



TEZĂ DE DOCTORAT

Domeniul Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

– REZUMAT –

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNUI SISTEM MIXT DE COMUNICAȚII VEHICULARE PRIN LUMINĂ VIZIBILĂ CU ÎNCORPORAREA DE FUNCȚII SPECIFICE PENTRU CREȘTEREA SIGURANȚEI AUTO

Conducător științific:

Prof. univ. dr. Mihai DIMIAN

Doctorand:

Ing. Cătălin-Marius BEGUNI

SUCEAVA

2024

CUPRINSUL REZUMATULUI TEZEI DE DOCTORAT

1. INTRODUCERE	1
1.1. Motivația tezei.....	1
1.2. Scopul cercetării	2
1.3. Structura și conținutul rezumatului tezei de doctorat	3
2. PREZENTAREA TEHNOLOGIILOR DE TELEMETRIE ȘI COMUNICAȚII FĂRĂ FIR BAZATE PE SPECTRUL OPTIC	4
2.1. Caracteristici de bază.....	4
2.2. Sisteme bazate pe spectrul optic utile în aplicații auto	5
2.3. Prezentarea arhitecturii generale a unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă	7
2.4. Caracteristici ce pot influența performanțele unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă.....	8
2.5. Principalele provocări ale utilizării sistemului VLC în domeniul vehicular.....	12
3. STUDII ANALITICE, SIMULĂRI ȘI TESTE PRELIMINARE PENTRU DESIGNUL PROTOTIPULUI VLC-R	15
3.1. Studiu comparativ al diverselor tehnici de localizare bazate pe sisteme VLC	15
3.2. Simularea efectului de nealiniere a vehiculelor asupra comunicațiilor prin lumină.....	17
3.3. Studiul analitic al unui amplificator transimpedanță pentru sisteme de comunicații prin lumină vizibilă	20
3.4. Studii legate de creșterea distanței de comunicație prin lumină în condiții de diminuare a intensității luminoase.....	23
3.5. Integrarea funcțiilor de măsurare a distanței și de diminuare a luminozității	25
4. DEMONSTRAȚII EXPERIMENTALE ALE PERFORMANȚELOR PROTOTIPULUI PROPUS	28
4.1. Evaluarea experimentală a performanței unei legături de date prin lumină vizibilă între vehicul și semafor	29
4.2. Evaluarea experimentală a performanțelor unei legături de date prin lumină între un vehicul și lămpile de semnalizare ale unei treceri de pietoni	30
4.3. Evaluarea experimentală a performanțelor unei legături de date prin lumină cu ajutorul farurilor auto	31
4.4. Evaluarea experimentală a performanțelor unei legături de date intervehiculare stabilite cu stopurile unui autovehicul.....	32
4.5. Testarea conceptului de măsurare a distanței cu ajutorul unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă	35
4.6. Testarea creșterii distanței VLC cu ajutorul supracreșterii curentului de impuls al ledurilor odată cu diminuarea factorului de umplere	37
5. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DEZVOLTĂRI VIITOARE	41
5.1. Concluzii generale și contribuții personale	41

5.2. Dezvoltări viitoare	46
6. BIBLIOGRAFIE.....	47

1. INTRODUCERE

Utilizarea spectrului optic pentru comunicații neghidate a apărut ca o alternativă promițătoare pentru transferul de date, un domeniu care poartă denumirea de comunicații optice fără fir (OWC - Optical Wireless Communications). Deoarece OWC utilizează radiațiile vizibile și infraroșii, spectrul de care beneficiază această tehnologie e de cel puțin 2.000 de ori mai mare decât spectrul radio utilizat în prezent.

Sfera comunicațiilor optice neghidate este destul de largă și include mai multe domenii, cum ar fi comunicațiile prin lumină vizibilă (VLC – Visible Light Communications), comunicațiile de mare viteză prin lumină (LiFi – Light Fidelity), comunicațiile optice cu cameră video (OCC – Optical Camera Communication) și comunicațiile optice în spațiul liber (FSOC – Free Space Optical Communication). Atunci când sunt folosite pentru dispozitivele mobile, tehnologiile de comunicații optice neghidate pot fi extinse și pentru alte aplicații în afara celor de transmitere a datelor, cum ar fi telemetria și localizarea. Astfel, tot pe baza spectrului optic, s-au dezvoltat tehnologii specifice de măsurare a distanței (VLR – Visible Light Ranging, LiDAR - Light Detection and Ranging) [1], care, la rândul lor, ar putea fi adaptate pentru aplicații de poziționare și localizare. Fiecare dintre tehnologiile prezentate mai sus se adresează unor aplicații specifice, având propriile avantaje și vulnerabilități [2],[3].

Atractivitatea tehnologiilor bazate pe spectrul optic a crescut semnificativ în ultimii ani odată cu introducerea și răspândirea tot mai largă a conceptului VLC [4]. Sistemele de comunicații prin lumină vizibilă au la bază o tehnologie emergentă cu potențial de schimbare radicală a peisajului wireless [2],[5]. Această tehnologie de comunicație fără fir este destul de nouă și se bazează pe capacitatea de comutație rapidă a surselor de iluminare cu leduri, pentru a oferi și funcția de transfer de date pe lângă eficiența energetică a iluminării. În plus, sistemele VLC pot oferi imunitate la interferențele de radiofrecvență, dar și securitate prin modul specific de propagare a luminii. Datorită capacității sale de a oferi conexiuni cu latență scăzută, eficiente din punct de vedere energetic [6] și, deci, rentabile, tehnologia VLC s-a dovedit a fi adecvată și pentru uz industrial, inclusiv în domeniul Industriei 4.0 [7].

1.1. Motivația tezei

Pe baza datelor furnizate de Organizația Mondială a Sănătății [8], se estimează că în 2021 au fost 1,19 milioane de decese din cauza accidentelor rutiere, ceea ce înseamnă o medie de 15 decese la 100.000 de locuitori. În același raport se arată că, în 2019, cauza principală a deceselor survenite în cazul copiilor și tinerilor cu vârsta cuprinsă între 5 și 29 de ani o reprezintă accidentele rutiere, iar în clasamentul distribuției mortalității cu toate cauzele, pentru toate vârstele, acestea ocupă locul 12.

Drept urmare, eficientizarea traficului și creșterea siguranței rutiere apare ca o necesitate ce obligă la o reformare sistemică a întregului domeniu, cu implicarea tuturor actorilor pentru realizarea indicatorilor asumați. Una dintre propunerile pentru faza de început presupune implementarea de soluții de transport cooperativ inteligent și sisteme specializate, dintre care o parte importantă o reprezintă comunicațiile vehiculare, cum ar fi comunicațiile vehicul cu vehicul (V2V – Vehicle-to-Vehicle), infrastructura rutieră cu vehicul (I2V – Infrastructure-to-Vehicle) sau vehicul cu pieton (V2P – Vehicle-to-Pedestrian), dar și soluții de monitorizare și control al traficului rutier [9]. Provocarea principală rămâne găsirea celor mai potrivite tehnologii pentru comunicații intervehiculare în condițiile unui mediu ambiant imprevizibil și, mai ales, în condiții de mobilitate.

O tehnologie emergentă care s-a făcut remarcată în ultimii ani este și transmiterea datelor prin lumină vizibilă [4].

În acest context, *teza de față* își propune să aducă *contribuții semnificative* la dezvoltarea unui *sistem mixt de comunicații vehiculare prin lumină vizibilă* cu caracteristici de comunicație la *distanțe utile* pentru siguranța traficului rutier, cu *funcție* de menținere a comunicației în condiții de *diminuare a intensității luminoase* atunci când regulile de circulație o impun, dar și cu *funcție de măsurare a distanței* V2V sau I2V, în vederea asigurării algoritmilor de implementare a măsurilor de evitare a accidentelor, cum ar fi menținerea distanței, evitarea coliziunii și frânarea automată pentru evitarea tamponărilor în lanț, dar și a algoritmilor pentru poziționare și localizare.

1.2. Scopul cercetării

Utilizarea sistemelor de comunicații prin lumină vizibilă în aplicații pentru traficul rutier poate aduce beneficii reale, făcând din această tehnologie un candidat potrivit pentru implementarea unor sisteme de conectivitate intervehiculară, în special în aplicațiile pentru mașini autonome [10]–[15]. Ca atare, întregul concept VLC se adresează cu precădere viitoarelor vehicule inteligente sau autonome, care vor putea comunica între ele sau cu infrastructura de trafic inteligentă folosind sistemele proprii de iluminare cu leduri, care deja se regăsesc în majoritatea covârșitoare a sistemelor de semnalizare rutieră. Astfel de aplicații au potențialul de a contribui semnificativ la creșterea eficienței și siguranței traficului rutier. Cu toate acestea, *condiția vizibilității directe* impuse de caracteristicile intrinseci ale acestei tehnologii face ca *fiabilitatea legăturii de date* să fie greu de menținut, deoarece există multe variabile care o influențează.

Un aspect important al implementării tehnologiei VLC este menținerea intensității luminoase necesare, adică prioritizarea scopului principal al dispozitivului de iluminat. Astfel, modelul de radiație luminoasă și puterea optică medie la emisie trebuie să fie conforme cu reglementările, în ciuda faptului că ajustarea lor ar putea optimiza semnificativ SNR-ul și distanța de comunicație. Ca atare, o altă provocare pentru menținerea fiabilității legăturii de date o constituie *creșterea rezistenței la zgomot* [2].

Pentru a fi pe deplin compatibile cu cerințele aplicațiilor de comunicații între vehicule, performanța prototipurilor VLC trebuie crescută în continuare. Ca atare, *creșterea distanței de comunicație* rămâne o provocare extrem de importantă și pentru folosirea tehnologiei VLC în aplicații auto [2].

În acest context, sistemul VLC trebuie să țină cont de mediul exterior și să rezolve cerințe diferite, cu soluții antagoniste. Dacă aplicațiile din mediul interior necesită, în principal, capacitatea de a furniza comunicații cu rată mare de transfer al datelor pe distanțe mici, aplicațiile rutiere, în schimb, necesită comunicații foarte fiabile, cu *latențe scăzute*, de ordinul a 20 ms, pe distanțe mici și medii. În astfel de condiții, exigențele ratei de transfer devin mai puțin stricte, acceptându-se *rate de transfer minime* care pleacă de la 11,67 kb/s conform IEEE 802.15.7, scopul principal fiind acela de a menține legătura de date indiferent de circumstanțele mediului exterior.

Un alt aspect important pe care trebuie să-l îndeplinească un dispozitiv bazat pe tehnologia VLC ca să poată fi adecvat cerințelor de siguranță rutieră este și asigurarea unor funcții suplimentare necesare pentru adaptarea sistemului la diverse situații impuse de trafic. Una dintre condițiile suplimentare, impuse și de standardul IEEE 802.15.7, este *asigurarea funcției de diminuare a luminozității simultan cu menținerea comunicației*.

O altă cerință de siguranță este *asigurarea unei funcții de măsurare a distanței*, care ar putea sta la baza localizării și poziționării vehiculului în trafic, dar mai ales a implementării aplicațiilor de siguranță rutieră, cum ar fi implementarea frânării automate de urgență. Sistemele de siguranță ale autovehiculelor încorporează de multă vreme tehnologii cu ajutorul

căroră se poate măsura distanța față de mașina din față, iar sistemele moderne pot detecta obiectele, pot măsura viteza sau direcția și pot evita coliziunile.

Prin urmare, pentru a fi potrivite pentru aplicații de comunicații rutiere sau pentru vehicule autonome, **fiabilitatea legăturii de date** prin asigurarea unui câmp vizual potrivit pentru mobilitatea vehiculară, prin creșterea rezistenței la zgomot, prin creșterea distanței de comunicație maxime, prin asigurarea unei latențe scăzute și a unei rate de transfer minime, dar și **asigurarea funcției de diminuare a intensității luminoase cu menținerea comunicației** odată cu asigurarea funcției de măsurare a distanței sunt încă pe lista principală a provocărilor ce trebuie rezolvate pentru îndeplinirea criteriilor impuse de traficul rutier, fiind necesar un echilibru în rezolvarea individuală a fiecărui parametru fără afectarea celorlalte cerințe dincolo de limita impusă de mediul vehicular.

Ținând cont de aceste aspecte, prezenta lucrare își propune proiectarea unui sistem VLC pentru creșterea siguranței rutiere cu performanțele descrise în continuare.

Obiectivul 1. Caracteristici de comunicație îmbunătățite din punctul de vedere al fiabilității: asigurarea unui câmp vizual potrivit în condiții de nealinieră și de mobilitate vehiculară, rezistență la zgomot în limita unui BER mai mic de 10^{-3} fără coduri corectoare de erori, latențe mai mici de 20 ms și capacitate de a menține legătura de date la distanțe maxime de peste 150 m, utile pentru traficul rutier.

Obiectivul 2. Pe lângă funcțiile de iluminare și de comunicație, prototipul va trebui să fie capabil de măsurarea distanței față de un alt autovehicul sau față de o sursă de lumină a infrastructurii rutiere, cum ar fi un semafor sau o lampă de semnalizare a unei treceri de pietoni, în vederea pregătirii sistemului pentru înglobarea caracteristicilor de siguranță rutieră, dar și de localizare sau de poziționare, în perspectiva unor studii de cercetare viitoare.

Obiectivul 3. Pe lângă funcțiile de mai sus, prototipul va trebui să includă o funcție suplimentară de diminuare a intensității luminoase când regulile traficului rutier o impun, cu menținerea performanțelor de comunicație.

1.3. Structura și conținutul rezumatului tezei de doctorat

Pentru atingerea obiectivelor propuse, lucrarea de față conține cinci capitole, căroră li se adaugă bibliografia.

Capitolul 2 se bazează pe analiza stadiului actual de cercetare și dezvoltare al domeniului comunicațiilor optice neghidate și al aplicațiilor acestora, cu principalele tehnologii ce oferă o aplicabilitate practică în comunicațiile intervehiculare și între infrastructură și vehicule, în special cele prin lumină vizibilă, cu scopul principal de creștere a siguranței rutiere.

Capitolul 3 se axează pe studii analitice, simulări și teste preliminare pentru designul prototipului de comunicație prin lumină vizibilă cu funcție de măsurare a distanței (VLC-R - Visible Light Communication Rangefinder), inclusiv în condițiile cerințelor de diminuare a luminozității. În paralel, s-au studiat diversele efecte negative ale factorilor externi, cum ar fi nealinieră vehiculelor în contextul mobilității urbane, dar și modul în care se poate modifica codarea la transmisie pentru a putea implementa un algoritm de integrare în sistemul VLC a diverselor funcții dorite.

Capitolul 4 se apleacă asupra implementării arhitecturii trasate și testării performanțelor de comunicație ale prototipului VLC-R în diverse scenarii, cât mai apropiate de situațiile cu potențial de generare a accidentelor din traficul rutier real.

Capitolul 5 încheie lucrarea de față cu concluzii generale, prezentarea contribuțiilor personale și evidențierea rezultatelor obținute în urma cercetării efectuate.

2. PREZENTAREA TEHNOLOGIILOR DE TELEMETRIE ȘI COMUNICAȚII FĂRĂ FIR BAZATE PE SPECTRUL OPTIC

2.1. Caracteristici de bază

Tehnologia comunicațiilor prin lumină vizibilă

Există mai multe tehnici de modulație și procesare a semnalului utilizat pentru a spori performanța sistemului VLC. Metoda cea mai ușoară și mai convenabilă din punctul de vedere al costurilor este modulația intensității luminoase urmată de detecția directă (IM/DD – Intensity Modulation/Direct Detection) pentru transmiterea și recepționarea datelor. Unele sisteme VLC folosesc modulații cu o singură purtătoare, cum ar fi schemele de modulație a impulsurilor în poziție (PPM – Pulse Position Modulation), modulația impulsului în lățime (PWM – Pulse Width Modulation) și modulația de tip "totul sau nimic" (OOK – On-Off Keying), dar pot fi folosite și modulații cu purtătoare multiple, cum ar fi multiplexarea cu divizare în frecvență ortogonală (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), care se caracterizează printr-o eficiență spectrală mult mai ridicată, dar cresc complexitatea sistemului.

Un obstacol în dezvoltarea tehnologiei VLC a fost lipsa standardizării, drept pentru care s-au făcut diferite încercări de reglementare. Dintre toate tentativele, IEEE 802.15.7 pare a avea cea mai largă susținere din partea comunității științifice, fiind standardul care abordează sistemele VLC în întreaga lor complexitate, ținând cont de multiple provocări. Un exemplu în acest sens e preocuparea pentru evitarea percepției fluctuațiilor luminoase provocate de modulație și implementarea funcției de diminuare a intensității luminoase pentru situațiile când funcția de bază, iluminarea, impune acest lucru. Publicat în 2011 și îmbunătățit pe parcurs, până la versiunea actuală din 2018, IEEE 802.15.7 este standardul care a definit inclusiv nivelurile fizice pentru comunicații prin lumină vizibilă pe distanțe mici [16]. Deși acceptarea și utilizarea standardului IEEE 802.15.7 au fost destul de limitate, un aspect important pe care acesta îl specifică este faptul că funcția de transmitere a datelor nu trebuie să influențeze funcția primară de iluminare, iar asta aduce cu sine o serie de constrângeri de care trebuie să se țină cont.

Avantajul principal al tehnologiei VLC e dat de faptul că sistemele de iluminare cu leduri sunt aproape omniprezente, ceea ce constituie un avantaj al costului la transformarea acestor surse luminoase în sisteme de transmitere a datelor. Față de alte metode de comunicații, VLC oferă posibilitatea de a folosi spectrul de frecvență înaltă acoperit de lumina vizibilă (430 THz – 790 THz) pentru a înlesni atingerea unor rate ridicate de transfer al datelor. Astfel, întrucât ledurile sunt pe cale să înlocuiască total sursele de lumină incandescentă și fluorescentă la interior și la exterior [17], fundamentul pentru implementarea pe scară largă a VLC este aproape îndeplinit. Fiecare sursă de lumină cu leduri poate fi modernizată pentru a deveni un sistem de difuzare a datelor prin adăugarea unei componente de modulație a intensității luminoase. Tehnologia VLC este susținută în mare parte de progresul tehnologiei de iluminare cu semiconductoare [18]-[20].

Tehnologia comunicațiilor optice cu ajutorul camerelor video

OCC reprezintă un subdomeniu al tehnologiei VLC, care folosește camere video ca elemente fotosensibile [21]. Acest domeniu al activității de cercetare este motivat de numărul tot mai mare de dispozitive echipate cu sistem de camere video, cum ar fi smartphone-urile,

tabletele, laptopurile, vehiculele, dronele etc. Un alt avantaj tehnic important al receptoarelor OCC este unghiul larg de recepție. Ca dezavantaj, performanțele sistemelor OCC sunt limitate de numărul limitat de cadre pe secundă (fps – frame per second), camerele obișnuite având 30-60 fps, ceea ce afectează rata de transfer. Un alt dezavantaj e dat de calitatea procesării imaginilor, care este puternic limitată de rezoluția imaginii.

Tehnologia LiFi

Tehnologia LiFi a fost dezvoltată ca o alternativă sau o completare a tehnologiei fără fir prin unde radio (WiFi – Wireless Fidelity). Spre deosebire de WiFi, care utilizează spectrul de radiofrecvență, LiFi folosește lumina vizibilă pentru *download* și spectrul infraroșu (sau, uneori, ultraviolet) pentru *upload*. Astfel, LiFi are potențialul de a furniza comunicații la viteze mari, sperându-se atingerea unei rate de transfer de sute de gigabiți pe secundă [22],[23]. Cu toate acestea, există mai multe probleme tehnice care trebuie încă soluționate. Astfel de probleme includ interferențele intercelulare [24] și echilibrarea încărcării rețelei între sistemele LiFi și WiFi [25].

Tehnologia comunicațiilor optice în spațiul liber

Utilizarea tehnologiei VLC în aplicații în spațiul liber este destul de complexă, mai ales atunci când se intenționează transmisii la distanțe mari. Din aceste motive, FSOC acoperă acel domeniu al OWC care impune viteze mari de transfer al datelor și distanță mare de comunicație. FSOC folosește în principal spectrul infraroșu datorită proprietăților de atenuare mai redusă a semnalului, dar poate exploata și gama spectrului vizibil și ultraviolet. Astfel, spre deosebire de VLC-ul standard, FSOC nu are funcția de iluminare ca o condiție obligatorie. În consecință, în aplicațiile FSOC, puterea emisă poate fi mărită pentru creșterea distanței de comunicație. Un dezavantaj al tehnologiei FSOC este că suferă încă de lipsa fiabilității legăturilor din cauza sensibilității la condițiile meteorologice și a diverselor obstrucționări ale fasciculului de lumină.

Tehnologia LiDAR

Pe lângă obiectivele legate de comunicații, sistemele optice de transmisii fără fir sunt, de asemenea, potrivite pentru aplicații de localizare și măsurare a distanței. LiDAR este cel mai reprezentativ exemplu pentru o astfel de aplicație. Similar cu radarul, LiDAR-ul emite un câmp de energie (de obicei un fascicul îngust în infraroșu) care se reflectă atunci când întâlnește un obstacol. Pe baza analizei fasciculului reflectat (timpul de zbor, unghiul de sosire, puterea semnalului recepționat) în urma baleierii spațiului de interes, sistemul este capabil să determine dimensiunea obiectului și, de asemenea, distanța până la acesta. Aplicațiile LiDAR includ cartografierea 3D de înaltă precizie în diferite domenii, scanarea aeriană a suprafeței sau detectarea și localizarea obstacolelor pentru vehicule autonome [1].

2.2. Sisteme bazate pe spectrul optic utile în aplicații auto

Comunicații prin lumină vizibilă în aplicații auto

Un domeniu aparte în care sistemele VLC se pot dovedi utile e cel al transportului rutier (VVLC – Vehicular Visible Light Communication). Folosind transmisii de date prin VLC V2V sau I2V se pot implementa diverse funcții importante pentru un vehicul modern:

- schimbul de mesaje informative legate de siguranță rutieră și de trafic;

- deplasare autonomă în convoi (*platooning*);
- calcularea distanței intervehiculare sau de la vehicul la infrastructura rutieră (*range-finding*);
- localizarea în spațiu în raport cu diverse repere fixe sau mobile (*localization/positioning*);
- calcularea vitezei;
- aplicații în interiorul vehiculelor [26],[27].

Importanța sistemelor VLC devine cu atât mai mare pentru sporirea siguranței traficului rutier cu cât în ultimii ani au început să apară autovehiculele semiautonomes și chiar autonome. Pentru o bună compatibilitate cu aplicațiile auto, este necesar să se aibă în vedere mobilitatea autovehiculelor și capacitatea de a transmite informații în condițiile în care acestea nu pot fi mereu aliniate.

Măsurarea distanței folosind spectrul optic în aplicații auto

Legat de comunicațiile intervehiculare, există mai multe tehnologii dedicate măsurării distanței. Cele mai utilizate sunt radarul, LiDAR-ul, sistemele cu ultrasunete și sistemele cu camere video. Exceptând sistemele cu videocamere, celelalte tehnologii folosesc același principiu de funcționare: trimit o undă, care este reflectată de țintă, apoi procesează ecoul recepționat pe baza unui parametru care variază proporțional cu distanța de la emițător până la țintă, cum ar fi durata, faza sau frecvența. Măsurarea distanței cu ajutorul videocamerei se bazează pe un concept cu totul diferit, în care sistemele video sunt utilizate ca senzori pasivi de lumină, elementul principal de analiză fiind fluxul de cadre cu ajutorul cărora distanțele sunt calculate prin intermediul tehnicilor de procesare a imaginilor.

În contextul dezvoltării tot mai accentuate a vehiculelor semiautonomes și autonome, creșterea preciziei localizării vehiculului și a poziționării în trafic sunt cerințe tot mai actuale. Măsurarea distanței prin lumină vizibilă este privită ca o tehnologie complementară, cu costuri reduse, care utilizează sistemele de iluminare și semnalizare ale vehiculelor pentru a determina distanța dintre două vehicule sau dintre un vehicul și un element al infrastructurii rutiere [28].

Dezvoltarea sistemelor de localizare și utilizarea acestora în aplicații auto

Sistemele de poziționare stau la baza serviciilor de navigație și sunt utilizate în scopul localizării utilizatorului și oferirii indicațiilor de deplasare. În prezent, e folosit cu precădere sistemul de poziționare globală (GPS – Global Positioning System) [29]. Deși prezintă multe avantaje, în medii dificile, cum ar fi în interiorul clădirilor sau a tunelurilor, poziționarea și navigația prin GPS este îngreunată de dificultatea stabilirii comunicației cu sateliții [30]. Deși GPS-ul poate fi extrem de precis și suficient de rapid pentru a fi utilizat cu rezultate bune, se știe totuși că străzile înguste printre blocuri înalte ("canioane" urbane), tunelurile și pasajele subterane pot să întrerupă semnalul de la sateliți suficient timp pentru ca sistemul să-și piardă poziția.

Pentru a contracara astfel de probleme, au fost propuse diverse soluții, un pas făcut în ultimii ani fiind studiul metodelor de odometrie autonome, care permit calcularea poziției vehiculului cu ajutorul senzorilor de bord, robustețea și precizia sistemului fiind crescută prin utilizarea unei combinații de abordări variate, cum ar fi odometria clasică, inerțială, vizuală, cu ajutorul radarului și cu ajutorul laserului. Totuși, fiecare dintre aceste metode vine cu propriile provocări [31].

Este ușor de înțeles că, atunci când receptorul sistemului de navigație GPS iese dintr-o zonă de vizibilitate a sateliților, nu este suficient un singur sistem de rezervă pentru a acoperi

toate scenariile posibile. O posibilă soluție pentru rezolvarea acestor impedimente, apărută în ultimii ani, este implementarea unor sisteme de poziționare bazate pe sistemele de iluminat cu leduri, care utilizează ca purtătoare lumina în loc de undele radio, pe baza tehnologiei VLC [32]. Deși au și ele propriile lor dezavantaje, sistemele VLC pot acoperi totuși o mare parte dintre provocări.

2.3. Prezentarea arhitecturii generale a unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă

Arhitectura generală a sistemelor VLC e alcătuită dintr-un emițător optic și un receptor optic ce comunică prin spațiul liber de propagare a luminii, spațiu care formează canalul de transmisie, având ca posibilele elemente componente blocurile prezentate în **Figura 2.1**.

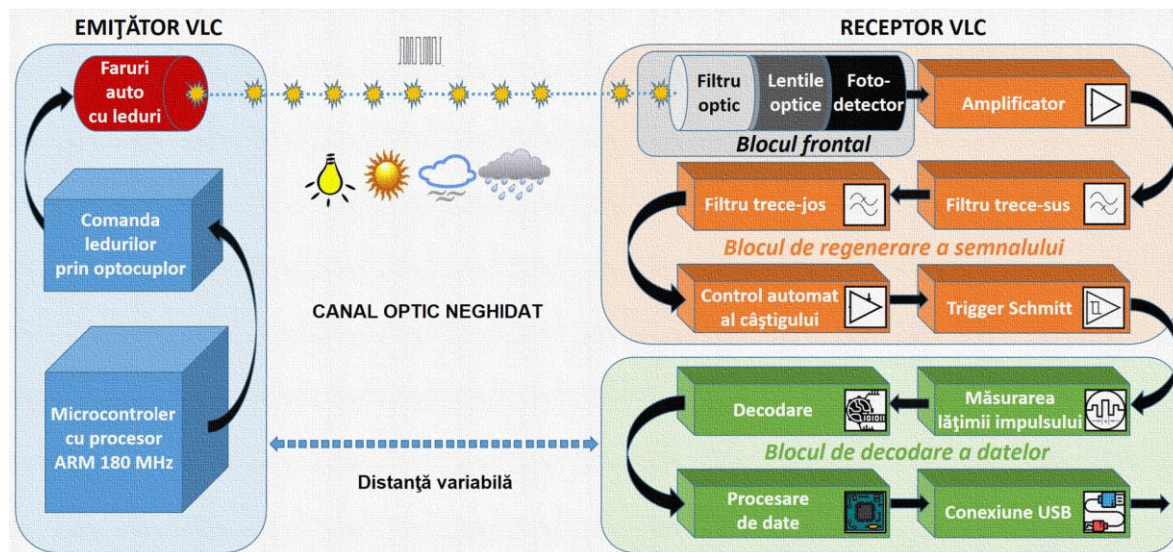


Figura 2.1. Arhitectura generală a unui sistem VLC.

Canalul optic în cadrul arhitecturii VLC

Structura canalului VLC poate fi împărțită în două categorii principale, în funcție de configurarea legăturii între emițător și receptor. Prima categorie se referă la vizibilitatea dintre emițător și receptor. Putem identifica situația în care există o *legătură cu vizibilitate directă* între emițător și receptor, situația în care nu există vizibilitate directă, dar există o *legătură indirectă*, stabilită prin reflexii pe alte suprafețe (cum ar fi panouri indicatoare, pereți etc.), sau situația unei *legături hibride*, în care primele două tipuri pot coexista simultan. În cazul sistemelor VLC vehiculare, pentru a obține eficiența maximă, cerința primordială este să se asigure o vizibilitate directă între transmițător și receptor. A doua categorie se referă la gradul de direcționalitate a canalelor, unde avem *legături direcționale*, când receptorul și emițătorul sunt orientați unul spre celălalt, *legături nedirecționale*, când atât emițătorul, cât și receptorul au unghiuri mari de emisie, respectiv, de vizibilitate, și *legături hibride*, când, de exemplu, emițătorul are un unghi mare de emisie, dar receptorul are un unghi îngust de vizibilitate și este direcționat către emițător [33].

Emițătorul VLC

Emițătorul VLC poate fi orice sursă de lumină cu leduri adaptată pentru transmiterea datelor prin spațiul liber, simultan cu funcția principală, de iluminare. Pentru îndeplinirea

acestui scop, emițătorul are drept componentă centrală un etaj de modulare și codare, care convertește datele în cod binar și le transmite la viteza necesară de transfer. În cazul transmisiei în mediul exterior, se poate folosi modulația OOK și cod Manchester, dar pot fi folosite și modulații mai complexe. Codarea poate fi făcută cu performanțe mulțumitoare folosindu-se microcontrolere, dar acestea ar putea fi înlocuite cu FPGA în aplicațiile mai pretențioase, când sunt necesare performanțe superioare.

Receptorul VLC

Receptorul VLC are cea mai mare complexitate în cadrul unui sistem VLC și este o componentă esențială, fiindcă de performanțele acestuia depinde calitatea legăturii de date. În general se folosește o fotodioda de tip PIN în scheme cu polarizare inversă, în care puterea optică incidentă generează un curent direct proporțional, având o valoare dată de sensibilitatea spectrală a fotodiodei.

Tensiunea obținută la ieșirea amplificatorului transimpedanță trece prin etaje succesive de amplificare, după care semnalul e trecut printr-un filtru trece-bandă, pentru eliminarea componentei continue și a zgomotului de joasă și de înaltă frecvență. Semnalul ajunge într-un bloc de control automat al amplificării, după care sunt refăcute fronturile cu ajutorul unui circuit trigger Schmitt. După regenerarea semnalului la forma inițială, se trece mai departe spre blocul de procesare digitală, unde se decodează datele pe baza măsurării lățimii impulsurilor, se procesează informația și se afișează rezultatul ce include rata erorilor de bit.

O altă componentă posibilă a receptorului VLC este și filtrul optic, în special în cazul sistemelor bazate pe sisteme de iluminare sau semnalizare cu leduri de o singură culoare, cum ar fi stopurile unei mașini sau culoarea unui semafor [2].

2.4. Caracteristici ce pot influența performanțele unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă

Influența canalului optic

Există o multitudine de lucrări pentru modelarea canalelor VLC și a tehnicilor de modulație adaptate special pentru canalul optic [34].

Dacă analizăm un canal de transmisie optic într-un sistem VLC și presupunem că semnalele optice ajung la receptor prin vizibilitate directă, considerând reflexiile pe alte căi neglijabile, puterea optică recepționată este reprezentată de produsul dintre puterea optică transmisă și câștigul la frecvență zero al canalului [33]. O diferență principală între sistemele VLC și cele de RF este faptul că primele au un câștig dependent de unghiul de emisie α și de unghiul de incidență ψ (**Figura 2.2**). În practică, diferitele sisteme de iluminare ale autovehiculelor și ale infrastructurii rutiere conțin mai multe leduri și echipamente optice complexe, ceea ce face ca modelul de radiație să aibă o distribuție neuniformă. Totuși, ținând cont că, pentru o sursă de lumină formată dintr-un singur led se poate considera un model de emisie lambertian generalizat, în situația în care avem o arie de leduri suficient de apropiate, cum ar fi, de exemplu, cazul semafoarelor cu leduri, modelul de radiație rezultat va consta în suprapunerea mai multor modele de radiație lambertiană, câte unul pentru fiecare led din emițător. Ca atare, radiația luminoasă poate fi modelată ca o distribuție lambertiană echivalentă, cu condiția ca ledurile din transmițător să fie amplasate la mică distanță unul de altul, iar distanța dintre emițător și receptor să fie suficient de mare, situație întâlnită destul de des în practică. În situațiile în care distribuția de lumină are un model mai complex, cum ar fi cazul anumitor indicatoare de avertizare rutieră sau cel al unor blocuri de lumini aparte

folosite pe autovehicule, este nevoie de o evaluare separată pentru alcătuirea unui model de distribuție potrivit, cum s-a făcut, de exemplu, în [35].

În cadrul unui sistem lambertian ce folosește modulația intensității luminoase și detecția directă, un canal optic nehidat poate fi modelat ca un sistem liniar în banda de bază, care respectă următoarele ecuații [33]:

$$i(t) = R \cdot p(t) \otimes h(t) + n(t), \quad (1)$$

unde $p(t)$ este puterea optică instantanee a emițătorului, $i(t)$ este fotocurentul la nivelul receptorului, R este responsivitatea fotoreceptorului (A/W), $h(t)$ este răspunsul la impuls, $n(t)$ este semnalul de zgomot independent de semnalul emis, în general de tip gaussian, iar simbolul „ \otimes ” denotă convoluția. Fiind putere optică instantanee, $p(t)$ nu poate fi negativă, iar puterea medie transmisă respectă ecuația:

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T p(t) dt. \quad (2)$$

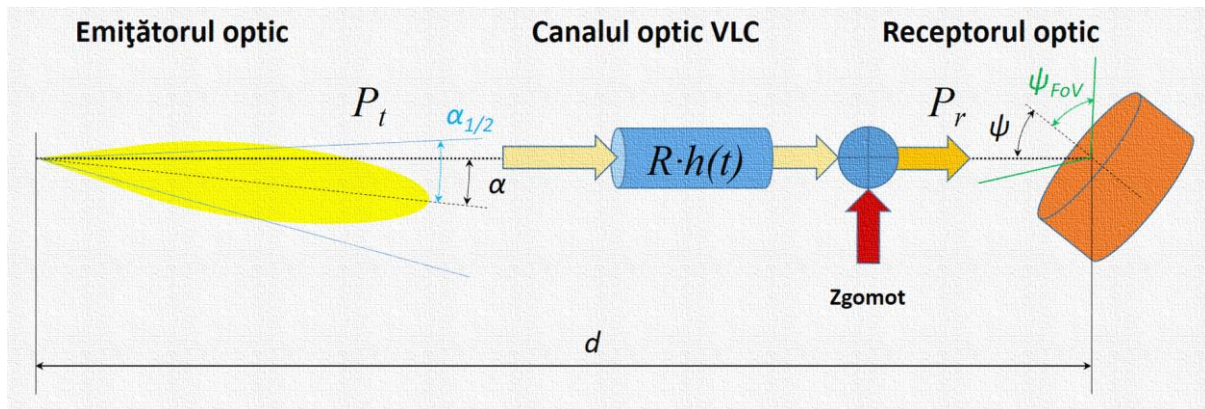


Figura 2.2. Schema geometrică pentru exprimarea câștigului la frecvență zero al canalului.

Ținând cont că modelarea canalului se poate face și în funcție de răspunsul în frecvență, vom folosi transformata Fourier:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt. \quad (3)$$

Răspunsurile în frecvență ale canalelor optice sunt relativ plate în zona de curent continuu, deci, pentru majoritatea scopurilor, cel mai important parametru care caracterizează canalul optic e câștigul în curent continuu $H(0)$. Asta înseamnă că puterea medie recepționată poate fi exprimată sub forma:

$$P_r = H(0) \cdot P_t, \quad (4)$$

situație în care $H(0)$ va avea, pe baza ecuației (3), expresia:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt. \quad (5)$$

Pentru calcularea câștigului în curent continuu al canalului, folosim schema reprezentată în **Figura 2.2**. Presupunem că transmițătorul emite cu o radiație distribuită axial simetric, caracterizată de intensitatea radiantă $P_t \cdot R_0(\alpha)$. La nivelul receptorului (dotat cu filtru și colimator optic), aflat la distanța d și unghiul α față de orientarea transmițătorului, iradianța va fi:

$$I_s(d, \alpha) = P_t \cdot R_0(\alpha) / d^\gamma . \quad (6)$$

Puterea medie receptată va fi dată de iradianța înmulțită cu aria elementului fotosensibil, care în cazul general e influențată de FoV și de unghiul de incidență ψ . Când ψ este mai mic decât FoV, aria efectivă (utilă) va fi exprimată sub forma:

$$A_{\text{eff}}(\psi) = A \cdot T_s(\psi) \cdot g(\psi) \cdot \cos \psi , \quad (7)$$

unde A e aria elementului fotosensibil, ψ este unghiul de incidență în raport cu axa receptorului, $T_s(\psi)$ e factorul de transmisie al filtrului optic, iar $g(\psi)$ este câștigul colimatorului optic. În cazul în care nu se folosesc nici filtre, nici lentile, $T_s(\psi)=1$ și $g(\psi)=1$. În final, puterea medie radiantă va fi dată de relația:

$$P_r = I_s(d, \alpha) \cdot A_{\text{eff}}(\psi) . \quad (8)$$

Din relațiile (4), (6), (7) și (8), deducem formula pentru câștigul canalului în curent continuu când unghiul de incidență e mai mic decât câmpul vizual al receptorului:

$$H(0) = \frac{A}{d^\gamma} R_0(\alpha) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi , \quad (9)$$

unde γ este exponentul pierderii odată cu distanța. Pentru situația în care emițătorul are o distribuție pur lambertiană a radiației, $\gamma=2$. Considerând cazul unei distribuții lambertiene generalizate, se poate scrie relația:

$$R_0(\alpha) = \left[(m+1) / 2\pi \right] \cos^m \alpha , \quad (10)$$

ordinul m fiind dependent de unghiul transmițătorului la care se înjumătățește puterea $\alpha_{1/2}$:

$$m = - \frac{\ln 2}{\ln(\cos \alpha_{1/2})} . \quad (11)$$

Câștigul colimatorului este dependent de FoV și de indicele de refracție n al lentilei colimatorului:

$$g(\psi) = \frac{n^2}{\sin^2 \psi_{\text{FoV}}} . \quad (12)$$

Din relația (8) se observă că dacă d și $R_0(\alpha)$ sunt constante într-un scenariu dat, cel mai eficient mod de a crește câștigul $H(0)$ este mărirea suprafeței elementului fotosensibil A (deci a sensibilității) și a câștigului colimatorului, $g(\psi)$, prin creșterea indicelui de refracție n și micșorarea FoV-ului, adică al unghiului ψ_{FoV} . Totuși, după cum s-a mai spus, trebuie remarcat că suprafața elementului fotosensibil nu poate crește oricât, întrucât în paralel crește și valoarea capacității interne, ceea ce duce la scăderea benzii de frecvență. Alegerea mărimii suprafeței elementului fotosensibil reprezintă întotdeauna un compromis între sensibilitate și bandă. Impactul alegerii tipului de fotodiodă a fost prezentat în [36].

În anumite condiții, se poate îmbunătăți și eficiența transmisiei prin optimizarea intensității radiante a transmițătorului. Dacă filtrul optic poate fi considerat omnidirecțional pentru unghiurile de interes, factorul de transmisie $T_s(\psi)$ va avea o valoare constantă, T_s .

În final, se obține relația:

$$H(0) = \frac{A n^2 (m+1)}{2\pi d^\gamma \sin^2 \psi_{\text{FoV}}} \cdot T_s \cdot \cos^m \alpha \cdot \cos \psi . \quad (13)$$

Modelul canalului optic oferă o descriere fiabilă pentru propagarea semnalelor optice. Cu toate acestea, în situații reale, semnalele optice ajung adesea la receptor atât prin vizibilitate directă, cât și prin reflexii pe căi multiple.

Efectul nealinierii și al câmpului vizual

Tehnologia VLC ar trebui să asigure comunicații fiabile, menținând în același timp scopul principal al dispozitivului de iluminat. Astfel, distribuția radiației luminoase și puterea optică de emisie trebuie să fie în conformitate cu reglementările din domeniul de aplicabilitate al sistemului de iluminat, cum ar fi de exemplu cel din infrastructura rutieră sau din dotarea autovehiculelor, chiar dacă prin ajustarea lor (de exemplu, prin creșterea intensității luminoase medii) s-ar optimiza semnificativ SNR-ul și distanța de comunicație. Deși, după cum s-a mai arătat, performanțele receptoarelor VLC pot fi îmbunătățite semnificativ prin restrângerea câmpului vizual, un factor benefic fiind evitarea saturării fotodetectorului, îngustarea FoV-ului limitează totodată și mobilitatea sistemului. Prin urmare, problema menținerii liniei de vizibilitate directe în cazul sistemelor VLC vehiculare este foarte complexă și necesită investigații aparte, în special în situații de nealinierie a vehiculelor aflate pe benzi diferite.

Zgomotul optic

Rezultatele experimentale din [35] au confirmat importanța unei componente optice adecvate de colectare frontală, arătând beneficiile lentilelor optice și ale filtrelor optice. Lentilele optice cresc regiunea de colectare a luminii, în timp ce filtrele optice permit doar trecerea lungimilor de undă de interes. Deoarece raportul semnal-zgomot este esențial pentru evaluarea performanței sistemelor VLC, influența zgomotelor nu trebuie neglijată.

Alegerea tipului de multiplexare

Performanțele unui sistem VLC sunt limitate și de lățimea de bandă disponibilă pentru modulare-demodulare, în special în scenarii cu surse multiple. Au fost dezvoltate mai multe metode de multiplexare, printre care putem aminti multiplexarea prin divizare în timp (TDM – Time Division Multiplexing), prin divizare în frecvență (FDM – Frequency Division Multiplexing), multiplexarea prin polarizare (PDM – Polarization Division Multiplexing) și multiplexarea prin divizare spațială (SDM – Space Division Multiplexing), pentru ca tehnologia VLC să transmită în paralel și, prin urmare, să se îmbunătățească în mod eficient capacitatea de transmisie a sistemului. În sistemele VLC bazate pe leduri, emițătorul trebuie să moduleze și să transmită date ce conțin informații sensibile, cum ar fi codul unic al sursei sau informații despre coordonate și despre puterea transmisă, pentru a ajuta receptorul să-și calculeze distanța față de emițător. Prin urmare, protocoalele de multiplexare cu privire la tehnologia VLC sunt necesare pentru a se asigura că receptorul poate extrage corect informațiile.

Efectul propagării pe căi multiple

Deoarece ledul este o sursă de lumină, fluxurile luminoase sunt dispersate în diferite direcții. Acest lucru duce la apariția reflexiilor la întâlnirea cu obstacole reflectorizante, cum ar fi ferestrele caselor, vitrinele magazinelor, oglinzile din intersecții, indicatoarele ș.a.m.d. Deși componentele reflectate au o intensitate mult mai slabă decât unda directă din cauza efectului multical, sunt detectate totuși de senzorul optic și pot contribui la apariția unui zgomot difuz în sistemul VLC, care să influențeze diferitele caracteristici de performanță ale sistemului. În cazul sistemelor VLR, estimarea distanței va deveni mult mai serios afectată

dacă componentele reflectate sunt amestecate în semnalele recepționate, ducând la o eroare de calcul al coordonatelor.

Deși poate fi prezent uneori, efectul propagării pe căi multiple este destul de limitat în aer liber, ceea ce constituie un avantaj al utilizării tehnologiei VLC în sistemele de siguranță rutieră.

Surse de erori

Impactul asupra performanței poate fi imens în cazul erorilor parametrilor de bază din sistemele VLC. De exemplu, desincronizarea în protocoalele de multiplexare în timp, măsurarea inexactă a unghiului datorată procesării slabe a imaginii sau imperfecțiunile de montare a sistemelor VLC pot cauza astfel de erori. În proiectele bazate pe TDM, erorile de sincronizare pot fi destul de mari când funcționează toate emițătoarele. Deoarece semnalele de la diferite leduri sunt transmise cu aceeași putere, dar în intervale de timp diferite, ideal ar fi ca semnalul recepționat în fiecare slot să nu conțină și sursele adiacente de lumină.

În cazul sistemelor VLR, măsurarea timpului de zbor poate fi afectată de zgomotul ambiant, de jitterul indus de blocurile de măsură, dar și de erorile de deplasare a timpilor la tranziția pragului de detecție în blocul trigger Schmitt (*time-walk*).

2.5. Principalele provocări ale utilizării sistemului VLC în domeniul vehicular

Creșterea rezistenței la zgomotul optic

Zgomotul optic reprezintă una dintre principalele provocări ale aplicațiilor VLC în mediul exterior, fiind capabil să perturbe comunicația atât prin prisma surselor de lumină artificiale, cât și prin prisma influenței soarelui. Sursele de lumină artificiale sunt mai ușor de contracarat, fiindcă afectează doar anumite frecvențe din spectru, ușor de identificat și de filtrat. Cea mai puternică sursă de perturbație rămâne însă soarele, a cărui lumină poate induce o componentă continuă ridicată în semnalul generat de fotodetector, cu riscul de a duce amplificatorul transimpedanță în zona de saturație. Deși această componentă continuă poate fi eliminată de filtrele trece-bandă, lumina solară produce și zgomot de alicie, mult mai dificil de contracarat.

Creșterea distanței maxime de comunicație

O altă provocare importantă pentru folosirea VLC în domeniul auto e creșterea distanței maxime. Comunicațiile la distanțe mari presupun capacitatea de detectare ale unor niveluri mici de semnal la recepție, cu SNR-uri reduse, chestiune strâns legată de prima provocare, prezentată mai sus.

Pentru a obține o distanță mai mare de transmisie, majoritatea cercetărilor în domeniul vehicular se îndreaptă către creșterea sensibilității receptorului VLC, întrucât intensitatea luminoasă la emisie dată de lămpile autovehiculelor este strict reglementată. Trebuie precizat totuși că există posibilitatea perfecționării modului în care sunt pilotate ledurile la emisie pentru a mări distanța de comunicație fără creșterea iradianței medii.

Creșterea mobilității sistemului VLC

În majoritatea experimentelor efectuate s-a avut grijă ca receptorul și emițătorul să fie aliniati. În situații reale, însă, luminile semaforului pot fi situate la înălțimi de 2,5-5,5 m

deasupra șoselei, fapt care afectează serios performanța sistemului. Mai mult, de multe ori autovehiculele se află pe benzi diferite, ceea ce poate duce la întreruperea comunicației din cauza ieșirii din câmpul vizual. Studiul creșterii mobilității reprezintă una dintre cerințele primordiale ale sistemelor VLC în domeniul vehicular.

Implementarea posibilității de măsurare a distanței între vehicule cu ajutorul tehnologiei VLC

Localizarea pe hartă sau poziționarea față de celelalte vehicule în trafic reprezintă un alt deziderat posibil a fi implementat cu un sistem VLR, acesta lucru fiind important atât pentru sistemele de asistare a conducerii, cât și pentru vehiculele autonome ce câștigă tot mai mult teren. Deși e utilizat pe scară largă, GPS-ul are rezultate slabe în condiții de congestie a traficului, în canioane urbane, în parcuri subterane sau în tuneluri. În prezent, vehiculele moderne folosesc senzori de poziție pe baza radarului sau a sistemului de telemetrie prin lumină (LiDAR – Light Detection and Ranging) pentru detectarea și chiar recunoașterea formei obiectelor înconjurătoare, care completează sistemele GPS. Deși au o precizie destul de ridicată, costurile încă nu permit implementarea pe scară largă. În plus, e posibil ca eficiența radarului să scadă în viitor din cauza interferențelor cu radarele participanților la trafic, odată cu proliferarea acestor sisteme [37]. Ca atare, se simte nevoia unui alt sistem complementar, care să suplinească deficiențele sistemelor RF, cum ar fi tehnologia VLC.

Creșterea ratei de transfer al datelor

Deși s-a reușit atingerea unor viteze de ordinul zecilor de gigabiți pe secundă [38] în condiții de interior cu ajutorul unor modulații complexe, în mediul exterior totuși vitezele sunt mult mai mici. În cele mai multe cazuri, sistemele VLC cu fotodiodă proiectate pentru distanțe utile au atins rate de transfer mai mici de 100 kbps [12]. În cazul sistemelor VLC vehiculare, rezistența la zgomot, distanța de comunicație, rata mică de erori de bit și latența sunt mai importante decât viteza de transfer. În ciuda acestui fapt, creșterea ratei de transfer e benefică atâta timp cât nu afectează parametrii prezentați până acum, deși vitezele care ar putea fi atinse s-ar ridica la maximum 1-2 Mbps.

Dezvoltarea sistemelor cu multiple canale VLC în paralel

O soluție posibilă pentru creșterea performanțelor de viteză poate fi implementarea unei tehnici de multiplexare spațială a transmisiei pe mai multe canale VLC în paralel, de tip MIMO.

Deși avantajele tehnicii MIMO sunt evidente, e nevoie de canale de comunicație cu unghiuri mici de transmisie și recepție, cu cerințe stricte de aliniere, ceea ce restrânge mult mobilitatea sistemului și limitează folosirea acestuia în domeniul auto. Cu toate acestea, avantajele majore ale unei astfel de abordări justifică continuarea cercetării pentru găsirea soluțiilor de autourmărire și de focalizare automată pe sursele de transmisie. Rezultatele cercetărilor efectuate în [39] și [40] confirmă compatibilitatea codului Miller cu aplicațiile VLC vehiculare prin posibilitatea reducerii interferențelor intercanal.

Implementarea sistemelor hibride DSRC-VLC

După cum s-a mai arătat, sistemele VLC vehiculare sunt compatibile și complementare cu sistemele DSRC, care funcționează în banda de 5,9 GHz. Ca atare, implementarea unor sistemele hibride e arătată a fi o soluție de rezolvare a unor provocări antagoniste, în special

prin prisma faptului că sistemele hibride au fost deja testate în condiții de interior, cu dispozitive mobile fără funcție de iluminare, cum ar fi smartphone-urile sau laptopurile. Astfel s-a demonstrat că mobilitatea și fiabilitatea sistemelor hibride este mai bună decât fiecare dintre sistemele luate individual [41], ceea ce sugerează o bună compatibilitate cu aplicațiile de siguranță rutieră.

Provocarea principală în cadrul unui astfel de sistem hibrid rămâne, însă, sincronizarea transmiterii datelor pentru asigurarea unei legături fără întreruperi. DSRC oferă de obicei latențe mai mici, în timp ce VLC are potențialul de a oferi rate de transfer al datelor mai mari, astfel încât costul dezvoltării unui sistem hibrid fiabil ar putea fi un impediment în implementarea pe scară largă.

Menținerea funcției principale de iluminare sau semnalizare

Modificarea sistemelor de semnalizare și iluminare ale vehiculelor și infrastructurii rutiere pentru transmiterea datelor trebuie să se facă astfel încât funcția principală a acestora să nu fie afectată. Astfel, este necesar ca lămpile de iluminare și semnalizare să poată oferi nivelul de iradianță cerut de normele rutiere și tot mai mulți constructori de mașini adoptă modularea PWM pentru controlul lămpilor cu leduri utilizate pentru semnalizare și iluminare. Un exemplu în acest sens este utilizarea unui singur bloc optic atât pentru luminile de poziție, cât și pentru luminile de frână. Diferența de intensitate luminoasă se realizează prin modificarea semnalului PWM pentru a obține factorul de umplere dorit, de exemplu 20% pentru luminile de poziție și 80% pentru luminile de frână. Ca atare, una dintre cerințele impuse de IEEE 802.15.7 este asigurarea funcției de diminuare a luminozității fără a afecta comunicația, astfel încât aceasta să se poată realiza conform reglementărilor impuse de normele rutiere. O altă cerință impusă de IEEE 802.15.7 este ca structura cadrului de date cu funcția de diminuare a luminozității să se construiască astfel încât să se evite fenomenul de fluctuație a luminozității la transmiterea datelor, prin evitarea șirurilor lungi de 0 sau de 1.

Concluzii la final de subcapitol

Pentru a fi potrivite pentru aplicații de siguranță rutieră, este necesar ca sistemul VLC să îndeplinească anumite cerințe, ceea ce presupune depășirea anumitor provocări din lista prezentată mai sus, ținând cont că dezvoltarea receptoarelor VLC pentru automobile implică găsirea unui numitor comun între factori ca distanța de comunicație, rezistența la zgomot, mobilitatea, complexitatea hardware, conectivitatea și procesarea semnalului. Astfel, de fiecare dată când o anumită componentă este avantajată, o altă componentă riscă să fie afectată. Soluția contracarării atâtor provocări complementare rămâne adaptabilitatea la context [37], [42].

Ca atare, lucrarea de față se axează pe dezvoltarea unui sistem VLC mixt, care să asigure următoarele aspecte:

- creșterea fiabilității legăturii de date prin:
 - asigurarea unui câmp vizual potrivit pentru mobilitatea vehiculară;
 - creșterea rezistenței la zgomot;
 - creșterea distanței de comunicație maxime;
 - asigurarea unei latențe scăzute;
 - asigurarea unei rate minime de transfer al datelor;
- încorporarea funcției de măsurare a distanței;
- încorporarea posibilității de diminuare a intensității luminoase cu menținerea celorlalte caracteristici.

3. STUDII ANALITICE, SIMULĂRI ȘI TESTE PRELIMINARE PENTRU DESIGNUL PROTOTIPULUI VLC-R

Capitolul de față abordează problemele legate de performanța legăturii de date a prototipului propus, în diverse situații de trafic întâlnite de un autovehicul, oferind o scurtă analiză a limitărilor și câteva soluții posibile pentru a depăși limitele de comunicație.

3.1. Studiu comparativ al diverselor tehnici de localizare bazate pe sisteme VLC

Contextul cercetării actuale în domeniul tehnicilor de localizare cu ajutorul sistemelor VLC

Estimarea poziției unui obiect se poate face cu o acuratețe suficient de bună folosind tehnologia GPS, care are avantajul unei răspândiri la nivel global și al unui preț scăzut. Din nefericire, există destule situații în care nu poate fi îndeplinită condiția obligatorie a recepționării unui semnal adecvat de la un anumit număr de sateliți, cum ar fi în zona canioanelor urbane [43], a tunelurilor [44] sau a parcărilor subterane. Ca atare, s-a încercat adaptarea altor tehnologii care să suplinească acest handicap, cum ar fi sistemele VLC. În contrast cu spațiul interior, mediul exterior este mult mai dificil de abordat, atât din cauza condițiilor de climă ce pot influența măsurătorile, cât și din cauza caracterului puternic eterogen. Ca atare, un studiu comparativ între diversele tehnici VLC folosite pentru localizarea în interiorul clădirilor ar fi binevenit, întrucât caracteristicile acestora ar ajuta la analiza modului în care ar putea fi folosite în mediul exterior.

Algoritmi folosiți în localizarea dispozitivelor mobile cu ajutorul sistemelor VLC

În studiile făcute până în prezent, există mai multe metode de abordare, care pot fi clasificate în diverse categorii [45]-[47], fiecare dintre acestea având propriile avantaje și dezavantaje. La modul general, tehnicile de localizare pot fi împărțite în două mari grupe: metode de localizare în doi pași și metode de localizare directă [48]. Dintre acestea, metodele de localizare în doi pași sunt cele mai răspândite.

Scopul acestui subcapitol e să se analizeze în ce măsură prototipurile propuse pentru localizare sunt adecvate pentru diferitele situații întâlnite în mediul exterior și în ce măsură pot fi folosite acestea pentru siguranța traficului rutier și pentru compensarea dificultăților întâmpinate de sistemele RF ale mașinilor autonome.

➤ *Tehnici de localizare prin proximitatea față de o sursă VLC*

Localizarea unui dispozitiv pe baza proximității sale față de diverse repere binecunoscute e una dintre tehnicile cele mai simple ce pot fi implementate, dar care are totuși o acuratețe scăzută. Ca atare, localizarea nu se face cu precizie, ci doar ca estimare a poziției într-o zonă de acoperire a unui emițător VLC, care transmite un cod unic de identificare.

➤ *Tehnici de localizare prin analiza amprentei de semnal*

Localizarea prin analiza amprentei de semnal se bazează pe compararea semnalului recepționat cu un set de valori măsurate anterior (amprenta de semnal) pentru fiecare loc din

spațiul acoperit, pe baza faptului că semnalul emis de leduri nu poate acoperi uniform spațiul de interes, deci vor exista valori specifice în funcție de poziție.

Metoda localizării prin analiza amprentei de semnal a condus la rezultate încurajatoare la interior [49]-[57], însă în mediul exterior există încă dificultăți de implementare din cauza surselor perturbatoare de lumină.

➤ *Tehnici de localizare prin triangulație*

Triangulația e metoda de determinare a poziției unui punct prin măsurarea unghiurilor formate de acesta cu niște puncte de referință, cu poziții cunoscute. Tehnica principală implementată în cadrul acestei metode este cea a măsurării unghiurilor la recepție (AoA – Angle of Arrival). Avantajele acestei metode în cazul tehnologiei VLC sunt date de condiția vizibilității directe între emițător și receptor și de faptul că nu e obligatoriu ca ledurile surselor să fie sincronizate. Pentru determinarea unghiului la recepție se pot folosi mai multe metode, în majoritatea cazurilor fiind nevoie de mai multe fotodectoare sau de un senzor de imagine.

Metoda AoA poate fi abordată cu succes în cazul receptoarelor cu camere video, dar provocarea principală a acestei metode rămâne determinarea unghiului de recepție în cazul folosirii unui detector cu fotodiodă, situație în care mecanismul poate deveni destul de complicat.

➤ *Tehnici de localizare prin multilaterație*

Multilaterația e metoda de determinare a poziției unui punct prin măsurarea distanțelor de la acesta și până la un număr minim necesar de puncte de referință cunoscute. Când numărul minim de puncte necesare pentru determinarea poziției e trei, metoda se numește trilateratie. Această metodă e cea mai eficientă și poate fi abordată prin mai multe tehnici de estimare a distanței, cum ar fi prin măsurarea puterii semnalului recepționat, a timpului până la recepția semnalului (ToA – Time of Arrival) sau a diferențelor dintre timpii până la recepția semnalelor (TDoA – Time Difference of Arrival) de la mai multe surse de lumină cu leduri.

Tehnica de măsurare RSS se bazează pe un algoritm de calcul al distanței pe baza puterii recepționate de la mai multe surse de lumină.

Prin *tehnica măsurării ToA* se pot determina coordonatele unui dispozitiv mobil pe baza trilateratiei calculându-se distanțele până la sursele de lumină cu ajutorul timpului în care ajunge la receptor semnalul emis. Cerința de sincronicitate între receptor și emițătoare poate fi evitată dacă se folosește *tehnica măsurării TDoA*. În acest caz, rămâne doar condiția de sincronicitate între sursele de lumină. În schimb, TDoA are ca dezavantaj față de ToA faptul că ecuațiile rezultate sunt mai complexe și rezolvarea lor cere o putere mai mare de calcul.

Avantajele metodei TDoA au făcut-o atractivă nu doar pentru localizarea dispozitivelor mobile la interior, ci și pentru poziționarea unui autovehicul în traficul rutier.

Pe lângă TDoA, au existat și lucrări care au abordat *tehnica măsurării diferenței de fază la recepție* (PDoA - Phase Difference on Arrival), fiind asemănătoare conceptual, cu diferența că folosește un semnal sinusoidal continuu în loc de impulsuri de scurtă durată.

➤ *Tehnici de localizare hibride*

Pe lângă metodele de localizare prezentate mai sus, există și abordări în cadrul unor sisteme hibride, ce încearcă să profite de avantajele mai multor tehnici. În [58] e prezentat un robot pentru identificarea surselor de lumină ce pot fi folosite ca repere pentru VLP într-o clădire. Sistemul se bazează pe un algoritm de localizare și cartografiere simultană și cu detectarea frecvenței cu ajutorul unui obturator rulant. Un sistem VLC pentru *downlink* a fost completat cu un sistem cu ultrasunete pentru *uplink* în [59], obținându-se o acuratețe de ordinul centimetrelor într-un spațiu de $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$, folosindu-se ca tehnică de localizare măsurarea timpului de zbor dus-întors.

3.2. Simularea efectului de nealiniere a vehiculelor asupra comunicațiilor prin lumină

În acest subcapitol e abordată o analiză cu privire la utilizarea tehnologiei VLC în aplicații pentru trafic rutier, ce explorează efectul nealinierei vehiculelor asupra performanței unei legături VLC intervehiculare.

Modelul de distribuție luminoasă a lămpilor spate pentru autovehicule comerciale

- *Determinarea experimentală a distribuției luminoase a lămpilor cu leduri și a lămpilor cu becuri incandescente ale unor vehicule comerciale*

Performanțele unei legături VLC intervehiculare sunt influențate semnificativ de cantitatea fluxului luminos purtător de date care ajunge pe suprafața elementului fotosensibil al receptorului VLC. Procedura experimentală de măsurare a iradianței este ilustrată în **Figura 3.1 a)**, în timp ce configurația pentru această procedură este prezentată în **Figura 3.1 b)**.

În primul caz, modelul de distribuție luminoasă a fost determinat pentru un vehicul cu un sistem al lămpilor spate bazat pe leduri. În cel de-al doilea caz, s-a determinat modelul de distribuție a intensității luminoase pentru un vehicul vechi de doisprezece ani, cu un sistem clasic al lămpilor spate bazat pe becuri incandescente.

- *Discuții asupra rezultatelor experimentale*

Determinările experimentale pentru modelele de distribuție a luminii pentru cele două vehicule sunt ilustrate în **Figura 3.2** și **Figura 3.3**.

Valorile de iradianță arată că luminile de frână au o intensitate mai mare în comparație cu luminile de poziție, ceea ce constituie un avantaj în utilizarea sistemelor VLC în aplicații de avertizare a frânării electronice de urgență (EEBL - Emergency Electronic Brake Light), deoarece o luminozitate mai mare oferă o distanță de comunicație crescută și o reziliență sporită. În plus, aceste determinări indică faptul că iradianța luminilor de frână a lămpilor cu leduri este semnificativ mai mică decât cea a sistemelor de iluminare cu becuri cu incandescență. Acest fapt se datorează faptului că lămpile cu becuri incandescente au o puternică componentă cu radiații infraroșii, care sunt detectate și puse în evidență ca atare de aparatul de măsură. Asta demonstrează o dată în plus avantajul lămpilor cu leduri din punctul de vedere al consumului energetic.

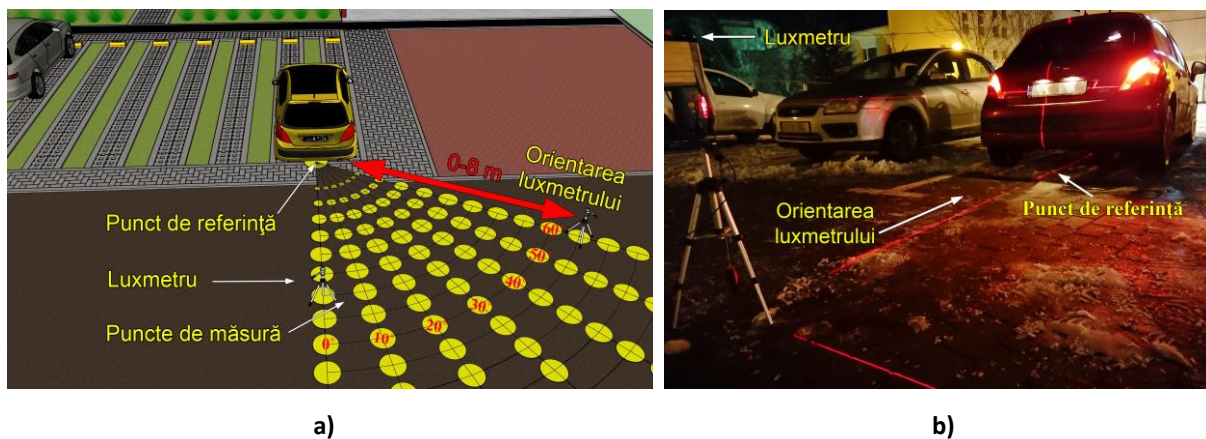


Figura 3.1. Procedura de măsurare experimentală a iradianței pentru un vehicul comercial: **a)** scenariul de testare; **b)** configurația pentru testările experimentale.

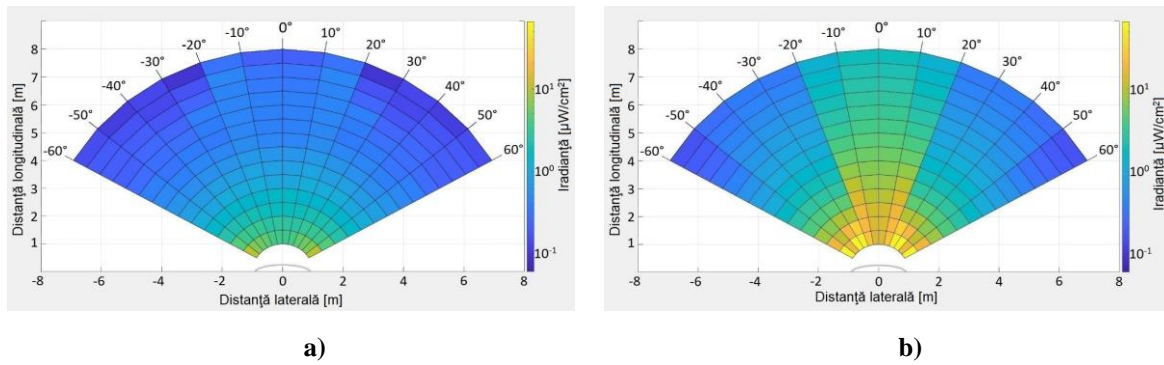


Figura 3.2. Modelul de distribuție a luminozității pentru un vehicul comercial cu sistem de iluminare pe bază de leduri pentru: **a)** lumini de poziție; **b)** lumini de frână.

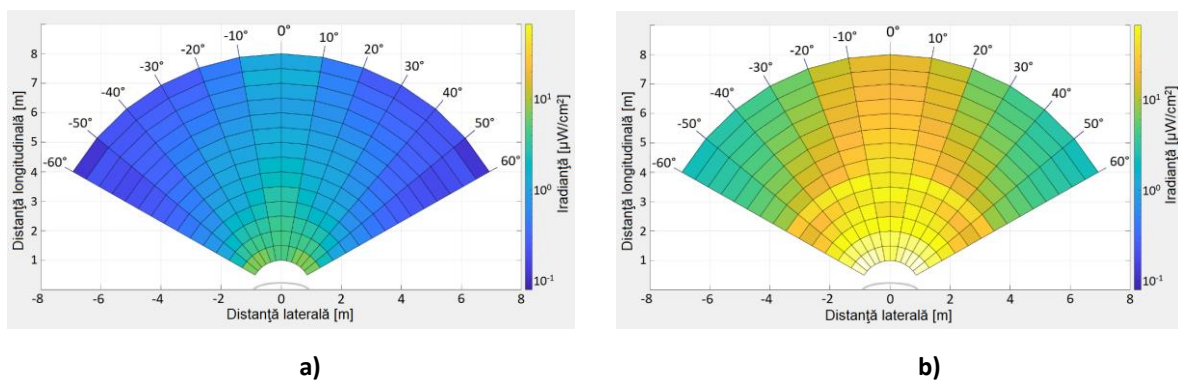


Figura 3.3. Modelul de distribuție a luminozității pentru un vehicul comercial cu sistem de iluminare pe bază de becuri incandescente pentru: **a)** lumini de poziție și **b)** lumini de frână. Irradianța mult crescută față de stopurile cu leduri se datorează spectrului în infraroșu captat de aparatul de măsură și demonstrează eficiența energetică a iluminării cu leduri.

Analiza influenței nealinerii vehiculelor asupra performanțelor sistemului VLC

Pentru a evidenția diferențele dintre situația în care legătura de comunicație e stabilită între două vehicule aflate pe aceeași bandă și situația în care legătura de comunicație e stabilită între două vehicule aflate pe benzi adiacente, scenariul de simulare ia în considerare un drum drept cu două benzi de circulație în același sens. Se consideră că această pistă de testare are o lățime de bandă $w=3,50$ m (autostrăzile au cel puțin două benzi de circulație pe fiecare sens, cu o lățime tipică de 3,50 m fiecare [60]). Din motive de simetrie, comunicația se poate desfășura în ambele sensuri cu aceleași valori ale BER-ului și ale SNR-ului dacă toate condițiile sunt similare. În **Figura 3.4** e desenată situația în care vehiculul din spate recepționează informația de la vehiculul din spate. Se presupune că vehiculul receptor va ocupa centrul primei benzi, la 1,75 m proiectat pe axa Oy , la poziția R_x . O altă presupunere este că fotodetectorul poate fi amplasat oriunde pe vehiculul receptor, fiind necesară o analiză pe toată lățimea celor două benzi, întrucât vehiculul emițător va ocupa alternativ pozițiile T_{x1} și T_{x2} pe banda doi și, respectiv, pe banda unu, la o distanță variabilă L de autovehiculul receptor. Coordonatele pozițiilor sus-amintite vor fi x_{Tx1} , x_{Tx2} , x_{Rx} , y_{Tx1} , y_{Tx2} și y_{Rx} .

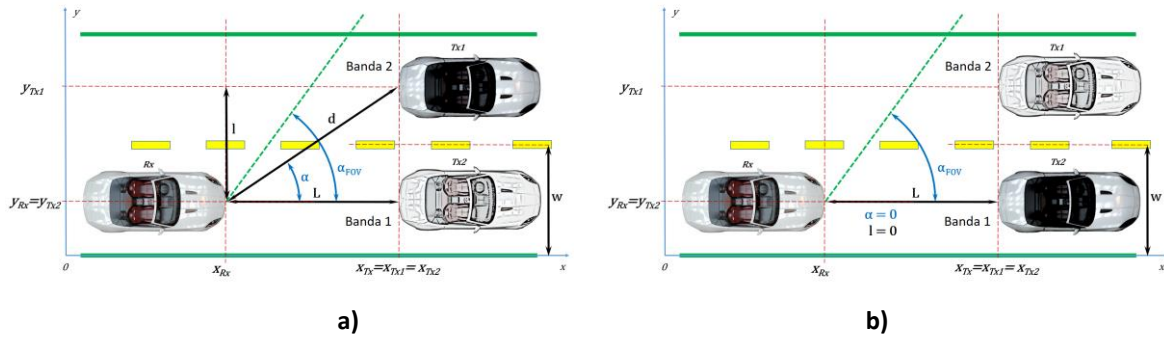


Figura 3.4. Scenarii de testare între vehicule: **a)** legătură de comunicație stabilită între două vehicule aflate pe benzi adiacente; **b)** legătură de comunicație stabilită între două vehicule aflate pe aceeași bandă.

Luând în calcul modelul prezentat în **Figura 3.4**, se observă că, în cazul nostru, putem aproxima unghiul α ca fiind egal cu ψ când cele două autovehicule sunt pe o porțiune de drum aproximativ rectilinie. Dacă filtrul optic poate fi aproximat ca având o caracteristică omnidirecțională, atunci factorul de transmisie al acestuia $T_s(\alpha)$ va avea o valoare relativ constantă, T_s . Având puterea medie recepționată P_r dată de relația (4), răspunsul canalului la frecvență zero dat de (13) și înlocuind distanța d dintre autovehicule din relația (26), putem exprima valoarea SNR-ului în funcție de unghiul α , pentru a evidenția efectul nealinierei când autovehiculele se află la o distanță longitudinală L unul de celălalt. Graficul funcției Q reprezentat în **Figura 3.5** arată că, odată cu creșterea unghiului de incidență α , pornind de la 0, SNR-ul va scădea de la valoarea maximă $SNR(0)$ și, în consecință, este de așteptat ca în rezultatele experimentale rata erorilor de bit să crească în conformitate cu relația (35).

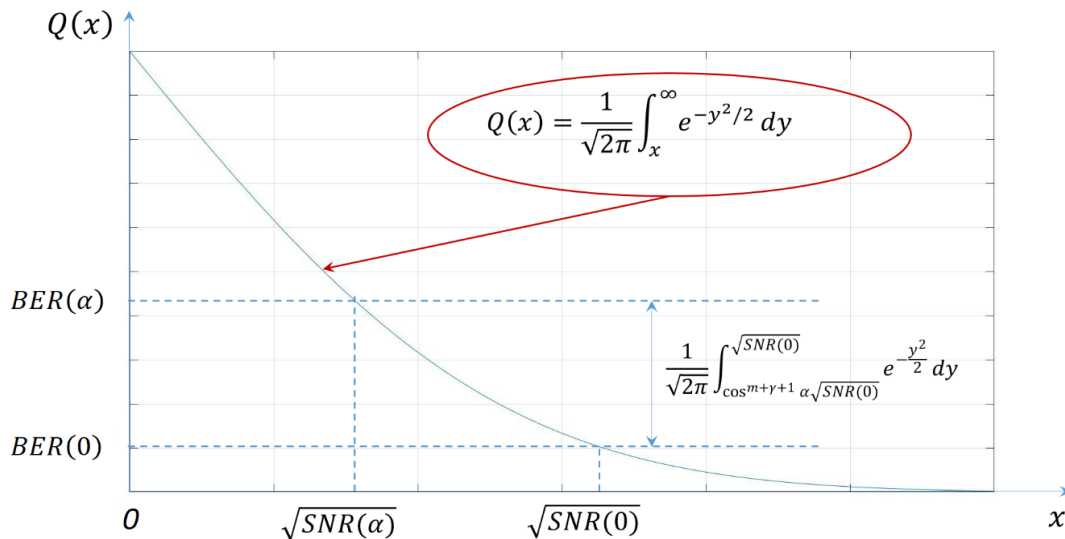


Figura 3.5. Analiza ratei de erori de bit în funcție de nealinierea vehiculelor.

Folosind programul Matlab, s-a analizat comportarea canalului VLC în cazul unui vehicul cu stopuri amplasate la distanță de 1 m unul de celălalt, simulându-se o situație reală a stopurilor unui vehicul comercial.

Folosind un FoV mai mare, de $\pm 53^\circ$, fără colimator, se observă din **Figura 3.6 a)** și **b)** că menținerea legăturii de date se face pentru distanțe între abscise mai mari de 3-4 m atunci când vehiculele sunt pe benzi adiacente, așa cum a reieșit și din calcule, dar SNR-ul scade cu aproximativ 15 dB, ceea ce ar contribui destul de mult la creșterea erorilor de măsurare a distanței intervehiculare.

După rularea simulării în Matlab, din **Figura 3.7 a) și b)** se observă că, în cazul unui FoV de $\pm 20^\circ$, cu colimator optic, performanța SNR-ului e mai bună, în schimb se pierde comunicația între vehicule când acestea se află pe benzi adiacente și distanța dintre abscise e mai mică de aproximativ 10 m, simularea fiind în concordanță cu calculele făcute anterior. Deși există acest unghi mort la mai puțin de 10 m, riscurile sunt destul de mici atâta timp cât vehiculele își mențin traiectoria pe cele două benzi adiacente, fiind posibilă restabilirea legăturii în momentul în care unul dintre vehicule se apropie de banda celuilalt și intră astfel în câmpul vizual.

Acest lucru se vede și din analiza graficelor BER din **Figura 3.7 a) și b)**, care arată inclusiv o îmbunătățire a legăturii de transmisie a datelor. Pentru un BER de sub 10^{-3} , distanța de comunicație crește de la 30 m până la peste 70 m.

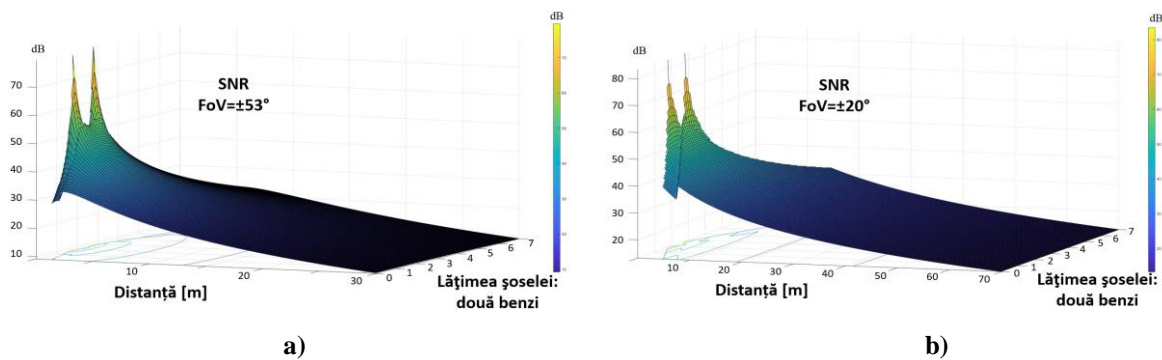


Figura 3.6. Simularea comunicației VLC între vehicule pentru evidențierea SNR-ului: **a)** cu FoV $\pm 53^\circ$, fără colimator, cu filtru optic; **b)** cu FoV $\pm 20^\circ$ cu colimator de 5 cm și cu filtru optic.

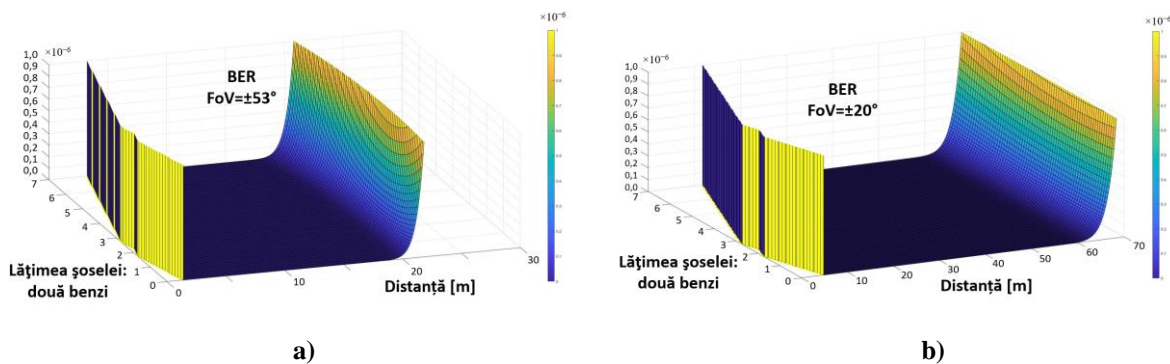


Figura 3.7. Simularea comunicației VLC între vehicule pentru evidențierea BER-ului: **a)** cu FoV $\pm 53^\circ$, fără colimator, cu filtru optic; **b)** cu FoV $\pm 20^\circ$ cu colimator de diametru 5 cm și filtru optic.

3.3. Studiul analitic al unui amplificator transimpedanță pentru sisteme de comunicații prin lumină vizibilă

Având în vedere că un sistem VLC pentru aplicații vehiculare este utilizat în mediu exterior și luând în considerare lumina parazită puternică a soarelui [61], la proiectarea unui amplificator de transimpedanță se poate adăuga un bloc de compensare pentru evitarea saturației atunci când receptorul este în bătaia directă a soarelui.

Pentru a rezolva cele mai întâlnite provocări în proiectarea acestuia, s-a ales ca bază pentru studiul din acest capitol un amplificator de instrumentație [62]. Pentru a se obține rezultate îmbunătățite, amplificatorul de instrumentație a fost modificat prin introducerea în buclele de reacție pozitivă a două circuite integratoare, pentru detectarea abaterii de tensiune

continuă la ieșire, iar în buclele de reacție negativă a rețelelor de tip T, acestea având rolul de a reduce efectul capacităților parazite [63]. Semnalul obținut la ieșire poate fi procesat în continuare în etapa de conversie analog-digitală (ADC – Analog-Digital Conversion) până când semnalul de date este reconstruit la parametrii originali.

Considerații de design pentru un circuit transimpedanță

Un receptor VLC adecvat trebuie să poată funcționa într-o gamă extinsă de valori ale iradianței. Problema este că, în condiții de exterior, lumina de fundal poate avea o iradianță ce poate ajunge până la $100.000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Această lumină parazită poate perturba puternic recepția datelor utile. În aceste condiții, dacă circuitul de transimpedanță este prea sensibil, se poate ajunge la saturație. În [64] s-a demonstrat că un circuit de transimpedanță logaritmică poate compensa lumina de fundal până la $15.000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, ca atare, scopul acestui capitol este de a îmbunătăți în continuare circuitul de transimpedanță cu componente mai bune, circuite suplimentare de compensare pentru lumina de fundal și, de asemenea, cu o rejectie importantă a modului comun.

În **Figura 3.8** este propusă o topologie care ține cont de problemele menționate mai sus. Trebuie subliniat că zgomotul intrinsec în schema de față este la un nivel mai ridicat decât cel al unui amplificator transimpedanță clasic. Chiar și așa, atunci când interferențele de cuplaj sunt predominante, zgomotul este mai bine gestionat cu o configurație diferențială [65]. U1 și U3 sunt amplificatoare de transimpedanță cu rețele T rezistive formate din R_1 - R_2 - R_3 și, respectiv, R_5 - R_6 - R_7 , care pot contribui la creșterea lățimii de bandă prin reducerea efectului capacității parazite. Ieșirile acestor amplificatoare sunt întoarse la intrările neînversoare prin U2 și U4, care se află într-o topologie de integrare clasică de tip Miller. Scopul lor aici este de a compensa decalajul de ieșire în tensiune continuă apărut din cauza luminii solare sau a altor surse externe de lumină. Ambele ieșiri de la U1 și U3 sunt injectate într-un amplificator diferențial U5, pentru asigurarea rejectiei de mod comun.

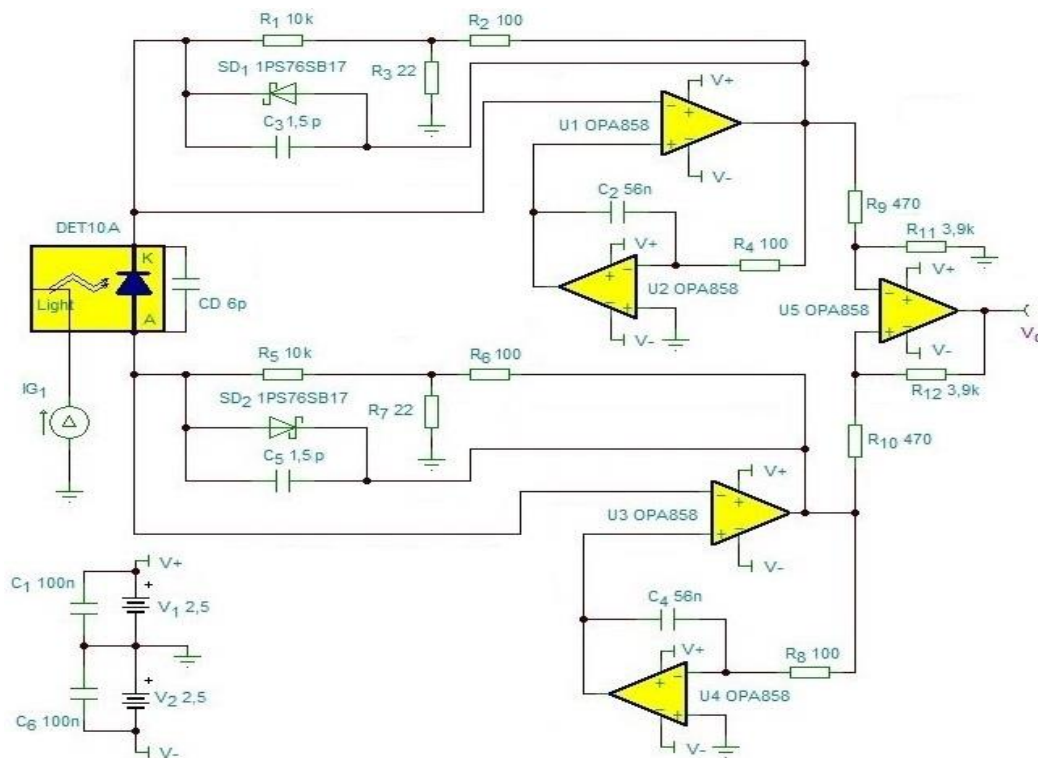


Figura 3.8. Schema propusă de amplificator transimpedanță.

Rezultatele simulării și discuții referitoare la zgomotul circuitului

Rezultatele simulării în programul TINA sub forma diagramei Bode sunt prezentate în **Figura 3.9** și indică faptul că schema propusă are o stabilitate bună.

Principalele surse de zgomot intern într-un amplificator cu fotodiodă sunt zgomotul de alicie, zgomotul termic, zgomotul curentului de întuneric, zgomotul de tip $1/f$ și zgomotele amplificatoarelor. Cel mai mare impact asupra raportului semnal-zgomot va fi dat de primul etaj, astfel încât, pentru început, se va lua în considerare circuitul U1-U2 pentru calcule, pe baza modelului de zgomot din **Figura 3.10** [66]. Se poate observa că sursa dominantă de zgomot aici este zgomotul termic al rezistenței de reacție. Zgomotul fotodiodei va fi amplificat odată cu câștigul semnalului, astfel încât acest lucru nu poate fi evitat. În privința zgomotelor adăugate de amplificatorul operațional de integrare, acestea sunt suficient de scăzute pentru a fi și ele ignorate.

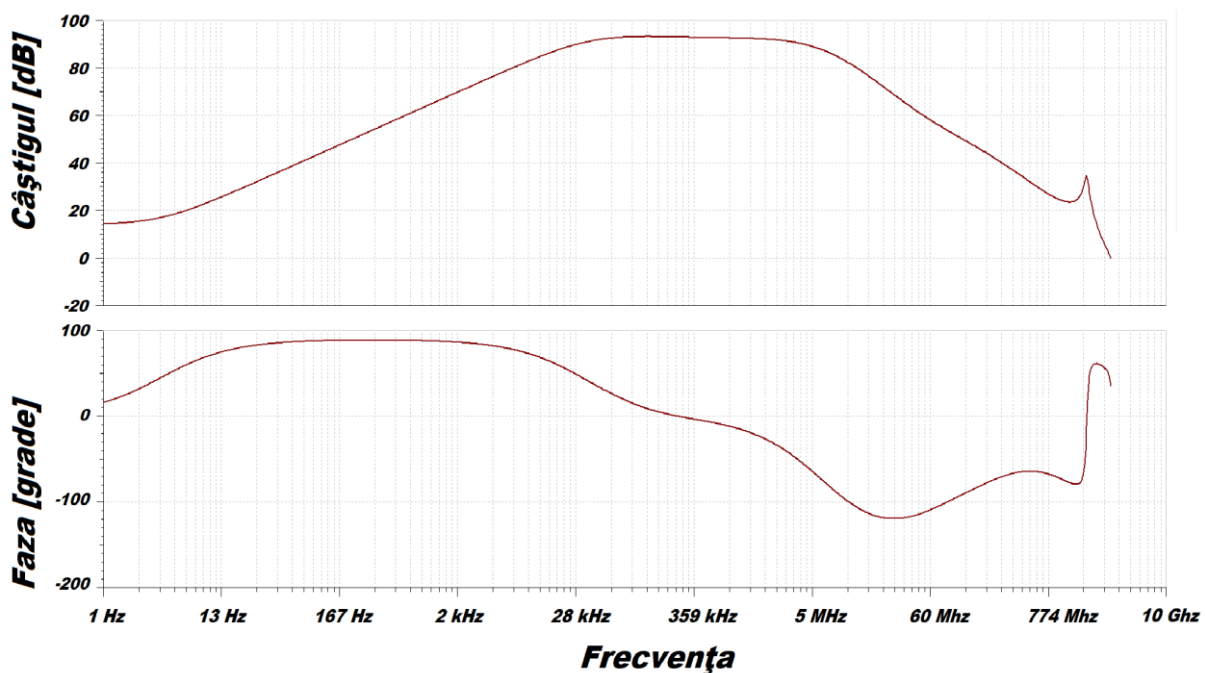


Figura 3.9. Diagrama Bode rezultată în urma simulării.

Zgomotul total la final e dat de relația:

$$E_{noe} = \sqrt{2 \frac{R_{11}}{R_9} (E_{R_{out}}^2 + E_{noe4}^2 + E_{noe5}^2)} \cong 230 \text{ nV} . \quad (14)$$

La un semnal minim de intrare, $V_{out} = 1 \text{ nA} \times 1 \text{ M}\Omega = 1 \text{ mV}$, iar raportul semnal-zgomot e dat de relația (15):

$$SNR[dB] = 20 \log \frac{V_{out}}{E_{noe}} \geq 72 \text{ dB} \quad (15)$$

Rezultatele simulării și ale analizei de zgomot arată că circuitul propus are potențialul de a oferi o rezistență sporită în bătaia directă a soarelui, o stabilitate bună și o protecție ridicată la zgomot.

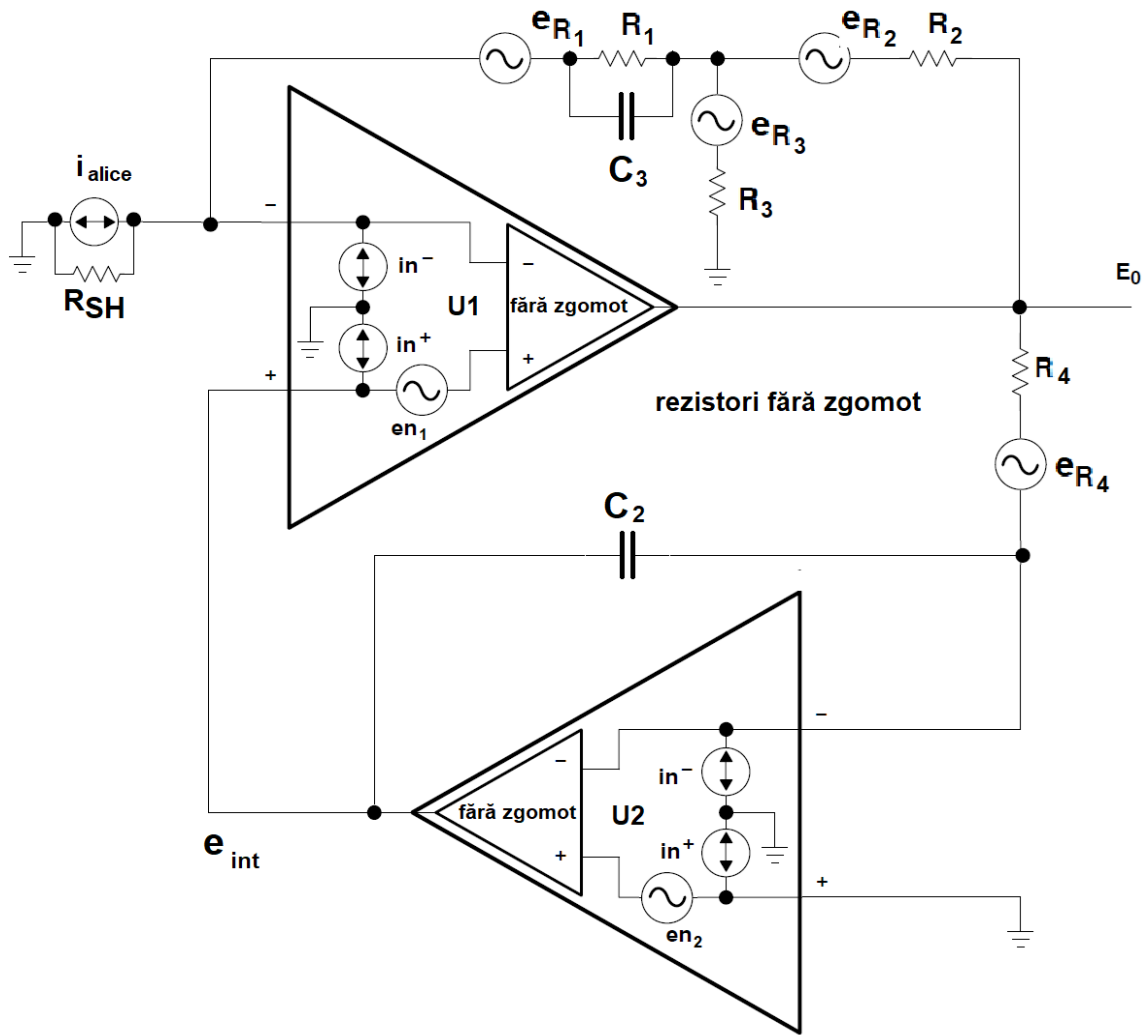


Figura 3.10. Circuitul pentru analiza zgomotului.

3.4. Studii legate de creșterea distanței de comunicație prin lumină în condiții de diminuare a intensității luminoase

În cadrul acestui subcapitol se propune un nou concept de îmbunătățire a distanței de comunicație a sistemelor VLC vehiculare, diferit de abordările existente care se concentrează în principal pe îmbunătățirea receptoarelor VLC. Tehnica prezentată exploatează beneficiile pe care le poate oferi transmițătorul VLC. Mecanismul propus se bazează pe tehnica de supracreștere a curentului de impuls al ledurilor, compensată printr-o scădere proporțională a duratei impulsului, prin micșorarea factorului de umplere ce dictează intensitatea luminoasă diminuată a transmițătorului VLC. În acest fel, se asigură o iradianță instantanee mai mare, menținând în același timp iradianța medie în limitele impuse de normele de standardizare ale vehiculelor.

Prezentarea conceptului de supracreștere a curentului de impuls al ledurilor

Ideea inedită în abordarea de față este de a crește distanța de comunicație prin supracreșterea curentului direct în impuls al ledurilor, odată cu scăderea suplimentară a factorului de umplere pentru restabilirea luminozității necesare [67],[68]. Evident, procedând

în acest fel, se va produce o mică deviere cromatică inevitabilă a luminii ledurilor, dar acesta este un compromis minor față de avantajul unei comunicații la distanță mai mare.

Pentru a nu depăși puterea maximă, un led trebuie alimentat cu un curent mediu sub valoarea sa nominală. Puterea nominală P_n , bazată pe curentul direct I_F și tensiunea directă U_F , este dată de ecuația (69):

$$P_n = I_F \cdot U_F . \quad (16)$$

Aproximând tensiunea directă U_F a unui LED ca fiind relativ constantă, valoarea curentului de impuls cu un factor de umplere D va fi similară cu cea rezultată din ecuația (70):

$$I_F = I_P \cdot T_i / T \Rightarrow I_P = I_F \cdot T / T_i = I_F / D , \quad (17)$$

unde T este perioada, iar T_i este intervalul alocat impulsului. Pentru un led cu un curent direct maxim $I_F = 20$ mA, aplicând un factor de umplere D de 1%, amplitudinea impulsului ar putea teoretic să urce până la 2 A. În consecință, pentru intervale scurte de timp puterea luminii va crește semnificativ, permițând o mai mare distanță de comunicație.

Dacă se folosește modulația în poziție a impulsului monobit (2-PPM – Binary Pulse Position Modulation – cunoscută și sub numele de codare Manchester), atunci intervalul dintre două tranziții este redus la jumătate și curentul de vârf poate fi dublat, așa cum rezultă din ecuația (71):

$$I_{P_2} = I_d \cdot T / T_{i_2} = I_d \cdot \frac{2 \cdot T_{i_2}}{T_{i_2}} = 2 \cdot I_d , \quad (18)$$

unde I_d este curentul mediu.

În general, pentru n -PPM, distanța dintre tranziții este redusă cu factorul n (**Figura 3.11**) [69]. Întrucât, la fel, ledul nu e alimentat continuu, ci în impulsuri, și de această dată s-ar putea folosi un curent maxim dat de formula (72):

$$I_{P_n} = I_d \cdot T / T_{i_n} = I_d \cdot \frac{n \cdot T_{i_n}}{T_{i_n}} = n \cdot I_d . \quad (19)$$

Aplicând tehnica VPPM pentru a diminua și mai mult luminozitatea în funcție de factorul de umplere D , ceea ce presupune includerea modulației în durată a impulsului, atunci s-ar putea crește teoretic și mai mult valoarea maximă a curentului de impuls, conform formulei de mai jos:

$$I_{VPPM_n} = I_d \cdot \frac{T}{T_{i_n} \cdot d} = I_d \cdot \frac{n \cdot T_{i_n}}{T_{i_n} \cdot d} = I_d \cdot \frac{n}{d} = \frac{I_d}{D} , \quad (20)$$

unde d este factorul de reducere a duratei impulsului dat strict de PWM. Asta înseamnă că, pentru o performanță îmbunătățită, putem crește valoarea maximă a curentului cu $1/D = n/d$, unde D este valoarea totală a factorului de umplere la transmisie, așa cum a fost definit anterior (**Figura 3.12**).

Mergând mai departe cu această idee, conceptul unei amplitudini crescute a impulsului simultan cu o reducere proporțională a duratei acestuia ar putea fi aplicat și la codarea VPPM modificată prezentată în [70]. Creșterea amplitudinii va fi invers proporțională cu scăderea factorului de umplere, iar aceasta va sta la baza implementării de față.

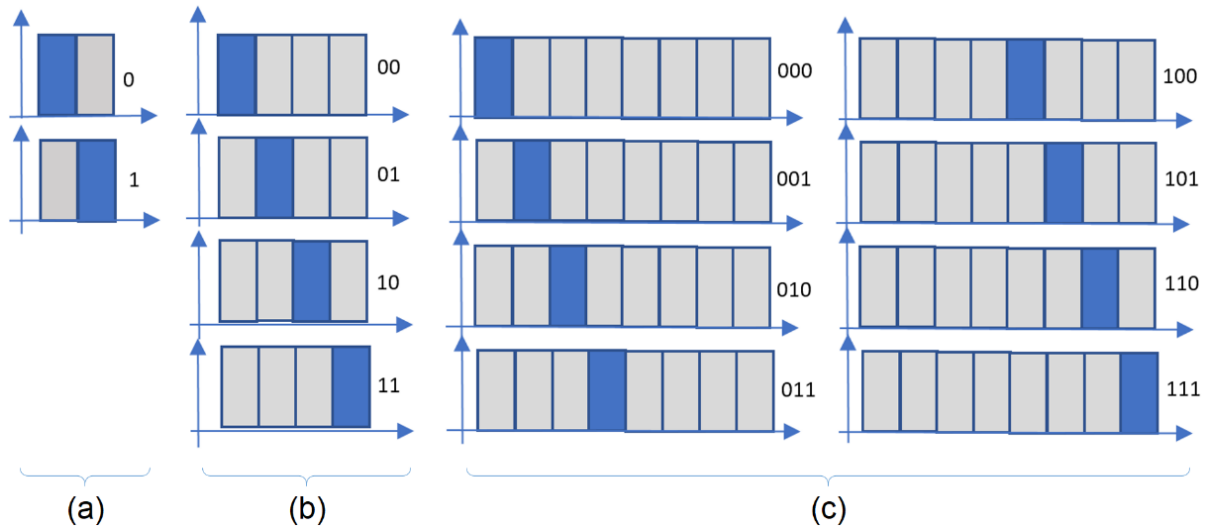


Figura 3.11. Exemple de modulație n-PPM: **a)** $n=2$, PPM binar (cod Manchester); **b)** $n=4$, PPM de ordin 4; **c)** $n=8$, PPM de ordin 8.

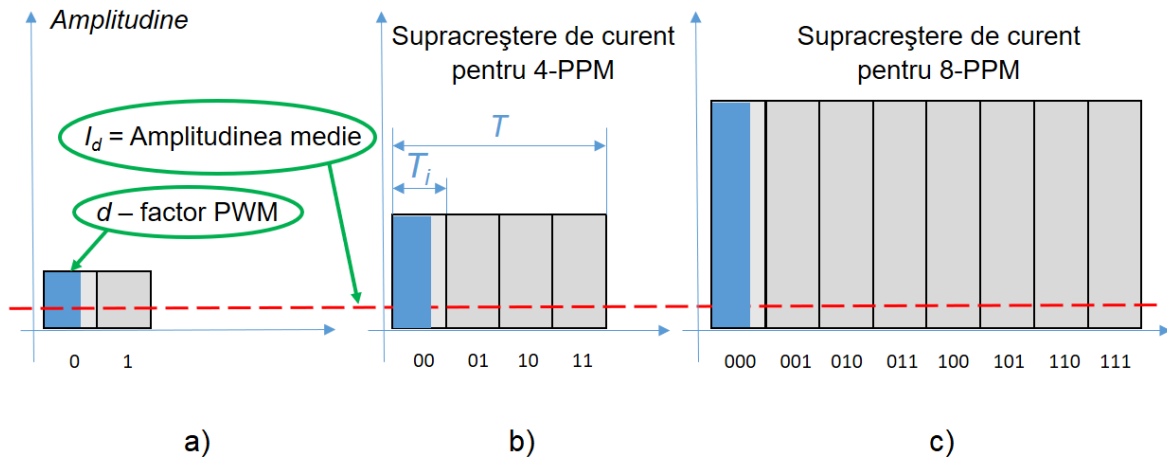


Figura 3.12. Analiza teoretică a creșterii curentului de impuls al unui led odată cu reducerea factorului de umplere, folosind VPPM, menținându-se amplitudinea medie la valoarea curentului nominal I_d . **a)** cod Manchester; **b)** VPPM de ordin 4; **c)** VPPM de ordin 8.

3.5. Integrarea funcțiilor de măsurare a distanței și de diminuare a luminozității

Schema bloc și descrierea sistemului VLC cu funcții de măsurare a distanței și de diminuare a intensității luminoase

Ținând cont de elementele prezentate în subcapitolele anterioare, se impune identificarea celei mai potrivite metode de includere a funcției de măsurare a distanței în cadrul unui sistem VLC. Având în vedere că în domeniul auto eficiența de cost este extrem de importantă și, întrucât nu este obligatoriu ca măsurarea distanței să se facă în mod continuu, o soluție eficientă ar fi alternarea acestei funcții cu funcția de comunicație. În acest sens, cea mai potrivită soluție este utilizarea unui protocol de multiplexare în timp, în baza căruia anumite intervale de timp să fie alocate pentru măsurarea distanței, pe baza trilaterăției prin metoda TDoA aleasă, iar restul intervalelor de timp să fie alocate pentru transmisia datelor sau integrarea altor funcții.

Prezenta lucrare vine cu o soluție inovatoare, încercând să transforme dezavantajul erorilor de deplasare a timpilor într-un avantaj dictat de caracteristicile tehnologiei VLC. Ideea de bază este de a profita de aceste erori pentru a realiza măsurători ale timpilor de zbor de ordinul zecilor de nanosecunde pentru fiecare metru distanță, crescând astfel precizia măsurării fără constrângeri excesive pentru sistemele VLC.

Abordarea calculării erorii de deplasare a timpilor la tranziția de prag pe baza funcțiilor de transfer: (i) a ledurilor la emisie, (ii) a canalului VLC și (iii) a amplificatorului de transimpedanță, știindu-se că semnalul recepționat în final va fi dat de semnalul treaptă al frontului crescător trecut printr-o funcție dată de convoluția celor trei funcții de transfer ar duce la calcule complicate, pe de o parte din cauza neliniarității manifestate de leduri la emisie, iar pe de altă parte din cauza distribuției luminoase neuniforme a dispozitivelor optice instalate pe mașini. Ca atare, o soluție universal valabilă ar putea fi maparea în prealabil a distribuției intensității luminoase a lămpilor autovehiculelor, în mod asemănător cu determinările experimentale efectuate în subcapitolul 3.3.1. În condițiile emiterii unui impuls calibrat pentru măsurare, odată cu determinarea distribuției luminoase se poate face și calculul erorii de deplasare a timpilor, în condițiile în care se cunosc pragul fixat la trigger și caracteristicile amplificatorului transimpedanță, dar și determinarea latenței blocurilor ce intervin în măsurarea distanței. După maparea prealabilă a distribuției intensității luminoase și a latențelor blocurilor VLC-R, caracteristicile obținute pot fi schimbate prin canalul VLC între vehicule, permițând estimarea distanței între vehicule cât mai precis posibil cu echipamente VLC obișnuite.

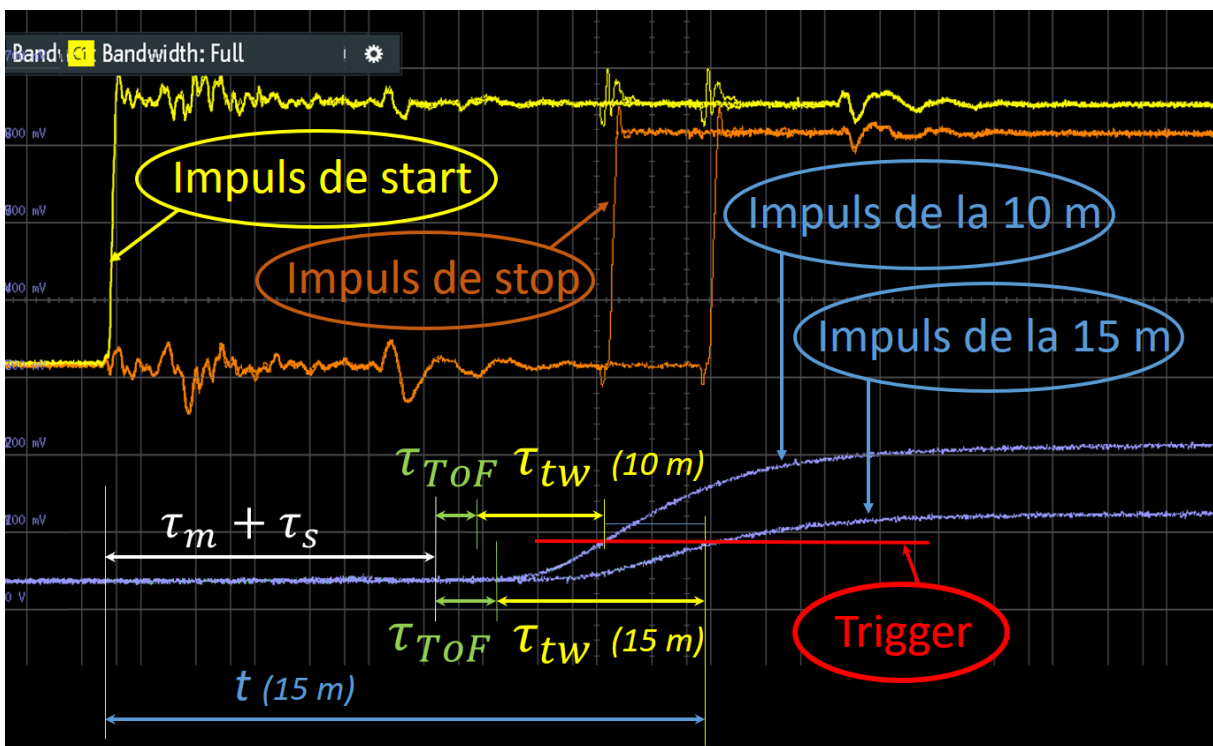


Figura 3.13. Măsurători de distanță cu erori de deplasare a timpilor pentru 10 m și pentru 15 m. Imaginile pentru aceste măsurători au fost suprapuse pentru o mai bună comparație. Trasele albastre arată fronturile crescătoare ale impulsurilor recepționate, trasele galbene arată fronturile impulsurilor de start, iar trasele roșii arată fronturile impulsurilor de stop, declanșate la tranziția peste nivelul de prag.

În **Figura 3.13** sunt prezentate două exemple de măsurare, una la o distanță de 10 m și una la o distanță de 15 m (ambele, dus-întors). Este ușor de observat că precizia poate fi crescută dacă, în loc să încercăm să determinăm doar timpii de zbor, cu o diferență de doar 35

ns între τ_{ToF} la 15 m și, respectiv, la 10 m, vom lua în calcul și eroarea de deplasare (*time-walk*), adică o diferență de 135 ns între $\tau_{ToF} + \tau_{tw}$ la 15 m și, respectiv, la 10 m, care e de patru ori mai mare. Desigur, un alt factor care trebuie cunoscut este nivelul pragului la trigger.

Pe baza unei elecții ad-hoc, unul dintre vehicule poate deveni *master*, iar celălalt, *slave*. Folosind canalul VLC, vehiculul *master* trimite periodic (de exemplu, o dată la zece cadre) un impuls calibrat pentru măsurarea distanței, în timp ce vehiculul *slave* este capabil să recunoască sincronizarea cadrului pentru măsurarea distanței și să intre în modul de reflexie activă a semnalului, returnând un alt impuls calibrat, cu ajutorul propriului său sistem de iluminare. Odată ce semnalul returnat este recepționat, vehiculul *master* măsoară timpul dintre impulsurile emise și recepționate (vezi **Figura 3.13**). Estimarea distanței poate fi făcută cu ecuația:

$$d = (t - \tau_m - \tau_s - \tau_{tw}) \cdot c / 2, \quad (77)$$

unde t este timpul total măsurat, τ_m este latența *master*-ului determinată în prealabil pentru blocurile de emisie, τ_s este latența totală a *slave*-ului determinată în prealabil pentru blocurile implicate în asigurarea modului de reflexie activă, τ_{tw} este eroarea de deplasare a timpilor la tranziția valorii de prag, iar c este viteza luminii. Trebuie menționat că eroarea de deplasare a timpilor include atât eroarea la recepția dispozitivului *slave*, cât și eroarea la recepția dispozitivului *master*. În mod normal, în urma schimburilor de informații făcute prin canalele VLC, *master*-ul are la dispoziție mapările cu valorile ambelor vehicule. Astfel, t este determinat prin măsurătoare, τ_m și τ_s sunt cunoscute din schimburile de informații, însă pentru τ_{tw} este nevoie de un algoritm pentru determinarea perechii corecte de valori din cele două mapări, care ar trebui să corespundă cât mai bine cu distanța calculată în final.

Soluția nou-propusă în această lucrare și ilustrată în **Figura 3.14** presupune adaptarea acestui sistem la principiul reflexiei active a luminii vizibile furnizate de sistemul de iluminare al autovehiculelor.

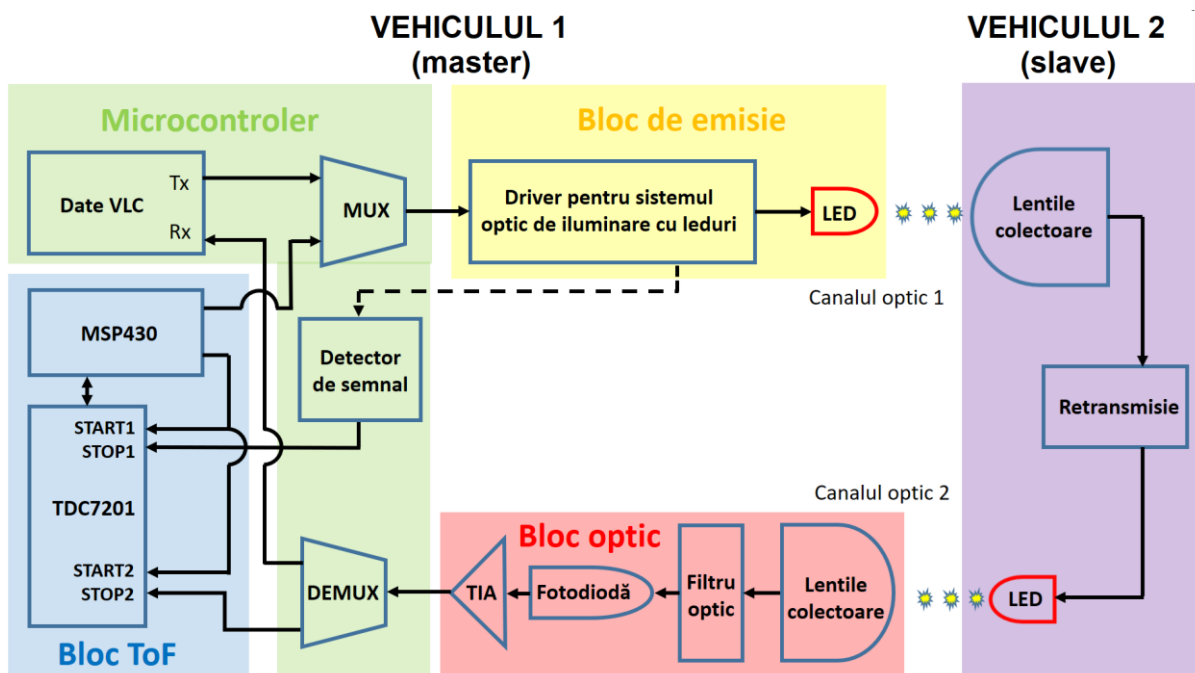


Figura 3.14. Schema bloc a sistemului VLC-R propus.

4. DEMONSTRAȚII EXPERIMENTALE ALE PERFORMANȚELOR PROTOTIPULUI PROPUȘ

Prototipul construit, figurat schematic în **Figura 4.1**, este capabil să ofere comunicații prin lumină vizibilă cu tehnici de modulație bazate pe DSSS și OOK, tehnicile de codare putând fi SIK, Manchester și Miller, iar vitezele de transfer, între 10 și 250 kb/s. Pentru diminuarea intensității luminoase, se folosește codarea VPPM modificată prezentată în [70], care se transformă în cod Manchester când factorul de umplere atinge 50%. La începutul cadrului e inserată o secvență de sincronizare care semnalează receptorului VLC că urmează o nouă serie de date, se continuă cu un antet fizic, care furnizează receptorului VLC informații referitoare la modulația selectată, tehnica de codare, viteza de transfer și lungimea mesajului, și se termină cu un câmp de date de lungime variabilă. Periodic este intercalat un cadru pentru măsurarea distanței, semnalizat printr-o secvență de sincronizare proprie. După construirea cadrelor, informația este modulată și semnalul este trimis către circuitul de comandă a ledurilor, care, la rândul lui, comandă sistemul de iluminare sau semnalizare cu leduri, datele fiind astfel transmise prin intermediul unui fascicul de lumină modulat.

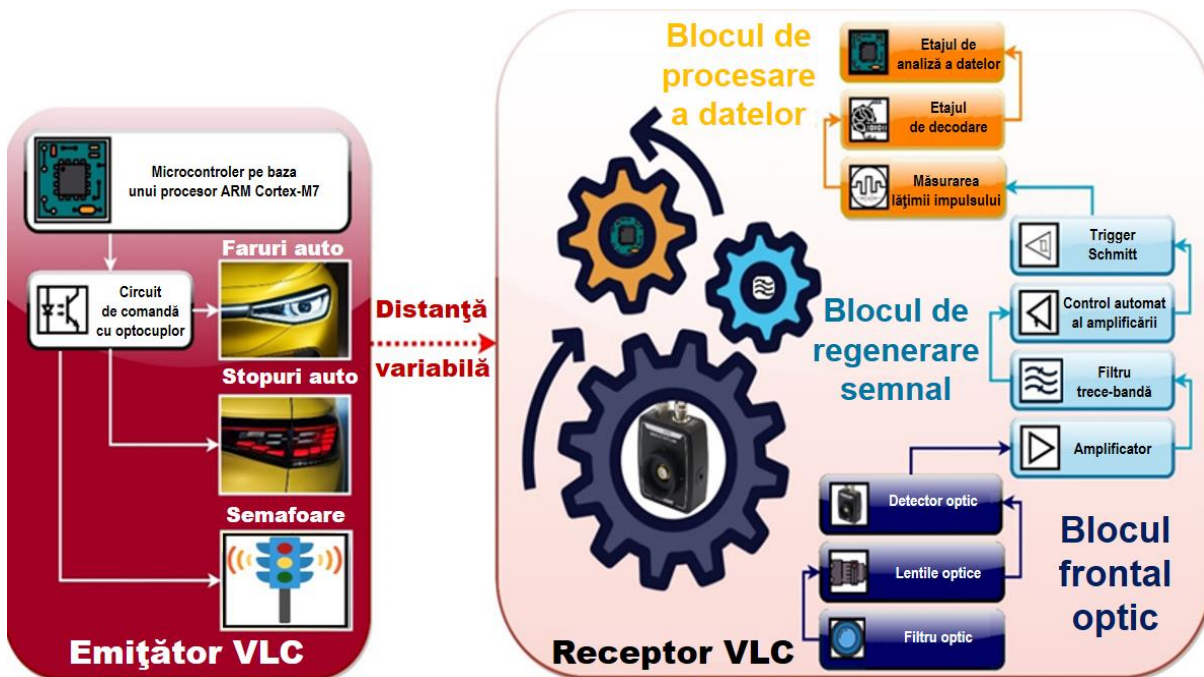


Figura 4.1. Reprezentarea schematică a prototipului VLC folosit pentru teste experimentale.

Receptorul VLC este componenta principală a sistemului de comunicații prin lumină vizibilă, deoarece designul său are cel mai puternic impact asupra performanțelor întregului sistem. Acesta are trei etaje principale: blocul frontal, blocul de prelucrare a semnalului și blocul de procesare a datelor. Partea frontală conține un sistem optic de colectare, care determină câmpul vizual al receptorului VLC și aria de colectare optică. Ca fotodetector s-a ales modelul PDA100A2, oferit de firma Thorlabs, ale cărui date de catalog se încadrează în limitele cerințelor stabilite în capitolul 3.3. Acesta are o fotodiodă PIN conectată într-un circuit de transimpedanță, permițând un câștig reglabil între 0 și 70 dB. În mod complementar emițătorului VLC, receptorul VLC este capabil să proceseze mesajele recepționate folosind tehnici de demodulație DSSS sau OOK, cu codare SIK, Manchester sau Miller și cu viteze de transfer între 10 și 250 kb/s. La fiecare experiment se vor detalia parametrii folosiți.

4.1. Evaluarea experimentală a performanței unei legături de date prin lumină vizibilă între vehicul și semafor

Procedura experimentală de testare

Pentru a putea determina experimental distanța maximă de comunicație dintre un vehicul și un semafor standard cu leduri pe baza unei legături VLC în condiții normale de exploatare, s-a efectuat o evaluare în condiții de interior, urmată de o evaluare în condiții obișnuite de mediu, la exterior. Dacă în [12] sau [64] prototipul VLC a fost evaluat în condiții dificile de mediu, pentru a demonstra capacitatea sistemelor VLC de a menține legătura de date la expuneri directe în bătaia soarelui sau în condiții de ninsoare abundentă, în experimentele de față s-a dorit obținerea unei distanțe cât mai mari în condiții obișnuite de utilizare. Odată ce s-a confirmat funcționarea corectă a sistemului VLC la interior, acesta a fost amplasat în condiții obișnuite de mediu exterior. S-a plecat de la o distanță de 68 m între emițător și receptor, în condiții de aliniament direct, după care s-a crescut distanța treptat până la 188 de metri și pentru fiecare punct de stop s-a determinat BER-ul la o rată de transfer stabilită la 100 kbps. Determinarea BER-ului s-a făcut ca și până acum, pe baza unui mesaj stabilit anterior, transmis ciclic și comparat la recepție cu valoarea stocată. **Figura 4.2 a)** prezintă etapa de testare experimentală cu emițătorul și receptorul VLC amplasate la distanță de 188 de metri unul de altul. **Figura 4.2 b)** arată și pașii intermediari pentru care a fost determinat BER-ul.

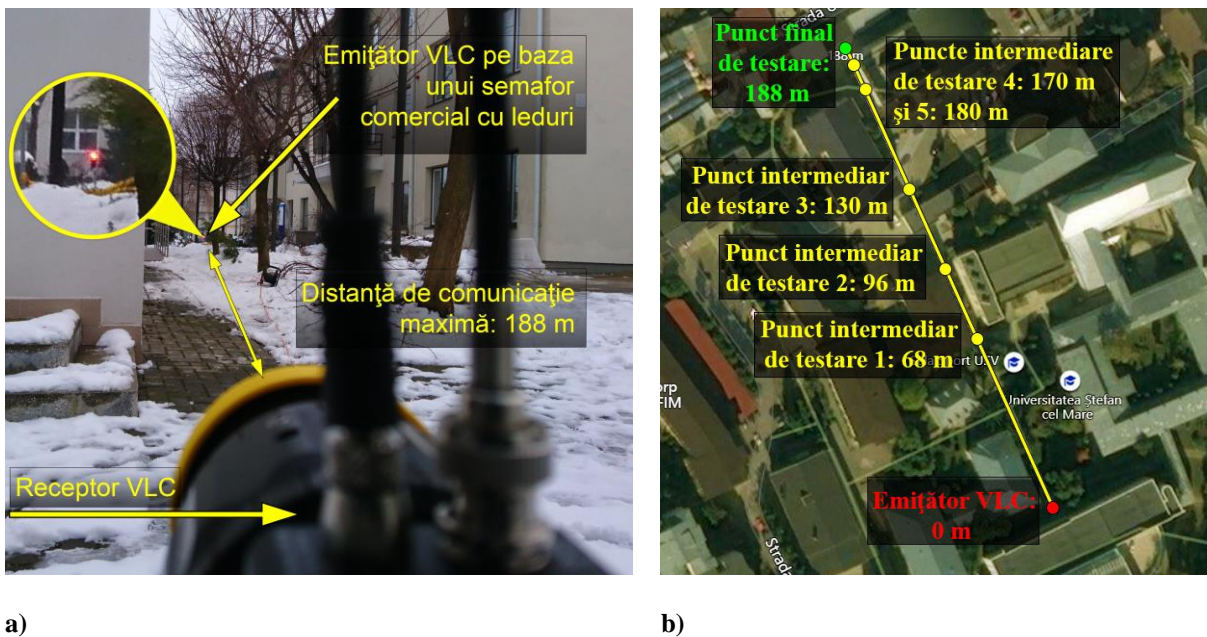


Figura 4.2. a) Imagine cu emițătorul VLC aflat la 188 m distanță de receptor; b) puncte de testare figurate pe imaginea din satelit.

Discuții asupra rezultatelor experimentale

Testările făcute la interior, pe distanțe de până la 40 de metri, arată că sistemul poate asigura conexiuni fiabile, cu rate de erori de bit mai mici de 10^{-7} . În mediu exterior, în condiții de expunere indirectă la lumina solară, legătura de date între vehicul și semafor se

poate menține până la o distanță de comunicație de 188 m, cu un BER de aproximativ 10^{-3} , și de 170 m cu un BER mai mic de 10^{-6} .

4.2. Evaluarea experimentală a performanțelor unei legături de date prin lumină între un vehicul și lămpile de semnalizare ale unei treceri de pietoni

Pentru experimentele desfășurate în acest scenariu [71], cele două componente principale ale prototipului VLC prezentat în **Figura 4.1** constau dintr-un emițător VLC adaptat la lămpile cu leduri ale unui indicator de trecere pentru pietoni și receptorul VLC al prototipului propus.

Configurația de testare a sistemului VLC între un vehicul și lămpile de semnalizare ale unei treceri de pietoni

Spre deosebire de scenariul anterior, în acest caz emițătorul VLC este conectat la sistemul de semnalizare luminoasă cu leduri al unui indicator de trecere pentru pietoni. Trebuie subliniat faptul că parametrii semnalizării cu leduri a trecerii pentru pietoni sunt similari cu cei folosiți în cazul indicatoarelor de pe drumurile publice în privința dimensiunii, puterii optice de emisie a ledurilor și înălțimii de amplasare a indicatorului.

Testarea experimentală a prototipului VLC cu lămpile de semnalizare ale unei treceri de pietoni

Testele s-au desfășurat în condiții de laborator pe timp de noapte la întuneric, dar și la expunere directă la surse de lumină fluorescentă, având o iradianță perturbatoare la nivelul receptorului VLC între $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ și $85 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, apoi în condiții necontrolate de mediu exterior pe timp de zi, având o iradianță a luminii solare la nivelul receptorului VLC cuprinsă între $6.500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ și $13.000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Testele de noapte la interior au fost efectuate pentru o distanță de comunicație între 5 și 40 de metri, în timp ce testele în aer liber, pentru o distanță între 6 și 27 de metri. După cum se poate vedea, scenariile de testare reproduc foarte bine toate condițiile la care ar putea fi expus sistemul VLC în situații reale. Și de această dată, în conformitate cu standardul IEEE 802.15.7, sistemul VLC a folosit modulația OOK și codarea Manchester. Aceste teste au fost efectuate la o rată de transfer de 100 kb/s, care este cea mai mare rată de transfer specificată în standardul pentru aplicațiile de exterior PHY I folosind modulația OOK.

Rezultatele experimentale sunt prezentate în **Figura 4.3**.

Discuții pe marginea rezultatelor experimentale

Testarea intensivă a sistemului VLC a arătat că tehnologia VLC este adecvată în transmiterea acestor informații către vehiculele care se apropie.

În circumstanțele menționate mai sus, rezultatele experimentale au demonstrat o distanță de comunicație fiabilă între 7 și 27 de metri în condiții de zi, extinzându-se la o zonă între 5 și 40 de metri în condiții de noapte. Aceste rezultate sunt adecvate, deoarece o distanță de comunicație de 27 de metri permite unui vehicul care rulează cu 50 km/h să se oprească în condiții de siguranță deplină, în timp ce raza de acțiune de 40 de metri oferită în condiții de

noapte îmbunătățește eficiența sistemului atunci când acuitatea vizuală a șoferului este mai puțin eficientă.

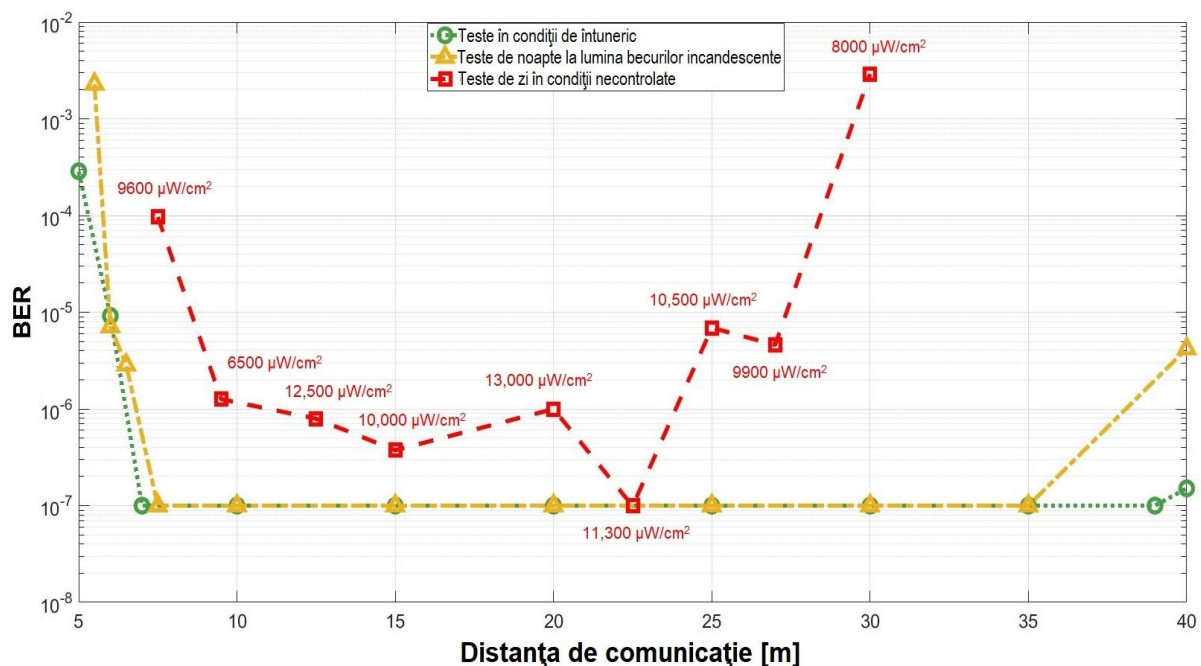


Figura 4.3. BER-ul atins în evaluarea sistemului de comunicații cu lumină vizibilă în condiții de noapte, sub influența luminilor fluorescente, și în condiții necontrolate de zi, în mediu exterior.

4.3. Evaluarea experimentală a performanțelor unei legături de date prin lumină cu ajutorul farurilor auto

Subcapitolul de față oferă rezultate experimentale privind utilizarea tehnologiei VLC în aplicații vehicul către vehicul, V2V. Pentru a evalua performanțele posibile ale unei astfel de legături de date, sistemului VLC folosit s-a bazat pe schema ilustrată în Figura 4.1, cu observația că în locul semaforului s-a folosit un far auto cu leduri.

Discuții pe marginea rezultatelor experimentale

Performanțele prototipului VLC V2V sunt prezentate în Tabelul 4.1. Aceste rezultate arată că un sistem VLC V2V poate atinge o distanță de comunicație de 185 de metri, oferind în același timp un BER de 10^{-7} – 10^{-6} .

Tabelul 4.1. Sumarul rezultatelor experimentale ale comunicației VLC intervehiculare cu far auto.

Distanța V2V [m]	BER	Zgomot optic [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	Condiții și observații
40	$1 \cdot 10^{-7}$	≈ 600	Teste în laborator, cu lumină naturală și cu lămpile fluorescente aprinse
70	$1 \cdot 10^{-7}$	≈ 4300	
95	$1 \cdot 10^{-7}$	≈ 3200	Teste în mediu exterior, în condiții necontrolate, după-amiaza, cu cer înnorat și cu lumină solară indirectă
130	$1 \cdot 10^{-7}$	≈ 4700	
150	$1 \cdot 10^{-7}$	≈ 2500	
170	$2 \cdot 10^{-7}$	≈ 3100	
185	$3 \cdot 10^{-7}$	≈ 4700	

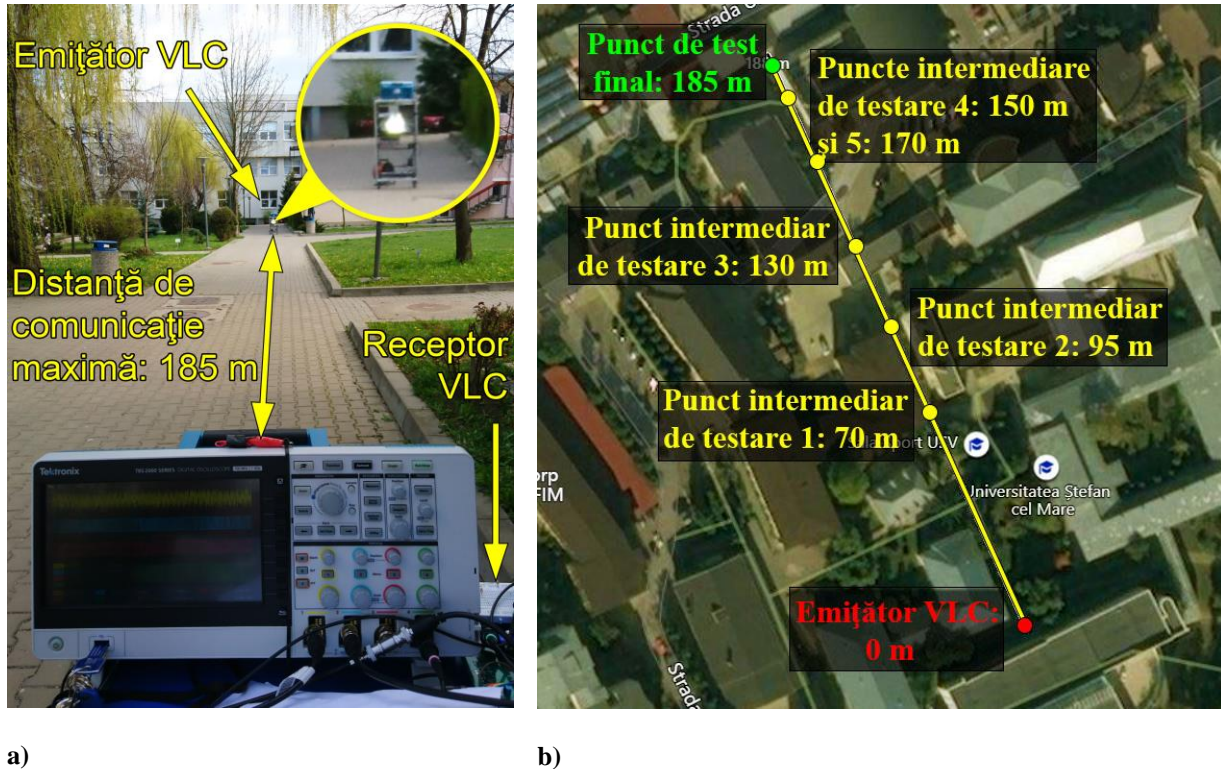


Figura 4.4. a) Imagine cu emițătorul VLC aflat la 185 m distanță de receptor; b) puncte de măsurare pe imaginea din satelit.

Este de menționat faptul că distanța de comunicație la interior de 40 m (cu lămpile fluorescente aprinse) și distanța de comunicație de 185 m la exterior au fost limitate de spațiul liniei de vizibilitate disponibile la fața locului. **Figura 4.4 a)** ilustrează pasul configurației de testare cu emițătorul și receptorul VLC amplasate la 185 m distanță unul față de altul. **Figura 4.4 b)** arată și distanțele intermediare în care s-a măsurat BER-ul.

Din analiza lucrărilor consultate pe această temă, aceasta este cea mai mare distanță raportată în literatura de specialitate, pentru care s-a asigurat o legătură de date VLC V2V.

4.4. Evaluarea experimentală a performanțelor unei legături de date intervehiculare stabilite cu stopurile unui autovehicul

În acest subcapitol e abordată o analiză cu privire la utilizarea tehnologiei VLC într-o nouă aplicație rutieră.

În paralel, studiul de față explorează și efectul nealinierei vehiculelor asupra performanței unei legături VLC V2V.

Pentru acest deziderat s-a folosit modelul de distribuție a luminii unor vehicule comerciale existente, experiment desfășurat în subcapitolul 3.2, care a fost comparat cu modelul de distribuție luminoasă a emițătorului VLC propus.

Pentru a evidenția diferențele dintre situația în care legătura de comunicație e stabilă între două vehicule aflate pe aceeași bandă și situația în care legătura de comunicație e stabilă între două vehicule aflate pe benzi adiacente, scenariul de simulare ia în considerare un drum drept cu două benzi de circulație în același sens. Pista de testare are două benzi, fiecare cu o lățime $w=3,50$ m (autostrăzile au cel puțin două benzi de circulație pe fiecare sens, cu o lățime tipică între 3,50 m și 3,75 m fiecare [60]) și se presupune că vehiculele vor

ocupa centrul benzilor corespunzătoare, la 1,75 m și, respectiv, la 5,25 m proiectate pe axa Oy . O altă presupunere este că fotodetectorul este centrat de-a lungul axei longitudinale a mașinii receptoare.

Determinarea practică a distribuției luminoase a prototipului VLC

Figura 4.5 ilustrează modelul de distribuție a luminii emițătorului VLC, acesta fiind determinat experimental pentru o distanță între 1 m și 8 m, de la 0° la $\pm 60^\circ$, valorile măsurate variind de la $26,39 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ la $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Determinarea experimentală a distribuției luminoase a emițătorului VLC confirmă că prototipul de emițător VLC dezvoltat este în conformitate cu standardele minime impuse sistemului de iluminat al unui vehicul [72] și că are un tipar similar cu cel al vehiculelor existente.

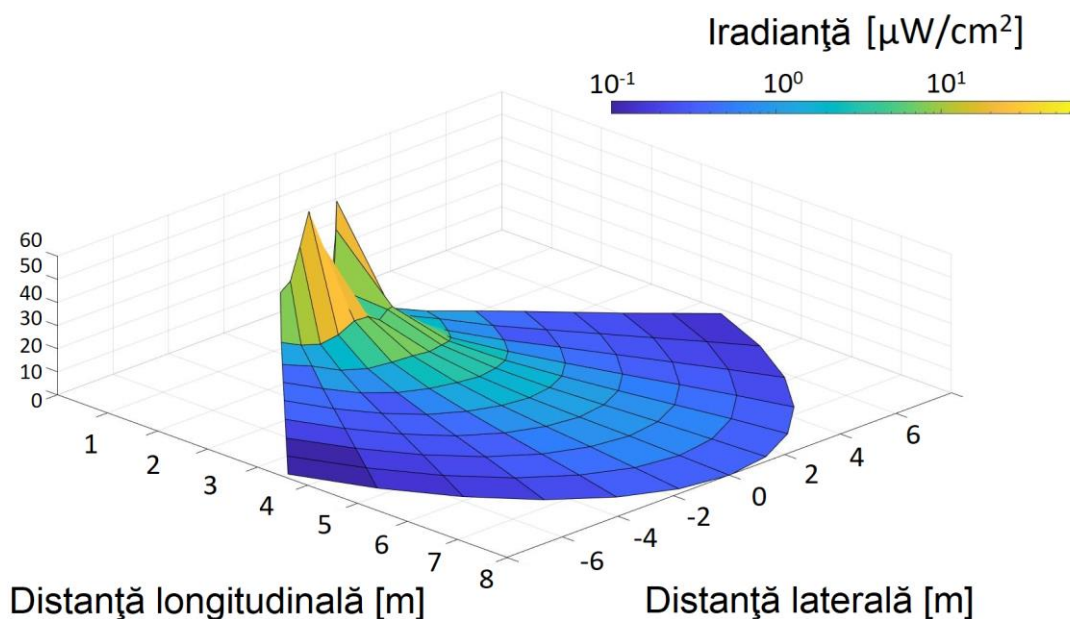


Figura 4.5. Determinarea experimentală a distribuției luminoase a prototipului VLC.

Procedura de testare în mediul exterior

Evaluarea experimentală a sistemului VLC a început cu o primă parte: examinarea modelului de distribuție a luminii pentru prototipul VLC. Această investigație și-a propus să stabilească asemănarea dintre modelul de distribuție a luminii emițătorului VLC și cel al vehiculelor comerciale.

A doua parte a investigației experimentale se axează pe determinarea performanțelor legăturii VLC intervehiculare, dar și a efectului nealinerii vehiculului asupra acestora. În acest scop, se ia în considerare un scenariu cu un drum cu două benzi, în care emițătorul VLC poate fi pe aceeași bandă sau pe o bandă adiacentă față de cea pe care se află receptorul VLC. În urma acestor situații, se va determina modul în care sunt influențate distanța minimă la care există vizibilitate și distanța maximă de comunicație pentru un anumit BER. Prin urmare, pentru a avea o evaluare adecvată a modului în care nealinierea vehiculului influențează acești parametri și pentru a trece de la un prototip de laborator la un sistem VLC funcțional încorporat într-un vehicul, este necesară o investigație experimentală extinsă. Scenariul de testare proiectat este ilustrat în **Figura 4.6**. Pentru a determina efectul nealinerii

autovehiculelor, sistemul VLC intervehicular a fost testat în condiții de mediu exterior, pe un drum cu două benzi, în parcarea Universității Ștefan cel Mare din Suceava. În acest scop, emițătorul VLC (vehiculul Tx) a fost plasat pe a doua bandă, în timp ce receptorul VLC (vehiculul Rx) a fost plasat alternativ pe prima și pe a doua bandă.

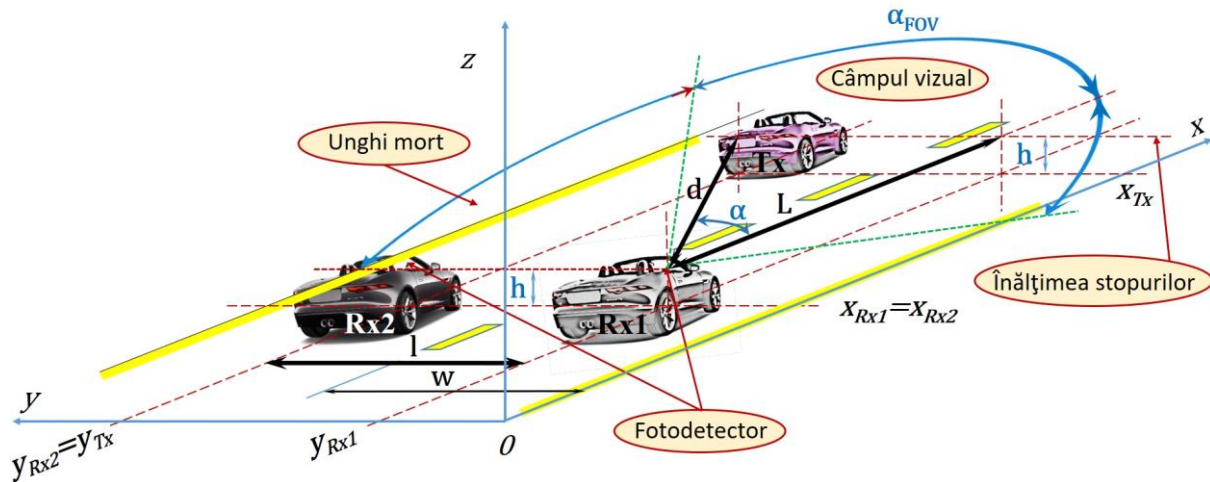


Figura 4.6. Scenarii de testare cu legătură de comunicație stabilită între două vehicule aflate pe aceeași bandă și cu legătură de comunicație stabilită între două vehicule aflate pe benzi adiacente.

Evaluarea experimentală a efectului nealinierei autovehiculelor și a distanței intervehiculare asupra calității comunicației

Rezultatele investigației experimentale a sistemului VLC V2V pentru scenariul cu două benzi sunt rezumate în Figura 4.7 și Figura 4.8. Astfel, Figura 4.7 ilustrează rezultatele BER pentru experimentele efectuate în condiții de noapte sub influența luminilor fluorescente pentru un FoV larg și pentru FoV îngust, în timp ce Figura 4.8 prezintă rezultatele testelor în aceleași condiții, dar în timpul zilei. Rezultatele experimentale arată clar modul în care nealinierea vehiculelor influențează performanțele legăturii VLC V2V în ceea ce privește distanța minimă de recepție, BER-ul și distanța maximă de comunicație.

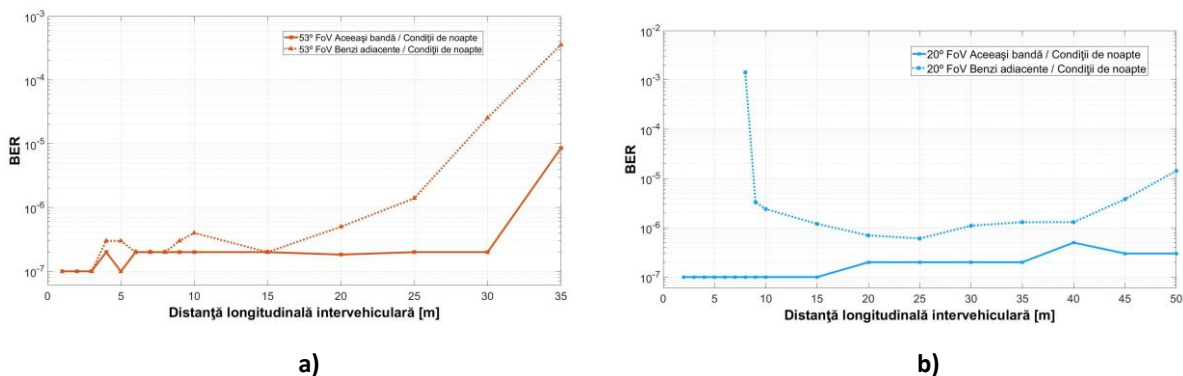


Figura 4.7. Sumarul rezultatelor experimentale V2V ale BER-ului pentru teste efectuate în condiții de noapte, sub influența lămpilor fluorescente: a) pentru un unghi de recepție de $\pm 53^\circ$; b) pentru un unghi de recepție de $\pm 20^\circ$, cu colimator optic.

După cum se poate vedea, montarea colimatorului optic, care are un FoV mai îngust, îmbunătățește SNR-ul și extinde regiunea de 10^{-7} – 10^{-6} a ratei de erori până la 50 m și distanța maximă de comunicație până la 75 m. Astfel, aceste rezultate demonstrează performanțele

tehnologiei VLC, care poate oferi legături V2V extrem de fiabile, cu BER-uri care pot coborî până la 10^{-7} și distanțe de comunicație de până la 75 m. Cu toate acestea, după cum se poate observa, la 75 m BER-ul crește semnificativ, atingând o valoare de 10^{-3} . Aceasta arată că, din cauza puterii optice scăzute, aceasta este limita de distanță a configurației curente.

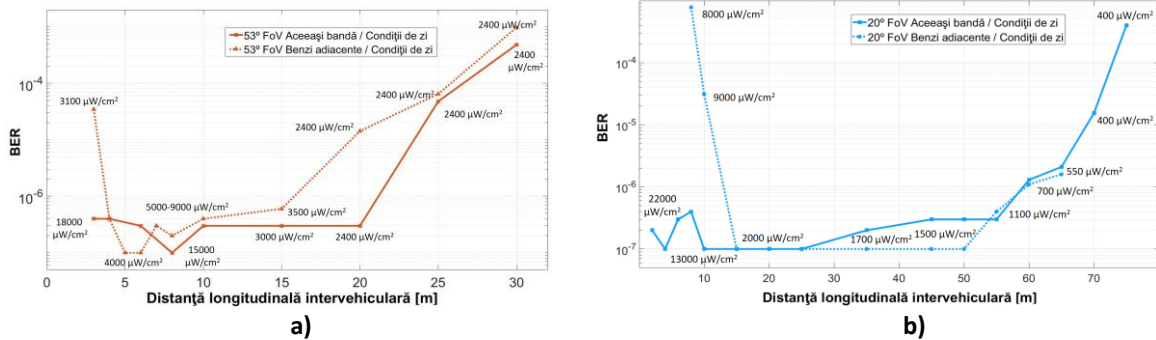


Figura 4.8. Sumarul rezultatelor experimentale V2V ale BER-ului pentru teste efectuate în condiții necontrolate, de zi: **a)** pentru un unghi de recepție de $\pm 53^\circ$; **b)** pentru un unghi de recepție de $\pm 20^\circ$, cu colimator optic.

În aceste circumstanțe, se poate observa că performanța sistemelor VLC auto se îmbunătățește constant. Prin urmare, rezultatele acestor experimente oferă noi dovezi cu privire la beneficiile asociate cu utilizarea tehnologiei VLC în aplicații auto. Astfel, pe lângă o posibilitate de răspândire rapidă și un cost scăzut generat de distribuția largă a surselor de lumină cu leduri, tehnologia VLC poate oferi distanțe de comunicație decente și o fiabilitate ridicată.

4.5. Testarea conceptului de măsurare a distanței cu ajutorul unui sistem de comunicații prin lumină vizibilă

Testarea blocului de măsurare a distanței în condiții de laborator

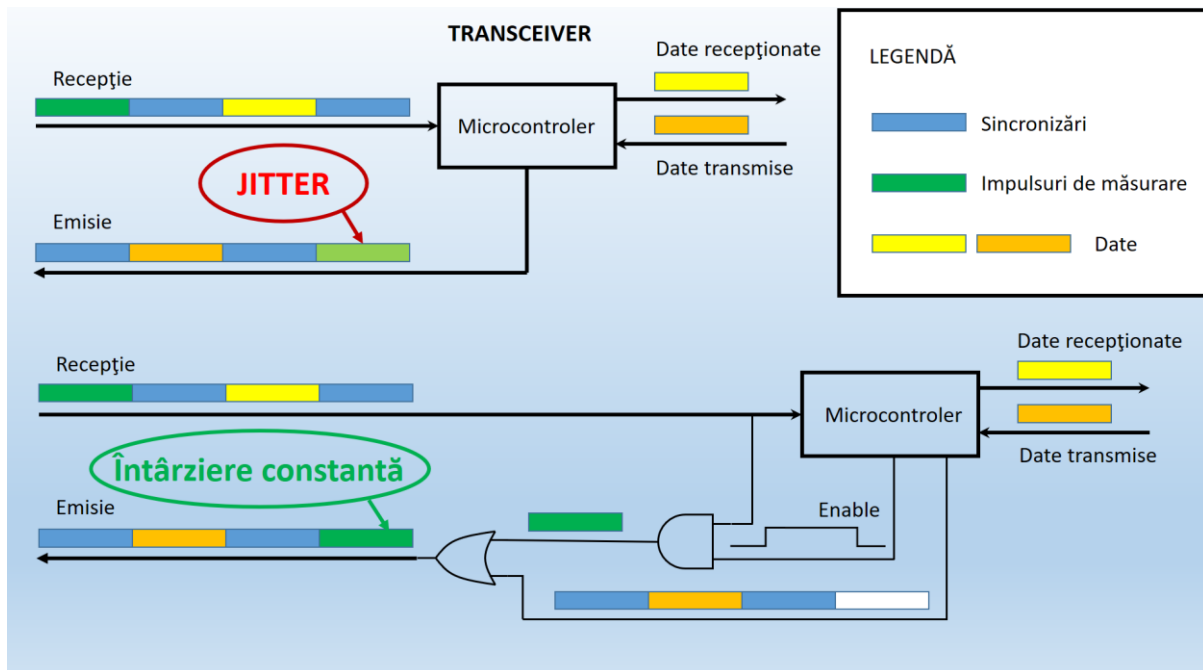


Figura 4.9. Soluția de implementare a reflexiei active pentru evitarea jitterului.

Integrarea blocului de măsură VLR în cadrul prototipului VLC-R a început cu scrierea codurilor necesare pentru partea de emisie și de recepție.

Dacă la partea de emisie structura cadrelor de transmisie a datelor și a celor de măsurare a distanței a putut fi realizată fără impedimente majore, la partea de recepție s-au întâmpinat dificultăți la partea de reflexie activă. Concret, întrucât impulsurile pentru întoarcerea semnalului n-au putut fi construite pe baza întreruperilor, au apărut întârzieri aleatoare la generarea biților, fenomen vizibil prin apariția unui jitter al semnalului reflectat, fapt care ar fi dus la generarea unor erori nepermise la măsurarea distanței. Trebuie precizat că latența intrinsecă a transceiverului *slave* (care poate fi considerată constantă) în transmiterea semnalului reflectat nu e o problemă majoră, algoritmul putând ține cont de aceasta. Întârzierile aleatoare însă nu pot fi compensate, eliminarea jitterului fiind imperios necesară. Soluția găsită a fost ca microcontrolerul să trimită în timpul cadrului de măsurare doar un semnal de enable, care să permită întoarcerea efectivă a biților recepționați la intrarea microcontrolerului cu ajutorul unor porți logice, ca în **Figura 4.9**, aceste porți logice putând fi considerate cu latențe constante.

Testarea sistemului de măsurare a distanței simultan cu sistemul de comunicații prin lumină vizibilă în condiții de laborator

Prototipul folosit pentru măsurători VLC-R constă din două transceivere VLC, câte unul pentru fiecare banc de test ce simulează un vehicul, cu funcții integrate de măsurare a distanței și de diminuare a intensității luminoase, conform schemei bloc prezentate în **Figura 3.14**.

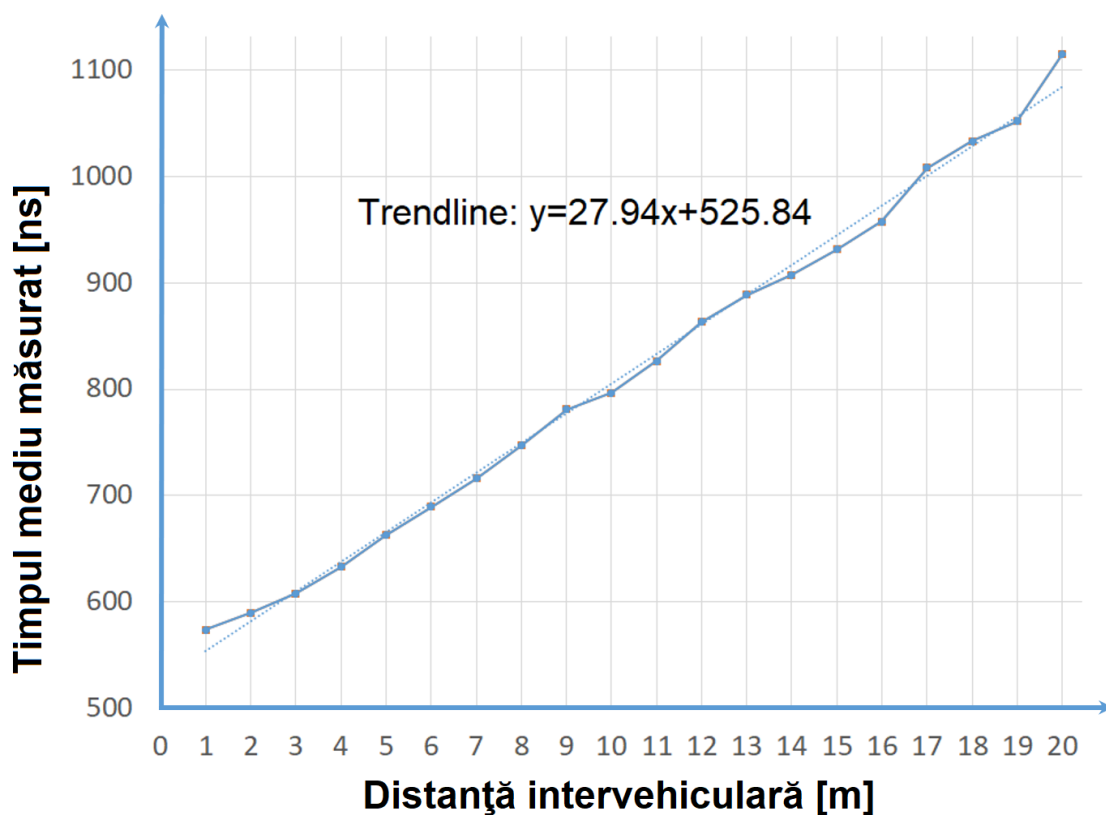


Figura 4.10. Rezultatele măsurătorilor de distanță pentru prototipul VLC-R cu un BER mai mic de 10^{-7} .

Rezultatele testelor ce demonstrează validitatea conceptului pentru prototipul de măsurare a distanței V2V sunt rezumate în **Figura 4.10**. Procedura de testare s-a desfășurat pe o distanță de la 1 la 20 de metri, din metru în metru, prin efectuarea a peste 300 de măsurători la fiecare pas. Timpurile medii măsurate au fost reprezentate pe grafic, iar valorile rezultate ale deviației standard s-au încadrat între valorile 0,87 ns și 3,3 ns. Linia măsurătorilor indică o tendință liniară, cu o diferență medie de aproximativ 28 ns între pași și o latență totală ($\tau_m + \tau_s$) de 525,84 ns. În același timp, însă, se observă că graficul prezintă unele neliniarități greu de contracarat, deoarece sunt cauzate de funcțiile de transfer specifice ale diferitelor elemente: leduri, canalul VLC, amplificatoarele de transimpedanță și, de asemenea, distribuția specifică a intensității luminoase a lămpilor auto. În loc să ne bazăm pe linia tendinței pentru estimarea distanței, precizia va fi mai bună (cu o deviație de aproximativ 10%) dacă se va crea o hartă cu valorile medii ca bază pentru comparație, așa cum s-a menționat anterior, în subcapitolul **3.5**. În timpul testelor, sistemul V2V VLC a fost capabil să mențină un BER mai mic de 10^{-7} , fără protocoale de corectare a erorilor. O concluzie suplimentară care poate fi trasă în urma studierii graficului din **Figura 4.10** este faptul că latența totală a celor două sisteme, după cum am mai precizat, este de 525,84 ns, ceea ce înseamnă că fiecare dintre cele două sisteme identice VLC-R are o latență de aproximativ 0,3 ms, o valoare suficient de mică pentru a nu influența prea tare pragul maxim de 20 ms impus de aplicațiile de siguranță rutieră.

Discuții asupra rezultatelor de măsurare a distanței odată cu transmiterea datelor prin sistemul de comunicații cu lumină vizibilă

Experimentele efectuate au demonstrat că prototipul VLC este capabil să includă o funcție de măsurare a distanței menținând în același timp un BER mai mic de 10^{-7} , simultan cu activarea funcției de diminuare a intensității luminoase la emisie. Odată ce harta distribuției erorilor de deplasare a timpilor este schimbată între vehicule prin canalele VLC, sistemul are posibilitatea de a estima distanța între vehicule pe baza unor timpi de zbor de patru ori mai mari decât în abordările convenționale bazate pe ToF, ceea ce reprezintă o bază reală de pornire pentru dezvoltarea unui sistem precis de măsurare. Prototipul a reușit să valideze ideea inovatoare a includerii erorilor de deplasare a timpilor în calculul distanței, oferind posibilitatea unei precizii sporite pentru estimările necesare în condițiile siguranței traficului rutier.

4.6. Testarea creșterii distanței VLC cu ajutorul supracreșterii curentului de impuls al ledurilor odată cu diminuarea factorului de umplere

Pentru a evidenția posibilitatea extinderii distanței de comunicație cu ajutorul supracurentului de alimentare în impulsuri a ledurilor, s-a utilizat un prototip V2V VLC similar cu cel utilizat în [2], așa cum e ilustrat în **Figura 4.11**. Sistemul include un banc de test emițător și un banc de test receptor. Între aceste două bancuri de probă se află canalul VLC. Experimentele s-au desfășurat în condiții de laborator, cu lumină naturală și lumină artificială din surse fluorescente.

Cadrelle transmise au un antet de sincronizare care semnalează începutul unui nou flux de date. Urmează câteva informații legate de tehnica de codare, modulație, rata de transfer al datelor și lungimea mesajului. La sfârșitul cadrului se află mesajul propriu-zis, acest câmp de date având o lungime variabilă, specificată în antet. Rata de transfer pentru acest experiment a fost setată la 10 kb/s.

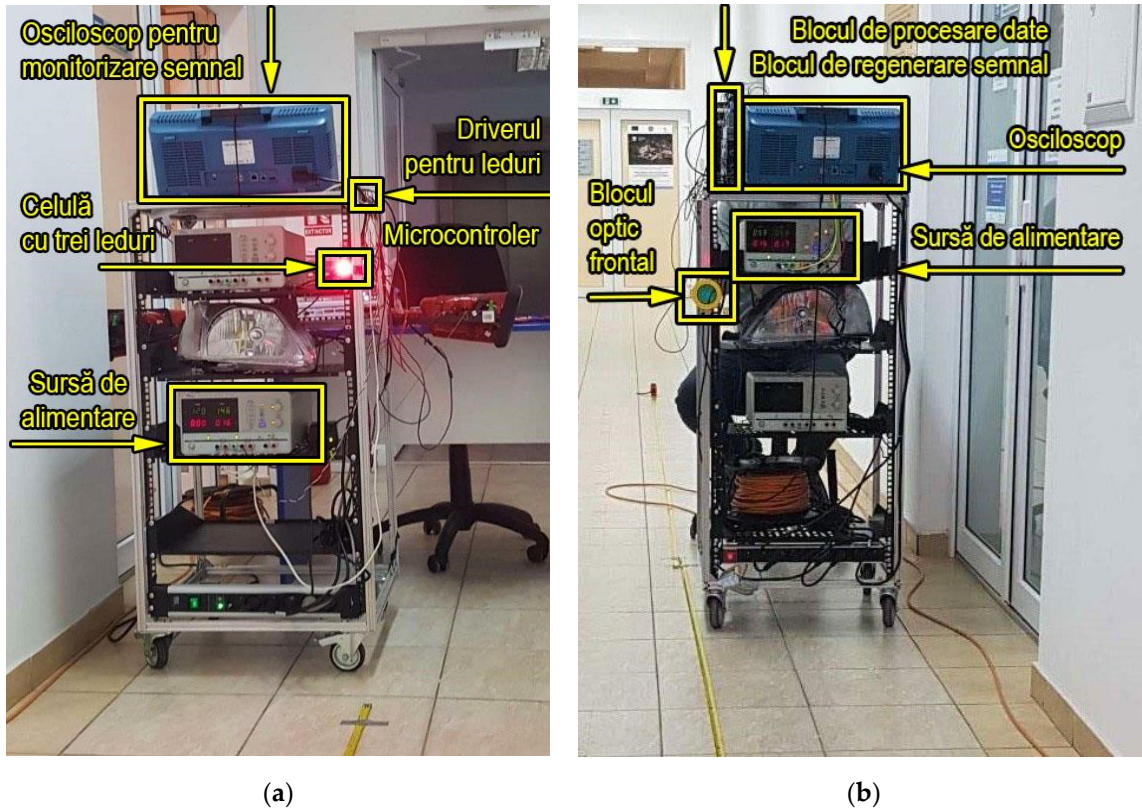


Figura 4.11. Implementarea hardware a prototipului VLC folosit la testarea experimentală a creșterii distanței de comunicație la atenuarea intensității luminoase: **a)** emițătorul VLC; **b)** receptorul VLC.

Proceduri experimentale și metode de investigație

Procedura experimentală are ca obiectiv evaluarea efectului asupra distanței de comunicație într-un sistem V2V VLC ca urmare a supracreșterii amplitudinii impulsurilor de curent prin ledurile emițătorului, odată cu scăderea proporțională a factorului de umplere. Experimentele s-au desfășurat în mediu controlat, luându-se în calcul două scenarii: unul cu o iradianță medie la emisie de aproximativ $90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, potrivită pentru luminile de frână, și altul cu o iradianță medie la emisie de aproximativ $6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, potrivită pentru luminile de poziție.

Pentru fiecare scenariu, prototipul V2V VLC a fost testat pentru diferite valori ale factorului de umplere, în timp ce distanța dintre emițătorul VLC și receptorul VLC a fost crescută treptat în pași de 10 cm.

Determinarea experimentală a distanței de comunicație ca efect al supracreșterii curentului de impuls al ledurilor odată cu scăderea factorului de umplere

Această secțiune prezintă rezultatele experimentale ce arată efectul supracreșterii amplitudinii impulsurilor de curent prin leduri odată cu scăderea factorului de umplere asupra distanței maxime într-o legătură de date V2V VLC în două scenarii: cu lumini de frână și cu lumini de poziție.

➤ *Rezultatele experimentelor de laborator în scenariul cu lumini de frână*

Testarea experimentală de laborator a urmat calea descrisă în secțiunea 4.6. Rezultatul evaluării pentru scenariul cu lumini de frână este prezentat în **Tabelul 4.2**.

Tabelul 4.2. Rezultatele experimentale de laborator, ce demonstrează creșterea distanței odată cu supracreșterea impulsurilor de curent la testele luminilor de frână.

Modulație	Rata [kb/s]	BER	Condiții	Factor de umplere	Curent [mA]	Emisie optică [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	Distanța V2V [m]
VPPM modificat	10	$<10^{-6}$	Lumină ambientă: 48 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, ziua, la interior, cu neone aprinse	50%	350	90,2	7,7
				40%	438	89,7	11,3
				30%	583	88,5	13,4
				20%	875	88,4	16,8

➤ *Rezultatele experimentelor de laborator în scenariul cu lumini de poziție*

Tabelul 4.3 prezintă rezultatele evaluării experimentale pentru scenariul cu lumini de poziție, care s-a desfășurat cu o iradianță la emisie de aproximativ 6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Tabelul 4.3. Rezultatele experimentale de laborator, ce demonstrează creșterea distanței la testele luminilor de poziție.

Modulație	Rata [kb/s]	BER	Condiții	Factor de umplere	Curent [mA]	Emisie optică [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	Distanța V2V [m]
VPPM modificat	10	$<10^{-6}$	Lumină ambientă: 48 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, ziua, la interior, cu neone aprinse	10%	100	5,65	6,8
				9%	111	5,61	7,3
				8%	125	5,75	7,9
				7%	143	5,98	8,9
				6%	167	6,01	9,9
				5%	200	5,96	11,0
				4%	250	5,87	13,0
				3%	333	5,82	15,3
				2%	500	5,81	19,1
1%	1000	5,3	25,2				

➤ *Rezultatele experimentelor în mediu exterior*

Pentru a determina fezabilitatea conceptului propus, sistemul VLC a fost testat în condiții de lumină solară exterioară, cu expunere indirectă la lumină. În timpul testelor, iradianța luminii solare a variat între 3.400 și 6.400 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Deși aceste prime teste au fost făcute în condiții statice, în viitor se intenționează efectuarea experimentelor în condiții de mobilitate. Pentru scenariul de față, transmțătorul VLC a fost montat în partea din spate a unui vehicul. **Figura 4.12** ilustrează configurația experimentală pentru testarea în aer liber. În privința distanței de comunicație, fiecare test a început de la o distanță de 5 m între vehicule, distanța crescând treptat până în punctul în care rata erorilor de bit a fost peste limita a 10^{-6} .

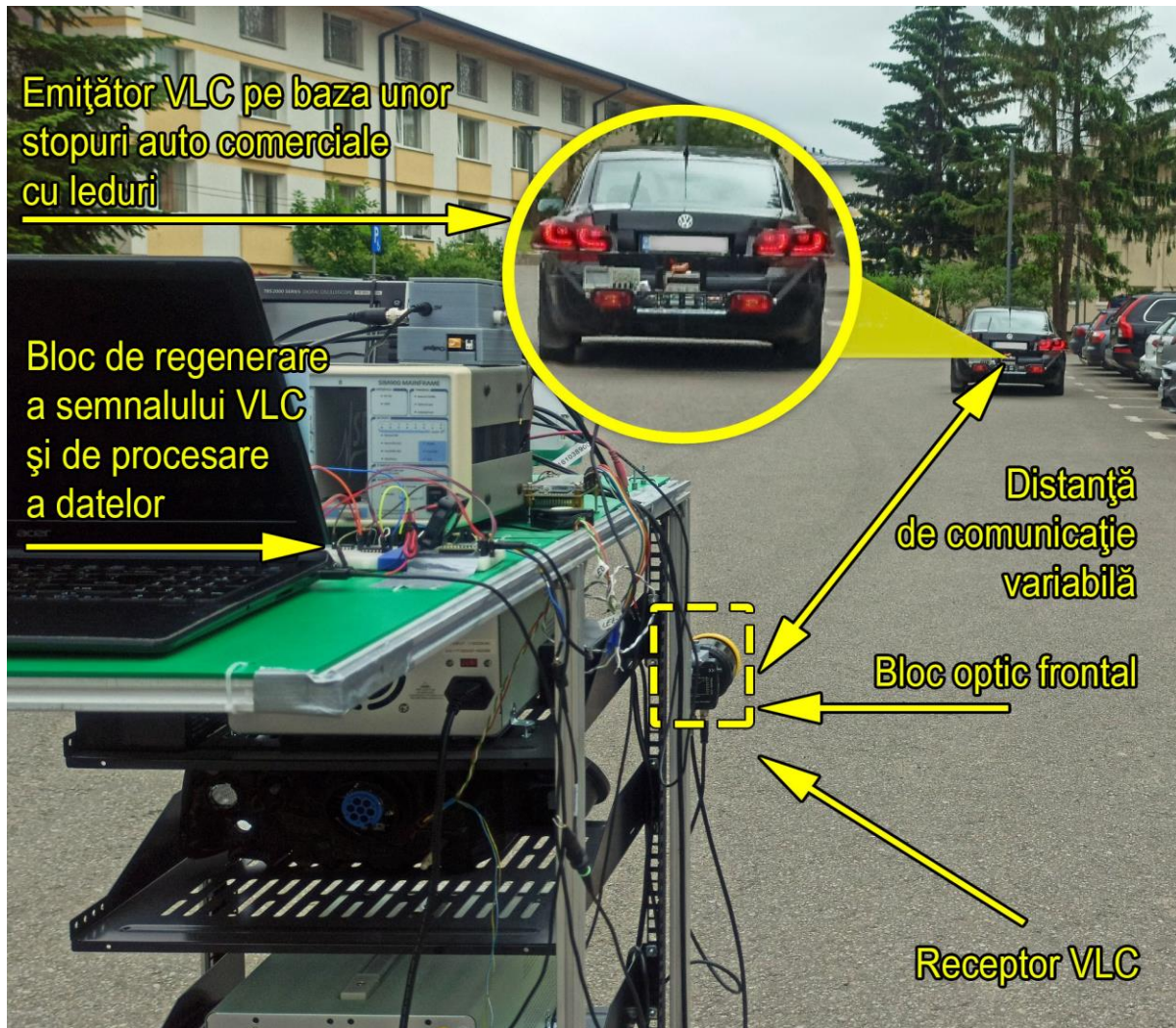


Figura 4.12. Sistemul experimental de testare VLC pentru creșterea distanței de comunicație V2V, bazată pe supracreșterea amplitudinii impulsurilor de curent prin ledurile emițătorului și scăderea proporțională a factorului de umplere [68].

Datele experimentale prezentate în **Tabelul 4.4** confirmă viabilitatea conceptului propus. Rezultatele arată o creștere graduală a distanței de comunicație pe măsură ce factorul de umplere scade pas cu pas și amplitudinea impulsurilor de curent prin leduri crește proporțional. După cum se poate observa, această metodă a permis prototipului VLC pentru vehicule să-și extindă limita de asigurare a unui BER $<10^{-6}$ de la 12 la 27 de metri, pe baza unei scăderi a factorului de umplere de cinci ori.

Tabelul 4.4. Rezultatele experimentale în mediu exterior pentru creșterea distanței de comunicație pe baza supracreșterii amplitudinii impulsurilor de curent prin ledurile lămpilor de poziție.

Modulație	Rata [kb/s]	BER	Condiții ambiante	Emisie optică [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	Curent mediu [mA]	Factor de umplere	Distanța V2V [m]
VPPM modificat	10	$<10^{-6}$	Lumina zilei: 3.400-6.400 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	$\cong 13.4$	150	50%	12 m
						40%	14 m
						30%	16 m
						20%	20 m
						10%	27 m

5. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DEZVOLTĂRI VIITOARE

5.1. Concluzii generale și contribuții personale

Lucrarea de față vine cu o serie de contribuții teoretice și practice care demonstrează îndeplinirea obiectivelor stabilite.

Contribuțiile și rezultatele cercetării au fost diseminate la nivel național și internațional, în reviste și conferințe dedicate domeniului Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale într-un număr de **24 de lucrări științifice** (dintre care **13** sunt indexate Web of Science), după cum urmează:

- 2 în reviste **Q1**, 1 ca prim autor, indexate WoS;
- 7 în reviste **Q2**, 3 ca prim autor, indexate WoS;
- 5 în conferințe ISI/IEEE Explore, indexate WoS;
- 8 în conferințe ISI/IEEE Explore fără a fi (încă) indexate WoS;
- 1 capitol de carte la editura Springer;
- 1 cerere de brevet.

Contribuții teoretice

Din punct de vedere teoretic, lucrarea de față a urmărit analizarea câtorva direcții principale:

✓ s-a făcut o analiză a stadiului actual de cercetare și dezvoltare în domeniul comunicațiilor optice neghidate, cu scopul identificării principalelor tehnologii ce pot oferi o aplicabilitate practică în domeniul comunicațiilor vehiculare;

Publicații:

1. **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, pp. 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ISEEE48094.2019.9136155>

2. M. Dimian, E. Zadobrischi, A.-M. Căilean, **C. Beguni**, S.-A. Avătămăniței, and P. Pașcu, "Digital transformation of the transport sector towards Smart and Sustainable Mobility," in L.-I. Cioca, L. Ivascu, F.-G. Filip, B. Doina, (eds) Digital Transformation. Intelligent Systems Reference Library, vol. 253, Springer, Cham, pp. 215-237, Apr. 2024.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-55952-5_11

✓ s-a prezentat arhitectura tehnologiei VLC cu caracteristicile necesare în vederea integrării unor funcții suplimentare, inclusiv VLR, cu avantajele și punctele slabe identificate, în vederea utilizării în aplicații vehiculare potrivite pentru creșterea siguranței rutiere cu prototipul propus;

✓ s-a studiat efectul nealinierii vehiculelor asupra comunicațiilor prin lumină vizibilă;

Publicație:

3. S.-A. Avătămăniței, **C. Beguni**, A.-M. Căilean, M. Dimian, and V. Popa, "Evaluation of Misalignment Effect in Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communications: Experimental Demonstration of a 75 Meters Link," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3577, May 2021.
<https://doi.org/10.3390/s21113577>

✓ s-a analizat comportamentul canalului VLC și s-au făcut simulări care să indice modul în care variază raportul semnal-zgomot la care aceste sisteme vor fi expuse atunci când distanța dintre automobile crește;

✓ s-a făcut analiza și determinarea compatibilității tehnicilor de localizare cu utilizarea în sisteme VLC destinate aplicațiilor rutiere;

✓ s-a studiat creșterea rezistenței la zgomot și s-a propus un amplificator transimpedanță cu etaj diferențial potrivit pentru aplicații vehiculare;

Publicații:

4. **C. Beguni**, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței 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. <https://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108928>

5. **C. Beguni**, A. Done, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, "Experimental demonstration of a visible light communications system based on binary frequency-shift keying modulation: A new step toward improved noise resilience," Sensors, vol. 23, no. 11, p. 5001, May 2023. <https://doi.org/10.3390/s23115001>

✓ s-a analizat posibilitatea creșterii distanței de comunicație prin lumină cu tehnica supracreșterii curentului prin leduri proporțional cu scăderea factorului de umplere;

Publicație:

6. S.-A. Avătămăniței, A.-M. 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. <https://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108964>

✓ s-a analizat posibilitatea de implementare a funcției de măsurare a distanței printr-o metodă inovativă, prin care se combină tehnica de *fingerprinting* cu tehnica de estimare a distanței prin includerea erorii de deplasare a timpilor la tranziția de prag;

✓ s-au extins studiile anterioare cu privire la posibilitatea implementării funcției de diminuare a intensității luminoase a emițătorului VLC cu menținerea legăturii de date;

Publicații:

7. A.-M. Căilean, **C. Beguni**, S.-A. Avătămăniței, M. Dimian, L. Chassagne, B. Béchadergue, "Experimental Evaluation of an Indoor Visible Light Communications System in Light Dimming Conditions," 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TELFOR59449.2023.10372674>

8. **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. (Q1 Journal - ISI Impact factor 2021-2022 = 3,576) <https://doi.org/10.3390/s21134446>

✓ s-a analizat modul în care se poate realiza integrarea unor funcții suplimentare în cadrul unui sistem VLC, cum ar fi posibilitatea diminuării intensității luminoase fără pierderea legăturii de date și posibilitatea implementării măsurării distanței pe baza unui protocol VPPM modificat și a multiplexării TDM.

Contribuții practice

Teza de față vine cu următoarele contribuții practice:

✓ s-a validat experimental blocul de comunicație prin lumină vizibilă al prototipul VLC-R pentru *o distanță-record V2V de 185 m* în condițiile unei legături de date menținute cu un BER mai mic de 10^{-6} cu ajutorul unui far auto comercial cu leduri;

Publicație:

9. 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. <https://doi.org/10.1109/IPC48725.2021.9592878>

✓ s-a validat experimental blocul de comunicație prin lumină vizibilă al prototipul VLC-R pentru *o distanță-record I2V de 188 m* în condițiile unei legături de date menținute cu un BER mai mic de 10^{-3} cu ajutorul unui semafor comercial cu leduri;

Publicație:

10. A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, **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. <https://doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530174>

✓ s-a validat experimental blocul de comunicație prin lumină vizibilă al prototipul VLC-R pentru *prima dată* cu ajutorul *lămpilor de semnalizare ale unui indicator al trecerii de pietoni*, obținându-se *o distanță de comunicație I2V de 27 m în condiții de zi*, cu un BER mai mic de 10^{-3} și *o distanță de comunicație de 40 m în condiții de noapte*, cu un BER mai mic de 10^{-5} efectuându-se inclusiv teste în condiții identice cu cele din traficul real;

Publicații:

11. **C. Beguni**, E. Zadobrischi, S.-A. Avătămăniței and A.-M. Căilean, "Experimental Demonstration of a Visible Light Communications Crosswalk Assistance System," 2022 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania, 2022, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISETC56213.2022.10009985>

12. A.-M. Căilean, **C. Beguni**, S.-A. Avătămăniței, M. Dimian, and V. Popa, "Design, Implementation and Experimental Investigation of a Pedestrian Street Crossing Assistance System Based on Visible Light Communications," Sensors, vol. 22, no. 15, p. 5481, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22155481>

✓ s-a evaluat experimental performanța unei legături VLC cu prototipul implementat și s-a demonstrat pentru *prima dată* că poate susține *legături de date V2V până la 75 m cu ajutorul unor stopuri comerciale cu leduri*, cu un BER mai mic de 10^{-3} ;

✓ s-a evaluat experimental efectul nealinierii autovehiculelor și al distanței intervehiculare asupra calității comunicației, punându-se în evidență *importanța filtrului optic și a îngustării câmpului vizual* cu ajutorul colimatorului;

Publicații:

13. 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.

<https://doi.org/10.1109/ICAICST53116.2021.9497804>

14. A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, **C. Beguni**, "Driving Toward Connectivity: Vehicular Visible Light Communications Receiver with Adaptive Field of View for Enhanced Noise Resilience and Mobility," Sensors, Vol. 24, no. 9, p. 2814, Apr. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24092814>

✓ s-a validat experimental mecanismul de diminuare a intensității luminoase bazat pe supracreșterea curentului de impuls al ledurilor odată cu micșorarea factorului de umplere, având ca rezultat *o creștere a distanței de comunicație de până la 370% în condiții controlate și de până la 250% în condiții de mediu exterior*;

Publicații:

15. **C. Beguni**, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, A.-D. Potorac, "Increasing Vehicular Visible Light Communications Range Based on LED Current Overdriving: Experimental Demonstration in Outdoor Conditions," 2023 31st

Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1-4.
<https://doi.org/10.1109/TELFOR59449.2023.10372808>

16. C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, A.-D. Potorac, E. Zadobrischi, M. Dimian, "Increasing Vehicular Visible Light Communications Range Based on LED Current Overdriving and Variable Pulse Position Modulation: Concept and Experimental Validation," *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3656, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23073656>

✓ prin experimentele efectuate, s-a arătat că **prototipul VLC-R propus este capabil să măsoare distanța cu o marjă de eroare de patru ori mai mică** simultan cu transmiterea datelor la un BER sub 10^{-7} și cu funcția de diminuare a intensității luminoase la emisie activată, ceea ce demonstrează capabilitatea sistemului integrat VLC-R.

✓ din măsurătorile făcute, s-a constatat că **latența hardware a sistemului VLC-R este mai mică de 0,6 ms**, ceea ce demonstrează faptul că prototipul poate fi utilizat în aplicații de siguranță rutieră.

✓ s-a validat experimental funcționarea sistemului VLC inclusiv în interiorul unui autovehicul, prin intermediul luminii ambiante distribuite cu ajutorul unor fibre optice.

Publicații:

17. A.-M. Căilean, C. Beguni, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, M. Dimian, B. Bechadergue, L. Chassagne, "Introducing A New Paradigm in Visible Light Communications: Light Distribution With Optical Fibers," 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1-4.
<https://doi.org/10.1109/TELFOR59449.2023.10372695>

18. C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, R. Stoler, M. Dimian, V. Popa, B. Bechadergue, and L. Chassagne, "In-Vehicle Visible Light Communications Data Transmission System Using Optical Fiber Distributed Light: Implementation and Experimental Evaluation", *Sensors*, vol. 22, no. 18, Sep. 2022.
<https://doi.org/10.3390/s22186738>

Pe baza rezultatelor obținute, lucrarea de față demonstrează capacitatea tehnologiei VLC de a menține legături de date V2V și I2V fiabile, **îndeplinindu-se obiectivele trasate**.

Contribuții în domenii conexe

Activitatea de studiu făcută în cadrul programului de cercetare științifică a prezentat oportunități de deschidere către alte domenii de cercetare, care s-au concretizat prin publicarea unor lucrări pe teme conexe, după cum se poate observa mai jos:

19. A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, E. Zadobrischi, M. Dimian, "Lighting Efficiency: Using Visible Light Communications Technology for Enhanced Energy Management in Built Environment and Beyond," 2024 *International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, Romania, 2024.

20. A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, E. Zadobrischi, M. Dimian, V. Popa, "Visible light communications-based assistance system for the blind and visually impaired: Design, implementation, and intensive experimental evaluation in a real-life situation," *Sensors*, vol. 23, no. 23, p. 9406, Nov. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23239406>.

21. A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, "Design and Experimental Evaluation of a Visible Light Communications-Based Smart Backpack for Visually Impaired Persons' Assistance," 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TELFOR59449.2023.10372606>.

22. C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței and M. Dimian, "Improved Single-LED Pulse Oximeter Design Based on Multi-Wavelength Analysis," 2022 *International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 2022, pp. 119-123.
<https://doi.org/10.1109/DAS54948.2022.9786087>.

23. A. Lavric, **C. Beguni**, E. Zadobrischi, A.-M. Căilean, and S.-A. Avătămăniței, "A Comprehensive Survey on Emerging Assistive Technologies for Visually Impaired Persons: Lighting the Path with Visible Light Communications and Artificial Intelligence Innovations," *Sensors*. (în curs de evaluare)

24. A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, **C. Beguni**, E. Zadobrischi, E.-D. Lupu, M. Dimian "Intelligent backpack for visually impaired persons," Patent request nr. A/00757/23.11.2022, State Office for Inventions and Trademarks, Bucharest, Romania.

Implicarea în proiecte de cercetare din domeniul doctoral

În paralel cu cercetarea făcută în cadrul programului doctoral, am avut oportunitatea de a mă putea implica și într-o serie de proiecte de cercetare strâns legate de programul de cercetare științifică, după cum urmează:

P1 *Proiect PN III, "Dezvoltarea de sisteme adaptive de comunicații auto cu funcții de măsurare a distanței între autovehicule, bazat pe tehnologii prin lumină vizibilă" (AutoVLC-R), cod proiect PN-III-P3-3.1-PM-RO-FR-2019-0282, contract nr. 21BM/2019, perioada de derulare 16.07.2019—31.12.2020, partener Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - Université Paris-Saclay.* Acest proiect a reprezentat o uriașă oportunitate de a începe o colaborare fructuoasă în domeniul programului doctoral cu cercetători de top din cadrul instituției partenere Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines - Université Paris-Saclay, ca urmare deplasării efectuate în 2019 la Paris.

P2 *Proiect PN III, "Platformă hibridă de comunicații prin lumină vizibilă și realitate augmentată pentru dezvoltarea de sisteme inteligente de asistență și siguranță activă a autovehiculelor" (CARSafe), cod proiect PN-III-P3-1.2-PCCDI-2017-0917, contract nr. 21PCCDI/ 2018, perioada de derulare 01.2018—11.2022.* Proiectul a reușit să concentreze expertize și rezultate de excepție existente în 7 instituții din 5 regiuni de dezvoltare ale României pentru realizarea unei platforme hibride de comunicații prin lumină vizibilă și realitate augmentată pentru dezvoltarea de sisteme inteligente de asistență și siguranță activă a autovehiculelor. Am făcut parte din acest proiect în perioada august 2020 – iunie 2022.

P3 *Proiect PNRR III, "NetZeroCities – Centrul Național de Competență și soluții pentru dezvoltarea orașelor inteligente climatic Neutre" (NetZeroCities), cod 6/16.11.2022, contract de finanțare 760007/30/12.2022.* Fac parte din cadrul acestui proiect din mai 2023, NetZeroCities fiind proiectul care a câștigat competiția pentru dezvoltarea unicului Centru Național de Competențe în domeniul Orașelor Inteligente și Neutre Climatic, beneficiind de o finanțare de 6 milioane de euro.

P4 *Research Valorization Program 2.0 "Intelligent visible light communication technology for car active safety and driver assistance (IVLC)".* Echipa noastră a câștigat participarea în cadrul acestui program pe o perioadă de 10 luni în 2022, pentru a primi sprijin în tranziția rezultatelor cercetării noastre către piața de larg consum, prin consiliere personalizată, din partea unei echipe de mentori de top, cu sprijinul Agenției pentru Dezvoltare Regională Nord-Est și al Băncii Mondiale.

Implicarea în proiecte de cercetare din domenii conexe

P5 *Proiect "Excelență în cercetare avansată, leadership în inovare și brevetare pentru dezvoltarea universității și regiunii" (Excalibur), ID 392, contract nr. 18PFE din 16.10.2018.* Am colaborat în cadrul acestui proiect din decembrie 2019 până în septembrie 2020.

P6 *Proiect PNRR III, "Crearea și dezvoltarea Centrului de orientare, asociere și consiliere în cariera de cercetător pentru Regiunea de dezvoltare Nord-Est a României în*

cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava” (COACH USV), apel nr PNRR-III-C9-2022 – I10. Colaborez cu echipa din cadrul acestui proiect din septembrie 2023. COACH USV este un proiect de aproximativ 1 milion de euro, cofinanțat din PNRR, pentru înființarea și dezvoltarea singurului centru regional de consiliere în cariera de cercetător pentru Regiunea Nord-Est, asociat European Research Area Talent Platform.

P7 Proiect PN III, "Lumină pentru orbi: Sistem de asistență a persoanelor nevăzătoare bazat pe tehnologia comunicațiilor prin lumină vizibilă" (Light4Blind), cod proiect PN-III-P2-2.1-PED-2021-4233, contract nr. 692PED/24.06.2022, perioada de derulare 24.06.2022 – 26.06.2024. Am fost membru activ în cadrul acestui proiect pe toată durata desfășurării sale, fiind într-un domeniu conex strâns legat de activitatea desfășurată în cadrul programului de cercetare.

P8 Proiect "Monitorizarea microclimatului în tabouri electrice de JT și MT, cu transmiterea datelor la distanță" (Monit uCLIMAT), Partea I, nr. 2752/172/08.02.2021, 10.03.2021-30.04.2021. Fiind finanțat de o companie privată, acest proiect a reprezentat o oportunitate prin care am putut să extind colaborarea inclusiv cu mediul privat.

Rapoarte de cercetare

1. Cătălin Beguni, „Starea actuală a cercetării în domeniul comunicațiilor prin lumină vizibilă”, Referat 1, 2022.
2. Cătălin Beguni, „Contribuții la dezvoltarea sistemelor de măsurare a distanței între autovehicule”, Referat 2, 2023.
3. Cătălin Beguni, „Contribuții la dezvoltarea sistemelor de comunicații prin lumină vizibilă cu caracteristici de măsurare a distanței”, Referat 3, 2023.

Impactul rezultatelor cercetării

Cercetările publicate au obținut un număr total de **143** de citări, rezultând un **h-index de 7** conform raportului oferit de Google Scholar, 70 dintre citări fiind indexate și în ISI – Clarivate Web of Science.

5.2. Dezvoltări viitoare

Lucrările viitoare pe această temă se vor orienta spre evaluarea sistemului VLC-R cu funcții suplimentare pentru creșterea siguranței rutiere în situații reale de trafic. Astfel de experimente sunt extrem de complexe în ceea ce privește conectivitatea, siguranța și repetabilitatea măsurătorilor. Cercetarea pe acest subiect implică o evaluare experimentală intensivă a prototipului VLC-R în condiții mobile, cu sistemul instalat pe vehicule reale. În acest scop s-au pregătit bancuri de test ce pot fi montate pe autovehicule, în vederea efectuării testelor în condiții reale de trafic. Testele preliminare efectuate au arătat că sistemul este capabil să mențină o comunicație fiabilă în regim extraurban, experimentând pierderi ale pachetelor de date doar în situația unor viraje extrem de strânse, cum ar fi în cazul virajelor la stânga sau la dreapta în intersecțiile din mediul urban.

Încercarea de a aborda o provocare a sistemelor VLC-R (de exemplu, creșterea rezistenței la zgomotul optic) poate duce la înrăutățirea altor caracteristici. Abordarea unitară a tuturor dificultăților, propusă în [2], ar putea fi o soluție la această dilemă. Astfel, pe baza unei arhitecturi autoadaptive la mediu, s-ar putea analiza și seta în mod automat parametrii optimi (de exemplu, modulația, codarea, rata de transfer etc.) pentru obținerea performanței maxime. Mai mult, se impune și necesitatea ca receptorul să-și poată adapta parametrii interni (unghiul de vizibilitate, câștigul, tipul filtrului etc.) ca să optimizeze semnalul recepționat.

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam and Y. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819-9840, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2792419.
- [2] A. 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.
- [3] 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>
- [4] 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
- [5] A. Memedi and F. Dressler, "Vehicular Visible Light Communications: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, doi: 10.1109/COMST.2020.3034224.
- [6] A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, E. Zadobrischi, M. Dimian, "Lighting Efficiency: Using Visible Light Communications Technology for Enhanced Energy Management in Built Environment and Beyond," 2024 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2024.
- [7] Almadani, Y.; Plets, D.; Bastiaens, S.; Joseph, W.; Ijaz, M.; Ghassemlooy, Z.; Rajbhandari, S. Visible Light Communications for Industrial Applications—Challenges and Potentials. *Electronics* 2020, 9, 2157, doi:10.3390/electronics9122157.
- [8] World Health Organization, "Global status report on road safety 2023", Geneva, 2023.
- [9] M. Dimian, E. Zadobrischi, A.-M. Căilean, C. Beguni, S.-A. Avătămăniței, and P. Pașcu, "Digital transformation of the transport sector towards Smart and Sustainable Mobility," in L.-I. Cioca, L. Ivascu, F.-G. Filip, B. Doina, (eds) *Digital Transformation. Intelligent Systems Reference Library*, vol. 253, Springer, Cham, pp. 215-237, Apr. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55952-5_11
- [10] 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.
- [11] Y. H. Kim, W. A. Cahyadi and Y. H. Chung, "Experimental Demonstration of VLC-Based Vehicle-to-Vehicle Communications Under Fog Conditions," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 1-9, Dec. 2015, Art no. 7905309, doi: 10.1109/JPHOT.2015.2499542.
- [12] 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, 10.3390/s20113190.
- [13] Masini, B.M.; Bazzi, A.; Zanella, A. A Survey on the Roadmap to Mandate on Board Connectivity and Enable V2V-Based Vehicular Sensor Networks. *Sensors* 2018, 18, 2207, doi:10.3390/s18072207.
- [14] Zadobrischi, E.; Cosovanu, L.-M.; Dimian, M. Traffic Flow Density Model and Dynamic Traffic Congestion Model Simulation Based on Practice Case with Vehicle Network and System Traffic Intelligent Communication. *Symmetry* 2020, 12, 1172, doi:10.3390/sym12071172.
- [15] Marabissi, D.; Mucchi, L.; Caputo, S.; Nizzi, F.; Pecorella, T.; Fantacci, R.; Nawaz, T.; Seminara, M.; Catani, J. Experimental Measurements of a Joint 5G-VLC Communication for Future Vehicular Networks. *J. Sens. Actuator Netw.* 2020, 9, 32, doi:10.3390/jsan9030032.
- [16] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications. IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011), 23 April 2019; pp. 1-407, doi:10.1109/IEEESTD.2019.8697198.
- [17] M. Cole, H. Clayton and K. Martin, "Solid-State Lighting: The New Normal in Lighting," in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 109-119, 2015. doi: 10.1109/TIA.2014.2328790
- [18] A. Sevincer, A. Bhattarai, M. Bilgi, M. Yuksel, and N. Pala, "LIGHTNETS: Smart lighting and mobile optical wireless networks—A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 4, pp. 1620–1641, 4th Quart., 2013.
- [19] K. T. Ho, R. Chen, G. Liu, C. Shen, J. Holguin-Lerma, A. A. Al-Saggaf, T. K. Ng, M. S. Alouini, J. H. He, and B. S. Ooi, "3.2 Gigabit-per-second Visible Light Communication Link with InGaN/GaN MQW Micro-photodetector," in *Optics express*, 26(3), 3037–3045, 2018, <https://doi.org/10.1364/OE.26.003037>

- [20] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 4th Quart., 2015.
- [21] N. Saha, M. S. Ifthekhar, N. T. Le and Y. M. Jang, "Survey on optical camera communications: challenges and opportunities," in *IET Optoelectron.*, vol. 9, no. 5, pp. 172-183, 10 2015. doi: 10.1049/iet-opt.2014.0151
- [22] H. Haas, L. Yin, Y. Wang and C. Chen, "What is LiFi?," in *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, 15 March 15, 2016. doi: 10.1109/JLT.2015.2510021
- [23] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network," *Opt. Express*, vol. 23, no. 2, pp. 1627–1637, Jan. 2015.
- [24] D. Miras, L. Maret, M. Maman, M. Laugeois, X. Popon and D. Ktenas, "A high data rate LiFi integrated system with inter-cell interference management," 2018 IEEE Wireless Commun. and Net. Conf. (WCNC), Barcelona, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/WCNC.2018.8377249
- [25] Y. Wang, D. A. Basnayaka, X. Wu and H. Haas, "Optimization of Load Balancing in Hybrid LiFi/RF Networks," in *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 4, pp. 1708-1720, April 2017. doi: 10.1109/TCOMM.2017.2654249
- [26] C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, R. Stoler, M. Dimian, V. Popa, B. Bechadergue, and L. Chassagne, "In-Vehicle Visible Light Communications Data Transmission System Using Optical Fiber Distributed Light: Implementation and Experimental Evaluation", *Sensors*, vol. 22, no. 18, Sep. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22186738>.
- [27] A.-M. Căilean, C. Beguni, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, M. Dimian, B. Bechadergue, L. Chassagne, "Introducing A New Paradigm in Visible Light Communications: Light Distribution With Optical Fibers," 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1-4.
- [28] S. Yu, O. Shih, H. Tsai, N. Wisitpongphan and R. D. Roberts, "Smart automotive lighting for vehicle safety," in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 12, pp. 50-59, December 2013. doi: 10.1109/MCOM.2013.6685757
- [29] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*. Boston, MA, USA: Artech House, 2006.
- [30] Y. Zhuang and N. El-Sheimy, "Tightly-coupled integration of WiFi and MEMS sensors on handheld devices for indoor pedestrian navigation," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 1, pp. 224–234, Jan. 2016.
- [31] S. A. S. Mohamed, M. Haghbayan, T. Westerlund, J. Heikkonen, H. Tenhunen and J. Plosila, "A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97466-97486, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929133.
- [32] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?" *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, Mar. 15, 2016.
- [33] Kahn, J.M.; Barry, J.R. Wireless infrared communications. *Proc. IEEE* 1997, 85, 265–298, doi:10.1109/5.554222.
- [34] Căilean, A.M.; Cagneau, B.; Chassagne, L.; Dimian, M.; Popa, V. Novel Receiver Sensor for Visible Light Communications in Automotive Applications. *IEEE Sens. J.* 2015, 15, 4632–4639, doi:10.1109/JSEN.2015.2425473.
- [35] S.-A. Avătămăniței, C. Beguni, A.-M. Căilean, M. Dimian, and V. Popa, "Evaluation of Misalignment Effect in Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communications: Experimental Demonstration of a 75 Meters Link," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3577, May 2021.
- [36] M. F. Keskin, E. Gonendik, and S. Gezici, "Improved lower bounds for ranging in synchronous visible light positioning systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 23, pp. 5496–5504, Dec. 1, 2016.
- [37] 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.
- [38] Hussein, A.T.; Alresheedi, M.T.; Elmighani, J.M.H. 20 Gb/s Mobile Indoor Visible Light Communication System Employing Beam Steering and Computer Generated Holograms. *J. Lightwave Technol.* 2015, 33, 5242–5260, doi:10.1109/JLT.2015.2495165.
- [39] A.-M. Căilean, B. Cagneau, L. Chassagne, M. Dimian, and V. Popa, "Miller code usage in visible light communications under the PHY I layer of the IEEE 802.15.7 standard," in *Proc. 10th Int. Conf. Commun. (COMM)*, Bucharest, Romania, May 2014, pp. 1–4.
- [40] A.-M. Căilean, "Study, implementation and optimization of a visible light communications system. Application to automotive field.", PhD Dissertation, Systems Engineering Laboratory, Saint Quentin University of Versailles, France, 2014 / Department of Computers, Electronics and Automation, Stefan cel Mare University of Suceava, Romania, 2015.
- [41] B. Masini, A. Bazzi, and A. Zanella, "Vehicular Visible Light Networks for Urban Mobile Crowd Sensing," *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1177, Apr. 2018.
- [42] Căilean, A.-M.; Dimian, M.; Popa, V. Noise-Adaptive Visible Light Communications Receiver for Automotive Applications: A Step Toward Self-Awareness. *Sensors* 2020, 20, 3764, doi:10.3390/s20133764.

- [43] Li, B.; Quader, I.J.; Dempster, A.G. On outdoor positioning with Wi-Fi. *J. Glob. Position. Syst.* 2008, 1, 18–26.
- [44] Song, X.; Li, X.; Tang, W.; Zhang, W.; Li, B. A Hybrid Positioning Strategy for Vehicles in a Tunnel Based on RFID and In-Vehicle Sensors. *Sensors* 2014, 14, 23095-23118. <https://doi.org/10.3390/s141223095>.
- [45] T.-H. Do and M. Yoo, "An in-Depth Survey of Visible Light Communication Based Positioning Systems," *Sensors*, vol. 16, no. 5, p. 678, May 2016, doi: 10.3390/s16050678.
- [46] N. U. Hassan, A. Naeem, M. A. Pasha, T. Jadoon, and C. Yuen, "Indoor positioning using visible led lights: A survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 48, pp. 1–32, 2015 <https://doi.org/10.1145/2835376>.
- [47] Y. Almadani, "Visible Light Positioning Using Received Signal Strength for Industrial Environments," Manchester Metropolitan University, 2020.
- [48] M. F. Keskin, A. D. Sezer, and S. Gezici, "Localization via visible light systems," *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 6, pp. 1063–1088, Jun. 2018.
- [49] Vegni, A.M.; Biagi, M. An indoor localization algorithm in a small-cell ledbased lighting system. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sydney, Australia, 13–15 November 2012; pp. 1–7.
- [50] Hann, S.; Kim, J.H.; Jung, S.Y.; Park, C.S. White LED ceiling lights positioning systems for optical wireless indoor applications. In *Proceedings of the 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, Italy, 19–23 September 2010.
- [51] Jung, S.Y.; Hann, S.; Park, S.; Park, C.S. Optical wireless indoor positioning system using light emitting diode ceiling lights. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2012, 54, 1622–1626.
- [52] Yang, S.H.; Kim, D.R.; Kim, H.S.; Son, Y.H.; Han, S.K. Indoor positioning system based on visible light using location code. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, Hue, Vietnam, 1–3 August 2012; pp. 360–363.
- [53] Yang, S.H.; Kim, D.R.; Kim, H.S.; Son, Y.H.; Han, S.K. Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2013, 55, 1385–1389.
- [54] Yang, S.H.; Jeong, E.M.; Kim, H.S.; Son, Y.H.; Han, S.K. Visible light indoor positioning system based on gain difference between tilted multiple optical receivers. In *SPIE OPTO; International Society for Optics and Photonics: San Francisco, CA, USA*, 2013.
- [55] Yang, S.H.; Jeong, E.M.; Han, S.K. Indoor positioning based on received optical power difference by angle of arrival. *Electron. Lett.* 2014, 50, 49–51.
- [56] Yang, S.H.; Kim, H.S.; Son, Y.H.; Han, S.K. Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers. *J. Lightwave Technol.* 2014, 32, 2480–2485.
- [57] Liu, M.; Qiu, K.; Che, F.; Li, S.; Hussain, B.; Wu, L.; Yue, C.P. Towards indoor localization using visible light communication for consumer electronic devices. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Chicago, IL, USA, 14–18 September 2014; pp. 143–148.
- [58] R. Amsters, E. Demeester, P. Slaets, D. Holm, J. Joly and N. Stevens, "Towards Automated Calibration of Visible Light Positioning Systems," 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/IPIN.2019.8911756.
- [59] E. Torres-Zapata et al., "Implementation of a VLC-based indoor localization system: Implementation of a VLC-based indoor localization system," in *Trans. emerg. telecommun. technol.*, vol. 30, no. 2, p. e3498, 2019.
- [60] Motorways 2018. Available online: [eursosynthesis2018-motorways.pdf](https://www.eursosynthesis2018-motorways.pdf) (europa.eu) (accessed on 5 March 2021).
- [61] 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.
- [62] C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței 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.
- [63] P. Wright, K. B. Ozanyan, S. J. Carey and H. McCann, "Design of high-performance photodiode receivers for optical tomography," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 281-288, April 2005. doi: 10.1109/JSEN.2004.841869
- [64] Avătămăniței, S.A.; Căilean, A.-M.; Done, A.; Dimian, M.; Prelipceanu, M. 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* 2020, 20, 909, doi:10.3390/s20030909.
- [65] S. Franco, "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits", McGraw-Hill, 2002.

- [66] Noise Analysis in Operational Amplifier Circuits, Application Report SLVA043B, Texas Instruments, 2007.
- [67] C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, A.-D. Potorac, E. Zadobrischi, and M. Dimian, "Increasing Vehicular Visible Light Communications Range Based on LED Current Overdriving and Variable Pulse Position Modulation: Concept and Experimental Validation," *Sensors*, vol. 23, no. 7: 3656.
- [68] C. Beguni, A.-M. Căilean, S.-A. Avătămăniței, E. Zadobrischi, A.-D. Potorac, "Increasing Vehicular Visible Light Communications Range Based on LED Current Overdriving: Experimental Demonstration in Outdoor Conditions," 2023 31st Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2023, pp. 1-4.
- [69] Shi, X.; Sun, Y.; Tian, J.; Chen, M.; Liu, Y.; Xie, N.; Zhang, J. BER Performance Analysis of Non-Coherent Q-Ary Pulse Position Modulation Receivers on AWGN Channel. *Sensors* 2021, 21, 6102. <https://doi.org/10.3390/s21186102>
- [70] 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, doi: 10.3390/s21134446.
- [71] A.-M. Căilean, C. Beguni, S.-A. Avătămăniței, M. Dimian, and V. Popa, "Design, Implementation and Experimental Investigation of a Pedestrian Street Crossing Assistance System Based on Visible Light Communications," *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5481, Jul. 2022, doi: 10.3390/s22155481.
- [72] United Nations. Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions. Addendum 6: Regulation No. 7. Revision 5—Amendment 2. New York, USA, 24 February 2011.