare și simulare a amplificatorului de transimpedanță propus.

Tipul fotodiodei	BPX61
Unghiul de vizibilitate maxim al fotodiodei (FOV) $\psi_{\mathcal{C}_{pd}}$	$\pm 55^{\circ}$
Suprafața fotosensibilă a fotodiodei	$7,02 \text{ mm}^2$
Curentul generat de fotodiodă	70 nA/lx
Timpul de comutație a fotodiodei	20 ns
Iluminarea produsă de emițătorul VLC măsurată la 1 m	1.300 lx
Intensitatea luminii perturbatoare	0 - 10.000 lx
Tensiunea de alimentare a amplificatorului	5 V
Rsarcină	Dependentă de modelul amplificatorului propus

Modelul de simulare

Modelul de simulare dezvoltat în vederea acoperirii scenariului de simulare este unul de tip procesual. Simularea și testarea amplificatoarelor de transimpedanță impune parcurgerea unor etape definite de o serie de relații dinamice de tip matematic și logic. Descrierea structurală a modelului abordează trei scenarii distincte definite de lipsa luminii perturbatoare, de prezența luminii ambientale perturbatoare intense și de situația în care receptorul se află în bătaia directă a soarelui. Fiecare dintre aceste scenarii oferă informații relevante cu privire la performanțele amplificatorului de transimpedanță propus, raportate la anumite situații.


Figura 16. Modelul de simulare utilizat în analizarea amplificatoarelor de transimpedanță propuse.

Determinarea distanței maxime de transmisie-recepție

După cum se poate observă în Figura 16, modelul de simulare elaborat impune într-o primă etapă determinarea distanței maxime de transmisie-recepție pe timp de noapte într-un mediu perfect transparent. În lipsa factorilor perturbatori prezenți la nivelul canalului de comunicație, această distanță devine de referință în evaluarea performanțelor sistemului propus pe timp de zi. Apariția luminii perturbatoare reduce substanțial distanța prin degradarea constantă a SNR-ului. Determinarea acestei distanțe se raportează la un semnal luminos de emisie de 1.300 lx, iradianță măsurată la 1 m distanță față de emițător. Pe baza experienței anterioare [17], [18], s-a observat că un receptor VLC poate procesa și decoda ieșirea unui circuit

de transimpedanță atât timp cât amplitudinea sa de ieșire este mai mare sau egală cu 5 mV. Pentru niveluri de amplitudine mai mici, SNR-ul este prea scăzut, iar datele devin dificil de decodificat folosind tehnici standard de procesare a semnalului.

Rezultatele simulării ATCLC

Determinarea comportamentului și valorii tensiunii de ieșire a amplificatorului de transimpedanță propus se realizează folosind ecuația (41), unde intensitatea directă a luminii solare (P_{directă}) este estimată ca având valori mai mici sau egale cu 30.000 lx, în contextul în care principalele situații în care soarele poate ilumina direct fotodioda se întâlnesc la apus și la răsărit, câtă vreme receptorul VLC este montat orizontal. Diferit de lumina perturbatoare ambiantă, impactul pe care îl aduce limitarea FOV-ului asupra luminii perturbatoare directe este considerabil mai mare, de vreme ce în acest caz FOV-ul poate împiedica în totalitate prezența acestei lumini pe suprafața fotodiodei PIN.

Determinarea rezultatelor simulării și analizarea lor se realizează parcurgând etapele descrise în modelul de simulare. La ATCLC propus se va folosi o rezistență de reacție negativă de 8,5 k Ω . După cum reiese din Tabel 4, această configurație permite sistemului VLC să atingă o distanță de transmisie-recepție de până la 12 m, în condiții de iluminat ambiental de până la 8.230 lx. În situații cu lumină ambientală mai intensă se impune reducerea FOV-ului la ±30° în vederea păstrării distanței de transmisie-recepție maximă.

Tabel 4. Rezumatul rezultatelor simulării privind limitele de transmisie-recepție a circuitului de transimpedanță cu câștig liniar continuu și limitele de saturare în diverse condiții.

Valoarea rezistorului	Distanță de transmisie- recepție realizabilă în	Limita de saturație a circuitului de transimpedanță în condiții de lumină difuză [lx]			
ae reacție $[k\Omega]$	condiții întunecate [m]	±55° FOV	±30° FOV	±15° FOV	±7,5° FOV
8,5	12	8.230	Nu se saturează până la 30.000 lx	Nu se saturează până la 30.000 lx	Nu se saturează până la 30.000 lx

După cum se poate observa și în Tabel 4, respectiv Figura 17, liniaritatea amplificării circuitului de transimpedanță propus, caracterizată de o insensibilitate ridicată la lumina perturbatoare, limitează substanțial distanța de transmisie-recepție. Acest lucru îi permite acestuia să funcționeze corespunzător în mediul exterior în lipsa unei lumini solare perturbatoare directe, însă nu îi permite să satisfacă pe deplin distanțele de transmisie-recepție impuse de domeniului auto.



Figura 17. Rezultatul ATCLC. Acesta prezintă evoluția tensiunii de ieșire în funcție de intensitatea luminoasă de intrare, punctând limita sa de saturație în contextul utilizării unui FOV larg de $\pm 55^{\circ}$.

Rezultatele simulării afișate în Figura 18 prezintă impactul major pe care îl generează limitarea FOV-ului asupra valorii tensiunii de ieșire a ATCLC. Deoarece relația (dată de ecuația 43) ce stabilește impactul acestuia nu este una de tip liniară, limitarea FOV-ului se dovedește mai eficientă decât reducerea nivelului de amplificare în vederea creșterii insensibilității receptorului VLC la lumină perturbatoare puternică.





Figura 18. Rezultatele simulării ATCLC ce prezintă efectul scăderii FOV-ului pentru: a. ± 30°; b. ± 15°; c. ± 7,5°. Se poate observa că pe măsură ce FOV-ul scade, crește valoarea intensitații luminoase la care are loc saturația circuitului deoarece în astfel de cazuri, doar o fracțiune din lumina difuză ajunge pe suprafața fotosensibilă.

Scenariul final al modelului de simulare prevede analizarea rezultatelor impactului luminii solare directe asupra fotodiodei. Valoarea curentului generat de aceasta este determinat în conformitate cu ecuațiile (38) – (41). Astfel, Figura 19 pune în evidență efectul generat de un fascicul de lumină solară, la nivelul fotodiodei, în funcție de unghiul de incidență al acestuia. După cum se poate observa, deși valoarea de referință a intensității fasciculului de lumină nu se modifică (30.000 lx), valoarea curentului crește pe măsură ce unghiul de incidență al acestuia se apropie de unghiul de perpendicularitate al suprafeței fotosensibile (0 grade). Valoarea acestui curent se determină conform ecuației (41).



Figura 19. Rezultatele simulării ce prezintă efectul expunerii directe la soare a fotodiodei PIN pe măsură ce unghiul incident crește (soarele răsare).

Amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar în trepte (ATCLT)

Acest ATCLT urmărește îndeaproape funcționalitatea ATCLC descrisă în subcapitolul 3.4.1.2. Totuși, se deosebește de acesta prin capacitatea sa de a-și modifica valoarea rezistenței de reacție negativă prin intermediul unui microcontroler. Acest lucru îi permite să opereze cu o rezistență de reacție cuprinsă între 3,9 k Ω și 3,9 M Ω . Valoarea rezistorilor a fost stabilită în urma analizei intensității de intrare a luminii, respectiv a limitelor de saturație specifice fiecărei rezistențe. După cum se poate observa în Figura 20, prin intermediul a trei circuite integrate, al unui registru de deplasare de 8 biți (74HC595), respectiv al celor două circuite de tip comutator analog bilateral cvadruplu (74HC4066), placa de dezvoltare cu microcontroler are posibilitatea de a selecta unul sau mai mulți rezistori prezenți pe bucla negativă (R1 - R7). Acest lucru îi permite amplificatorului propus să funcționeze ca un amplificator liniar cu cel puțin șapte grade de sensibilitate diferite.



Figura 20. Schema electrică a ATCLT comandat de microcontroler.

De asemenea, acest amplificator a fost proiectat și din dorința de a răspunde unui nou concept de abordare a provocărilor generate de perturbațiile prezente în mediul rutier, acela de adaptivitate la context. În acest sens, microcontrolerul alocat acestui tip de amplificator de transimpedanță prezintă capacitatea de a modifica nivelul de amplificare și FOV-ul fotodetectorului acestuia. În acest proces, microcontrolerul urmărește colectarea atât a informațiilor cu privire la nivelul de perturbații regăsit pe suprafața fotoreceptorului VLC, cât și o serie de informații referitoare la semnalul de date recepționat.

Analiza performanțelor ATCLT

Amplificatorul de transimpedanță propus, deși compus prin contopirea a șapte amplificatoare diferite, se va analiza ca un întreg cu proprietățile sale specifice. Așadar, deși va fi conturată valoarea de ieșire a fiecăruia dintre aceste valori componente, urmărindu-se modelul de simulare anterior stabilit, nivelul de amplificare va fi ajustat spre a preveni saturarea. Deși Figura 20 sugerează faptul că se pot obține mai mult de șapte valori ale rezistorului de reacție negativă, simulările se vor concentra doar pe valorile rezistorilor aleși, o combinație a acestora neprezentând interes.

Scenariul de simulare

Scenariul de simulare a ATCLT se face pe baza procedurii descrise în subcapitolul 3.4.2.1. Compatibilitatea deplină a acestuia cu schema bloc descrisă în subcapitolul 3.4.1.2, respectiv cu amplificatorul anterior descris, permite testarea lui în exact aceleași circumstanțe.

Rezultatele simulării

Rezultatele simulării prezintă evoluția unui amplificator de transimpedanță liniar cu șapte valori diferite ale rezistenței de reacție negativă. Această configurație permite acoperirea a mai multor scenarii în care se poate găsi receptorul VLC. Ca de exemplu, conform Tabel 5, un astfel de amplificator de transimpedanță poate fi folosit cu succes într-o zi luminoasă de vară pe o distanță de transmisie-recepție de până la 15 m, dacă unghiul de vizibilitate al acestuia (FOV-ul) este redus la $\pm 30^{\circ}$, iar lumina solară nu pică direct pe suprafața de incidență a fotodiodei. În vederea determinării distanței maxime s-a urmărit atingerea unei valori a tensiunii de ieșire mai mare sau egală cu 5 mV, prag stabilit în subcapitolul dedicat, pentru scenariu caracterizat prin lipsa luminii perturbatoare. După cum se poate vedea, în condiții de luminozitate scăzută (< 360 lx) și cu un FOV limitat la $\pm 30^{\circ}$, se pot atinge distanțe de transmisie-recepție de până la 150 m. Cu toate acestea, în cele mai multe situații, sistemele VLC nu se bucură de un canal de comunicații atât de favorabil. Așadar, principala preocupare este definită de creșterea imunității la lumină perturbatoare puternică. Acest lucru ar permite nu doar obținerea de comunicații mai robuste, ci și atingerea unor distanțe de comunicație mai generoase.

Tabel 5. Rezumatul rezultatelor simulării privind limitele de transmisie-recepție a ATCLT și limitele de saturare în diverse condiții.

Valoarea rezistorului	Distanță de emisie/recepție	Limita de saturație a circuitului de transimpedanță în condiții de lumină difuză [lx]				
de câștig [kΩ]	realizabilă în condiții întunecate [m]	±55° FOV	±30° FOV	±15° FOV	±7,5° FOV	
3,9	9	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	
12	14	5.831	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	
39	26	1.798	10.975	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	
120	46	587	3.570	16.569	Nu se saturează la expuneri de până la 33.000 lx	
390	84	184	1.102	5.101	21.136	
1.200	147	62	363	1.659	6.873	
3.900	266	23	115	514	2.118	

În vederea simulării și determinării tuturor acestor valori pentru acest scenariu, nivelul intensității luminii perturbatoare este crescut treptat, în timp ce se urmărește valoarea tensiunii de ieșire a ATCLT. Figura 21 sugerează că o plajă atât de generoasă a rezistenței de reacție negativă favorizează o amplificare variabilă foarte dinamică, capabilă să contracareze principalele neajunsuri generate de lumina solară perturbatoare. Concret, un astfel de amplificator poate susține comunicații de tip V2V sau I2V în condiții cu iluminare de fundal de până la 18.000 lx, conștienți fiind de faptul că distanțele de operare vor scădea odată cu creșterea vitezei de transmisie a datelor.



Figura 21. Rezultatele simulării ATCLT. Figura prezintă evoluția tensiunii de ieșire în funcție de lumina de intrare, prezentând și limitele sale de saturație în contextul utilizării unui FOV larg de $\pm 55^{\circ}$.

În sistemelor VLC pentru aplicații rutiere, comunicațiile pe distanțe lungi se realizează folosind unghiuri reduse între emițător și receptor, și astfel, un sistem de colectare optică care restrânge FOV-ul receptorului VLC devine o soluție eficientă pentru prevenirea saturației și îmbunătățirea SNR-ului.





Figura 22. Rezultatele simulării ATCLT ce prezintă efectul scăderii FOV-ului pentru: a. ± 30°; b. ± 15°; c. ± 7,5°. Se poate observa că pe măsură ce FOV-ul scade, crește valoarea intensitații luminoase la care are loc saturația circuitului, deoarece în astfel de cazuri doar o fracțiune din lumina difuză ajunge pe suprafața fotosensibilă.

Concluzii privind simularea utilizării ATCLT în sisteme VLC destinate aplicațiilor rutiere

Circuitele de transimpedanță liniare sunt utilizate pe scară largă în aplicațiile VLC auto. Astfel de circuite au limitări intrinseci dacă sunt utilizate folosind o configurație de amplificare unică (ATCLC). Cu toate acestea, efectul acestor limitări poate fi redus prin introducerea conceptului de adaptivitate la context [31]. Prin extinderea acestui concept la nivelul circuitului de transimpedanță se poate dezvolta un ATCLT. O astfel de abordare oferă un raport optim între sensibilitate si rezistentă la zgomot. Această sectiune a analizat performantele unui astfel de circuit din punct de vedere al rezistenței la zgomot și al distanței maxime de transmisie-recepție. Rezultatele simulărilor au arătat că se pot atinge distante de transmisie-receptie ce variază între 9 și mai mult de 150 de metri. De asemenea, rezultatele indică faptul că atunci când sunt avute în vedere distante reduse de transmisie-receptie (de exemplu 9 m), un astfel de circuit poate oferi o rezistență sporită la zgomot indiferent de FOV receptorului. Astfel, s-a pus în evidență că o abordare în care este folosit un câștig fix al circuitului de transimpedantă poate fi adaptată pentru utilizarea unui circuit în care câștigul este stabilit de către un microcontroler. În acest caz, echilibrul între rezistența la zgomot și distanța de transmisie-recepție poate fi ales în mod optim pe baza estimării nivelului de zgomot optic. De asemenea, rezultatele indică faptul că, atunci când receptorul VLC este expus la o lumină perturbatoare puternică, distanța de transmisiereceptie este tot mai redusă pe măsură ce suprafata de colectare a zgomotului creste. Cu toate acestea, o configurație în care receptorul VLC utilizează un FOV larg presupune comunicația cu un vehicul din apropiere. În cazul în care nu există un vehicul în apropiere, FOV-ul poate fi redus și, astfel, distanța de transmisie-receptie poate fi crescută. Acest studiu confirmă deci faptul că un comportament adaptiv la context poate extinde considerabil performanțele sistemelor VLC auto, permitând utilizarea acestora în aplicatii rutiere.

Comparația ATCLC cu ATCLT

O comparație directă a evoluției ATCLC cu ATCLT punctează dinamica celui din urmă și prezintă principalele sale avantaje competitive. Simulările realizate la 10.000 lx, respectiv la 33.000 lx, cu diferite FOV-uri evidențiază nevoia unui amplificator de transimpedanță cu gama dinamică mai generoasă și sugerează o așa-numită valoare ideală a valorii de amplificare în scenariile analizate. După cum se poate vedea în Figura 23, în scenariul definit de utilizarea unui FOV generos (±55°) și prezența unei intensități luminoase cuprinsă între 8.200 și 10.000 lx, ATCLC atinge limita de saturație, în timp ce ATCLT, având o amplificare de 2,1 ori mai mică, previne acest lucru. Evident, o amplificare mai redusă limitează și distanța de transmisie-recepție din cauza degradării SNR-ului, însă este de preferat o distanță de transmisie-recepție mai mică decât o comunicație întreruptă din cauza saturării. Când intensitatea luminii perturbatoare scade, ATCLT, prin comutația rezistorului de reacție negativă, permite valori ale amplificării de la 1,4 până la 45,8 ori mai mari în comparație cu un ATCLC, conform condițiilor prezentate în Figura 23. Așadar, în condiții de lumină perturbatoare de nivel scăzut, distanța de transmisie-recepție pe care o poate atinge ATCLT în raport cu ATCLC este semnificativ mai mare.



Figura 23. Compararea rezultatelor simulării ATCLT cu cele ale ATCLC. Acesta prezintă evoluția tensiunii de ieșire în funcție de lumina de intrare în contextul utilizării unui FOV larg de $\pm 55^{\circ}$.

Rezultatelor simulărilor indică de asemenea că prin reducerea FOV-ului (vezi Figura 24) ATCLT poate prezenta o amplificare și de 458 de ori mai mare, în comparație cu ATCLC. Un FOV adaptiv împreună cu un ATCLT gestionat de un microcontroler pot dezvolta performanțe net superioare soluțiilor de amplificare curente. Totodată, analiza rezultatelor simulărilor sintetizate în Figura 23, respectiv Figura 24, sugerează că performanțele ATCLT susținut de un FOV adaptiv, deși sunt superioare soluțiilor de amplificare utilizate în prezent de cei mai mulți dezvoltatori de sisteme VLC, se pot îmbunătăți prin creșterea numărului de trepte. Așadar, deși din punctul de vedere al rutinelor software și al timpilor de reacție ai microcontrolerului și ai celorlalte circuite logice pot apărea anumite probleme suplimentare, o amplificare în trepte maximizează în mod evident performanțele unui astfel de amplificator.



Figura 24. Comparația rezultatelor simulării ATCLT cu cele ale ATCLC, ce analizează efectul scăderii FOV-ului pentru: a). ± 30°; b). ± 15°; c). ± 7,5°.

Amplificatorul de transimpedanță logaritmic (ATL)

ATCLT descris anterior prezintă niște avantaje evidente ce satisfac mare parte din cerințele generate de utilizarea sa în mediul rutier. Alături de o componentă software dinamică și de o etapă de testare-îmbunătățire generoasă acest tip de amplificator prezintă caracteristici ce îi conferă șansa de a face parte din noua generație de amplificatoare de transimpedanță dedicate comunicațiilor realizate prin lumină vizibilă în mediul rutier. În continuare, acest capitol propune o abordare inedită bazată pe un circuit de transimpedanță având un comportament logaritmic ca alternativă la acest amplificator de transimpedanță și în general la amplificatoarele de transimpedanță liniare.

Structura bloc a receptorului VLC

Structura bloc a receptorului VLC este compatibilă și cu acest nou tip de amplificator de transimpedanță. Deși ATL prezintă o variație a tensiunii de ieșire considerabil mai redusă, structura bloc a receptorului nu necesită nicio modificare, așadar, ea nu diferă cu nimic de structura descrisă în subcapitolul anterior.

Schema electrică a ATL

Dezvoltarea ATL urmează practic proiectarea unui circuit liniar de transimpedanță cu excepția rezistenței liniare (adică a comportamentului liniar) care stabilește câștigul circuitului, acesta fiind înlocuită cu un bloc / componentă / circuit ce are un comportament logaritmic.



Figura 25. Schema electrică a ATL.

Astfel, ATL se deosebește de amplificatoarele mai sus amintite printr-o dependență logaritmică între tensiunea de ieșire și cantitatea de lumină de intrare / curentul de intrare generat de fotodiodă, stabilită în ecuația (48). Această dependență a tensiunii de ieșire este generată de prezența unui element de conversie logaritmică pe bucla de reacție negativă. În cazul ATL propus (vezi Figura 25) acest element este reprezentat de dioda D2. Totodată, în locul acesteia putem regăsi un tranzistor bipolar NPN, cu baza conectată la masă, colectorul în locul anodului,

iar emitorul în locul catodului, situație în care acesta poartă numele de transdiodă. Divizorul rezistiv R1, R2 și C1 prezintă aceleași proprietăți cu cele ale amplificatoarelor de transimpedanță cu câștig liniar continuu sau în trepte. Asemenea ATCLT, limitarea benzii de trecere revine în sarcina blocului de filtrare trece-bandă cu amplificare prezentat în Figura 12.

Rezultatele simulării

Scenariul de simulare al ATL nu diferă cu nimic față de al amplificatoarelor de transimpedață supuse precedent acestui proces. Rezultatele simulării ATL prezintă diferențe notabile comparativ cu cele generate de simularea amplificatoarelor de transimpedanță cu câștig liniar descrise anterior. Totuși aceste diferențe sunt generate tocmai de comportamentul său logaritmic. Așadar, conform

Tabel 6, în condiții de vizibilitate perfectă și în lipsa unei lumini perturbatoare, acest amplificator poate asigura o distanță de transmisie-recepție generoasă de până la 107 m.

Tabel 6. Rezumatul rezultatelor simulării privind limita de transmisie-recepție a ATL și limitelede saturare în diverse condiții.



Figura 26. Rezultatele evaluării unui ATL. Rezultatele arată variația valorii tensiunii de ieșire atunci când este luat în considerare un FOV larg $(\pm 55^{\circ})$. În vederea păstrării aceleiași limite de saturație valoare tensiunii de ieșire este inversată.



Figura 27. Rezultatele simulării care prezintă efectul scăderii FOV-ului pentru: a). $\pm 30^{\circ}$; b). $\pm 15^{\circ}$; c). $\pm 7,5^{\circ}$. După cum se poate observa, față de amplificatoarele de transimpedanță cu câștig liniar, acesta este departe de limita de saturație. În vederea păstrării aceleiași limite de saturație valoare tensiunii de ieșire este inversată.

Concluzii privind simularea utilizării în sisteme VLC a ATL

În urma analizării rezultatelor simulării, se poate spune că utilizarea unui ATL reprezintă o soluție foarte bună de vreme ce comportamentul său previne saturarea etajului de recepție în condiții cu lumină de fundal puternică. Spre deosebire de amplificatoarele de transimpedanță liniare, în cazul ATL, reducerea FOV-ului nu se face pentru prevenirea saturării, ci pentru creșterea nivelului amplificării și deci pentru îmbunătățirea SNR-ului. De asemenea, simulările au mai arătat și că acesta se bucură de o sensibilitate ridicată în condiții de iluminat redus ceea ce îi permite detecția și amplificarea unor fascicule de lumină cu intensitate foarte scăzută. Datorită acestor calități, o astfel se soluție este foarte potrivită pentru a fi utilizată în cadrul receptoarelor VLC dedicate domeniului rutier.

Capitolul V: Evaluarea experimentală a amplificatoarelor de transimpedanță propuse

Această secțiune prezintă evaluarea experimentală a sistemului VLC propus, în condiții de laborator și luând în considerare două situații extreme:

- a) Testarea în laborator, în condiții de noapte, caracterizate așadar de lipsa aproape totală a luminii perturbatoare;
- b) Testarea în laborator, în condiții de zgomot puternic.

Pentru fiecare dintre aceste două scenarii, toate cele trei amplificatoare de transimpadanță propuse au fost supuse protocoalelor de testare descrise anterior. Scopul acestor teste este de a confirma funcționalitatea și viabilitatea sistemului și în special a acestor amplificatoare de transimpedanță, într-o plajă de condiții și scenarii de testare. Astfel, performanțele sistemului VLC sunt analizate succesiv în diferite condiții de zgomot și pentru distanțe de comunicație variabile.

Tabel 7.	Rezumatul	parametrilor	experimentali.
10000171	1102011101001	parametric	cripermienteann

Parametru	Caracteristică / Valoare
Tipul emițătorului	Semafor standard LED de 200 mm, cu o iradianță măsurată la 1 m de 190 μW/cm ²
Tipul receptorului	FOV variabil, fotodiodă PIN cu diferite amplificatoare de transimpedanță
Înălțimea poziției emițătorului	190 cm
Înălțimea poziției receptorului	85 cm
Iradianța luminii naturale perturbatoare	$100 - 300 \mu\text{W/cm}^2$
Iradianța luminii LED perturbatoare	$0 - 200 \ \mu W/cm^2$
Iradianța semnalului recepționat	190 μ W/cm ² – 0,076 μ W/cm ²
Distanța emițător - receptor	1 – 50 m
Modulația, tehnica de codare și viteza de transfer al datelor	Modulație OOK cu codare Manchester: ≤100 kb/s

Prototipul propus este proiectat să funcționeze la viteze variabile de date în intervalul 3-100 kb/s. Astfel, pentru condiții de zgomot mediu sau de nivel redus, rutina software a microcontrolerului permite abordarea modulației OOK. În acest caz, datele sunt modulate la o frecvență de ceas de 22 kHz, 50 kHz sau 100 kHz. Pentru condiții cu SNR scăzut și pentru condiții extreme de lucru (adică ceață, zăpadă, expunere directă la soare), sistemul este proiectat să utilizeze modulația DSSS la o frecvență de 22 kHz și, astfel, se obține o rată de transfer al datelor de 3 kb/s. Deși în acest caz rata realizabilă de transfer al datelor este destul de scăzută,

utilizarea modulației DSSS este prevăzută pentru scenarii în care SNR-ul este foarte scăzut sau când frecvența de zgomot se află în lățimea de bandă a receptorului VLC.

Având în vedere cerințele impuse (adică modulația, codarea, rata de transfer), emițătorul VLC transformă datele într-un fascicul de lumină modulat în amplitudine. Astfel, datele mesajului text sunt transformate într-un șir binar, care este apoi codat, modulat și transmis prin intermediul canalul optic.

Testarea în condiții de noapte a amplificatoarelor de transimpedanță propuse. Determinarea distanței maxime.

Determinarea distanței maxime de transmisie-recepție impune testarea fiecăreia dintre configurații într-un mediu cât mai apropiat de cel ideal, așadar un mediu definit de un grad cât mai ridicat de transparență și un grad cât mai scăzut de perturbații (Figura 28). Astfel de parametri sunt întâlniți în cadrul testelor de noapte, în condiții controlabile, cu precădere în laborator.



Figura 28. Modelul de testare utilizat în determinarea distanțelor maxime de transmisie-recepție ale amplificatoarelor de transimpedanță propuse.

Tabel 8. Rezumat	ul parametrilor	[.] comuni ai receptori	ului VLC folosit îi	n timpul testelor.
------------------	-----------------	----------------------------------	---------------------	--------------------

Parametru	Caracteristică/Valoare
Tipul fotodiodei	BPX61
Capacitatea fotodiodei	72 pF
Senzitivitatea fotodiodei	70 nA/lux
Suprafața elementului fotosensibil	7,02 mm ²
Intervalul spectral al fotodiodei	400-1.100 nm
Timpul de răspuns al fotodiodei	20 ns
FOV-ul receptorului VLC	±55°
Responsivitatea spectrală a fotodiodei	0,62 A/W (la 850 nm)

Semnalul emis ciclic de către emițătorul VLC are valoare statică, este codat Manchester și modulat OOK. La recepție, semnalul regăsit la ieșirea amplificatorului de transimpedanță

urmărește procesul sintetizat anterior. Analizarea unui semnal cu amplitudinea de 5 mV (Figura 29) prezintă unele dificultăți. Chiar dacă vorbim de teste de noapte, peste semnalul de date se suprapun o serie de alte semnale de diferite naturi, colectate din mediul înconjurător, generând astfel dificultăți în interpretarea vizuală a amplitudinii și formei acestuia utilizând osciloscopul. Așadar, amplitudinea semnalului prezentă pe canalul 1 (Figura 29) îndeplinește condiția avută în vedere atât în cadrul proceselor de proiectare și simulare, aceea de a prezenta o amplitudine minimă de 5 mV.



Figura 29. Captură osciloscop realizată în timpul testelor de determinare a distanței maxime. Canal 1 (galben) – semnalul de date regăsit la ieșirea amplificatorului de transimpedanță; Canalul 2 (albastru) – forma aceluiași semnal după un proces de amplificare; Canalul 3 (roșu) –semnalul regăsit la ieșirea filtrelor după ce a fost supus unui alt proces de amplificare; Canalul 4 (verde) – semnalul de date reconstruit cu ajutorul AGC-ului și a triggerului Schmitt.

In Tabel 9 sunt prezentate rezultatele testelor de determinare a distanței maxime de transmisie-recepție.

Tabel 9. Rezultatele testelor de determinare a distanței maxime de transmisie-recepție. Distanța marcată cu * prezintă un grad de acuratețe mai scăzut în raport cu celelalte valori determinate.

Tip	Iradianță la 1 m	FOV	Val. element	Distanță	Distanța
amplificator	de emițător	FUV	reacție	simulată	max. obținută
ATCLC	190 μW/cm ²	±55°	8k5	12 m	14 m
ATCLT	190 µW/cm ²	±55°	1M2*	147 m	*217 m
ATL	190 μW/cm ²	±55°	Diodă 1n4148	107 m	109 m

Analiza comparativă a distanțelor maxime obținute în raport cu cele simulate anterior atestă corectitudinea procesului de modelare-simulare. Deși prezintă valori ale distanței ușor mai mari, acestea se pot datora îndeosebi abaterilor de citire ale valorii de amplitudine regăsite la ieșirea amplificatorului de transimpedanță. Valorile obținute sunt mai mult decât mulțumitoare, acestea permit atingerea unor distanțe de transmisie-recepție generoase cu condiția ca zgomotul la nivelul canalului de comunicație să fie caracterizat de valori cât mai reduse.

Testarea în condiții de zgomot puternic a amplificatoarelor de transimpedanță propuse: stabilirea limitelor de saturație.

Dezvoltarea unor sisteme de comunicație prin lumină vizibilă cu performanțe ridicate în condiții de noapte ar putea reprezenta un prim pas în vederea utilizării acestei tehnologii în aplicații rutiere. Utilizarea unui amplificator de transimpedanță liniar cu grad ridicat de amplificare împreună cu una sau mai multe lentile colimatoare ar putea usura semnificativ atingerea acestui obiectiv. Însă, provocarea capătă o cu totul altă nuanță când vorbim de utilizarea acestui sistem și pe timp de zi. Prezența luminii ambientale este tradusă la nivelul receptorului VLC ca un factor perturbator. Fie că vorbim de o componentă continuă, fie că vorbim de o componentă alternativă, prezența luminii la nivelul fotodiodei generează zgomot alb. Lucrurile devin și mai complicate când lumina perturbatoare alternativă prezintă o oscilație încadrată în spectrul alocat comunicațiilor sau în preajma lui. Totuși, prezența unei astfel de surse de lumină ar putea fi diminuată considerabil odată cu reglementarea și alocarea unei anumite lățimi de bandă în spectrul luminos pentru acest tip de comunicație. Componenta continuă de zgomot, pe de altă parte, este dată în cea mai mare parte de lumina soarelui. Aceasta poate prezenta valori considerabil mai mari în raport cu valorile surselor de lumină artificiale și în special cu valoarea semnalului util. Dincolo de prezența zgomotului mai sus amintit, valoarea ridicată a intensității luminoase a acestuia poate satura cu usurintă amplificatorul de transimpedanță blocând temporar recepția de date. Așadar, marea provocare stă în dezvoltarea de sisteme de comunicație prin lumină vizibilă robuste la valori ridicate ale intensității solare.

Proiectarea amplificatoarelor de transimpedanță propuse a urmărit întocmai definirea într-o manieră cât mai clară a ceea ce reprezintă lumina solară în raport cu acest gen de comunicații și a căutat identificarea unor soluții ce ar putea diminua semnificativ efectele generate de către aceasta. Modul cel mai simplu de a rezolva acest impediment constă în reducerea factorului de amplificare ceea ce afectează implicit și distanța de comunicație. Acest lucru impune stabilirea și realizarea unui compromis constant între rezistența la zgomot și distanța de comunicație. Așadar, identificarea de noi soluții cu privire la această problemă este imperioasă. Prezentarea în această lucrare a anumitor indicatori determinați prin testare practică succedă o etapă anterioară de proiectare și simulare a unor amplificatoare de transimpedanță capabile să răspundă la provocarea dată de prezența luminii solare în mediul rutier din perspectiva comunicațiilor prin lumină vizibilă. În cadrul acestora, lumina solară a fost împărțită din punctul de vedere al incidenței sale pe suprafața fotoreceptoare în lumină directă și lumină indirectă. Pentru fiecare dintre aceste situații au fost propuse o serie de soluții la problemele generate de prezența luminii perturbatoare la nivelul fotoreceptorului.

Testarea practică a acestor amplificatoare și sisteme de comunicație caută să evalueze o serie de indicatori-cheie, dintre aceștia cei mai importanți fiind gradul de eroare a estimărilor

obținute prin procesele de modelare și simulare, comportamentul sistemului în condiții reale și gradul de compatibilitate al acestuia cu domeniul rutier. Implementarea practică a unui sistem generează un feedback bogat de informații ce împlinește procesul de cercetare și îl facilitează pe cel de dezvoltare. Testarea practică în condiții de zi a comportamentului manifestat de amplificatoarele de transimpedanță din cadrul sistemului de comunicație propus și dezvoltat se realizează în condiții de laborator conform Figura 30, respectă schema bloc prezentată și parametrii consemnați în Tabel 7 și Tabel 8.



Figura 30. Modelul de testare/simulare utilizat în determinarea distanțelor maxime de transmisierecepție ale amplificatoarelor de transimpedanță propuse.

În vederea simplificării lucrurilor s-a stabilit ca întregul proces să identifice exclusiv limita de saturație a amplificatoarelor operaționale, nu și dependența liniară sau logaritmică dintre nivelul intensității luminoase intermediare incidente pe suprafața fotodiodei, respectiv tensiunea de ieșire generată de către aceste amplificatoare. Analiza unui astfel de sistem în condiții complet naturale prezintă un mare inconvenient legat de imposibilitatea de a controla valoarea intensității solare și de a o stabiliza. Din dorința de a compensa parțial acest inconvenient, în spatele emițătorului VLC, deja iluminat natural, s-a montat un perturbator optic format din câteva leduri albe cu o putere totală de 8 W și 6 becuri auto, incandescente, caracterizate de o putere de 75 W fiecare. În planul de emisie al acestora s-a aplicat un difuzor de lumină, simulând astfel recepția luminii difuze / ambientale la nivelul fotoreceptorului VLC. Puterea optică totală măsurată la 1 m distanță față de acest dispozitiv perturbator a înregistrat o intensitate de $2.216 \,\mu\text{W/cm}^2$.

	FOV	Valoare de saturație simulată [lux]	Valoare de saturație determinată [lux]
	±55°	8230	17247
	±30°	\oslash	62578
ATCLC	±15°	\oslash	\oslash
	±7,5°	\oslash	\oslash
	±55°	\oslash	44263
	±30°	\oslash	\oslash
ATCLI	±15°	\oslash	\oslash
	±7,5°	\oslash	\oslash
	±55°	\oslash	*1144
	<i>±30°</i>	\oslash	*
AIL	±15°	\oslash	*
	±7,5°	\oslash	*

Tabel 10. Rezultatele testelor de determinare a limitei de saturație.

De remarcat totuși că rezultatele experimentale obținute în urma procesului de determinarea a limitei de saturatie a amplificatoarelor analizate în raport cu valorile generate de procesul de modelare-simulare au reliefat nevoia unor etaje de amplificare suplimentare, în special pentru ATL. Desi la valori de 1.500 lx este departe de a se satura, valoarea sa de iesire este nesatisfăcătoare din punctul de vedere al amplitudinii. Coeficientul de amplificare al acestui tip de amplificator de transimpedanță scade atât de mult, încât cu greu depășește pragul de zero volți (planul de masă). Cu toate acestea, o analiză detaliată a semnalului generat de către acesta a arătat că, deși valoarea amplitudinii de ieșire este mică în comparație cu a unuia liniar, prezența unui etaj de amplificare suplimentar permite valorificarea semnalului de date rezultat. Practic, prezența directă a soarelui sub un unghi cât mai apropiat de perpendicularitate reduce mult prea mult acest coeficient de amplificare, devenind nesatisfăcător, iar singura metoda de a diminua intensitatea solară incidentă la nivelul fotodiodei PIN este aceea de a limita FOV-ul. Această acțiune are ca rezultat, pe lângă creșterea coeficientului de amplificare în cazul ATL, și îmbunătătirea SNR-ului, indiferent de natura amplificatorului de transimpedantă. În concluzie, în cazul ATL, singurul care conform procesului de modelare-simulare previne saturarea indiferent de valoarea puterii solare incidente, proprietate validată prin teste practice, se impune, pe lângă o serie de etaje de amplificare suplimentare, și modelarea avantajoasă a FOV-ului, astfel încât valoarea amplitudinii de ieșire să nu prezinte un comportament similar cu al amplificatoarelor de transimpedantă liniare atunci când acestea sunt saturate.

Capitol VI: Testarea experimentală, în condiții reale, pe baza unor scenarii, a sistemului VLC dezvoltat

Așa cum am subliniat anterior și după cum reiese și din Figura 34, raportat la întregul sistem, performanțele amplificatorului de transimpedanță joacă un rol decisiv în cadrul comunicațiilor prin lumină vizibilă. Totuși, acest gen de comunicații nu se rezumă doar la partea de emisie și la amplificatorul de transimpedanță. Fiecare bloc component descris generic în Figura 34 contribuie la performanțele generale ale întregului sistem VLC. Așadar, acest capitol își propune testarea și determinarea performanțelor sistemului de comunicație dezvoltat în diferite scenarii relevante în care s-ar putea regăsi, fiind vorba de un sistem de comunicație prin lumină vizibilă dedicat mediului rutier. Acest proces nu urmărește analiza sistemului în funcție de cele trei tipuri de amplificatoare de transimpedanță propuse, ci analizează comportamentul general al sistemului ca un întreg, axându-se pe scopul pentru care a fost proiectat și implementat. Din motive ce țin de dinamică și de accesibilitate, sistemul VLC analizat în cadrul acestei lucrări este dotat cu un ATL. Analiza unui astfel de sistem dotat cu un ATCLT face obiectul unor cercetări viitoare dată fiind complexitatea acestui proces de testare.

Configurație experimentală nr. 1 - Distanță medie de comunicație în condiții de SNR ridicat

Următorul set de experimente și-a propus evaluarea funcționalității sistemului de comunicații în condiții de zgomot redus utilizând diferite tehnici de modulație. În prima configurație experimentală, în condiții de laborator, emițătorul și receptorul VLC au fost plasați la o distanță de 18 metri unul față de celălalt. Ca orice radiație electromagnetică, puterea luminii transmise scade exponențial pe măsură ce distanța crește. Mai mult, puterea care ajunge la receptor este influențată și de unghiul dintre emițător și receptor. Așadar, în acest scenariu, puterea măsurată a semnalului recepționat este de 0,56 μ W/cm², în timp ce puterea luminii naturale difuze prezintă valori cuprinse între 100 și 300 μ W/cm².

În vederea validării sistemului de comunicație, s-a urmărit nu doar transmiterea și recepționarea semnalelor de date, ci și determinarea BER-ului în tot acest proces. Pentru a determina BER-ul, seturi de date de aproximativ 10 milioane de biți au fost transmise prin repetarea unui mesaj text predefinit de 72 de biți. Datele au fost transmise utilizând modulația DSSS și codificarea SIK, modulația OOK și codarea Manchester, respectiv modulația OOK și codarea Miller. Pentru datele transmise cu DSSS, a fost selectată o frecvență de modulație de 22 kHz și o viteza de 3 kb/s. Pentru modulația OOK, datele au fost transmise folosind trei rate diferite de transfer al datelor: 22 kb/s, 50 kb/s și 100 kb/s. Emițătorul VLC a fost plasat la o înălțime de 190 cm, în timp ce receptorul VLC la o înălțime de 85 cm. Rezumatul rezultatelor experimentale este prezentat în Tabel 11.

Modulație	Codare	Transferul de date (kb/s)	Distanța VLC (m)	BER
DSSS	SIK	3	18	<10-7
ООК	Manchester	22	18	<10 ⁻⁷
ООК	Miller	22	18	<10-7
ООК	Manchester	50	18	<10 ⁻⁷
ООК	Miller	50	18	<10-7
ООК	Manchester	100	18	<10 ⁻⁷
ООК	Miller	100	18	<10-7

Tabel 11. Rezumatul rezultatelor experimentale pentru configurația nr. 1.

Rezultatele experimentale ale acestui prim scenariu de testare confirmă caracterul adecvat al prototipului propus. După cum se poate vedea pentru ambele tehnici de modulație s-au obținut BER-uri mai mici de 10⁻⁷, fără a se utiliza protocoale de corectare a biților eronați.

Configurație experimentală nr. 2 - Distanță medie de comunicație în condiții de SNR mediu

În cadrul acestei configurații experimentale se urmărește influența surselor de zgomot perturbator asupra performanțelor generale ale comunicației. Pentru acest scenariu, distanța emițător - receptor este menținută la 18 metri, în timp ce o sursă perturbatoare cu LED-uri de mare putere a fost plasată la 17 cm față de fotodioda receptorului. Din cauza sursei perturbatoare, senzorul VLC primește în mod direct un zgomot optic suplimentar de 190 μ W/cm² (măsurată la nivelul fotodetectorului) față de cel prezent în laborator la momentul testelor, reprezentat de o lumină difuză, naturală, cu valori cuprinse între 100 și 300 μ W/cm². Spre comparație, o valoare a iradianței de 190 μ W/cm² se înregistrează la o distanță aproximativă de 4-5 m față de o pereche de faruri LED omologate, orientate direct spre instrumentul de măsură. Chiar dacă sursa de zgomot se confruntă direct cu receptorul VLC, în timp ce puterea semnalului primit este semnificativ mai mică, receptorul VLC este în continuare capabil să extragă datele. Rezumatul acestor experimente este prezentat în Tabel 12.

Modulație	Codare	Transferul de date (kb/s)	Valoare zgomot suplimentar față de cel prezent în mediu de testare	Distanță VLC (m)	BER
DSSS	SIK	3	190 μW/cm ²	18	<10-7
ООК	Manchester	22	$190 \mu\text{W/cm}^2$	18	<10-7
ООК	Miller	22	$190 \mu\text{W/cm}^2$	18	<10-7
ООК	Manchester	50	$190 \mu\text{W/cm}^2$	18	<10-7
ООК	Miller	50	190 μW/cm ²	18	<10-7

Tabel 12. Rezumatul rezultatelor experimentale pentru configurația nr. 2.

ООК	Manchester	100	190 µW/cm ²	18	2*10 ⁻⁷
ООК	Miller	100	190 µW/cm ²	18	8*10 ⁻⁷

În continuare, în vederea evaluării unei situații și mai nefavorabile, puterea optică a LEDului perturbator este crescută până când zgomotul optic de la nivelul fotodiodei înregistrează valori de 400 μ W/cm², respectiv 800 μ W/cm² (Figura 31). O valoare de până la 800 μ W/cm² se poate înregistra la o distanță de sub 3 m față de o pereche de faruri LED ce iluminează direct suprafața fotoreceptorului. Figura 31 prezintă procesul de reconstrucție a semnalului în etajele principale ale receptorului VLC. Acesta ilustrează semnalul de la ieșirea circuitului de transimpedanță logaritmic, semnalul de la ieșirea primului bloc de preamplificare, semnalul de la ieșirea filtrelor și semnalul de date reconstruit. Această figură arată, de asemenea, răspunsul senzorului la puterea de zgomot în creștere (Figura 31.b și Figura 31.c). Se poate observa că, pe măsură ce nivelul luminii perturbatoare primite este în creștere, circuitul de transimpedanță logaritmic contracarează acest efect prin ajustarea automată a răspunsului său. Astfel, saturația fotoelementului este prevenită. Răspunsul circuitului de transimpedanță logaritmic pentru atenuarea efectului de zgomot duce la o scădere și a amplitudinii semnalului de date. Cu toate acestea, răspunsul adecvat al circuitului AGC compensează acest neajuns, în timp ce reconstrucția semnalului de date nu este afectată.



Figura 31. Capturile de osciloscop care ilustrează procesul de reconstrucție a semnalului la nivelul diferitelor blocuri ale receptorului VLC: Canalul 1 (portocaliu) arată semnalul de la ieșirea circuitului de transimpedanță logaritmic; Canalul 2 (albastru) arată semnalul de la ieșirea circuitului de transimpedanță după o amplificare de 24x; Canalul 3 (violet) arată semnalul de la ieșirea blocului de filtrare; Canalul 4 (verde) arată semnalul de date reconstruit. Figura arată răspunsul receptorului VLC pe măsură ce puterea luminii perturbatoare incidente crește: a. lumină naturală difuză cu o putere de 150 μW/cm²; b. lumină LED directă cu o putere de 400 μW/cm².

Configurație experimentală nr. 3 - Distanță lungă de comunicație în condiții de SNR scăzut

Scopul următoarei configurații experimentale este evaluarea comportamentului sistemului propus pe distanțe de comunicație mai mari. În acest caz, distanța de comunicație a fost crescută până la 40 de metri, iar comportamentul comunicațiilor a fost analizat pentru cele două tehnici de modulatie mentionate anterior. La această distantă, intensitatea luminii produse de semafor prezintă valori de 0,11 µW/cm² la nivelul fotodiodei receptorului. Configurația experimentală este exemplificată în Figura 32. Figura 33 ilustrează procesul de reconstrucție a semnalului de date recepționat la nivelul receptorului VLC, în cadrul acestor teste, la nivelul diferitelor blocuri de procesare sintetizate anterior. Deoarece receptorul VLC testat este capabil să reconstruiască în mod corespunzător semnalul de date, nivelul SNR-ului a fost redus cu scopul de a determina limitele orientative ce definesc blocarea acestuia. Astfel, un LED alb perturbator a fost plasat la 47 cm față de receptorul VLC, orientat către fotodioda acestuia. În aceste condiții, puterea luminii perturbatoare a LED-ului măsurată la nivelul senzorului a fost de 120 µW/cm² (pe lângă intensitatea luminii naturale, difuză, cu valori cuprinse între 100 și 300 µW/cm² - a se vedea Figura 32). Efectul luminii perturbatoare asupra receptorului VLC poate fi observat în Figura 33.b. Se poate observa că circuitul de transimpedanță logaritmic își reduce automat amplificarea pentru a preveni saturația elementului fotosensibil. Deși la o primă vedere Figura 33 a., respectiv Figura 33 b. nu evidentiază acest lucru, se poate deduce raportul dintre valorile de amplitudine ale semnalelor prin comparația scărilor de măsură utilizate în acest demers. Mai mult, lumina puternică perturbatoare afectează si forma semnalului, efect ce poate fi observat la ieșirea blocului de filtrare (Figura 33.b - Canal 3). Prin urmare, semnalul se îndepărtează și mai mult de forma sa rectangulară, în timp ce perioada biților de date este usor afectată. Asa cum am mai explicat anterior, decodarea se face pe baza determinării lățimii pulsului de date, iar această abordare în decodare conduce la o oarecare alterare a semnalului.



Figura 32. Configurația experimentală cu emițătorul VLC plasat la 40 de metri distanță față de receptorul VLC, o sursă de zgomot LED plasată la 47 cm de senzorul VLC și osciloscopul care arată semnalul primit.



Figura 33. Capturi de osciloscop care ilustrează procesul de reconstrucție a semnalului la nivelul receptorului VLC pentru o distanță de comunicație de 40 m: **a**. în condiții normale (definite de prezența unei lumini naturale, difuze cu valori cuprinse între 100 și 300 μW/cm²) **b**. cu LED-uri albe ca sursă de zgomot perturbator (ce adaugă un zgomot direct suplimentar față de cel indirect de origine naturală regăsit în timpul testelor efectuate).

Modulație	Codare	Transfer de date (kb/s)	Distanță VLC (m)	BER	Condiții
DSSS	SIK	3	40	<10-7	
ООК	Manchester	22	40	<10-7	
ООК	Miller	22	40	<10-7	
ООК	Manchester	50	40	<10-7	Cu element perturbator LED
ООК	Miller	50	40	<10-7	cu luminozitate ridicată
ООК	Manchester	100	40	5,71·10 ⁻⁴	
ООК	Miller	100	40	2,23·10 ⁻³	
ООК	Manchester	100	40	3·10 ⁻⁷	
ООК	Miller	100	40	1,7·10 ⁻⁶	

Tabel 13. Rezumatul rezultatelor experimentale pentru configurația nr. 3.

Configurație experimentală nr. 4 - Distanță mare de comunicație în condiții de soare puternic

Configurația nr. 4 urmărește să valideze compatibilitatea sistemului VLC cu aplicațiile auto caracterizate de nevoia acoperirii unor distanțe cât mai generoase. În acest sens este analizată influența condițiilor exterioare în general și a soarelui, în special, asupra comunicațiilor VLC realizate pe distante lungi. Astfel, am considerat un scenariu similar cu cel ilustrat în Figura 15. Într-un scenariu favorabil, vehiculele care se apropie sunt capabile să receptioneze semnalul emis. Cu toate acestea, pe măsură ce soarele călătorește pe cer, poziția sa relativă față de locația vehiculului se schimbă. Acest lucru înseamnă că, în funcție de locatia si orientarea semaforului, mai devreme sau mai târziu în timpul zilei, vehiculele care se apropie pot întâlni frontal lumina solară. În acest caz, lumina puternică a soarelui poate afecta serios performanțele legăturii sau chiar satura elementul fotosensibil, blocând astfel comunicația. Din dorința realizării acestor teste într-un scenariu care să fie cât mai apropiat de situațiile reale, am considerat o evaluare statică în mediul exterior, ce are loc între corpul C și corpul B al campusului Universității Ștefan cel Mare din Suceava, după cum se poate observa în Figura 34 și Figura 36. Această alegere permite realizarea unei distanțe de comunicație de aproximativ 50 de metri, ce este mai mult decât satisfăcătoare dacă ar fi să ne raportăm la stadiul de dezvoltare al acestei tehnologii la momentul realizării testelor. Semaforul descris anterior, ce face obiectul acestor teste, este orientat către NE, având vizibilitate directă către receptorul VLC (vezi Figura 34). Pentru a evalua si evidentia influenta soarelui, testele au fost efectuate în două zile diferite. În prima zi examinarea a început într-o după amiază înnourată, dar luminoasă, lipsită de vizibilitatea directă a soarelui la nivelul receptorului VLC. Cea de-a doua zi, a fost o zi de vară însorită. În cel de-al doilea caz, pe toată perioada desfășurării testelor, receptorul VLC este expus la lumina puternică a soarelui.



Figura 34. Vedere din satelit a campusului universității care prezintă orientarea emițătorului VLC și a receptorului VLC. În această configurație, receptorul VLC este orientat direct spre soare în timpul apusului.

Deoarece aceste teste urmăresc o distanță de comunicație de aproximativ 50 m, distribuția teoretică a puterii în raport cu distanța este determinată și prezentată în Figura 35.



Figura 35. Distribuția teoretică a puterii semaforului în raport cu distanța. Valoarea de plecare (puterea iradierii la 1 metru distanță față de semafor) este determinată în urma unei măsurători practice.

În cadrul testelor, emițătorul VLC este configurat în vederea difuzării ciclice a aceluiași mesaj de date modulat OOK și codat Manchester [24]. Deși în cadrul acestor teste s-a preferat o frecvență de modulație de 22 kHz, pot fi utilizate și frecvențe de modulație de până la 100 kHz. De vreme ce aceste teste și-au propus să evalueze rezistența la zgomot, testarea cu frecvențe mai mari nu a fost abordată, ținându-se cont de rezultatele testelor anterioare, care au arătat că în condiții de zgomot creșterea frecvenței duce la un BER mai ridicat.

Rezumatul configurației utilizate în timpul testării în aer liber poate fi făcut după cum urmează:

- Emițătorul VLC bazat pe un semafor cu LED-uri;
- Receptorul VLC bazat pe circuitul de transimpedanță logaritmic propus;
- Câmpul de vizibilitate (FOV): 7,5°/15°/30° (în funcție de poziția soarelui în raport cu receptorul VLC);
- Un filtru optic de blocare a componentei infraroșii (IR reject);
- Tipul de modulație: OOK;
- Tipul de codare: Manchester;
- Viteza de transfer de date: 22 kb/s;
- Transmisia: asincronă;
- Distanța emițător receptor: 50 m;
- Condiții: condiții exterioare necontrolabile; teste efectuate în diferite momente ale zilei pentru a evalua impactul soarelui pentru diferite niveluri de putere optică și orientări relative păstrând legătura cu emițătorul VLC;
- Parametrii măsurați: determinarea BER-ului în timp real;

Configurația experimentală pentru aceste teste este prezentată în Figura 36a, în timp ce rezumatul evaluării experimentale este prezentat în Tabel 14. Rezultatele confirmă faptul că

utilizarea circuitului logaritmic permite senzorului VLC să furnizeze comunicații fiabile în condiții exterioare bogate în zgomot, dând posibilitatea obținerii unui BER mai mic de 10⁻⁶.





(c)

Figura 36. Imaginile ce prezintă configurația experimentală pentru testele VLC efectuate la 50 m: (a) teste în aer liber efectuate în condiții moderate din punct de vedere a iluminatului de fundal; (b) condiții de iluminare puternică cu soarele poziționat la stânga receptorului VLC; (c) evaluarea VLC în condiții de iluminare solară puternică: Unde receptorul VLC prezintă vizibilitate directă în raport cu emițător VLC. Pozițiile emițătorului și ale receptorului VLC sunt statice în timp ce poziția soarelui se schimbă. În timpul după-amiezii, soarele este orientat direct către receptorul VLC.

După cum se poate vedea, aceste situații sunt foarte reprezentative pentru cel mai defavorabil scenariu VLC, deoarece implică o distanță mare de comunicații (până la 50 m) pentru nivelul de dezvoltare actual al VLC și condiții exterioare cu lumină puternică și expunere directă la soare. În consecință, pentru a menține conectivitatea în condiții atât de dure, FOV-ul receptorului a fost redus treptat până la 15° ($\pm7,5^{\circ}$), în timp ce soarele se îndrepta spre apus. Totuși, atunci când unghiul soarelui a devenit și mai incomod, intrând în câmpul vizual direct al receptorului VLC, FOV-ul a fost redus suplimentar ajungând să aibă valori de până la $7,5^{\circ}$

 $(\pm 3,75^{\circ})$. Figura 36c ilustrează clar configurația experimentului și arată că receptorul VLC este orientat simultan și spre emițătorul VLC, și spre soare, în timp ce Figura 37 ilustrează forma semnalului primit și procesul de reconstrucție al acestuia la nivelul diferitelor blocuri componente ale receptorului VLC. Se poate observa că în expunerea puternică la soare, circuitul de transimpedanță logaritmic previne saturația fotodiodei PIN și este capabil să mențină legătura de comunicație.

Iradianța luminii solare la nivelul senzorului [μW/cm²]	Câmpul de vizibilitate al receptorului VLC	BER-ul mediu	Condițiile exterioare necontrolabile
1.500 – 2.200	30°	<10 ⁻⁶	Înnorat după-amiază
4.000 - 4.500	30°	~10 ⁻⁴	Zi însorită fără iradierea directă a soarelui (vezi <i>Figura 36</i> a)
12.000 – 17.500	7,5°	<10 ⁻⁶	Soarele apune și iradierea lui este treptat în scădere.
25.000 – 50.000	7,5°	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	Vreme însorită, fără nori. Soarele este situat chiar deasupra emițătorului VLC, cu vedere directă spre receptorul VLC. Cel mai defavorabil scenariu pentru sistemul VLC. Vezi Figura 36c
63.000 – 67.250	15°	10 ⁻³ - 10 ⁻⁵	Vreme însorită, fără nori. Soarele a fost inițial situat în stânga receptorului VLC. Pe măsură ce tranzitează cerul spre apus, influența soarelui asupra receptorul VLC crește, ceea ce explică variația BER-ului. Soarele este pe aceeași axă cu sistemul VLC, orientat spre receptor. Vezi Figura 36.b

Tabel 14. Rezumatul evaluării experimentale a sistemului VLC în diferite condiții exterioare.



Figura 37. Captura de pe osciloscop care ilustrează procesul de reconstrucție a semnalului la nivelul diferitelor blocurilor ale receptorului VLC în cadrul testelor realizate în mediul exterior pe o distanță de aproximativ 50 m: Canalul 1 (portocaliu) arată ieșirea circuitului de transimpedanță logaritmic; Canalul 2 (albastru) arată ieșirea circuitului de transimpedanță amplificat de 24 ori; Canal 3 (violet) arată ieșirea blocului de filtrare; Canalul 4 (verde) arată forma semnalului reconstruit ce va fi utilizat în procesul de decodare al datelor.



Figura 38. BER-ul în funcție de SNR.

Configurația experimentală nr. 5 - Distanță mare de comunicație în condiții de ninsoare

După prezentarea rezultatelor experimentale în condiții variabile într-o primă fază în laborator, și apoi în condiții exterioare caracterizate de prezența unui soare puternic, următorul pas este de a asigura validarea experimentală într-un mediu afectat și de alte fenomene meteo nefavorabile. După cum s-a demonstrat în [21], pe lângă lumina puternică a soarelui, ninsorile reprezintă cea mai importantă sursă perturbatoare pentru sistemele VLC utilizate în aer liber. Conform [21], ninsorile pot reduce intervalul de comunicație cu până la 60%. În consecință, următorul test evaluează performanțele sistemului VLC propus în condiții de ninsoare, pentru un interval de comunicație de până la 50 de metri [139]. Pe lângă distanță și ninsoare, canalul VLC este afectat și de episoadele de viscol puternic. În vederea realizării acestui demers, parametrii ce definesc atât emițătorul VLC, cât și receptorul VLC rămân neschimbați în raport cu etapele de testare anterioare. Ceea ce diferențiază aceste teste de cele descrise anterior este mediul cu totul diferit. Rezumatul parametrilor ce definesc condițiile meteorologice din timpul evaluării experimentale este disponibil în

Tabel 15, în timp ce configurația sistemului VLC în timpul acestor teste este prezentată în Tabel 16.

Parametrii de vreme	Interval orar de realizare a testelor				
	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00	
Temperatura [°C]	-0,5	-0,8	-1,7	-2,3	
Umiditate relativă [%]	94	94	96	96	
Strat mediu de zăpadă [cm]	1,5	1,7	1,5	1,5	
Radiație luminoasă [µW/cm²]	7.650	6.500	4.540	2.140	
Viteza vânt [km/h]	40,9	42	42	43	
Rafală vânt [km/h]	58	62	64	64	

Tabel 15. Rezumatul condițiilor meteorologice în timpul testelor în aer liber.

Tabel 16. Rezumatul configurației sistemului VLC în timpul testelor realizate în aer liber în condiții de ninsoare.

Caracteristica sistemului VLC	Configurație / Valoare		
Distanță emițător - receptor	≈50 m		
Valoarea iradianței semnalului recepționat	0,05 μW/cm ²		
Valoarea iradianței luminii perturbatoare	$200 - 3.000 \mu\text{W/cm}^2$		
Transmisie	Asincronă		
Modulație	ООК		
Codare	Manchester		
Rate de transfer al datelor	22 kb/s; 50 kb/s; 100 kb/s		
Distanță de comunicație	50 de metri		
Parametri măsurați	Prelucrarea datelor în timp real și calculare BER-ului		

Condiții BER $10^{-7} - 10^{-6}$ Lumină perturbatoare redusă 4·10⁻⁵ Condiții de ninsoare Condiții de ninsoare și rafale abundente Până la 10⁻³ Emițătorul VLC bazat Viscol pe un semafor LED comercial **Receptorul VLC** Directia orientat către viscolului emitătorul VLC 100 **國||**圖| 50 metri

Tabel 17. Rezumatul rezultatelor experimentale în condiții de ninsoare.

Figura 39. Evaluarea experimentală a sistemului VLC auto propus, în condiții de ninsori exterioare pe o distanța de comunicație de 50 metri între semafor (emițătorul VLC) și receptorul VLC. În această configurație, canalul VLC este perturbat de episoade de ninsori și viscol.



Figura 40. Evoluția în timp real a rezultatelor BER-ului în condiții de ninsori și rafale de vânt. Vârfurile reprezentării BER-ului sunt generate de variații ale intensității ninsorilor și ale rafalelor de vânt.

Observații finale privind evaluarea experimentală a receptorului VLC și compatibilitatea acestuia cu aplicațiile rutiere. Dezbatere privind performanțele sistemului VLC propus

Rezultatele experimentale au arătat că sistemul este capabil, în anumite condiții, să suporte distanțe de comunicație în aer liber de până la 50 m, în timp ce se poate asigura un BER de până la 10⁻⁶. Aceste rezultate au la bază un cumul de factori ce au facilitat întregul proces. Pentru fiecare din blocurile componente principale s-a urmărit atât optimizarea procesului pe care acesta îl desfășoară, cât și gradul de compatibilitate dintre acestea. În urma experimentelor realizate anterior cu amplificatoarele de transimpedanță propuse, s-a decis realizarea testelor de sistem utilizând amplificatorul de transimpedantă logaritmic, date fiind proprietătile sale adaptive, în timp real, în raport cu cantitatea de lumină incidentă. Totodată, testarea tuturor amplificatoarelor propuse a oferit informații relevante cu privire la relația de dependență dintre lumină și valoarea amplitudinii semnalului de ieșire a fiecăruia din amplificatoare. Aceste informații permit intuirea într-o manieră destul de fidelă a comportamentului pe care l-ar putea dezvolta întregul sistem de recepție dacă unul sau mai multe din blocurile sale componente ar suferi modificări. Asadar, modelarea, simularea și mai apoi testarea practică a fiecăruia dintre blocurile componente, dar mai ales a sistemului complet în condiții reale a relevat o serie de aspecte-cheie. Pe lângă importanța evidentă dată de modelarea coeficientului de amplificare al amplificatorului de transimpedantă în raport cu parametrii de mediu, astfel încât convertirea luminii să fie cât mai avantajoasă, atât simulările cât și experimentele practice au subliniat influenta FOV-ului de la receptie asupra performantelor generale ale sistemului de comunicatie. Astfel, nivelul de deschidere al FOV-ului influențează SNR-ul, iar SNR-ul determină BER-ul sistemului. Totodată, valoarea FOV influentează și posibilitatea ca receptorul VLC să poată funcționa și în condiții de orientare în bătaia directă a soarelui. Totuși, deși lucrurile par simplu de rezolvat prin reducerea substantială a FOV-ului, o astfel de abordare ar putea conduce sistemul în imposibilitatea de a mai recepționa date în cazul în care unghiului dintre emițător și receptor este mai mare decât unghiul de receptie.

Conform rezultatelor investigatiilor experimentale, atât circuitul de transimpedantă logaritmic, cât și circuitului de transimpedanță cu câștig liniar în trepte, împreună cu o abordare avantajoasă a FOV-ului și a filtrelor de culoare oferă senzorului VLC performanțe îmbunătățite în condiții de iluminat puternic, deoarece această abordare împiedică saturarea elementului fotosensibil. Astfel, sistemele VLC proiectate utilizând această abordare devin mai eficiente în medii în care puterea luminii de fundal variază semnificativ (cum ar fi în mediul rutier). Asa cum s-a demonstrat în toate simulările și experimentele prezentate, această abordare este capabilă să prevină saturația amplificatorului de transimpedanță. Cu toate acestea, dacă intensitatea zgomotului incident creste peste un anume prag, degradarea SNR-ului duce amplificatorul de transimpedanță în imposibilitatea de a mai reda fidel informația optică recepționată (fie ca vorbim de amplitudini ale semnalului mult prea mici, fie că vorbim de ratarea anumitor biti sau deformarea acestora). Din acest moment, abilitatea de a decoda informațiile este dată de abilitatea procesării semnalului în vederea eliminării zgomotului și a reconstruirii informației de date pe baza unui SNR scăzut. Pentru a rezolva în continuare această problemă și pentru a îmbunătăti în continuare performantele acestor senzori VLC, noi tehnici de procesare a semnalului sunt cercetate. Cercetările anterioare au indicat faptul că performantele unui senzor VLC pot fi îmbunătățite semnificativ cu ajutorul procesării digitale a semnalului [87]. Mai mult, performanțele generale ale unui sistem VLC pot fi îmbunătățite prin dezvoltarea de sisteme

hardware care sunt capabile să evalueze condițiile de mediu și contextul existent și care își adaptează comportamentul (adică designul hardware, planul de procesare a semnalului, parametrii de comunicatie etc.) în conformitate cu conditiile / mediul / configuratia existentă [142]. Pe baza acestor fapte, lucrarea presupune combinarea tehnicilor digitale si analogice de prelucrare a semnalelor si controlarea FOV-ului, având caracteristici de adaptabilitate controlate de o unitate de procesare a datelor. Astfel, rezultatele prezentate indică faptul că în ceea ce privește utilizarea tehnologiei VLC în aplicații auto, acest lucru va fi posibil nu numai pe distanțe scurte de comunicatie, cu expunerea doar la lumină indirectă sau pe o vreme ideală, ci și în condiții neprietenoase. Astfel, această lucrare reprezintă un pas important în această direcție, deoarece se confirmă experimental o legătură VLC pe o distantă medie spre mare de comunicație, în condiții de soare direct și cu un emițător VLC standard și se evidențiază comportamentul amplificatorului de transimpedanță și a FOV-ului în funcție de anumiți parametrii urmăriți. Amplificatoarele de transimpedanță propuse au fost evaluate în scenarii variabile și în condiții de zgomot pentru a demonstra compatibilitatea sistemelor VLC cu aplicațiile de comunicații rutiere. Evaluarea experimentală a abordării propuse confirmă caracterul adecvat al designului și potențialul tehnologiei VLC în aplicații auto. Trebuie remarcat, în finalul acestei secțiuni, că sistemul VLC propus a fost dezvoltat în cea mai mare parte având ca prioritate îmbunătătirea aspectelor hardware în proiectarea sistemului VLC. Cu toate acestea, performanțele sale ar putea fi îmbunătățite în continuare prin integrarea unui sistem optic dedicat. De exemplu, sistemul optic integrat în proiectul VLC prezentat în [143] este capabil să ofere un câștig de aproximativ 15 dB. Mai mult decât atât, utilizarea de filtre optice accesibile permite eliminarea a până la 30% din zgomotul optic total, ceea ce sugerează că utilizarea de benzi înguste de filtrare optică permite îmbunătățirea SNR-ului. În privința obținerii unor valori bune ale ratei de erori, sistemul propus este capabil să realizeze un BER de 10⁻⁶ prin simpla integrare a unei soluții adecvate de detectare a luminii și a unui bloc decent de procesare a semnalelor. Cu toate acestea, sistemele de comunicații fără fir utilizează, în general, algoritmi de corecție suplimentară a erorilor. În VLC, codurile Reed-Solomon și codurile convoluționale sunt utilizate în general pentru a îmbunătăți valorile BER-ului [24]. Astfel, sunt de asteptat BER-uri mai mici de 10⁻⁷, chiar până la 10⁻⁹. Aceste nivele reduse ale BER-ului ar putea fi un avantaj major, recomandând utilizarea tehnologiei VLC în aplicații auto.

Verificarea experimentală a confirmat potențialul ridicat al sistemelor VLC în aplicațiile auto, aceste teste fiind realizate cu un semafor cu LED-uri obișnuit. Conform standardelor existente, semafoarele de 200 mm sunt fixate la 250 cm deasupra șoselei, în timp ce semafoarele de 300 mm sunt fixate la 500 cm deasupra șoselei. În cele mai multe cazuri, semafoarele nu sunt paralele în raport cu drumul, ci sunt ușor orientate către acesta. În cazul acestor teste, înălțimea semaforului (plasat la 190 cm în cadrul testărilor de laborator) nu este similară cu înălțimea specificată de standarde, deoarece manipularea de astfel de echipamente în condiții de laborator poate fi dificilă. Prin urmare, înălțimea și orientarea semaforului influențează puterea semnalului primit și, în consecință, SNR-ul și BER-ul. Cu toate acestea, întrucât mediul exterior este extrem de dinamic și foarte imprevizibil, un receptor VLC auto va experimenta în anumite condiții niveluri de SNR similare, în timp ce în alte cazuri SNR-ul ar putea fi ușor diferit. Chiar și așa, aceste rezultate sunt încă reprezentative pentru scenariul de comunicație semafor - vehicul, în special atunci când distanța emițător - receptor crește. Într-un astfel de caz, unghiul dintre semafor și vehicul scade și influența acestei înălțimi este redusă.

Această lucrare și-a propus să investigheze și să sugereze un sistem VLC capabil să funcționeze cu diferite tehnici de modulație, tehnici de codare și rate de transfer al datelor reglabile în conformitate cu contextul existent. Rezultatele experimentale au arătat că, în condițiile investigate, s-au obținut rezultate ale BER-ului destul de similare pentru cele trei tehnici de codare, cu excepția ratei de transfer al datelor de 100 kb/s. Deși diferit de ceea ce se aștepta, se poate considera că acest lucru se datorează în principal performanțelor receptorului VLC:

- i. astfel, circuitul de transimpedanță logaritmic utilizat în timpul testelor este capabil să reducă semnificativ influența luminii ambientale, oferind o gamă dinamică extinsă și prevenind saturarea fotodiodei;
- ii. limitarea avantajoasă a FOV-ului permite îmbunătățirea semnificativă a SNR-ului și implicit a BER-ului;
- iii. circuitul de amplificare cu câștig automat este capabil să mențină la ieșire o tensiune constantă a amplitudinii semnalului, deși semnalul la intrare variază semnificativ;
- iv. filtrele adaptive sunt reglate optim pe banda de frecvențe a semnalului;
- v. algoritmul de decodare bazat pe măsurarea lățimii pulsului permite variații ale perioadei semnalului de date. Cu toate acestea, pe baza experienței anterioare și a literaturii existente, se poate considera că utilizarea modulației DSSS este potrivită pentru date cu prioritate ridicată în condiții de SNR scăzut [60], [142], utilizarea OOK împreună cu codarea Manchester este adecvată pentru un SNR mediu [144], [145], în timp ce codul Miller ar putea fi o soluție eficientă în aplicațiile de tip MIMO [81], [100].

Totodată, o contribuție importantă a acestei lucrări este oferită de una dintre primele verificări experimentale ale unui sistem VLC auto în condiții de ninsoare. Aceste teste au arătat și reconfirmat efectul extrem de perturbator al ninsorii asupra sistemului VLC în aer liber. Pentru aceste teste speciale, ninsorile și rafalele intense au crescut rata erorilor de biți cu până la patru ordine de mărime. Cu toate acestea, chiar și așa, s-a obținut un BER brut de 10⁻⁴ - 10⁻³. Astfel, aceste teste arată că o comunicație este încă posibilă, în timp ce cu ajutorul codurilor de corectare a erorilor, BER-ul poate fi îmbunătățit în mod semnificativ.
Concluzii, contribuții proprii și cercetări viitoare

Dezvoltarea tehnologiei VLC și asigurarea compatibilității ei cu cerințele impuse de utilizarea în aplicații rutiere reprezintă un deziderat major, a cărui împlinire ar putea aduce numeroase beneficii, atât din punct de vedere social, cât și din punct de vedere financiar. În ultimi ani, acest domeniu a înregistrat un progres major. Anual apar noi abordări, noi soluții, noi provocări ca un pas firesc spre obținerea unui nou produs ingineresc remarcabil. Abordarea și rezultatele consemnate în cadrul acestei lucrări contribuie în mod evident la acest demers unitar. Deși rămân multe provocări nesoluționate în cel mai optim mod, obținerea unui produs final reprezintă în fond o chestiune de timp și de fonduri. Contribuțiile ce urmează a fi relatate denotă interesul ridicat al autorului cu privire la acest tip de tehnologie prin contribuțiile sale și în alte proiecte din sfera comunicațiilor optice neghidate, ce nu fac însă subiectul acestei lucrări.

Contribuții teoretice

Din punct de vedere teoretic, această lucrare s-a axat pe analiza atentă a provocărilor asociate cu utilizarea tehnologiei VLC în aplicații rutiere. Odată înțelese aceste provocări, următorul pas s-a concretizat prin identificarea și analizarea de soluții care pot răspunde acestor provocări. Din acest punct de vedere, lucrarea de față s-a concentrat pe două direcții principale.

O primă direcție a fost cea a îmbunătățirii etajului de recepție a semnalelor optice. Acest fapt este justificat pe deplin deoarece raportul de conversie optic-electric nu mai poate fi influențat ulterior, stabilind adesea un grad mai ridicat de rezistență la perturbațiile optice în detrimentul distantei de comunicatii. În acest sens s-au evaluat trei abordări diferite cu privire la amplificatorul de transimpedanță. Într-o primă etapă, s-au analizat, calculat și determinat prin intermediul unui proces de simulare-modelare principalii parametrii ce definesc cel mai popular amplificator de transimpedanță denumit în cadrul lucrării "amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar continuu". Apoi, s-au propus două noi abordări ale acestui etaj de amplificare dezvoltate în vederea integrării conceptului de adaptivitate la context a sistemului VLC. Într-una dintre acestea, factorul de amplificare al amplificatorului de transimpedanță propus este dictat de un microcontroler prin intermediul unei rutine software ce are în vedere valorile medii de ieșire ale semnalului recepționat, valorile medii de zgomot ale aceluiași semnal, respectiv valoarea FOV-ului. Acesta urmărește constant atingerea unui nivel de amplificare optim care să ofere un raport avantajos între sensibilitatea amplificatorului de transimpedanță și rezistența sa la zgomot. În acest sens, acestui amplificator de transimpedanță denumit "amplificatorul de transimpedanță cu câștig liniar în trepte" i se atribuie o serie de trepte de amplificare, stabilite pe baza unei analize laborioase atât a literaturii de specialitate, cât și a condițiilor de mediu. Pentru fiecare din aceste valori, amplificatorul de transimpedanță propus a fost supus aceluiași proces de modelaresimulare amintit anterior, rezultatele determinate fiind prezentate în cadrul acestei lucrări. Cea de-a doua propunere prezintă un amplificator de transimpedantă logaritmic. Spre deosebire de amplificatoarele de transimpedantă liniare, acest amplificator prezintă un comportament mai dificil de anticipat, însă simulabil, cu performanțe mai ridicate. În cadrul lucrării am simulat și analizat detaliat comportamentul acestui tip de amplificator. Această analiză a dovedit că noua abordare este evident superioară în raport cu clasicul amplificator de transimpedanță liniar,

principalul său atu fiind dat de capacitatea sa de a evita saturarea printr-o modificare constantă a gradului de amplificare.

O altă direcție abordată a fost aceea a îmbunătățirii performanțelor sistemelor VLC destinate aplicațiilor rutiere prin integrarea de funcții de adaptivitate la context ce permit îmbunătățirea performanțelor generale ale sistemului VLC. În acest sens s-au structurat toate blocurile componente ale receptorului VLC, s-a analizat posibilitatea adaptării lor la context și s-au propus diferite soluții. Cele mai importante dintre acestea fiind utilizarea unui FOV reglabil, a unui amplificator de transimpedanță dinamic, a circuitului de amplificare adaptiv, a trei tipuri de codare, două tipuri de modulare și trei frecvențe diferite de transmisie a datelor ce au impus și dezvoltarea unui sistem de filtrare dinamică a semnalului. Pentru fiecare din soluții s-a determinat posibilul impact pe care acestea îl pot aduce pe tot parcursul acestui proces. Totodată, s-a urmărit și compatibilitatea, respectiv modul în care se influențează reciproc.

Contribuțiile teoretice ale acestei lucrări pot fi rezumate după cum urmează:

- ✓ Analiza principiilor de funcționare ale tehnologiei VLC;
- ✓ Analiza caracteristicilor tehnologiei VLC, cu identificarea avantajelor, vulnerabilităților și a caracteristicilor ce o apropie de utilizarea ei în aplicații rutiere;
- ✓ Analiza caracteristicilor tehnologiei VLC din perspectiva utilizării ei în rețele hibride RF-VLC;

Publicații:

- [1] E. Zadobrischi, L. Cosovanu, S.-A. Avătămăniței and A. Căilean, "Complementary Visible Light Systems for Indoor Vehicular Radiofrequency and and Communications," 2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2019, 419-423. pp. doi: 10.1109/ICSTCC.2019.8885570.. https://ieeexplore.ieee.org/document/8885570
- [2] E. Zadobrischi, S.-A. Avătămănitei, A. Căilean, M. Dimian and M. Negru, "Toward a hybrid vehicle communication platform based on VLC and DSRC technologies," 2019 *IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, Romania, 2019, pp. 103-107, doi: 10.1109/ICCP48234.2019.8959672.. https://ieeexplore.ieee.org/document/8959672
- ✓ Analiza posibilității utilizării tehnologiei VLC în sisteme de transmisie a informațiilor destinate publicului larg, în interiorul clădirilor sau al automobilelor.

Publicații:

- [3] S.-A. Avătămăniţei, A. Căilean, A. Done, A. Căpitan and V. Popa, "Indoor Visible Light Communications demonstration: University Campus Radio Station transmitted through the lighting system," 2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136137. https://ieeexplore.ieee.org/document/9136137
- ✓ Analiza posibilității utilizării tehnologiei VLC în aplicații de determinare a distanțelor dintre automobile;

Publicații:

[4] C. Beguni, S.-A. Avătămăniței, A.-M. Căilean, E. Zadobrischi, M. Dimian, H. Guan and L. Chassagne "Toward a mixed visible light communications and ranging system for automotive applications," 2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136155. https://ieeexplore.ieee.org/document/9136155

✓ Analiza modului de proiectare a surselor de alimentare ale sistemelor VLC;

Publicații:

- [5] A. Done, E.-D. Olariu, A. M. Cailean, S.-A. Avatamanitei, "Green power supply for an intelligent traffic light enhanced with visible light communications capabilitie," 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, 2018, pp. 114-119. DOI: 10.1109/DAAS.2018.8396082 https://ieeexplore.ieee.org/document/8396082/
- ✓ Analiza metodelor ce permit utilizarea funcțiilor de reducere a intensității luminoase ale emițătorilor VLC și a efectelor acestor tehnici asupra performanțelor sistemelor VLC destinate aplicațiilor rutiere;

Publicații:

- [6] C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, and M. Dimian, "Analysis and Experimental Investigation of the Light Dimming Effect on Automotive Visible Light Communications Performances," *Sensors*, vol. 21, no. 13, p. 4446, Jun. 2021. https://doi.org/10.3390/s21134446 (*Q1 Journal - ISI Impact factor 2021-2022 = 3,576*)
- ✓ Analiza criteriilor ce stau la baza dezvoltării practice a componentelor sistemelor VLC, cu realizarea unei analize atente a principiilor de funcționare a etajelor de recepție optică;

Publicații:

- [7] C. Beguni, A. Căilean, S.-A. Avătămăniţei and M. Dimian, "Photodiode Amplifier with Transimpedance and Differential Stages for Automotive Visible Light Applications," 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2020, pp. 127-132, doi: 10.1109/DAS49615.2020.9108928. https://ieeexplore.ieee.org/document/9108928
- ✓ Analiza și evaluarea teoretică a limitelor de funcționare pentru diferite tipuri de circuite de recepție a semnalelor optice;

Publicații:

[8] S.-A. Avătămăniţei, A. Căilean, C. Beguni, M. Dimian and V. Popa, "Analysis Concerning the Usage of Visible Light Communications in Automotive Applications: Achievable Distances vs. Optical Noise," 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2020, pp. 121-126, doi: 10.1109/DAS49615.2020.9108964. https://ieeexplore.ieee.org/document/9108964

Contribuții practice

În contextul unei preocupări tot mai mari pentru dezvoltarea de soluții care să contribuie la îmbunătătirea sigurantei traficului rutier, această lucrare a abordat problemele legate de utilizarea sistemelor VLC în aplicațiile de siguranță activă bazate pe comunicații fără fir. În acest context, contribuțiile majore ale acestei lucrări țin de dezvoltarea, implementarea și evaluarea experimentală a unui nou sistem VLC destinat aplicațiilor rutiere. Acest proces a permis obținerea de noi contribuții semnificative în proiectarea și implementarea amplificatoarelor de transimpedanță, a conceptului de FOV adaptiv dar și a arhitecturii software aferentă sistemului. Spre deosebire de majoritatea soluțiilor existente, sistemul propus a fost dezvoltat folosind o abordare mai pragmatică, bazată pe un emitător VLC cu o putere standard și un receptor VLC cu unghi larg de recepție. Deși acest unghi larg de recepție este mai potrivit pentru aplicații auto, SNR-ul sistemului VLC este afectat considerabil. O provocare remarcabilă pentru sistemul VLC propus a fost cea legată de asigurarea unei reziliențe superioare la sursele de zgomot optic. Pentru acest lucru, au fost analizate, dezvoltate, implementate și testate trei soluții de circuite de transimpedanță, evidențiind, pentru fiecare în parte avantajele și dezavantajele sale. Din aceste trei soluții, cea bazată pe controlul amplificării amplificatorului de transimpedanță prin intermediul unui microcontroler se remarcă prin flexibilitatea îmbunătățită, prin capacitatea de adaptare extinsă și prin distanțele de comunicație realizabile mai mari, având dezavantajul unei arhitecturi mai complexe și al unui cost mai ridicat. Pe de altă parte, solutia bazată pe circuitul de transimpedanță logaritmic se remarcă printr-o capacitate remarcabilă de a preveni saturația, chiar și în contextul expunerii la o sursă de perturbații optice de putere mare.

În cadrul acestei lucrării a fost investigată, de asemenea, oportunitatea utilizării tehnicilor de modulație adaptabile, tehnicilor de codare adaptabile și a ratelor de transfer al datelor adaptabile, în funcție de contextul existent. Astfel, această lucrare a făcut un nou pas către un sistem VLC adaptabil la context, capabil să maximizeze performanțele pentru condiții de mediu variabile.

Testarea fiecărei soluții propuse a urmărit supunerea sistemului VLC celor mai nefavorabile condiții specifice mediului rutier real. Funcționalitatea sistemului chiar și în astfel de condiții, a validat suportul teoretic și rezultatele procesului de modelare-simulare, generând totodată noi informații relevante. O testare atât de dură reprezintă un aspect foarte important, deoarece, de obicei, testele sunt realizate în condiții avantajoase care să evidențieze calitățile sistemelor propuse. Testarea a fost realizată atât în condiții de laborator unde perturbațiile comunicației VLC au crescut treptat în intensitate, cât și în condiții meteo externe diverse, plecând de la soare puternic de vară și terminând cu ninsoare viscolită. Aceste teste au arătat efectul extrem de perturbator al acestor fenomene meteorologice, dar au confirmat în același timp faptul că sistemul este încă capabil să mențină comunicația chiar și în astfel de situații.

Contribuțiile practice și experimentale ale acestei lucrări pot fi rezumate astfel:

 Dezvoltarea, implementarea și testarea unui receptor VLC ce înglobează un circuit de transimpedanță logaritmic și care permite o reziliență net superioară la perturbații optice;
 Dublicatiii

Publicații:

- [9] S.-A. Avatamanitei, A. M. Cailean, E. Zadobrischi, A. Done, M. Dimian, V. Popa, "Intensive Testing of Infrastructure-to-Vehicle Visible Light Communications in Real Outdoor Scenario: Evaluation of a 50 meters link in Direct Sun Exposure," 2019 Global LIFI Congress (GLC), Paris, 2018, pp. 1-4. https://ieeexplore.ieee.org/document/8864129
- [10] S.-A. Avătămăniței, A.-M. Căilean, A. Done, M. Dimian, and M. Prelipceanu, "Noise Resilient Outdoor Traffic Light Visible Light Communications System Based on Logarithmic Transimpedance Circuit: Experimental Demonstration of a 50 m Reliable Link in Direct Sun Exposure," Sensors, vol. 20, no. 3, p. 909, Feb. 2020.. (*Q1* - *ISI Impact factor 2020-2021 = 3,275*) https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/909
- ✓ Testarea sistemelor VLC rutiere în condiții de distanțe extreme;

Publicații:

- [11] A. -M. Căilean, C. Beguni, S.-A. Avătămăniței and M. Dimian, "Experimental Demonstration of a 185 meters Vehicular Visible Light Communications Link," 2021 IEEE Photonics Conference (IPC), 2021, pp. 1-2, doi: 10.1109/IPC48725.2021.9592878. https://ieeexplore.ieee.org/document/9592878
- [12] A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniţei, C. Beguni, V. Popa and M. Dimian, "Experimental Demonstration of a 188 meters Infrastructure-to-Vehicle Visible Light Communications Link in Outdoor Conditions," 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAS51076.2021.9530174. https://ieeexplore.ieee.org/document/9530174
- ✓ Dezvoltarea, implementarea și testarea intensivă unui receptor VLC cu caracteristici îmbunătățite și cu capacități de adaptare la context;

Publicații:

- [13] S.-A. Avătămăniței, A.-M. Căilean, A. Done, M. Dimian, V. Popa, and M. Prelipceanu, "Design and Intensive Experimental Evaluation of an Enhanced Visible Light Communication System for Automotive Applications," Sensors, vol. 20, no. 11, p. 3190, Jun. 2020. (*Q1 ISI Impact factor 2020-2021 = 3,275*) https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3190
- ✓ Testarea intensivă a unui sistem VLC destinat aplicațiilor rutiere în condiții de ninsoare şi viscol în vederea evaluării efectului fenomenelor meteorologice extreme asupra parametrilor comunicației;

Publicații:

[14] S.-A. Avătămăniței, A. -M. Căilean, A. Done, M. Dimian and V. Popa, "Experimental Evaluation of Traffic Light to Vehicle Visible Light Communications in Snowfall Conditions," 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 693-696, doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263837. https://ieeexplore.ieee.org/document/9263837

- Analiza, și evaluarea intensivă a efectelor cauzate de nealinierea automobilelor:
 Publicații:
 - [15] S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, A.-M. Căilean, M. Dimian, V. Popa, "Evaluation of Misalignment Effect in Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communications: Experimental Demonstration of a 75 Meters Link," in *Sensors*, vol. 21, 3577. https://doi.org/10.3390/s21113577 (*Q1 Journal - ISI Impact factor 2021-2022 = 3,576*)
 - [16] S.-A. Avătămăniței, A. -M. Căilean, C. Beguni, V. Popa and M. Dimian, "Experimental Investigation of Visible Light Communications Coverage in Vehicle-to-Vehicle Applications," 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science Technology (ICAICST), 2021, pp. 135-140, doi: 10.1109/ICAICST53116.2021.9497804. https://ieeexplore.ieee.org/document/9497804.

Perspective și dezvoltări viitoare

Cercetările viitoare implică îmbunătățirea suplimentară a robusteții sistemului la zgomot, respectiv creșterea în continuare a distanței de comunicație. De asemenea, aceste cercetări implică dezvoltarea arhitecturilor VLC configurabile și a sistemelor VLC adaptabile la context. Toate aceste cercetări viitoare sunt menite să demonstreze pe deplin și să confirme adecvarea sistemelor VLC pentru aplicații auto.

Având în vedere progresele recente din domeniul utilizării tehnologiei VLC în aplicații de siguranță rutieră, identificarea provocărilor viitoare și adresarea lor într-o manieră adecvată ar trebui să ducă la noi îmbunătățiri ale performanțelor acestor sisteme, și în final la dezvoltarea unor prototipuri deplin compatibile cu aplicațiile de siguranță rutieră.

Din aceste puncte de vedere sunt identificate o serie de provocări, insuficient abordate.

Creșterea mobilități sistemelor VLC destinate aplicațiilor rutiere

Optimizarea sistemului de FOV adaptabil, în special din punct de vedere electromecanic ar conduce la timpi de modificare a acestuia mult mai mici și poate la un grad de precizie superior. Această nouă caracteristică s-ar regăsi sub forma unei dinamici mult mai generoasă a sistemului de recepție VLC, în special din punct de vedere al mobilității sale, fără a diminua sensibilitatea amplificatorului de transimpedanță și implicit distanța de comunicație medie.

Implementarea unui sistem de control dinamic al poziției receptorului cu posibilitatea de detectare automată a emițătorului VLC și ajustarea poziției receptorului astfel încât să fie menținută vizibilitatea directă dintre emițător și receptor, în timp ce nivelul de zgomot este limitat cât mai mult, reprezintă o nouă direcție importantă ce ar conduce sistemul de FOV adaptabil la un nivel superior. Practic, în acest caz, nu doar că s-ar diminua considerabil nivelul de zgomot prin limitarea FOV-ului, însă o orientare directă între emițător și receptor permite recepția de date în modul cel mai eficient din punct de vedere al unghiului de recepție aferent

fotodiodei PIN. În toate celelalte cazuri valoarea semnalului recepționat scade cu cosinusul unghiului generat de poziția în cauză.

Continuarea testării experimentale intensive

Simulările și analizele teoretice reprezintă pași importanți în vederea stabilirii limitelor de performanță a sistemelor VLC. Din aceste motive, ele sunt indispensabile în dezvoltarea viitoare a sistemelor VLC destinate aplicațiilor rutiere. Cu toate acestea, istoria recentă indică faptul că aplicațiile rutiere bazate pe tehnologia VLC s-au dezvoltat și au câștigat în popularitate atunci când au fost realizate și testate sisteme în condiții cât mai apropiate de cele reale. Din acest motiv, este absolut necesar ca să se continue testarea în codiții reale a prototipurilor VLC. În următorul pas, acestea vor trebui integrate în automobile reale și testate în condiții cât mai diverse și dinamice. Din această perspectivă, trebuie demarată testarea acestor sisteme în poligoane de test, urmată de evaluarea în condiții de trafic în exteriorul localităților și în final, testarea în condițiile dificile regăsite în interiorul orașelor.

Creșterea vitezei de transfer al datelor

În dezvoltarea prototipului VLC propus, accentul a fost axat pe creșterea rezistenței la zgomot si pe integrarea de funcții de adaptivitate la context. Cu toate acestea, pentru a asigura compatibilitatea sistemelor VLC cu cerintele impuse în aplicațiile rutiere, ar fi utilă creșterea vitezelor de transfer al datelor. În configurația actuală, sau cu ajutorul unor modificări destul de limitate, viteza de comunicație a sistemului VLC ar putea fi crescută până la 500 kb/s. Cu toate acestea, pentru a putea concura cu solutiile bazate pe cerintele impuse în standardul IEEE 802.11p, rate de transfer al datelor de ordinul zecilor de megabiti pe secundă ar trebui atinse. În acest sens se impune îmbunătătirea hardware și utilizarea de tehnici îmbunătătite de modulație și codare a datelor așa cum se întâlnesc în aplicațiile VLC din interiorul clădirilor (OFDM, DMT etc.). Pentru a putea atinge astfel de performante din punct de vedere al vitezei de transfer al datelor, se impun o serie de îmbunătățiri de natură hardware. Astfel, se impune înlocuirea plăcii de dezvoltare cu microcontroler cu o alta mai performantă sau cu un FPGA, înlocuirea amplificatorului operational aflat în componența amplificatorului de transimpedantă (este depăsit din punct de vedere al frecvenței și a slew rate-ului), înlocuirea sistemelor de comutație a semnalului (prezintă capacități prea mari), înlocuirea amplificatoarelor operaționale din componenta tuturor celorlalte circuite, ca de exemplu circuitele de filtrare a semnalului sau a AGC-ului (în vederea îmbunătățirii frecvenței de lucru), înlocuirea circuitului trigger Schmitt (îmbunătătirea frecvenței de lucru), reproiectarea PCB-ului în raport cu cerintele tehnice impuse de noua frecvență. Din punct de vedere software se impun adaptări ale structurii în raport cu noile tehnici de modulatie și codare, cu noile frecvențe de lucru și cu noua placă de dezvoltare. O schimbare substanțială din punct de vedere hardware impune rescrierea în totalitate a componentei software.

Determinarea distanțelor între automobile folosind tehnologia VLC

Cea mai populară abordare în determinarea distanțelor între două sau mai multe automobile utilizând tehnologia VLC se folosește de reflexia activă. Reflexia activă presupune emiterea unui semnal optic de o anumită frecvență prin intermediul sistemelor de iluminare și semnalizare aflate în dotare unui autovehicul, recepționarea semnalului de către autovehiculul căruia i-a fost emis și retransmisia semnalului către autovehiculul emițător. În urma acestui proces apare o diferență de fază între semnalul emis inițial și cel recepționat. Valoarea acesteia permite determinarea timpul de zbor al semnalului pe baza căruia se poate deduce distanța dintre autovehicule. Față de cel mai popular mecanism de determinare a distanței dintre autovehicule axat pe un sistem radar, tehnologia VLC prezintă un important avantaj dat de imposibilitatea a interfera radio cu celelalte sisteme. Mai mult, față de sistemul radar, utilizarea tehnologiei VLC generează posibilitatea identificării distanțelor nu doar în raport cu autovehiculul din fața sau din spatele emițătorului, ci și cu cele aflate în apropierea acestora prin retransmiterea succesivă a acestei informații informând astfel un întreg convoi cu privire la densitatea autovehiculelor aflate pe acel sector de drum și cu privire la o posibilă cauză a generării lui.

Determinarea distanțelor între automobile utilizând tehnologia VLC a înregistrat deja o serie de rezultate remarcabile, însă chiar și așa, este încă departe de o tehnologie ajunsă la deplină maturitate. Ca și în cazul comunicațiilor, aceasta mai poate fi îmbunătățită considerabil pe partea de recepție, partea de emisie fiind limitată de scopul principal al sursei de lumină. Așadar dincolo de filtrele optice ce pot fi îngustate, tehnologia permite îmbunătățiri și ale etajului de transimpedanță, algoritmilor de calcul, frecvenței de lucru, capacității FPGA-ului, respectiv componentei software utilizată în prezent.

Bibliografie

- [1] Systems, Cisco, "Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper," in *Whitepaper*, 9 March 2020.
- [2] The Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, "What is Radio Spectrum Policy?," 19 March 2015
- [3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Standard 802.15.7-2011, Sep. 2011, pp. 1–309.
- [4] A. M. Căilean and M. Dimian, "Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2681-2703, Fourthquarter 2017. doi: 10.1109/COMST.2017.2706940
- [5] A. T. Hussein, M. T. Alresheedi and J. M. H. Elmirghani, "20 Gb/s Mobile Indoor Visible Light Communication System Employing Beam Steering and Computer Generated Holograms," in Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 24, pp. 5242-5260, 15 Dec.15, 2015. doi: 10.1109/JLT.2015.2495165
- [6] H. Chun et al., "LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 13, pp. 3047-3052, 1 July1, 2016. doi: 0.1109/JLT.2016.2554145
- [7] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira and O. Gnawali, "Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204-3237, Fourthquarter 2019. doi: 10.1109/COMST.2019.2913348
- [8] G. Pang, T. Kwan, Chi-Ho Chan and Hugh Liu, "LED traffic light as a communications device," Proceedings 199 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems (Cat. No.99TH8383), Tokyo, Japan, 1999, pp. 788-793. doi: 10.1109/ITSC.1999.821161
- [9] M. Akanegawa, Y. Tanaka and M. Nakagawa, "Basic study on traffic information system using LED traffic lights," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 197-203, Dec. 2001. doi: 10.1109/6979.969365
- [10] R. Bian, I. Tavakkolnia and H. Haas, "15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 10, pp. 2418-2424, 15 May15, 2019. doi: 10.1109/JLT.2019.2906464
- [11] R. Bian, I. Tavakkolnia and H. Haas, "10.2 Gb/s Visible Light Communication with Off-the-Shelf LEDs," 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Rome, 2018, pp. 1-3. doi: 10.1109/ECOC.2018.8535210
- [12] T. Yamazato et al., "Range estimation scheme for integrated I2V-VLC using a high-speed image sensor," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Wkshps (ICC), Kuala Lumpur, 2016, pp. 326-330.
- [13] D. Tsonev et al., "A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED," in IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 26, no. 7, pp. 637–640, Apr. 1, 2014.
- [14] H.-K. Kim, J. H. Park and H.-Y. Jung, "An Efficient Color Space for Deep-Learning Based Traffic Light Recognition," in *Journal of Advanced Transportation*, Art. 2365414, 2018. doi: 10.1155/2018/2365414
- [15] P. Das, S. Park, and P. Bhavsar, "Simulation-Based Framework for Estimating Crash Modification Factors (CMFs): A Case Study for ITS Countermeasures," in *Journal of Advanced Transportation*, Art. 1980363, 2019. doi: 10.1155/2019/1980363
- [16] X. Wang, J. Li, C. Zhang and T. Z. Qiu, "Active Warning System for Highway-Rail Grade Crossings Using Connected Vehicle Technologies," in *Journal of Advanced Transportation*, Art. 3219387, 2019. doi: 10.1155/2019/3219387
- [17] S. Avătămăniţei, A. Căilean, E. Zadobrischi, A. Done, M. Dimian and V. Popa, "Intensive Testing of Infrastructure-to-Vehicle Visible Light Communications in Real Outdoor Scenario: Evaluation of a 50 meters link in Direct Sun Exposure," 2019 Global LIFI Congress (GLC), Paris, France, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/GLC.2019.8864129
- [18] S.A. Avătămăniței, A.M. Căilean, A. Done, M. Dimian, M. Prelipceanu, "Noise Resilient Outdoor Traffic Light Visible Light Communications System Based on Logarithmic Transimpedance Circuit:

Experimental Demonstration of a 50 m Reliable Link in Direct Sun Exposure." *Sensors*, vol. 20, no. 3, pp. 909, 2020. doi: 10.3390/s20030909

- [19] W. Shen and H. Tsai, "Testing vehicle-to-vehicle visible light communications in real-world driving scenarios," 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Torino, 2017, pp. 187-194. doi: 10.1109/VNC.2017.8275596
- [20] B. Béchadergue, L. Chassagne and H. Guan, "Simultaneous Visible Light Communication and Distance Measurement Based on the Automotive Lighting," in *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 4, no. 4, pp. 532-547, Dec. 2019. doi: 10.1109/TIV.2019.2938087
- [21] R.W. Zaki, H.A. Fayed, A. Abd El Aziz, M.H.Aly, "Outdoor Visible Light Communication in Intelligent Transportation Systems: Impact of Snow and Rain," *Applied Sciences*, vol. 9, 5453, 2019. 10.3390/app9245453
- [22] M. S. Islim et al., "The Impact of Solar Irradiance on Visible Light Communications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 12, pp. 2376-2386, 15 June15, 2018. doi: 10.1109/JLT.2018.2813396
- [23] H. B. Eldeeb and M. Uysal, "Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communication: How to select receiver locations for optimal performance?," 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2019, pp. 402-405. doi: 10.23919/ELECO47770.2019.8990598
- [24] A. Cailean and M. Dimian, "Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 4, pp. 169-175, April 2017. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600206
- [25] S. Jaktheerangkoon, Kulit Na Nakorn, and K. Rojviboonchai, "Blind Corner Propagation Model for IEEE 802.11p Communication in Network Simulators," in *Journal of Advanced Transportation*, Art. 9482325, 2018. doi: 10.1155/2018/9482325
- [26] R. Duo, C. Wu, T. Yoshinaga, J. Zhang, Y. Ji, "SDN-based Handover Scheme in Cellular/IEEE 802.11p Hybrid Vehicular Networks," Sensors, vol. 20, pg. 1082, 2020. doi: 10.3390/s20041082
- [27] M.A. Al-Absi, A.A. Al-Absi, H.J. Lee, "Performance Enriching Channel Allocation Algorithm for Vehicle-to-Vehicle City, Highway and Rural Network," *Sensors*, vol. 19, pg. 3283, 2019.
- [28] Alexander Graham Bell, "Apparatus for signaling and communicating, called photophone," US Patent 235199, 1880
- [29] A. Sevincer, A. Bhattarai, M. Bilgi, M. Yuksel and N. Pala, "LIGHTNETs: Smart LIGHTing and Mobile Optical Wireless NETworks — A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 4, pp. 1620-1641, Fourth Quarter 2013. doi: 10.1109/SURV.2013.032713.00150
- [30] Rahaim, M.; Little, T.D.C. Interference in IM/DD optical wireless communication networks. IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw. 2017, 9, D51–D63.
- [31] A. Căilean and M. Dimian, "Toward Environmental-Adaptive Visible Light Communications Receivers for Automotive Applications: A Review," in IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 9, pp. 2803-2811, May1, 2016. doi: 10.1109/JSEN.2016.2529019
- [32] G. Pang, H. Liu, C. H. Chan, and T. Kwan, "Vehicle location and navigation systems based on LEDs," in Proc. 5th World Congr. Intell. Transp. Syst., Oct. 1998, pp. 1–8, paper 3036.
- [33] "Traffic information system using light emitting diodes," U.S. Patent 5 633 629, May 27, 1997.
- [34] "Japan patent publication," Japan Patent H5-326094, Dec. 10, 1993.
- [35] "Japan patent publication," Japan Patent 2001-067585, Mar. 16, 2001.
- [36] Hoa Le Minh et al., "80 Mbit/s Visible Light Communications using pre-equalized white LED," 2008 34th European Conference on Optical Communication, Brussels, 2008, pp. 1-2. doi: 10.1109/ECOC.2008.4729532.
- [37] S.-B. Park, et. al, 'Information Broadcasting System based on Visible Light Signboard'. Proc. WOC 2007, Montreal, Canada, 2007, pp. 311-313.
- [38] M. Ayyash et al., "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges," in IEEE Commun, Mag., vol. 54, no. 2, pp. 64-71, Feb. 2016.
- [39] S. H. Yang, E. M. Jeong, D. R. Kim, H. S. Kim, Y. H. Son and S. K. Han, "Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication," in *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 54-56, Jan. 3 2013.
- [40] Se-Hoon Yang, Hyun-Seung Kim, Yong-Hwan Son and Sang-Kook Han, "Three-Dimensional Visible Light Indoor Localization Using AOA and RSS With Multiple Optical Receivers," in J. Lightw. Technol., vol. 32, no. 14, pp. 2480-2485, Jul. 2014.

- [41] M. Yasir, S. W. Ho and B. N. Vellambi, "Indoor Position Tracking Using Multiple Optical Receivers," in J. Lightw. Technol., vol. 34, no. 4, pp. 1166-1176, Feb.15, 15 2016.
- [42] Alin-Mihai CAILEAN, "Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field" Teză coordonată de Valentin POPA și Luc CHASSAGNE, Octombrie 2014.
- [43] Oledcomm Company official website, "The LiFi Technology. What is Li-Fi?", Disponibil online: https://www.oledcomm.net/lifi-technology/, (accesat pe 12.12.2018).
- [44] S. Wu, H. Wang, C.-H.; Youn, "Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications," in IEEE Network, vol.28, no.6, pp.41-45, Nov.-Dec. 2014.
- [45] X. Fan, W. D. Leon-Salas, T. Fischer and A. Perez-Olvera, "An LED-based image sensor with energy harvesting and projection capabilities," 2016 in *IEEE SENSORS*, Orlando, FL, 2016, pp. 1-3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808901
- [46] I. Haydaroglu and S. Mutlu, "Optical Power Delivery and Data Transmission in a Wireless and Batteryless Microsystem Using a Single Light Emitting Diode," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 155-165, 2015.
- [47] S.-A. Avătămăniţei, A. Căilean, A. Done, A. Căpitan and V. Popa, "Indoor Visible Light Communications demonstration: University Campus Radio Station transmitted through the lighting system," 2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136137. https://ieeexplore.ieee.org/document/9136137
- [48] Z. Li, L. Liao, A. Wang, and G. Chen, "Vehicular optical ranging and communication system", J Wireless Com Network, vol. 2015, no. 1, pp. 1–6, Jul. 2015
- [49] C. Beguni, S.-A. Avătămăniței, A.-M. Căilean, E. Zadobrischi, M. Dimian, H. Guan and L. Chassagne "Toward a mixed visible light communications and ranging system for automotive applications," 2019 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Galati, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEEE48094.2019.9136155. https://ieeexplore.ieee.org/document/9136155
- [50] S. Savasta, M. Pini, and G. Marfia, "Performance assessment of a commercial GPS receiver for networking applications," in Proc. 5th IEEE Cons. Commun. Netw. Conf., 2008, pp. 613-617.
- [51] M. Goppelt, H.-L. Blcher, and W. Menzel, "Automotive radar -investigation of mutual interference mechanisms," in Adv. Radio Sci., vol. 8, pp. 55-60, Sep. 2010.
- [52] T. Yamazato and S. Haruyama, "Image Sensor Based Visible Light Communication and Its Application to Pose, Position, and Range Estimations," in IEICE Trans. Commun., vol.E97-B No.9, pp.1759-1765, 2014.
- [53] G. Kim, J. Eom and Y. Park, "An Experiment of Mutual Interference between Automotive LIDAR Scanners," in Proc. 12th Int. Conf. Inf. Technol. - New Generations (ITNG), Las Vegas, 2015, pp. 680-685.
- [54] G. Kim, J. Eom and Y. Park, "Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners," in *Proc. IEEE Intell. Vehic. Symp. (IV)*, Seoul, 2015, pp. 437-442.
- [55] Masaki Yoshino, Shinichiro Haruyama and Masao Nakagawa, "High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor," in Proc. IEEE Radio Wireless Symp., Orlando, FL, 2008, pp. 439-442.
- [56] Shun-Hsiang Yu; Shih, O.; Hsin-Mu Tsai; Roberts, R., "Smart automotive lighting for vehicle safety," *IEEE Communications Magazine*, vol.51, no.12, pp.50,59, December 2013.
- [57] Roberts, R.; Gopalakrishnan, P.; Rathi, S., "Visible light positioning: Automotive use case," Vehicular Networking Conference (VNC), 2010 IEEE, vol., no., pp.309-314, 13-15 Dec. 2010.
- [58] C. Y. Wen, R. D. Morris and W. A. Sethares, "Distance Estimation Using Bidirectional Communications Without Synchronous Clocking," in *IEEE Trans. Sig. Process.*, vol. 55, no. 5, pp. 1927-1939, May 2007.
- [59] C. Beguni, A. Căilean, S.-A. Avătămăniţei and M. Dimian, "Photodiode Amplifier with Transimpedance and Differential Stages for Automotive Visible Light Applications," 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2020, pp. 127-132, doi: 10.1109/DAS49615.2020.9108928. https://ieeexplore.ieee.org/document/9108928
- [60] Ebrahim, K.J.; Al-Omary, A. Sandstorm Effect on Visible Light Communication. In Proceedings of the 2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), Manama, Bahrain, 8–11 May 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 1–7.

- [61] Kim, Y.H.; Cahyadi W. A.; Chung, Y.H. Experimental Demonstration of VLC-Based Vehicle-to-Vehicle Communications Under Fog Conditions. IEEE Photonics Journal, 2015, 7, 7905309. doi:10.1109/JPHOT.2015.2499542
- [62] C.R. Calvo, "A 2.5GHz Optoelectronic Amplifier in 0.18um CMOS", M.S. thesis, Worcester Polytechnic Institute, May 2003
- [63] John Caldwell,"1 MHz, Single-Supply, Photodiode Amplifier Reference Design," *Texas Instruments*, Noiembrie 2014
- [64] Singh, G.; Srivastava, A.; Bohara, V. A. Impact of Weather Conditions and Interference on the Performance of VLC based V2V Communication. 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Angers, France, 2019, 1-4.
- [65] Islim, M.S.; Videv, S.; Safari, M.; Xie, E.; McKendry, J.J.; Gu, E.; Haas, H. The Impact of Solar Irradiance on Visible Light Communications. J. Lightwave Technol. 2018, 36, 2376–2386. doi:10.1109/JLT.2018.2813396
- [66] Abualhoul, M. Y.; Marouf, M.; Shag, O.; Nashashibi, F. Enhancing the field of view limitation of Visible Light Communication-based platoon. IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC 2014), Vancouver, BC, 2014, pp. 1-5.
- [67] Memedi, A.; Tsai, H.; Dressler, F. Impact of Realistic Light Radiation Pattern on Vehicular Visible Light Communication. 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017, pp. 1-6.
- [68] Abualhoul, M. Y.; Munoz, E. T.; Nashashibi, F. The Use of Lane-Centering to Ensure the Visible Light Communication Connectivity for a Platoon of Autonomous Vehicles. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), Madrid, 2018, pp. 1-6.
- [69] Memedi, A.; Tebruegge, C.; Jahneke, J.; Dressler, F. Impact of Vehicle Type and Headlight Characteristics on Vehicular VLC Performance. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Taipei, Taiwan, 2018, pp. 1-8.
- [70] 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, 2015, 10(4), 45-53.
- [71] Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report, The CAMP Vehicle Safety Communications Consortium consisting of BMW, DaimlerChrysler, Ford, GM, Nissan, Toyota, and VW, 39255 Country Club Drive, Suite B-30,Farmington Hills, MI 48331, Mar. 2005.
- [72] IEEE Standard for Information Technology—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE Standard 802.11p, Jul. 2010.
- [73] Cailean, A.; Cagneau, B.; Chassagne. L.; Popa, V.; Dimian M. A survey on the usage of DSRC and VLC in communication-based vehicle safety applications. IEEE 21st Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), Delft, 2014, 69-74. doi: 10.1109/SCVT.2014.7046710
- [74] Zaki, R.W.; Fayed, H.A.; Abd El Aziz, A.; Aly, M.H. Outdoor Visible Light Communication in Intelligent Transportation Systems: Impact of Snow and Rain. *Appl. Sci.* 2019, 9, 5453.
- [75] Takai, I.; Harada, T.; Andoh, M.; Yasutomi, K.; Kagawa, K.; Kawahito, S. Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and Camera Receiver. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5), 7902513.
- [76] Goto, Y.; et al., A New Automotive VLC System Using Optical Communication Image Sensor. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3), 1-17.
- [77] Abualhoul, M. Y.; Marouf, M.; Shagdar, O.; Nashashibi, F. Platooning control using visible light communications: A feasibility study. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), The Hague, 2013, 1535-1540.
- [78] A. Căilean, B. Cagneau, L. Chassagne, M. Dimian and V. Popa, "Novel Receiver Sensor for Visible Light Communications in Automotive Applications," in IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 8, pp. 4632-4639, Aug. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2015.2425473.
- [79] A. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, S. Topsu, Y. Alayli and J. Blosseville, "Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures," 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Alcala de Henares, 2012, pp. 1055-1059. doi: 10.1109/IVS.2012.6232225

- [80] Kumar, N.; Lourenco, N.; Terra, D.; Alves, L.N.; Aguiar, Rui L., "Visible light communications in intelligent transportation systems," Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE, vol., no., pp.748,753, 3-7 June 2012.
- [81] Cen B. Liu, Bahareh Sadeghi, and Edward W. Knightly. 2011. Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks. In Proceedings of the Eighth ACM international workshop on Vehicular inter-networking (VANET '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 41–50. DOI:https://doi.org/10.1145/2030698.2030705
- [82] Lee, I.E.; Sim, M.L.; Kung, F.W.L. Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver. IET Optoelectronics, 2009, 3(1), 30-39.
- [83] Kurokawa, U.; Choi, B. I.; Chang, C.-C. Filter-based miniature spectrometers: Spectrum reconstruction using adaptive regularization. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7), 1556–1563.
- [84] C. Chang, Y. Su, U. Kurokawa and B. I. Choi, "Interference Rejection Using Filter-Based Sensor Array in VLC Systems," in IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 5, pp. 1025-1032, May 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2172980.
- [85] Forkel, G.J.M.; Krohn, A.; Hoeher, P.A. Optical Interference Suppression Based on LCD-Filtering. Appl. Sci. 2019, 9, 3134.
- [86] Avătămăniței, S.A.; Căilean, A.-M.; Beguni, C.; Dimian, M.; Popa, V. Analysis concerning the usage of Visible Light Communications in Automotive Applications: achievable communication distances vs optical noise. International Conference on Development and ApplicationSsystems, 2020.
- [87] A. Căilean, M. Dimian, V. Popa, L. Chassagne and B. Cagneau, "Novel DSP Receiver Architecture for Multi-Channel Visible Light Communications in Automotive Applications," in IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 10, pp. 3597-3602, May15, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2529654.
- [88] Dimian, M.; Căilean, A.M.; Done, A; Vlad, S.; Andrei, P. Visible light communication sensors with adaptive hysteretic circuits for automotive applications. Physica B: Condensed Matter, 2018, 549, 31-34.
- [89] Abualhoul, M. Y.; Shagdar, O.; Nashashibi, F. Visible Light inter-vehicle Communication for platooning of autonomous vehicles. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Gothenburg, 2016, 508-513.
- [90] Béchadergue, B.; Chassagne, L.; Guan, H. Suitability of visible light communication for platooning applications: An experimental study. 2018 Global LIFI Congress (GLC), Paris, 2018, 1-6.
- [91] T. Nawaz, M. Seminara, S. Caputo, L. Mucchi, F. S. Cataliotti and J. Catani, "IEEE 802.15.7-Compliant Ultra-Low Latency Relaying VLC System for Safety-Critical ITS," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 12, pp. 12040-12051, Dec. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2948041.
- [92] S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, A.-M. Căilean, M. Dimian, V. Popa, "Evaluation of Misalignment Effect in Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communications: Experimental Demonstration of a 75 Meters Link," in Sensors, vol. 21, 3577. https://doi.org/10.3390/s21113577 (Q1 Journal - ISI Impact factor 2021-2022 = 3,576).
- [93] S.-A. Avătămăniţei, A. -M. Căilean, C. Beguni, V. Popa and M. Dimian, "Experimental Investigation of Visible Light Communications Coverage in Vehicle-to-Vehicle Applications," 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science Technology (ICAICST), 2021, pp. 135-140, doi: 10.1109/ICAICST53116.2021.9497804. https://ieeexplore.ieee.org/document/9497804.
- [94] Saito, T.; Haruyama, S.; Nakagawa, M. A New Tracking Method using Image Sensor and Photo Diode for Visible Light Road-to-Vehicle Communication. Proc 10th Int. Conf. Advanced Commun. Technol. ICACT, 2008, 673-678.
- [95] Okada, S.; Yendo, T.; Yamazato, T.; Fujii, T.; Tanimoto, M.; Kimura, Y. On-vehicle receiver for distant visible light road-to-vehicle communication, Proc. IEEE Intell. Veh. Symp. (IV), 2009, 1033-1038.
- [96] Kumar, N.; Lourenço, N.; Terra, D.; Alves, L.N.; Aguiar, R.L. Visible light communications in intelligent transportation systems. IEEE Intell. Veh. Symp. Alcala de Henares, Spain; 2012, 748. doi:10.1109/IVS.2012.6232282.
- [97] Yamazato, T.; et al., Image-sensor-based visible light communication for automotive applications. IEEE Commun. Mag., 2014, 52, 88–97.

- [98] Y. Liu, R. Shiu, L. Wei, C. Hsu, C. Chow and C. Yeh, "100-m Long Distance RGB Visible Light Camera Communication," 2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Jeju Island, Korea (South), 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/OECC.2018.8730013.
- [99] Căilean, A.M.; Dimian, M. Impact of IEEE 802.15.7 Standard on Visible Light Communications Usage in Automotive Applications. IEEE Commun. Mag. 2017, 55, 169–175. doi:10.1109/MCOM.2017.1600206.
- [100] Căilean, A.M.; Dimian, M.; Done, A. Enhanced design of visible light communication sensor for automotive applications: Experimental demonstration of a 130 meters link. 2018 Global LIFI Congress (GLC), Paris, 2018, 1-4. doi: 10.23919/GLC.2018.8319100.
- [101] IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments," in IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009), 2010.
- [102] Takai, I.; Ito, S.; Yasutomi, K.; Kagawa, K.; Andoh, M.; Kawahito, S. LED and CMOS Image Sensor Based Optical Wireless Communication System for Automotive Applications. IEEE Photonics J., 2013, 5(5), 6801418.
- [103] Zhang. Y.; Zhang. M.; Zhou. H.; Sun. Y.; Wei. C.; He. W. A Long Distance Real-time DPSK Visible Light Communication System Based on FPGA. 18th International Conference on Optical Communications and Networks, 2019, 1-3. doi: 10.1109/ICOCN.2019.8934859.
- [104] Liu, Y.; Jiang, Z.; Wang, F.; Chi, N. 315Mbps Internet of Vehicle Communication System Using Car Head Lamp Based on Weighted Pre-distortion. IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), Chongqing, 2018, 509-512.
- [105] C. Wang, Y. Liu, W. Li, F. Wang and N. Chi, "A 375Mb/s Real-time Internet of Vehicles System Based on Automotive Headlight Utilizing OFDM-64QAM Modulation Format," 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), Huangshan, China, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICOCN.2019.8934137.
- [106] S. Han, C. Wang, G. Li and N. Chi, "A 427.5 Mbps Automotive Headlight Visible Light Communication System Utilizing 64QAM-DMT Modulation with Software Pre-equalization," 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Changchun, China, 2019, pp. 169-172, doi: 10.1109/ICCChina.2019.8855978.
- [107] Chen, J.; Wang, Z.; Mao, T. Resource Management for Hybrid RF/VLC V2I Wireless Communication System, IEEE Communications Letters, 2020, 24(4), 868-871.
- [108] Delgado-Rajo, F.; Melian-Segura, A.; Guerra, V.; Perez-Jimenez, R.; Sanchez-Rodriguez, D. Hybrid RF/VLC Network Architecture for the Internet of Things. Sensors 2020, 20, 478.
- [109] E. Zadobrischi, L. Cosovanu, S.-A. Avătămăniţei and A. Căilean, "Complementary Radiofrequency and Visible Light Systems for Indoor and Vehicular Communications," 2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2019, pp. 419-423, doi: 10.1109/ICSTCC.2019.8885570.. https://ieeexplore.ieee.org/document/8885570
- [110] E. Zadobrischi, S.-A. Avătămănitei, A. Căilean, M. Dimian and M. Negru, "Toward a hybrid vehicle communication platform based on VLC and DSRC technologies," 2019 *IEEE 15th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, Cluj-Napoca, Romania, 2019, pp. 103-107, doi: 10.1109/ICCP48234.2019.8959672. https://ieeexplore.ieee.org/document/8959672
- [111] B. Béchadergue, L. Chassagne, H. Guan, "Visible Light Phase-Shift Rangefinder for Platooning Applications," in *Proc. 19th IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Syst.*, 2016, pp. 2462-2468.
- [112] A. Done, E.-D. Olariu, A. M. Cailean, S.-A. Avatamanitei, "Green power supply for an intelligent traffic light enhanced with visible light communications capabilitie," 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, 2018, pp. 114-119. DOI: 10.1109/DAAS.2018.8396082 https://ieeexplore.ieee.org/document/8396082/
- [113] J.M. Kahn, J.R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol.85, no.2, pp.265,298, Feb 1997, doi: 10.1109/5.554222.

- [114] J. Liu, P. W. C. Chan, D. W. K. Ng, E. S. Lo and S. Shimamoto, "Hybrid visible light communications in Intelligent Transportation Systems with position based services," 2012 IEEE Globecom Workshops, Anaheim, CA, 2012, pp. 1254-1259.
- [115] Abualhoul, M.Y. Visible Light and Radio Communication for Cooperative Autonomous Driving: Applied to Vehicle Convoy. Ph.D. Thesis, *University of Paris Sciences et Letters*, Paris, France, 2016. Disponibil online: https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/INRIA/tel-01447124v1 (accesat pe 20 Aprilie 2020).
- [116] Chen, Q.; Zheng,W.; Zhang, T.; Cui,W.; Cui, Z. A power analysis model for outdoor long-distance visible light communication. In *Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Milan, Italy, 4–7 July 2017; pp. 131–136.
- [117] Vaishali. Terrestrial Free Space Optical Li-Fi for Broadband Access Communication System. Ph.D. Thesis, Manipal University Jaipur, Sanganer, India, 2018. Disponibil online: https://shodhganga.inflibnet.ac.in/handle/ 10603/237470 (accesat pe 30 Aprilie 2020).
- [118] International Communication Union—Recommendations. Propagation Data Required for the Design of Terrestrial Free-Space Optical Links. 2012, p. 1817-1. Disponibil online: https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1817-1-201202-I/en (accesat pe on 1 Mai 2020).
- [119] Shettle, Eric. (1990). Models of aerosols, clouds, and precipitation for atmospheric propagation studies. AGARD Conf. Proce.. -1.
- [120] Ahmad Zabidi, Suriza & Islam, Md. (2011). Analysis of rain effects on terrestrial free space optics based on data measured in tropical climate. IIUM Engineering Journal. 12. 45-51.
- [121] Kim, Isaac & Mcarthur, Bruce & Korevaar, Eric. (2001). Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. Proc. SPIE. 4214. 10.1117/12.417512.
- [122] Martinek, R.; Danys, L.; Jaros, R. Visible Light Communication System Based on Software Defined Radio: Performance Study of Intelligent Transportation and Indoor Applications. *Electronics* 2019, 8, 433.
- [123] K. J. Ebrahim and A. Al-Omary, "Sandstorm Effect on Visible Light Communication," 2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), Manama, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEEGCC.2017.8448035.
- [124] M. Elamassie, M. Karbalayghareh, F. Miramirkhani, R. C. Kizilirmak and M. Uysal, "Effect of Fog and Rain on the Performance of Vehicular Visible Light Communications," 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417738.
- [125] Guan, W.; Li, J.; Wen, S.; Zhang, X.; Ye, Y.; Zheng, J.; Jiang, J. The Detection and Recognition of RGB-LED-ID Based on Visible Light Communication using Convolutional Neural Network. *Appl. Sci.* 2019, *9*, 1400.
- [126] M. S. Islim and H. Haas, "An investigation of the solar irradiance effect on visible light communications," 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292621.
- [127] H. Kim, S. Chandrasekhar, C.A. Burrus, Jr., J. Bauman, "A Si BiCMOS Transimpedance Amplifier for 10Gb/s SONET Receiver," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, pp. 769-776, May 2001
- [128] S. Unlu, "Resonant Cavity Enhanced (RCE) Photonic Devices," October 7 1995, Boston University, March 2003, http://photon.bu.edu/selim/papers/apr-95/review.html.
- [129] M. Tanzid and F. M. Mohammedy, "Analysis of zero-bias resistance area product for InGaSb PIN Photodiodes," *International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE 2010)*, Dhaka, 2010, pp. 419-422, doi: 10.1109/ICELCE.2010.5700718.
- [130] S. Rajagopal, R. D. Roberts and S. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72-82, March 2012. doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.
- [131] C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, and M. Dimian, "Analysis and Experimental Investigation of the Light Dimming Effect on Automotive Visible Light Communications Performances," Sensors, vol. 21, no. 13, p. 4446, Jun. 2021. https://doi.org/10.3390/s21134446 (Q1 Journal - ISI Impact factor 2021-2022 = 3,576).

- [132] Nawaz. T.; Seminara, M.; Caputo. S.; Mucchi. L.; Cataliotti. F. S.; Catani. J. IEEE 802.15.7-Compliant Ultra-Low Latency Relaying VLC System for Safety-Critical ITS. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019, 68(12), 12040-12051. doi: 10.1109/TVT.2019.2948041.
- [133] European Committee for Standardization, EN 12368 Traffic control equipment Signal heads, approved in Feb. 2006, updated in 2015.
- [134] IEC 60598-1:2014/AMD1:2017, Amendment 1 Luminaires Part 1: General requirements and tests.
- [135] Cailean. A.; Cagneau, B.; Chassagne. L.; Dimian M.; Popa, V. Miller code usage in Visible Light communications under the PHY I layer of the IEEE 802.15.7 standard. 2014 10th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, 2014, 1-4.
- [136] Lu, X.; Li, J. New Miller Codes for Run-Length Control in Visible Light Communications. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17, 1798-1810.
- [137] Lourenço, N.; Terra, D.; Kumar, N.; Alves, L. N.; Aguiar, R. L. Visible Light Communication System for outdoor applications. 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Poznan, 2012, 1-6.
- [138] A. Cailean, B. Cagneau, L. Chassagne, V. Popa and M. Dimian, "Evaluation of the noise effects on Visible Light Communications using Manchester and Miller coding," 2014 International Conference on Development and Application Systems (DAS), 2014, pp. 85-89, doi: 10.1109/DAAS.2014.6842433.
- [139] S.-A. Avătămăniței, A. -M. Căilean, A. Done, M. Dimian and V. Popa, "Experimental Evaluation of Traffic Light to Vehicle Visible Light Communications in Snowfall Conditions," 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 693-696, doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263837. https://ieeexplore.ieee.org/document/9263837.
- [140] U.S. Department of Transportation. Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report; CAMP, Veh. Safety Commun. Consortium, Tech. Rep. DOTHS 809 859; National Technical Information Service: Springfield, Virginia, 2005.
- [141] Avătămăniței S-A, Căilean A-M, Done A, Dimian M, Popa V, Prelipceanu M. Design and Intensive Experimental Evaluation of an Enhanced Visible Light Communication System for Automotive Applications. Sensors. 2020; 20(11):3190. https://doi.org/10.3390/s20113190
- [142] Căilean, A.M.; Dimian, M. Toward Environmental-Adaptive Visible Light Communications Receivers for Automotive Applications: A Review. IEEE Sens. J. 2016, 16, 2803–2811. doi:10.1109/JSEN.2016.2529019.
- [143] Shen W.; Tsai, H. Testing vehicle-to-vehicle visible light communications in real-world driving scenarios, In 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Torino, Italy,; IEEE; 2017; pp. 187–194. doi:10.1109/VNC.2017.8275596.
- [144] Chowdhury, M.Z.; Hossan, M.T.; Islam, A.; Jang, Y.M. A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications. IEEE Access 2018, 6, 9819–9840, doi:10.1109/ACCESS.2018.2792419.
- [145] Cailean. A.; Cagneau, B.; Chassagne. L.; Topsu. S.; Alayli. Y.; Blosseville. J. Visible light communications: Application to cooperation between vehicles and road infrastructures. IEEE Intell. Veh. Symp. Alcala de Henares, Spain; 2012, 1055. doi: 10.1109/IVS.2012.6232225.