



Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași



## Evaluarea performanțelor comunicațiilor în rețea pentru vehiculele interconectate

### Rezumat

Răzvan-Gabriel LAZĂR

Conducător de doctorat: prof. dr. ing. Constantin-Florin CĂRUNTU

IAȘI, 2024

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAŞI  
RECTORATUL**

Către \_\_\_\_\_

Vă facem cunoscut că, în ziua de **16.09.2024** la ora **09.00**, în Sala de Consiliu a Facultății de Automatică și Calculatoare (Bvd. Mangeron nr. 27, Iași), va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**“Evaluarea performanțelor comunicațiilor în rețea pentru vehiculele interconectate / Performance assessment of networked communications for interconnected vehicles”**

elaborată de domnul **ing. Răzvan-Gabriel Lazăr** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- |  |                        |
|--|------------------------|
| 1. <b>Prof.univ.dr.ing. Adrian Burlacu</b><br>Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași                           | Președinte             |
| 2. <b>Prof.univ.dr.ing. Constantin-Florin Căruntu</b><br>Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași                | Conducător de doctorat |
| 3. <b>Prof.univ.dr.ing. Ioan-Ștefan Sacală</b><br>Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București | Referent oficial       |
| 4. <b>Prof.univ.dr.ing. Honoriu Vălean</b><br>Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca                                      | Referent oficial       |
| 5. <b>Conf.univ.dr.ing. Ciprian-Romeo Comşa</b><br>Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași                      | Referent oficial       |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

**RECTOR,**  
**Prof.univ.dr.ing. Dan Cașcaval**



Secretar universitate,  
Ing. Cristina Nagîț

# **Evaluarea performanțelor comunicațiilor în rețea pentru vehiculele interconectate**

Răzvan-Gabriel Lazăr  
domeniul: Ingineria Sistemelor

Președinte  
comisie doctorat

Prof.univ.dr.ing. Adrian Burlacu  
(Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași)

Conducător  
de doctorat

Prof.univ.dr.ing. Constantin-Florin Căruntu  
(Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași)

Referenți oficiali

Prof.univ.dr.ing Ioan-Ştefan Sacală  
(Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA  
București)

Prof.univ.dr.ing. Honoriu Vălean  
(Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca)

Conf.univ.dr.ing. Ciprian-Romeo Comşa  
(Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași)

# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>1</b>
1.1	Motivația . . . . .	1
1.2	Descrierea problemei . . . . .	2
1.3	Structura tezei și contribuțiile . . . . .	2
1.4	Lista publicațiilor . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamente teoretice</b>	<b>5</b>
2.1	Sistem de transport intelligent . . . . .	5
2.2	Tehnologia retelelor vehiculare . . . . .	5
2.2.1	Arhitecturi și componente ale comunicației . . . . .	6
2.2.2	Tipuri de comunicatii vehiculare . . . . .	6
2.2.3	Modele de propagare în comunicatiile vehiculare . . . . .	6
2.3	Tehnologii de comunicație utilizate în aplicatiile vehiculare . . . . .	7
2.3.1	Comunicatie pe distanțe scurte dedicată (eng., dedicated short-range communication - DSRC) . . . . .	7
2.3.2	Tehnologii Wi-Fi . . . . .	7
2.3.3	Tehnologii C-V2X . . . . .	7
2.3.4	Comunicația prin lumină vizibilă (eng., visible light communication - VLC) . . . . .	8
2.3.5	Tipuri de mesaje pentru comunicațiile în rețea . . . . .	8
2.4	Metrici de evaluare a performanței comunicațiilor . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Tehnică de colectare a datelor în timp real pentru evaluarea indicatorilor de performanță a rețelei 5G</b>	<b>10</b>
3.1	Introducere . . . . .	10
3.2	Metodologia de colectare a datelor . . . . .	11
3.2.1	Configurația hardware . . . . .	11
3.2.2	Implementarea software . . . . .	11
3.3	Măsurători în timp real . . . . .	12
3.3.1	Măsurători dinamice . . . . .	12
3.3.2	Măsurători statice și validarea tehnicii împreună cu Orange România . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Evaluarea rețelelor 5G în scenarii de trafic urban</b>	<b>15</b>
4.1	Introducere . . . . .	15
4.2	Sisteme de comunicație vehiculară bazate pe 5G . . . . .	15
4.3	Testarea bazată pe simulare a comunicației 5G pentru intersecțiile conectate . . . . .	16
4.3.1	Scenariul de simulare pentru comunicația 5G . . . . .	16
4.3.2	Analiza fluxului de mesaje și rezultatele simulării . . . . .	16
4.4	Abordări simulate și practice pentru evaluarea fiabilității comunicației 5G pentru interfața Uu . . . . .	17

---

4.4.1	Evaluarea prin simulare . . . . .	18
4.4.2	Evaluarea prin măsurători din viață reală . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Simularea și evaluarea rețelelor de comunicație wireless ad-hoc pentru vehiculele interconectate</b>	<b>20</b>
5.1	Introducere . . . . .	20
5.2	Testarea comunicațiilor între vehiculele dintr-un pluton utilizând mediul TrueTime . . . . .	21
5.2.1	Rezultatele obținute prin simulare . . . . .	21
5.3	Evaluarea fiabilității comunicatiei de siguranță vehiculară bazată pe standardul DSRC . . . . .	22
5.3.1	Evaluarea congestionării canalului pentru comunicația de siguranță V2V în aplicații cu multiple plutoane . . . . .	22
5.3.1.1	Implementarea scenariului simurat . . . . .	22
5.3.1.2	Rezultatele obținute . . . . .	23
5.3.2	Impactul pierderii pachetelor de date asupra comunicației vehiculară de siguranță pentru plutoanele de vehicule conectate . . . . .	23
5.3.2.1	Scenariul de simulare . . . . .	23
5.3.2.2	Rezultatele obținute prin simulare . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Cadru conceptual de comunicație pentru plutoanele de roboți mobili bazat pe protocolul ZigBee</b>	<b>25</b>
6.1	Introducere . . . . .	25
6.2	CACC bazat pe comunicația ZigBee . . . . .	25
6.3	Platforma de testare pentru evaluarea experimentală . . . . .	26
6.4	Rezultatele obținute . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Concluzii</b>	<b>28</b>
7.1	Contribuții . . . . .	28
7.2	Directii viitoare de cercetare . . . . .	28
		29
	<b>Referințe (selectie)</b>	<b>29</b>

# 1

## Introducere

### 1.1 Motivăția

Creșterea utilizării vehiculelor a dus la creșterea accidentelor și a congestiilor de trafic. Controlul eficient al traficului și gestionarea drumurilor sunt esențiale pentru îmbunătățirea siguranței rutiere și a capacitații de trafic. Organizația mondială a sănătății (WHO) raportează peste 1,4 miliarde de vehicule la nivel mondial, cu 1,35 milioane de decese anuale din accidente rutiere, în special în rândul tinerilor [1]. Congestiile de trafic costă aproximativ 1 trilion de dolari anual, cauzând probleme economice, de mediu și de sănătate, cu emisii semnificative de  $CO_2$  [2]. Guvernele și producătorii dezvoltă sisteme de transport inteligente (ITS) pentru a aborda aceste probleme. Inovații precum semafoarele adaptive, planificarea avansată a rutelor și conducerea automată au ca scop îmbunătățirea siguranței și eficienței. Sistemele de siguranță actuale se bazează pe senzori la bord, dar performanța lor este limitată de nece-

sitatea unei linii de vedere directă (eng., line-of-sight - LOS) [3].

Sistemele de transport inteligente, utilizând retelele ad-hoc vehiculare (eng., vehicular ad-hoc network - VANET) și tehnologia vehicul-la-tot (eng., vehicle-to-everything - V2X), poate reduce semnificativ accidentele prin permiterea vehiculelor să partajeze date în timp real [4]. Studiile arată că avertismantele la timp pot preveni peste 60% din coliziunile între vehicule multiple [3]. Comunicațiile vehiculare îmbunătățesc funcționalitatea senzorilor și fluxul de trafic, oferind o mai bună conștientizare a mediului și măsuri proactive de siguranță. Tehnologiile cheie includ standardul IEEE 802.11p pentru comunicația cu latență redusă și tehnologia celulară V2X (eng., cellular V2X - C-V2X) pentru acoperire mai largă și integrare cu retelele 5G. Aceste tehnologii îmbunătățesc siguranța și eficiența rutieră prin suportul aplicațiilor în timp real, cum ar fi evitarea coliziunilor [5].

Vehiculele conectate și automate (CAV) revoluționează în continuare siguranța rutieră și gestionarea traficului prin integrarea senzorilor, învățării automate și comunicăției wireless. CAV-urile pot ajusta dinamic rutele, optimiza fluxul de trafic, reduce consumul de combustibil și emisiile. Adoptarea lor este de așteptat să reducă semnificativ congestiunea și accidentele [6].

Eficacitatea sistemelor de comunicație vehiculară depinde de stabilitatea legăturilor de comunicație,

care pot fi afectate de condițiile de mediu și sarcinile retelei. Comunicația fiabilă în timp real între vehicule, infrastructură și dispozitivele pietonilor este crucială pentru prevenirea accidentelor și asigurarea siguranței.

## 1.2 Descrierea problemei

Scopul evaluării performanței este de a obține un comportament de comunicare predictibil, o mai bună organizare a informațiilor transmise prin retea și o utilizare eficientă a resurselor de retea. Asigurarea calității serviciilor (QoS) pentru comunicațiile în retea implică mai multe provocări [7]:

- Factorii precum dispunerea străzilor, condițiile drumurilor, dimensiunea vehiculului, viteza și distanța afectează eficiența canalului wireless. Comunicația vehicul-la-vehicul (V2V) se confruntă cu probleme datorate vitezei vehiculului, obstacolelor și buclelor de rutare, reducând livrarea pachetelor de date și randamentul retelei.
- Mobilitatea ridicată a nodurilor duce la deconectări frecvente ale legăturilor și la partiziionarea rețelei.
- Implementarea limitată a unităților staționare de pe marginea drumului (eng., road-side unit - RSU) din cauza constrângerilor de cost afectează negativ QoS.
- Protejarea informațiilor critice de confidențialitate din noduri este crucială pentru transmiterea sigură a mesajelor și QoS.
- Algoritmii de rutare eficienți sunt necesari pentru transmiterea la timp și exactă a pachetelor de date.

Integrarea comunicațiilor în retea în cadrul vehiculelor interconectate prezintă provocări în ceea ce privește performanța, fiabilitatea și securitatea. Această teză își propune să evalueze sistematic performanța acestor retele abordând aceste provocări.

## 1.3 Structura tezei și contribuțiile

Această secțiune prezintă organizarea tezei și rezumă contribuțiile cheie ale cercetării.

**Capitolul 2** oferă o înțelegere de bază a conceptelor și tehnologiilor cheie pentru ITS și rețelele vehiculare.

**Capitolul 3** prezintă o metodologie pentru evaluarea performanței rețelei 5G prin măsurători de date în timp real.

**Capitolul 4** evaluează rețelele 5G pentru comunicațiile între vehiculele interconectate în medii de trafic urban.

**Capitolul 5** examinează simularea și evaluarea sistemelor de comunicații ad-hoc vehiculare pentru aplicații cooperative de platoane de vehicule.

**Capitolul 6** explorează un cadru conceptual de comunicație pentru platoanele de roboți mobili destinate aplicațiilor logistice din depozite.

**Capitolul 7** prezintă concluziile cercetării, rezumă contribuțiile principale și sugerează posibile direcții viitoare de cercetare.

## 1.4 Lista publicațiilor

Capitolul 3 conține rezultatele prezentate în:

- **R. G. Lazar**, A. V. Militaru, C. F. Caruntu, C. Pascal, and C. Patachia-Sultanoiu, “Real-time data measurement methodology to evaluate the 5G network performance indicators,” IEEE Access, 2023 (ISI, Q2, IF = 3.4).
- **R. G. Lazar**, A. V. Militaru, C. F. Caruntu and C. Patachia-Sultanoiu, “Performance analysis of 5G communication based on distance evaluation using the SIM8200EA-M2 module,” in 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, 2022 (ISI Proceedings).

Rezultatele prezentate în Capitolul 4 sunt publicate în:

- **R. G. Lazar** and C. F. Caruntu, “Comparative analysis between 4G LTE and 5G NR: An evaluation of cellular communications for V2X technology”, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics Section, vol. 69, no. 1, 2023, pp. 9-22.
- A. V. Militaru, **R. G. Lazar**, C. F. Caruntu, C. R. Comsa, and I. Bogdan, “Analysis of message flow transmissions for an inter-vehicle communication scenario,” in 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiești, Romania, 2022.
- **R. G. Lazar**, C. F. Caruntu, and C. Patachia-Sultanoiu, “Simulated and practical approach to assess the reliability of the 5G communications for the Uu interface,” in 14th International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, 2022.

Capitolul 5 se bazează pe următoarele publicații:

- **R. G. Lazar**, O. Pauca, A. Maxim, C. F. Caruntu, “Control Architecture for Connected Vehicle Platoons: From Sensor Data to Controller Design Using Vehicle-to-Everything Communication,” Sensors 23, no. 17: 7576, 2023 (ISI, Q2, IF = 3.4).
- **R. G. Lazar** and C. F. Caruntu, “Evaluation of Channel Congestion for V2V Safety Communication in Multiplatooning Applications,” International Symposium ELMAR, Zadar, Croatia, 2023 (ISI Proceedings).
- **R. G. Lazar**, A. V. Militaru, and C. F. Caruntu, “Impact of Data Packet Loss for DSRC Vehicular Safety Communication in Connected Vehicle Platoons,” in 28th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sinaia, Romania, 2023 (ISI Proceedings).
- **R. G. Lazar**, V. Varga, and C. F. Caruntu “TrueTime-based Analysis of a Distributed Generalized Predictive Control Architecture for CACC Systems,” in 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Iasi, Romania, 2021 (ISI Proceedings).
- C. F. Caruntu, V. Varga, and **R. G. Lazar**, “TrueTime Testing of Inter-Vehicular Communications for Cooperative Vehicles using Distributed Generalized Predictive Control,” in 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Bari, Italy, 2021 (ISI Proceedings).
- **R. G. Lazar** and C. F. Caruntu, “Simulator for the Automotive Diagnosis System on CAN using Vector CANoe Environment,” in 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2020, pp. 705–710 (ISI Proceedings).

Capitolul 6 se bazează pe:

- O. Pauca, **R. G. Lazar**, M. Postolache, C. F. Caruntu, “DMPC-based control solution for mobile robots platoon based on ZigBee communication,” Submitted to Computers and Electrical Engineering, 2024 (ISI, Q1, IF = 4).
- A. Maxim, O. Pauca, **R. G. Lazar**, C. M. Amarandei, C. F. Caruntu, “Cloud-Based DMPC Simulation for Autonomous Mobile Robot Platooning in Logistic Applications,” Accepted for the 28th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2024 (ISI Proceedings).
- O. Pauca, **R. G. Lazar**, A. Maxim, C. F. Caruntu, , “Coalitional Control for Mobile Robots Formation,” Accepted for the 28th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2024 (ISI Proceedings).

# 2

## Fundamente teoretice

Acest capitol descrie conceptele fundamentale necesare pentru a înțelege conținutul tezei, alături de o revizuire a noțiunilor conexe referitoare la subiect.

### 2.1 Sistem de transport intelligent

Sistemele de transport inteligente integrează tehnologii precum rețele de senzori, comunicații și învățare automată pentru a îmbunătăți siguranța rutieră și mobilitatea. Acestea își propun să rezolve problemele de trafic, cum ar fi accidentele, congestia și poluarea [8]. Componentele cheie includ:

- **Aplicațiile vehiculelor:** colectează și schimbă informații pentru localizare și identificare;
- **Infrastructura rutieră:** monitorizează și controlează traficul rutier;
- **Rețelele wireless:** facilitează comunicația între vehicule și infrastructură.

Implementarea ITS-urilor îmbunătățește siguranța rutieră, reduce congestia și crește eficiența călătoriilor [9]. Rețelele VANET joacă un rol vital, permitând o comunicație fiabilă între participanții la trafic în cadrul acestor sisteme.

### 2.2 Tehnologia rețelelor vehiculare

Rețelele vehiculare, esențiale pentru ITS, implică comunicații wireless între vehicule și infrastructură. Acestea se caracterizează prin mobilitate ridicată și topologie dinamică, susținând aplicații precum siguranța și optimizarea traficului [10]. Caracteristicile cheie ale acestor rețele includ:

- **Topologia și densitatea rețelei:** mobilitatea ridicată duce la schimbări frecvente ale topologiei și densități variabile;
- **Modelul și distribuția mobilității:** vehiculele se deplasează pe drumuri previzibile, influențând rutarea și aplicațiile;

- **Comunicația geografică:** utilizează zone geografice pentru comunicare, în loc de ID-uri fixe;
- **Scalabilitatea:** poate crește semnificativ, mai ales în zonele urbane, afectând proiectarea protocolului;
- **Capacități de procesare și energie:** vehiculele au putere și capacitați de calcul ridicate.

### 2.2.1 Arhitecturi și componente ale comunicației

Vehiculele echipate cu interfețe radio wireless pot comunica direct dacă sunt în raza de acțiune, sau prin intermediul nodurilor intermediare sau RSU-uri. Fiecare vehicul este echipat cu o unitate de bord (eng., on-board unit - OBU) și o unitate de aplicație (AU) pentru comunicare și execuția aplicațiilor. Retelele VANET includ, de asemenea, o autoritate de încredere (eng., trusted Authority - TA) pentru gestionarea securității rețelei și înregistrarea componentelor.

Arhitecturile VANET pot fi clasificate în trei tipuri [11]: *i*) arhitectură pur ad-hoc, *ii*) arhitectură pur celulară și *iii*) hibridă.

### 2.2.2 Tipuri de comunicații vehiculare

Tehnologia V2X este esențială, inclusiv comunicarea între vehicule și alte elemente de trafic. Astfel, V2X include patru moduri [4]:

- **Vehicul-la-vehicul (V2V):** comunicarea între vehiculele apropiate care împărtășesc date precum locația și viteza, îmbunătățind siguranța și eficiența;
- **Vehicul-la-infrastructura (V2I):** interacțiunea între vehicule și infrastructura rutieră, furnizând informații despre trafic, rute și condiții;
- **Vehicul-la-pieton (V2P):** comunicarea în timp real între vehicule și pietoni sau cicliști, îmbunătățind siguranța;
- **Vehicul-la-rețea (V2N):** conexiunea la servicii de rețea pentru alerte de trafic și optimizarea rutelor.

Comunicațiile vehiculare îmbunătățesc semnificativ siguranța rutieră, eficiența traficului și ajută aplicațiile de infotainment și serviciile publice.

### 2.2.3 Modele de propagare în comunicațiile vehiculare

Aceste modele sunt esențiale pentru optimizarea protocoalelor de comunicare și îmbunătățirea fiabilității rețelei în medii vehiculare dinamice. Modelele de propagare pot fi clasificate în modele deterministe și stocastice [12]:

1. **Modele deterministe:** aceste modele utilizează ecuații matematice precise pentru a reprezenta proprietățile fizice ale mediului și a prezice propagarea semnalului:
  - **Modelul Free-space:** presupune că undele radio se propagă fără obstacole, cu LOS direct între transmițător și receptor;
  - **Modelul Two-ray ground:** consideră atât semnalele directe, cât și cele reflectate de sol, oferind predicții mai precise pe distanțe mai lungi;
  - **Modelul Log-distance:** consideră factori suplimentari precum terenul și obstacolele, spre deosebire de modelul Free-space;

- **Modelul Ray tracing:** simulează propagarea undelor electromagnetice în medii complexe folosind principiile opticii geometrice.
2. **Modele stocastice:** aceste modele încorporează aleatoriu și proprietăți statistice pentru a ține cont de factorii de mediu imprevizibili care afectează propagarea semnalului:
- **Modelul Log-normal shadowing:** modelează variabilitatea puterii semnalului datorită factorilor de mediu aleatori;
  - **Modelul Rayleigh:** descrie distribuția magnitudinii semnalului în absența unei căi dominante LOS;
  - **Modelul Rice:** descrie amplitudinile semnalului cu o componentă dominantă LOS;
  - **Modelul Nakagami:** modelează estomparea în scenarii de propagare multi-cale, oferind flexibilitate față de modelele mai simple precum Rayleigh sau Rice.

## 2.3 Tehnologii de comunicație utilizate în aplicațiile vehiculare

Această secțiune examinează principalele protocoale de comunicație utilizate în aceste sisteme, detaliind principiile, capacitațile și aplicabilitatea acestora.

### 2.3.1 Comunicație pe distanțe scurte dedicată (eng., dedicated short-range communication - DSRC)

Acesta este un standard de comunicație wireless specific rețelelor vehiculare. Utilizează standardele IEEE și SAE, folosind IEEE 802.11p pentru straturile fizic (eng., physical - PHY) și control al accesului la mediu (eng., medium access control - MAC), și IEEE 1609.x pentru servicii de rețea și securitate. Standardele SAE J2735 și J2945.x definesc formatele mesajelor și cazurile de utilizare la nivelul aplicației. DSRC funcționează în banda de frecvență de 5.9 GHz, oferind comunicație bidirectională pentru interacțiunile V2V și V2I. Suportă latență mică, fiabilitate ridicată și viteze de transfer de date între 3 Mbps și 27 Mbps, acoperind aproximativ 1 km [13].

### 2.3.2 Tehnologii Wi-Fi

Wi-Fi, bazat pe familia de standarde 802.11, este utilizat pentru comunicațiile vehiculare datorită flexibilității, costului scăzut și vitezelor mari de transfer al datelor. Funcționează la 2.4 GHz și 5.4 GHz, cu viteze de transfer de la 11 Mb/s (802.11b) până la 1 Gb/s (802.11ac). Cel mai recent standard, Wi-Fi 6 (802.11ax), îmbunătățește performanța și abordează problemele congestionării. Wi-Fi 6 acoperă benzi de la 1 la 7.125 GHz, atingând viteze de Gb/s [14].

### 2.3.3 Tehnologii C-V2X

C-V2X integrează sistemele celulare cu rețelele V2X, utilizând standardele LTE-V2X și 5G NR-V2X. LTE-V2X suportă moduri atât pentru comunicația gestionată, cât și pentru cea directă, oferind viteze mari de transfer al datelor, latență mică și arii de acoperire extinse. 5G NR-V2X îmbunătățește capacitatea, vitezele și fiabilitatea, susținând cazuri avansate de utilizare precum aplicațiile cu plutoane și conducerea la distanță. C-V2X funcționează la aceeași frecvență ca DSRC, care este de 5,9 GHz [15].

### 2.3.4 Comunicația prin lumină vizibilă (eng., visible light communication - VLC)

VLC utilizează lumina vizibilă pentru comunicatiile V2V și V2I, bazându-se pe standardul IEEE 802.15.7. VLC oferă viteze mari de transfer al datelor, lătimi de bandă largi, securitate crescută și imunitate la interferențele electromagnetice și utilizează infrastructura de iluminat existentă [16].

### 2.3.5 Tipuri de mesaje pentru comunicațiile în rețea

Mesajele cheie sunt următoarele:

- **Mesajul de conștientizare cooperativă** (eng., cooperative awareness message - CAM): facilitează conducerea cooperativă prin difuzarea periodică a stării vehiculului (locație, viteză, direcție) către vehiculele din apropiere;
- **Mesajul decentralizat de notificare a mediului** (eng., decentralized environment notification message - DENM): informează despre evenimentele și urgențele de mediu, esențiale pentru siguranța în trafic;
- **Mesajul de siguranță de bază** (eng., basic safety message - BSM): transmit informații de bază de siguranță, cum ar fi poziția, viteză și direcția.

## 2.4 Metrici de evaluare a performanței comunicațiilor

Metricile de performanță oferă informații despre fiabilitatea, eficiența și calitatea comunicației:

1. **Metrici de fiabilitate:** aceste metrici evaluatează capacitatea sistemului de a livra mesaje în mod constant și sigur în condiții variate, susținând aplicații critice [17]:

- **Rata de livrare a pachetelor** (eng., packet delivery ratio - PDR):

$$PDR(i) = 1 - \frac{N_{Tx}(i)}{N_{TTx}}, \quad (2.1)$$

unde  $N_{Tx}(i)$  este numărul de pachete livrate cu succes de vehiculul  $i$ , iar  $N_{TTx}$  este numărul total de pachete trimise.

- **Rata de recepție a pachetelor** (eng., packet reception ratio - PRR):

$$PRR(i) = 1 - \frac{N_{Rx}(i)}{N_{TTx}}, \quad (2.2)$$

unde  $N_{Rx}(i)$  este numărul de pachete receptionate cu succes de vehiculul  $i$ , împărțit la numărul total de pachete trimise  $N_{TTx}$ .

- **Întârzierea medie de la sursă la destinație** (eng., average end-to-end (E2E) delay):

$$\text{E2EDelay} = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} (t_{Rx}, j - t_{Tx}, j), \quad (2.3)$$

unde  $t_{Tx}$  este momentul în care este generat pachetul  $j$ ,  $t_{Rx}$  este momentul în care acesta este receptionat, iar  $N_m$  este numărul total de pachete.

2. **Măsurători ale congestiei canalului:** aceste metrici evaluatează impactul încărcăturii traficului asupra performanței comunicației, în special în scenarii cu densitate ridicată de vehicule [18]:

- **Rata de ocupare a canalului (eng., channel busy ratio - CBR):**

$$CBR = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} \frac{t_{b,i}}{T}, \quad (2.4)$$

unde  $t_{b,i}$  și  $t_{i,i}$  reprezintă timpul în care canalul este ocupat sau liber pentru vehiculul  $i$ , iar  $N_v$  este numărul de vehicule.

- **Rata de pierdere a pachetelor (eng., packet loss rate - PLR):**

$$PLR(v_i, v_j, T) = 1 - \frac{N_{Rx}(v_i, v_j, T)}{N_{Tx}(v_i, v_j, T)}, \quad (2.5)$$

unde  $N_{Rx}(v_i, v_j, T)$  este numărul de pachete receptionate cu succes de  $v_j$ , iar  $N_{Tx}(v_i, v_j, T)$  este numărul total trimis de  $v_i$ .

- **Întârzierea între pachete (eng., inter-packet delay - IPD):**

$$IPD(v_i) = \frac{1}{N_{Rx}(v_i)} \sum_{k=2}^{N_{Rx}(v_i)} (t_{Rx}(v_i, k) - t_{Rx}(v_i, k-1)), \quad (2.6)$$

unde  $N_{Rx}$  este numărul total de receptii reușite, iar  $k$  și  $k-1$  reprezintă două receptii succesive de pachete trimise la timpul  $t_{Rx}$  și observate de vehicul  $v_i$ .

3. **Măsurători ale calității legăturii comunicatiei:** aceste metrii evaluatează stabilitatea și performanța legăturii de comunicație wireless între vehicule sau infrastructură [19]:

- **Indicator de putere a semnalului recepționat (eng., received signal strength indicator - RSSI):**

$$RSSI = P_{T_x} + G - P_L, \quad (2.7)$$

unde  $P_{T_x}$  este puterea semnalului transmis, iar  $P_L$  este pierderea de cale.

- **Puterea semnalului de referință recepționat (eng., reference signal received power - RSRP):**

$$RSRP = P_{R_x} - P_{ref}, \quad (2.8)$$

unde  $P_{R_x}$  este puterea măsurată a semnalului recepționat, iar  $P_{ref}$  este un nivel de putere de referință.

- **Calitatea semnalului de referință recepționat (eng., reference signal received quality - RSRQ):**

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}, \quad (2.9)$$

unde  $N$  este numărul de blocuri de resurse.

- **Raportul semnal-interferență-plus-zgomot (eng., signal-to-interference-plus-noise ratio - SINR):**

$$SINR = 10 \times \lg \left( \frac{P_s}{P_i + P_n} \right), \quad (2.10)$$

unde  $P_s$  este puterea semnalului,  $P_i$  este puterea interferenței, iar  $P_n$  este puterea zgomotului.

,

# 3

## Tehnică de colectare a datelor în timp real pentru evaluarea indicatorilor de performanță a rețelei 5G

Acest capitol prezintă o abordare practică pentru măsurarea datelor în timp real, esențială pentru evaluarea performanței rețelelor 5G. Au fost analizați diversi indicatori de performanță, precum acoperirea rețelei, puterea semnalului, raportul semnal-zgomot, viteza de transfer, calitatea canalului și puterea de transmisie, pentru a oferi o evaluare cuprinzătoare a capacitatilor rețelei 5G.

### 3.1 Introducere

Tehnologia 5G este mai complexă decât predecesoarele sale, fiind proiectată să conecteze o gamă largă de dispozitive, de la vehicule la infrastructuri inteligente, cu o securitate, acoperire și performanță îmbunătățite [20]. Aceasta oferă avantaje semnificative, inclusiv o capacitate spectrală crescută, rate de transfer mai mari, latență ultra-redusă, conectivitate masivă și robustețe, făcând evaluările de fiabilitate cruciale pentru o funcționare optimă.

Indicatorii cheie de performanță (KPI) pentru 5G, în special comunicatiile ultra-fiabile cu latență redusă, cer o fiabilitate ridicată, permitând eșecul a doar 0,001% din pachetele de 20 de bytes în termen de 1 ms. Acest nivel de fiabilitate este vital pentru aplicațiile critice, cum ar fi chirurgia la distanță și vehiculele autonome, unde orice intrerupere a rețelei ar putea avea consecințe grave. Prin urmare, rețelele 5G trebuie proiectate cu redundanță încorporată pentru a asigura un serviciu neîntrerupt. Până în 2024, se estimează că 5G va atinge 40% din populația globală, cu 1,9 miliarde de abonați [21]. Serviciile vehiculare, parte a comunicațiilor C-V2X, necesită KPI stricți pentru lățime de bandă, latență și fiabilitate. Standardul 5G NR introduce noi cazuri de utilizare, cum ar fi platoon-ul de vehicule și asistența avansată pentru șoferi, necesitând măsurători riguroase în timp real pentru validarea performanței.

Acest capitol prezintă o metodă practică pentru colectarea datelor din rețelele 5G folosind un har-

dware bazat pe platforma SIM8200EA-M2. Măsurările în timp real au fost efectuate în Iași, România, atât în mișcare (cu echipamentul instalat într-o mașină), cât și staționar (conectat la o singură stație de bază). Orange România a participat, permitând o comparație între rezultatele locale și cele furnizate de către furnizorul de rețea pentru a evalua fiabilitatea metodei.

## 3.2 Metodologia de colectare a datelor

Această secțiune detaliază metodologia de colectare a datelor, concentrându-se pe configurația hardware și implementarea software.

### 3.2.1 Configurația hardware

Pentru configurația hardware, prezentată în Fig. 3.1, s-a folosit modulul SIM8200EA-M2 și o placă de dezvoltare SIMCom SIM8200-M2-EVB pentru a se conecta la o rețea 5G. Modulul, a fost conectat la un laptop prin comunicare serială. Acesta suportă multiple benzi 5G NR, cu rate de transfer de date de până la 4 Gbps pentru downlink (DL) și 500 Mbps pentru uplink (UL). Modulul are șase interfețe pentru antene. Antenele ANT0-ANT4 gestionează transmisia și receptia semnalului, în timp ce ANT5 este folosită pentru GPS [22]. Programarea modulului implică utilizarea diferitelor comenzi AT și necesită o cartelă SIM compatibilă cu 5G.

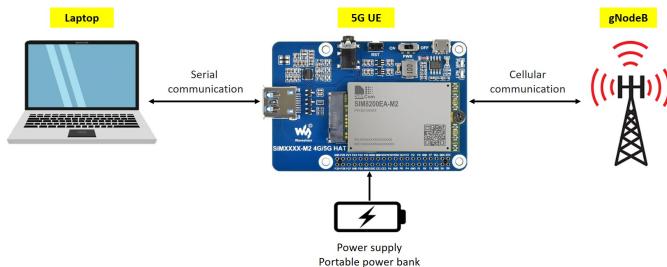


Figura. 3.1: Measurement setup overview

### 3.2.2 Implementarea software

Un script utilizând mediul Python a fost dezvoltat pentru a automatiza colectarea datelor. Scriptul se conectează la SIM8200EA-M2 și utilizează comenzi AT specifice pentru achiziția de date, precum:

- **AT+CNMP:** setează modul preferat, în funcție de infrastructura celulară disponibilă;
- **AT+CSQ:** returnează calitatea semnalului (RSSI, BER);
- **AT+CPSI:** oferă informații despre sistem (RSRP, RSRQ, SNR);
- **AT+CGPSINFO:** returnează detalii GPS;
- **AT+CNWINFO:** returnează informații despre rețea (eNBID, CQI).

Scriptul se conectează la portul serial AT, setează modul preferat, trimită comenzi la intervale de o secundă și salvează răspunsurile pentru analiză ulterioară.

### 3.3 Măsurători în timp real

Această secțiune prezintă măsurători în timp real pentru validarea tehnicii de colectare a datelor și evaluarea principalilor parametri ai rețelei 5G.

#### 3.3.1 Măsurători dinamice

Măsurările dinamice au fost efectuate pentru a evalua performanța rețelei 5G în condiții de mobilitate. Modulul SIM8200EA-M2, folosit ca și echipament pentru utilizator (eng., user equipment - UE), a fost montat într-o mașină care a parcurs un traseu predeterminat în Iași, România. UE-ul s-a conectat la diverse stații de bază 5G (gNodeB sau gNB) de-a lungul traseului, utilizând tehnologia 5G furnizată de Orange România. Traseul selectat a fost un bulevard principal din Iași, caracterizat printr-o densitate ridicată de gNB-uri și infrastructură urbană variată. Măsurările au utilizat o arhitectură hibridă a rețelei (eng., 5G non-standalone - NSA), unde standardul 5G NR a fost ancorat în rețeaua de bază 4G.

Modulul a operat în banda de frecvență n78 pentru comunicațiile 5G, care se întinde de la 3300 la 3800 MHz în intervalul de frecvență 1 (eng., frequency range 1 - FR1), folosind o lățime de bandă de 500 MHz. Pentru comunicatiile 4G, a operat în benzile E-UTRAN 3 și 7 ale 4G.

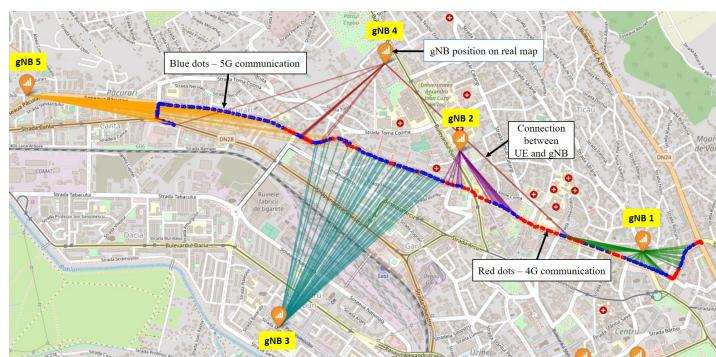


Figura. 3.2: Acoperirea comunicațiilor celulare

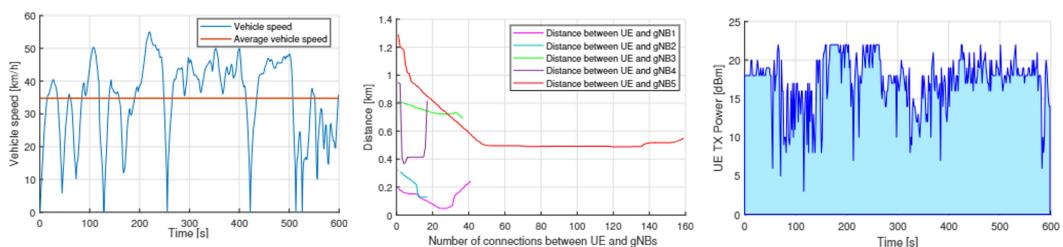


Figura. 3.3: Măsurători dinamice: a) viteza vehiculului - diagrama din stânga; b) distanțele între UE și gNB-uri - diagrama din centrul; și c) puterea de transmisie a modulului - diagrama din dreapta

Figura 3.2 ilustrează traseul parcurs, evidențiind tipurile de comunicații celulare (4G și 5G) și conexiunile la gNB-uri. Figura 3.3 prezintă viteza vehiculului, distanța dintre UE și gNB-uri și distribuția puterii de transmisie a modulului. Indicatorii de performanță pentru comunicațiile 4G—RSRP, RSRQ

și RSSI—sunt prezentate în Fig. 3.4. Acești indicatori evidențiază puterea semnalului, calitatea și interferențele. Valorile RSRP și RSSI urmează tendințe similare, cu RSRP constant mai mic decât RSSI. Diferențele mai mici între RSRP și RSSI indică, în general, un RSRQ mai bun și, prin urmare, o calitate mai bună a semnalului. Pentru comunicatiile 5G, indicatorii RSRP, RSRQ și SNR sunt prezentati în Fig. 3.5 și 3.6. Acești indicatori sunt corelați strâns; valorile mai mari ale SNR reflectă, în general, un RSRP mai bun și interferențe reduse, rezultând o calitate îmbunătățită a semnalului și, posibil, o viteză mai mare de transfer a datelor.

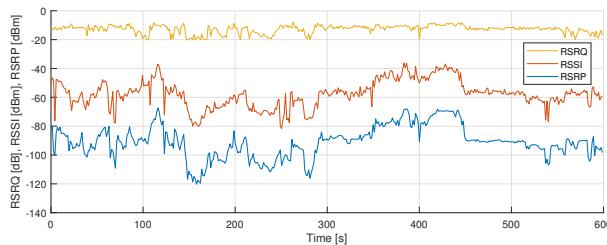


Figura. 3.4: Valorile indicatorilor RSRP, RSRQ și RSSI pentru comunicația 4G

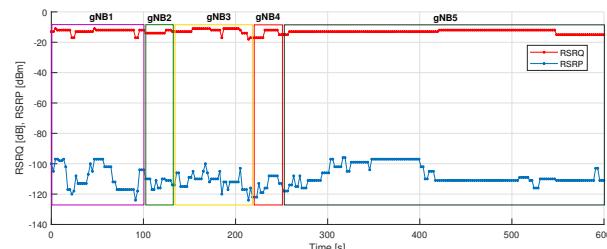


Figura. 3.5: Valorile indicatorilor RSRP și RSRQ pentru comunicația 5G

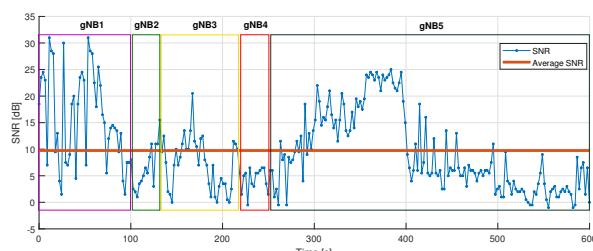


Figura. 3.6: Valorile indicatorului SNR pentru comunicația 5G

### 3.3.2 Măsurători statice și validarea tehnicii împreună cu Orange România

Măsurările statice au avut ca scop evaluarea performanței 5G prin conectarea UE la un singur gNB, UE-ul rămânând în aceeași poziție. Orange România a monitorizat comunicația UE-gNB prin rapoarte de trafic către celula conectată utilizând sisteme de suport operațional (eng., operations support systems - OSS), care urmăresc identitatea temporară a abonatului mobil (eng., temporary mobile subscriber identity - TMSI) pentru monitorizarea performanței.

Similar măsurătorilor dinamice, măsurătorile statice au fost realizate într-o zonă urbană, dens populată din Iași, România, cu UE-ul poziționat la 300 de m de gNB. Datele au fost colectate pe o perioadă de 35 de minute, de la 16:55 la 17:30, conexiunea realizându-se doar cu celula 145. Spectrul utilizat a fost același ca în cazul măsurătorilor dinamice. Figura 3.7 arată numărul de utilizatori 5G deserviți de celula 145 pe parcursul zilei. În perioada de măsurare statică, numărul de utilizatori a variat între 8000 și 8500, cu un procentaj de servire variind între 99,75% și 99,95%.

Figurile 3.8 și 3.9 compară valorile RSRP și SNR pentru comunicația 5G, obținute prin metoda de măsurare descrisă cu cele măsurate de Orange România. Alinarea strânsă a acestor valori indică fiabilitatea și acuratețea metodei de colectare a datelor.

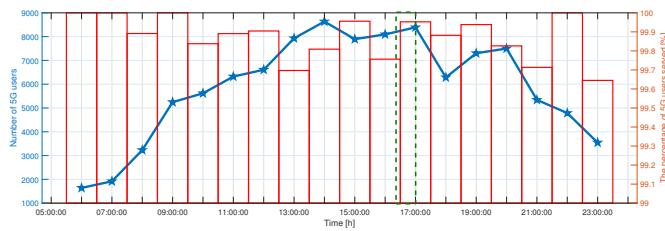


Figura. 3.7: Numărul de utilizatori 5G deserviți de celula 145

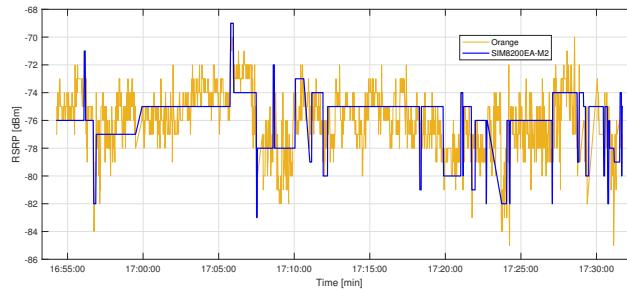


Figura. 3.8: Măsurarea comparativă a indicatorului RSRP

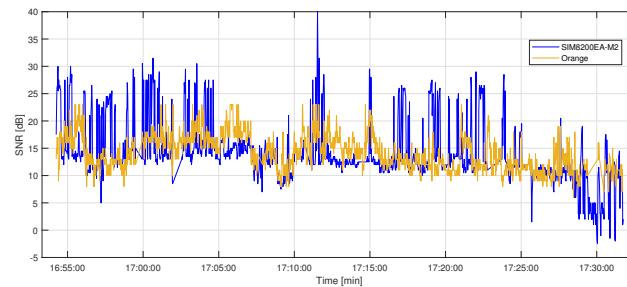


Figura. 3.9: Măsurarea comparativă a indicatorului SNR

# 4

## Evaluarea rețelelor 5G în scenarii de trafic urban

Acest capitol evaluatează rețelele 5G în medii de trafic urban, unde densitatea ridicată a vehiculelor și a infrastructurii prezintă provocări și oportunități unice.

### 4.1 Introducere

Pe măsură ce zonele urbane cresc și devin mai aglomerate, managementul tradițional al traficului întâmpină dificultăți în a gestiona numărul tot mai mare de vehicule, pietoni și alți participanți. Provocările moderne ale mobilității includ congestiunea constantă, intersecțiile aglomerate și accidentele frecvente implicant utilizatori vulnerabili ai drumului (eng., vulnerable road user - VRU). Pentru a aborda aceste probleme, cercetările în cadrul ITS-urilor vizează utilizarea tehnologiilor precum comunicatiile wireless, semafoarele sincronizate, rețelele VANET și conducederea autonomă pentru a îmbunătăți eficiența și siguranța transportului [23].

Tendințele mobilității urbane necesită o infrastructură conectată, iar 5G are potențialul de a satisface aceste nevoi. Pe măsură ce numărul utilizatorilor crește, rețeaua trebuie să asigure eficiență, continuitate și eficacitate pentru toți [24]. Se așteaptă ca 5G să conecteze o gamă largă de participanți la trafic, de la pietoni și șoferi cu smartphone-uri la vehicule și infrastructură cu conexiuni wireless. Acest capitol prezintă două cazuri de evaluare a performanței comunicațiilor 5G în scenarii urbane. Primul caz examinează comunicația într-o intersecție inteligentă, concentrându-se pe comunicarea directă V2V. Al doilea caz evaluatează comunicația între un UE și o gNB într-o zonă urbană cu un număr variabil de utilizatori conectați.

### 4.2 Sisteme de comunicație vehiculară bazate pe 5G

Tehnologia C-V2X se bazează pe două interfețe principale de acces radio [25]:

- **Interfața Uu:** este o interfață tradițională de rețea celulară care conectează terminalele printr-o stație de bază. Oferă o fiabilitate mai mare, latență mai mică și un debit mai mare, în special cu

170 de benzi de frecvență noi ale 5G NR, inclusiv mmWave. Această interfață este utilizată și pentru comunicațiile V2N, conectând vehiculele la servicii în cloud, în special pentru aplicațiile pe distanțe lungi;

- **Interfața PC5:** facilitează comunicarea directă între entitățile de trafic (vehicule, infrastructură și pietoni) fără o stație de bază, sprijinind comunicațiile V2V, V2I și V2P. Funcționează în banda ITS de 5,9 GHz pentru comunicatii pe distante scurte, de obicei în limita a 1 km, și incorporează solicitarea automată hibridă de repetare (eng., Hybrid automatic repeat request - HARQ) pentru o fiabilitate sporită a comunicațiilor.

### 4.3 Testarea bazată pe simulare a comunicației 5G pentru intersecțiile conectate

Această secțiune detaliază simularea unui scenariu de comunicație dispozitiv-la-dispozitiv (eng., device-to-device - D2D) bazat pe 5G într-o intersecție urbană folosind simulatorul Simu5G, urmată de o analiză a rezultatelor simulării, concentrându-se pe performanța comunicației între vehicule.

#### 4.3.1 Scenariul de simulare pentru comunicația 5G

O simulare a fost creată în Simu5G, implicând comunicația 5G într-o intersecție urbană, cu două stații de bază 5G și patru UE-uri configurate ca vehicule. Fig. 4.1 ilustrează scenariul, cu vehiculele roșii (0, 2) ca emițătoare și vehiculele albastre (1, 3) ca receptoare.

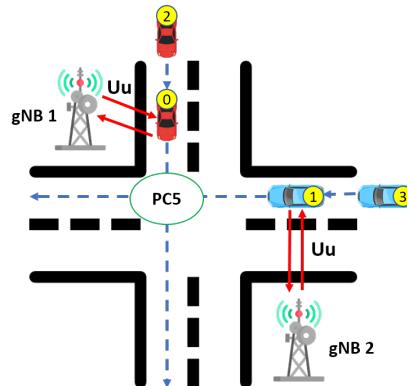


Figura. 4.1: Scenariul ales pentru simulare

Mașinile comunică inițial cu stații de bază, dar trec la comunicația D2D pe măsură ce se apropiu una de cealaltă, simulând comunicația V2V și transmiterea în două salturi (UL și DL) prin gNB-uri.

#### 4.3.2 Analiza fluxului de mesaje și rezultatele simulării

Această subsecțiune analizează tranziția de la transmisia tradițională în două salturi la transmisia directă într-un singur salt între două vehicule. Deși scenariul implică patru vehicule, doar două—vehiculul 0 (emițător) și vehiculul 1 (receptor)—sunt analizate.

Scenariul se concentrează pe evaluarea calității canalului de comunicații și distanțele dintre vehicule și gNB-uri. Pentru comunicația D2D, se evaluatează și latența între vehicule. Fluxul de mesaje este împărțit în patru faze cheie:

- **Faza I:** În primele 30 de secunde, mașina 0 comunică cu gNB1, iar mașina 1 cu gNB2, folosind transmisia tradițională în două salturi (Fig. 4.2).
- **Faza II:** După 30 de secunde, așa cum este ilustrat în fig. 4.3, mașinile se apropiie, permítând comunicarea D2D pe măsură ce intră în aceeași celulă și se află la mai puțin de 30 de metri una de celală [26]. Ambele mașini comunică acum direct, atingând niveluri maxime de CQI (Fig. 4.7). În Fig. 4.8, se poate observa că latența în acest moment este de 13 ms.
- **Faza III:** După 36 de secunde, mașinile ies din aceeași celulă, ceea ce slăbește comunicația directă. Transmisia în două salturi completează SL pe măsură ce distanța crește (Fig. 4.4).
- **Faza IV:** Pe măsură ce distanța crește și mai mult, mașina 0 se conectează la gNB2, reluând comunicarea tradițională în două salturi, iar comunicația D2D începează (Fig. 4.5).

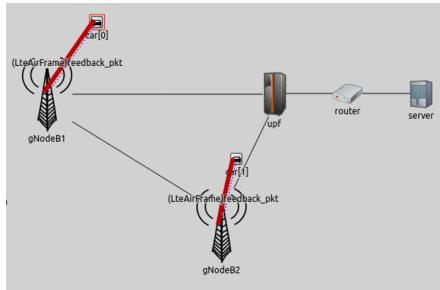


Figura. 4.2: Mașinile comunică cu cel mai apropiat gNB

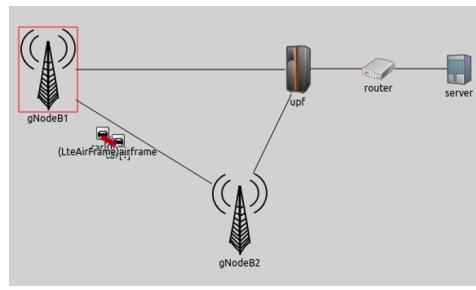


Figura. 4.3: Comunicație D2D între mașinile apropiate din aceeași celulă

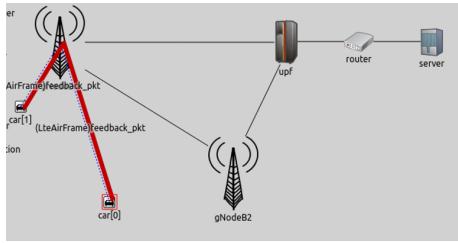


Figura. 4.4: Mașinile comunică cu cel mai apropiat gNB: mașina 0 cu gNB2, mașina 1 cu gNB1

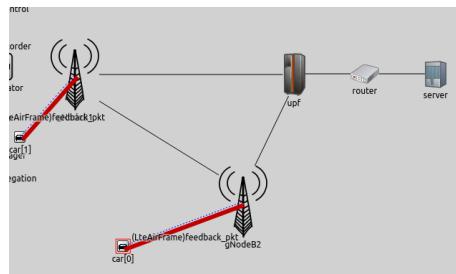


Figura. 4.5: Mașinile comunică cu cel mai apropiat gNB: mașina 0 cu gNB2, mașina 1 cu gNB1

#### 4.4 Abordări simulate și practice pentru evaluarea fiabilității comunicării 5G pentru interfața Uu

Evoluția rapidă la nivel global către o lume conectată, inclusiv IoT, orașe inteligente și vehicule conectate, necesită o comunicare 5G robustă. Reteaua radio de acces 5G (eng., radio access network - RAN)

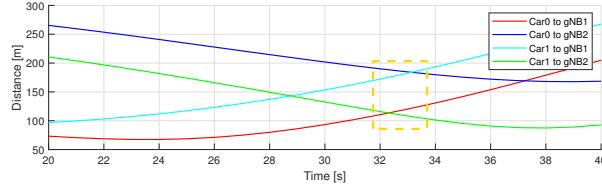


Figura. 4.6: Distanțele dintre vehicule și stațiile de bază

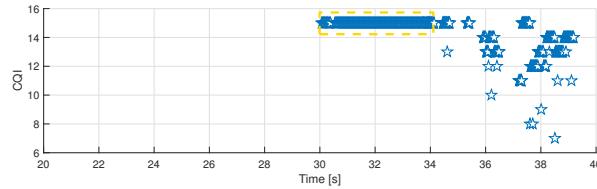


Figura. 4.7: Variația CQI în funcție de distanțele dintre vehicule și stațiile de bază

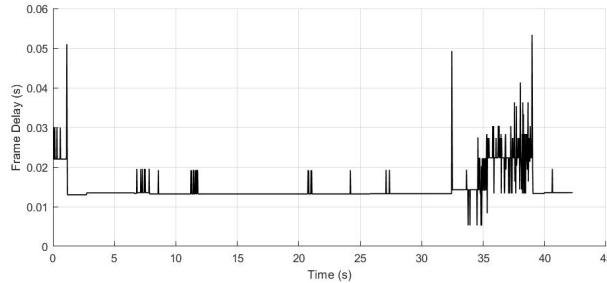


Figura. 4.8: Latența măsurată pentru comunicația D2D

este esențială pentru conectarea dispozitivelor la rețea centrală, susținând comunicarea de mare viteză, cu latență mică și capacitate mare. Această secțiune evaluatează fiabilitatea interfeței Uu în diferite condiții de încărcare a rețelei.

#### 4.4.1 Evaluarea prin simulare

Pentru acest caz se utilizează un mediu urban simulat pentru a evalua impactul diferențelor încărcării de utilizatori (50 și 100) asupra comunicației 5G între un UE și două gNB-uri plasate la 500 de metri distanță. Componentele simulării sunt prezentate în Fig. 4.9.

În Fig. 4.10 (a) sunt prezentate valorile SINR-ului pentru diferite numere de UE-uri conectate (50 și 100). Valorile pentru SINR sunt în general bune în ambele cazuri, cu o diferență de mai puțin de 10 dB. Figura 4.10 (b) afisează valorile pentru CQI, care arată variații minime între 50 și 100 UE-uri. Pentru 50, CQI-ul mediu este 14,53, comparativ cu 14,38 pentru 100. Figura 4.10 (c) arată că întârzierea E2E rămâne constantă la 5 ms, indiferent de numărul de UE-uri conectate.

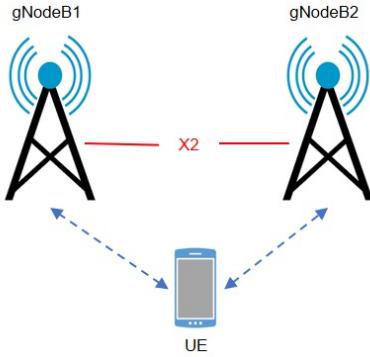


Figura. 4.9: Componentele simulării Simu5G

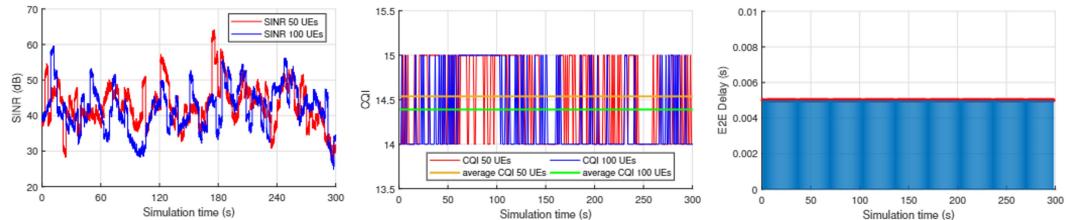


Figura. 4.10: Rezultate obținute: a) valorile SINR-ului pentru DL - diagrama din stânga; b) valorile CQI-ului pentru DL - diagrama din centru; și c) latență - diagrama din dreapta

#### 4.4.2 Evaluarea prin măsurători din viață reală

Testele practice au fost efectuate într-o zonă urbană densă folosind modulul SIM8200EA-M2, replicând scenariul de simulare. În timpul măsurătorilor, a fost trimis un set de comenzi AT cu o periodicitate de o secundă. Măsurările efectuate pe parcursul a 300 de secunde au dezvăluit variații mai semnificative și valori mai mici ale SINR-ului (Fig. 4.11 (a)) și CQI-ului (Fig. 4.11 (b)) comparativ cu simularea, din cauza factorilor de mediu și interferențelor din lumea reală. Valorile medii măsurate au fost de 8 pentru CQI și 11.8 dB pentru SINR.

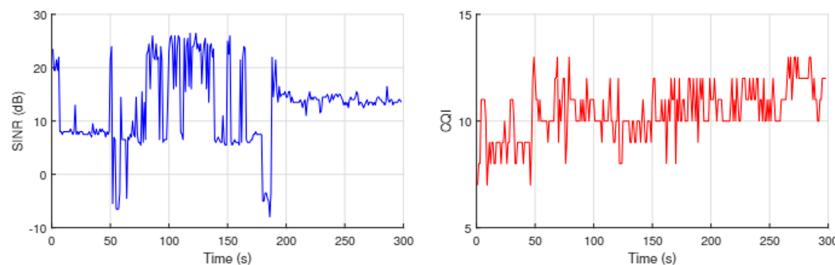


Figura. 4.11: Rezultate obținute: a) măsurarea indicatorului SINR - diagrama din stânga și b) măsurarea indicatorului CQI - diagrama din dreapta

# 5

## Simularea și evaluarea rețelelor de comunicație wireless ad-hoc pentru vehiculele interconectate

Acest capitol evaluatează sistemele de comunicație ad-hoc între vehicule pentru aplicațiile cu plutoane. Astfel, acesta se concentrează pe metrii esențiale precum fiabilitatea transmiterii datelor, latență și pierderea de pachete.

### 5.1 Introducere

Numărul crescut de vehicule și mobilitatea ridicată în intersecții au amplificat riscurile pentru pietoni și șoferi. Vehiculele moderne, echipate cu tehnologie avansată și comunicații wireless, beneficiază de o siguranță sporită, reducerea poluării și un confort mai mare. Comunicația între vehicule (eng., inter-vehicle communication - IVC) permite conducerea cooperativă și o mai bună gestionare a traficului. Aplicațiile IVC, cum ar fi functionalitatea controlul cooperativ adaptiv de croazieră (eng., Cooperative adaptive cruise control - CACC), ajută vehiculele să călătorească la viteze mai mari cu spații mai mici între ele, îmbunătățind capacitatea drumurilor, siguranța și eficiența combustibilului. Rețelele ad-hoc sustin aceste comunicații prin permiterea vehiculelor de a schimba mesaje de siguranță, control și mediu fără a se baza pe infrastructura fixă [27].

Acest capitol discută simularea comunicației ad-hoc pentru plutoanele de vehicule, concentrându-se pe IVC și fiabilitatea comunicațiilor de siguranță DSRC, abordând pierderea de pachete și congestia canalului.

## 5.2 Testarea comunicațiilor între vehiculele dintr-un platon utilizând mediul TrueTime

Această secțiune acoperă atât aspectele teoretice, cât și practice ale sistemelor de control al vitezei și distanței pentru vehiculele unui platon folosind comunicații V2V. Pentru modelul vehiculului, intrarea este forța de tracțiune, iar ieșirea este viteza. Pentru acest model se utilizează o funcție de transfer de ordinul întâi liniarizată, derivată din dinamica longitudinală [28].

În MATLAB-Simulink, mediul TrueTime simulează comunicațiile V2V utilizând standardele IEEE 802.11b/g. Simularea include parametri pentru transmiterea pachetelor, cum ar fi rata de transfer, puterea și probabilitatea pierderii mesajelor. Au fost utilizate trei blocuri TrueTime: *i*) TrueTime Kernel (pentru definirea nodurilor de rețea și a interfețelor de comunicație), *ii*) TrueTime Wireless Network (pentru configurarea rețelei V2V) și *iii*) TrueTime Battery (pentru definirea puterii initiale a unui nod).

În simulare, transmiterea pachetelor începe atunci când un nod detectează un mediu de comunicație liber timp de 50 µs. Dacă rata de eroare a bitelor este sub pragul de codare, mesajul este reconstruit.

### 5.2.1 Rezultatele obținute prin simulare

S-a simulațat un platon de șase vehicule (un lider și 5 următori) cu probabilități variabile de pierdere a mesajelor (5% și 10%). Întreaga arhitectură de control a fost implementată în Simulink, iar comunicația V2V între vehicule s-a bazat pe standardul IEEE 802.11b și a fost simulațat folosind TrueTime. Rezultatele au arătat că, deși pierderea de pachete a crescut ușor timpuri de răspuns (Figurile 5.1 și 5.2), performanța sistemului a rămas robustă. Erorile de distanță între vehicule (Figurile 5.3 și 5.4) au fost minime, iar sistemul a fost doar ușor afectat de rate mai mari de pierdere a mesajelor.

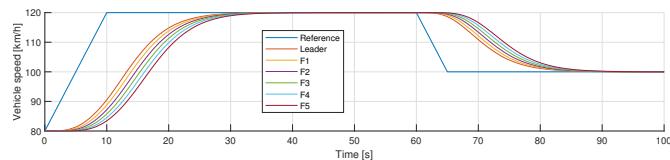


Figura. 5.1: Vitezele vehiculelor din platoon - pierderi de pachete de 5%

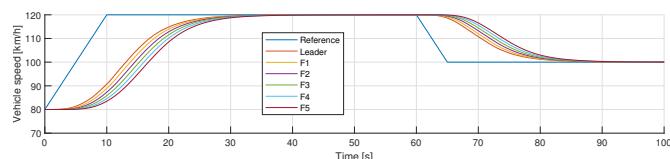


Figura. 5.2: Vitezele vehiculelor din platoon - pierderi de pachete de 10%

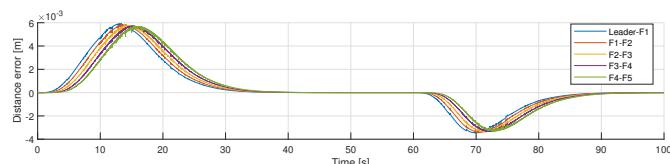


Figura. 5.3: Erorile de distanță - pierderi de pachete de date de 5%

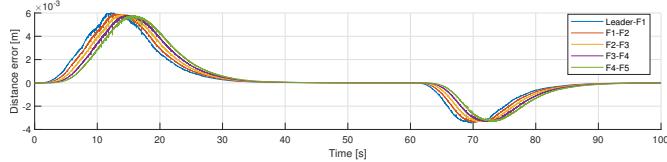


Figura. 5.4: Erorile de distanță - pierderi de pachete de date de 10%

### 5.3 Evaluarea fiabilității comunicației de siguranță vehiculară bazată pe standardul DSRC

Fiabilitatea standardului DSRC este esențială pentru o comunicație de siguranță vehiculară (eng., vehicular safety communication - VSC) eficientă în vehicule interconectate și cele din plutoane. Această secțiune analizează două aspecte cheie: congestionarea canalului pentru comunicația V2V pentru aplicațiile cu multiple plutoane și efectele pierderii pachetelor de date asupra comunicației în cadrul plutoanelor conectate. Scopul este de a aborda provocările care influențează performanța standardului DSRC. Experimentele au fost realizate utilizând simulatorul Plexe [29].

#### 5.3.1 Evaluarea congestiunii canalului pentru comunicația de siguranță V2V în aplicații cu multiple plutoane

În aplicațiile cu multiple plutoane, vehiculele formează plutoane care se urmăresc reciproc, îmbunătățind siguranța și capacitatea drumului prin sisteme cooperative de transport intelligent (C-ITS). Aceste sisteme se bazează pe difuzarea periodică a mesajelor folosind protocolul DSRC pentru comunicația V2V, cu semnale transmise la fiecare 0,1 secunde. Transmiterea mesajelor beacon într-o manieră statică (eng., static beaconing - STB) presupune difuzarea semnalelor la o rată fixă de 10 Hz, indiferent de congestiune. Congestionarea canalului, cauzată de densitatea mare a vehiculelor, poate duce la coliziuni ale pachetelor și pierderi de date, afectând fiabilitatea comunicației. Evaluarea precisă a capacitatii canalului este crucială pentru asigurarea fiabilității mesajelor de siguranță.

##### 5.3.1.1 Implementarea scenariului simulație

Simulatorul Plexe, integrat cu simulatorul de trafic Simulation of Urban MObility (SUMO), a fost folosit pentru a evalua nivelurile de congestiune. A fost modelat un scenariu de autostradă cu 4 benzi, cu plutoane de câte 8 vehicule fiecare, cum este ilustrat în Fig. 5.5. Fiecare bandă are o lungime de 10 km, în care au fost injectate uniform diferite numere de plutoane de 8, 12, 16, 24, 28, 32, 40, 48, 60 și 80. Plutoanele folosesc arhitectura CACC, menținând o distanță de 5 metri între vehicule și ajustând viteza în funcție de comportamentul liderului.

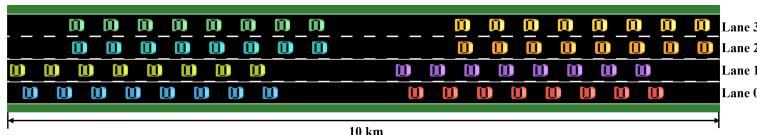


Figura. 5.5: Captură de ecran din SUMO a scenariului realist - aplicație multiple plutoane

Comunicația folosește tehnologia DSRC cu o frecvență de 5,89 GHz, și mesajele sunt transmise la o rată de 10 Hz cu o lungime de 100 de octeți și o rata de transfer de 6 Mbit/s. Configurația utilizează IEEE 802.11p pentru stratul PHY și IEEE 1609.4 pentru stratul MAC, concentrându-se pe canalul de control (CCH) pentru transmiterea informațiilor.

### 5.3.1.2 Rezultatele obținute

Această subsecțiune prezintă valorile indicatorii de performanță aleși pentru acest experiment.

Valorile CBR-ului, prezentate în Fig. 5.6 (a), cresc odată cu densitatea vehiculelor. Valorile de peste 0,6 indică o încărcare mare a canalului și potențial pentru coliziuni, întârzieri și pierderi de pachete. Pentru 480 și 640 de vehicule, valorile CBR depășesc 0,6, sugerând saturarea și congestiunea canalului.

Figura 5.6 (b) arată că PLR crește odată cu congestiunea. Pentru până la 40 de plutoane, PLR rămâne sub 20%. Pentru 60 și 80 de plutoane, PLR crește la 51% și, respectiv, 71,5%, afectând fiabilitatea aplicațiilor de siguranță și comunicația între vehicule.

Figura 5.6 (c) ilustrează că IPD rămâne la 0,1 s pentru 8 până la 32 de plutoane. Pentru 40, 48 și 60 de plutoane, IPD crește cu 13 ms, 15 ms și 27 ms, indicând o calitate redusă a aplicațiilor de siguranță. La 80 de plutoane, IPD ajunge la 0,177 s, reflectând o încărcare mare a canalului și o fiabilitate insuficientă pentru menținerea distanței între vehicule.

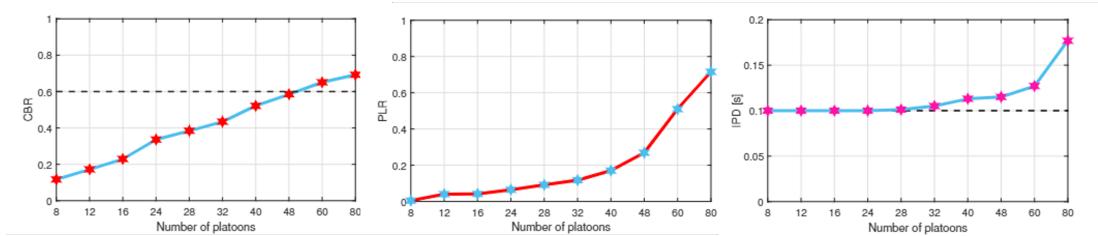


Figura. 5.6: Rezultate obținute în funcție de densitatea vehiculelor: a) valorile pentru CBR - diagrama din stânga; b) valorile pentru PLR - diagrama din centru și c) calorile pentru IPD - diagrama din dreapta

### 5.3.2 Impactul pierderii pachetelor de date asupra comunicației vehiculară de siguranță pentru plutoanele de vehicule conectate

Performanța plutoanelor de vehicule este evaluată în funcție de fiabilitatea comunicației, latență și capacitate, punând accent pe stabilitatea din platon, care se asigură că erorile de distanță nu se amplifică pe măsură ce se propagă. Pierderea de pachete de date poate întârzi sau întrerupe comunicația, ducând la probleme potențiale de siguranță, cum ar fi coliziunile. Această subsecțiune analizează modul în care pierderea de pachete de date afectează performanța plutoanelor folosind simulatorul Plexe.

#### 5.3.2.1 Scenariul de simulare

Simularea a implicat un platoon de 7 vehicule utilizând CACC. Fiecare vehicul a folosit tehnologia DSRC (IEEE 802.11p și IEEE 1609.4) cu o viteză de transmisie de 6 Mbit/s, trimițând mesaje de semnalizare de 200 de octeți la 10 Hz. Plutonul a circulat pe o bandă dedicată cu o distanță de 5 m între vehicule, iar fiecare vehicul având o lungime de 4 m.

Scenariul de simulare a inclus un caz de frânare de urgență, unde liderul oprește brusc de la 100 km/h cu o decelerare de  $8 \text{ m/s}^2$  și o frecvență a oscilațiilor de 0,2 Hz. Impactul pierderii de pachete de date a fost evaluat pentru rate de eroare a cadrelor de 10% și 20%.

### 5.3.2.2 Rezultatele obținute prin simulare

Această secțiune evaluează indicatorii cheie de performanță: distanța între vehicule și întârzierea din față. Figurile 5.7 și 5.8 arată distanțele între vehicule cu rate de pierdere a pachetelor de 10% și 20%, respectiv. Măsurările indică faptul că pierderea de pachete cauzează creșterea distanțelor între membrii platoonului, afectând în mod special capacitatea de frânare a primului vehicul urmărit (F1). Deși vehiculele următoare evită coliziunile, algoritmul de control se confruntă cu dificultăți în menținerea distanței impuse de 5 m din cauza pierderii de pachete. Figurile 5.9 și 5.10 ilustrează întârzierea din față pentru vehiculele următoare. Pe măsură ce pierderea de pachete crește, întârzierea crește de asemenea, cu o creștere medie notabilă a întârzierii de 10-20 ms la o rată de pierdere de 20% comparativ cu 10 ms la 10%.

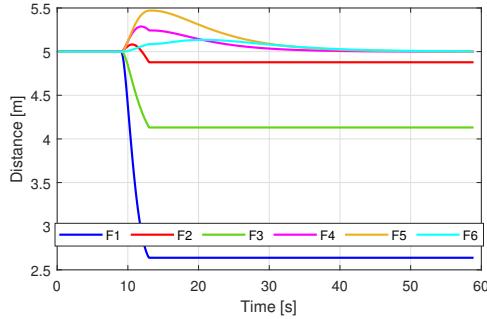


Figura. 5.7: Distanțele între vehicule - rată de pierdere a pachetelor de date de 10%

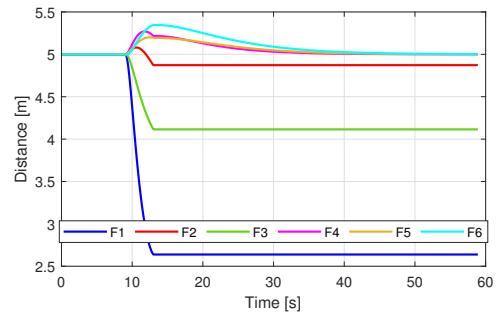


Figura. 5.8: Distanțele între vehicule - rată de pierdere a pachetelor de date de 20%

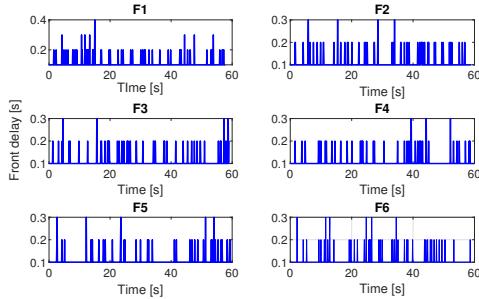


Figura. 5.9: Întârzierile din față - rată de pierdere a pachetelor de date de 10%

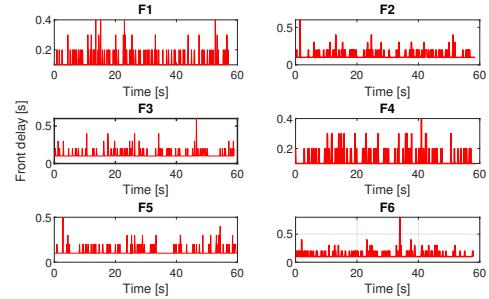


Figura. 5.10: Întârzierile din față - rată de pierdere a pachetelor de date de 20%

# 6

## Cadru conceptual de comunicație pentru plutoanele de roboți mobili bazat pe protocolul ZigBee

Acest capitol introduce un cadru conceptual de comunicație pentru plutoanele de roboți mobili, utilizând functionalitatea CACC printr-un algoritm de control DMPC și protocolul ZigBee pentru comunicația V2V. De asemenea, a fost dezvoltată o metodă practică pentru evaluarea experimentală a soluției de control propusă.

### 6.1 Introducere

În peisajul tehnologic în continuă evoluție de astăzi, roboții mobili autonomi (AMR) sunt integrați din ce în ce mai mult în mediile industriale, comerciale și domestice. Aceștia marchează o schimbare în domeniul roboticii, fiind capabili să navigheze și să opereze autonom în medii dinamice, folosind tehnologii avansate [30].

Acest capitol prezintă un cadru conceptual de comunicație pentru un pluton de roboți mobili conceput pentru aplicații logistice, în special în depozite. Soluția utilizează o aplicație CACC bazată pe un algoritm DMPC și standardul ZigBee pentru comunicația între roboți. Cadrul suportă multiple topologii de comunicație și a fost testat la scară de laborator, cu roboți care acționează ca noduri de rețea.

### 6.2 CACC bazat pe comunicația ZigBee

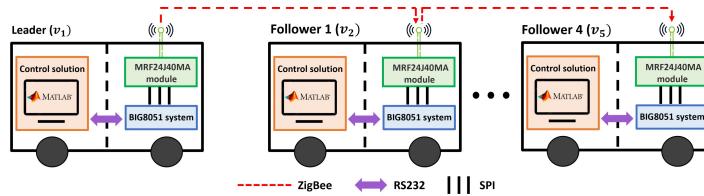
Protocoloalele de comunicație wireless sunt esențiale în arhitectura CACC pentru comunicarea V2V, susținând manevrele plutonului. Fiabilitatea și siguranța acestor procese depind de calitatea comunicației. Standardul de comunicație pentru aplicația propusă ar trebui să îndeplinească următoarele specificații:

*i)* rezistent la interferențe și fiabil, dar rentabil; *ii)* scalabil, cu un consum redus de energie și ușor de implementat; *iii)* latență redusă și rate de date adecvate; și *iv)* distanțe medii de comunicație.

ZigBee este o soluție adecvată pentru comunicarea V2V în platoane de机器人 mobili, oferind cost redus, fiabilitate, securitate și flexibilitate. Bazat pe IEEE 802.15.4, ZigBee operează în 3 benzi de frecvență (868 MHz, 915 MHz și 2450 MHz) pe 27 de canale radio. Suportă rate de date de până la 250 kbps, intervale de transmisie de 10-100 metri și o latență sub 140 ms [31].

### **6.3 Platforma de testare pentru evaluarea experimentală**

Configurația experimentală utilizează microsistemul BIG8051, antena MRF24J40 și mediul MATLAB. Fig. 6.1 prezintă configurația: *i*) Mediul MATLAB simulează dinamica robotilor și CACC, *ii*) BIG8051 și MRF24J40 gestionează comunicația între roboti prin ZigBee, iar *iii*) UART și RS232 gestionează comunicația între MATLAB și BIG8051. Configurarea simulează un pluton cu un lider și patru urmăritori. Fiecare robot transmite predicția de viteză pe baza topologiei de comunicație. Puterea de transmisie este fixă la 0 dBm. Algoritmii pentru lider și urmăritor sunt detaliați în algoritmii 1 și 2, cu  $k_f$  reprezentând timpul de simulare:



*Figura. 6.1: Operating principle of the proposed application*

**Algoritm 1:** Algoritmul pentru robotul lider

```
for k = 1; k ≤ kf; k = k + 1 do
    1. Trimite predicția vitezei de la MATLAB la BIG8051 prin RS232;
    2. BIG8051 trimite predicția prin ZigBee;
    3. Calculează comanda și actualizează stările.
```

**Algoritm 2:** Algoritmul pentru robotul urmăritor

**for**  $k = 1; k \leq k_f; k = k + 1$  **do**

- 1. Recepționează mesajele de la roboți vecini prin ZigBee;
- 2. Trimită mesajele la MATLAB prin RS232;
- 3. Trimite predicția vitezei de la MATLAB la BIG8051 prin RS232;
- 4. BIG8051 trimite predicția prin ZigBee;
- 5. Calculează comanda și actualizează stările.

## 6.4 Rezultatele obținute

Această secțiune prezintă rezultatele obținute în urma testării. Robotii trec de la parcare la un punct de încărcare, își reduc viteza pentru încărcare și apoi accelerează către punctul de depozitare. Fiecare robot are o dimensiune de 1 metru, cu modulul MRF24J40 amplasat central și o distanță de 0,5 metri între roboti, rezultând o distanță de 1,5 metri între modulele MRF24J40.

Fig. 6.2 arată că robotul lider urmează traiectoria sa, iar următorii mențin erori mici de distanță. Pe măsură ce plutonul se apropie de punctul de încărcare, vitezele scad pentru a facilita încărcarea, apoi cresc pe măsură ce se îndreaptă spre punctul de depozitare.

Performanța comunicației ZigBee a fost evaluată prin măsurarea indicatorului RSSI pentru distanțe de la 1,5 m până la 7,5 m. Măsurările, efectuate fără obstacole, arată ca RSSI-ul variază (Figura 6.3) de la -55,13 dBm la -69,63 dBm, indicând o putere suficientă a semnalului. Datele confirmă comunicația fiabilă pe toate distanțele, asigurând performanța eficientă a algoritmului CACC.

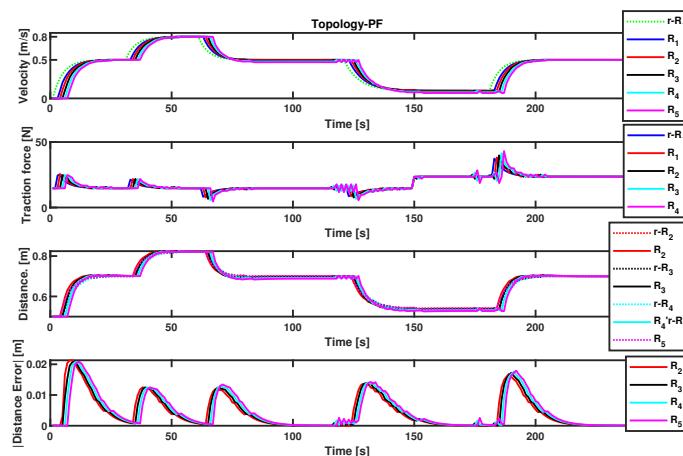


Figura. 6.2: Vitezele, forțele de tracțiune, distanțele, erorile de distanță ale robotilor - topologie PF

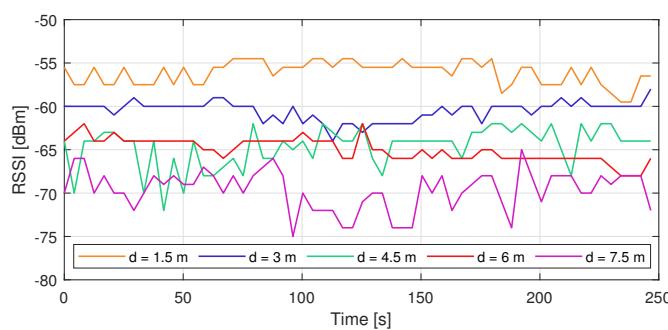


Figura. 6.3: Valorile RSSI-ului măsurate pentru fiecare distanță

# 7

## Concluzii

Acest capitol rezumă principalele contribuții și sugerează direcții viitoare de cercetare.

### 7.1 Contribuții

Principalele contribuții ale acestei teze sunt reprezentate de:

- Proiectarea și implementarea unui algoritm de achiziție de date în timp real pentru rețele 5G;
- Dezvoltarea unui cadru de comunicație pentru plutoane de roboți mobili folosind protocolul ZigBee;
- Evaluarea performanței a comunicației ad-hoc vehiculare pentru aplicații cu plutoane cooperative;
- Dezvoltarea unui scenariu de trafic urban simulant pentru evaluarea comunicării celulare pentru tehnologia V2X.

### 7.2 Direcții viitoare de cercetare

Această teză propune mai multe direcții de cercetare pornind de la cercetările realizate:

- Continuând cu Capitolul 3, direcțiile viitoare includ testarea retelelor 5G SA pentru streaming video și utilizarea modelului ray-tracing pentru analiza leagăturilor de comunicații urbane și a acoperirii;
- Capitolul 4 sugerează utilizarea simulatorului ns-3 pentru evaluarea mobilității pe autostrăzi folosind tehnologia C-V2X și implementarea unei platforme V2X open-source;
- Capitolul 5 prezintă direcții viitoare privind dezvoltarea strategiilor de control al congestiunii pentru comunicarea V2V și modelarea comunicării V2V pentru proiectarea unei aplicații de siguranță;
- Capitolul 6 propune direcții viitoare precum integrarea ZigBee cu alte tehnologii pentru un cadru de comunicație hibrid și îmbunătățirea coordonării plutonului de roboți mobili cu senzori avansați.

## Referințe (selectie)

- [1] W.H.O. Road traffic injuries. Accessed: 2024-06-10. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.
- [2] E. Struyf, C. Sys, E. Van de Voorde, and T. Vanelslander, “Calculating the cost of congestion to society: A case study application to Flanders,” *Research in Transportation Business & Management*, vol. 44, p. 100573, 2022.
- [3] E. C. Eze, S. Zhang, and E. Liu, “Vehicular ad hoc networks (VANETs): Current state, challenges, potentials and way forward,” in *20th International Conference on Automation and Computing*, Cranfield, UK, 2014, pp. 176–181.
- [4] **R. G. Lazar**, O. Pauca, A. Maxim, and C.-F. Caruntu, “Control Architecture for Connected Vehicle Platoons: From Sensor Data to Controller Design Using Vehicle-to-Everything Communication,” *Sensors*, vol. 23, no. 17, 2023.
- [5] G. Mozhdeh, “Reliable broadcasting in vehicular networks,” Ph.D. dissertation, University of Twente, 2018.
- [6] M. Sadaf, Z. Iqbal, A. R. Javed, I. Saba, M. Krichen, S. Majeed, and A. Raza, “Connected and Automated Vehicles: Infrastructure, Applications, Security, Critical Challenges, and Future Aspects,” *Technologies*, vol. 11, no. 5, 2023.
- [7] N. Malik, P. Nanda, X. He, and R. Liu, “Vehicular networks with security and trust management solutions: proposed secured message exchange via blockchain technology,” *Wireless Networks*, vol. 26, 08 2020.
- [8] H. Makino, K. Tamada, K. Sakai, and S. Kamijo, “Solutions for urban traffic issues by ITS technologies,” *IATSS Research*, vol. 42, no. 2, pp. 49–60, 2018.
- [9] Y. Lin, P. Wang, and M. Ma, “Intelligent Transportation System (ITS): Concept, Challenge and Opportunity,” in *IEEE 3rd international conference on big data security on cloud (bigdatasecurity)*, Beijing, China, 2017, pp. 167–172.
- [10] S. Hu, Y. Jia, and C. She, “Performance Analysis of VANET Routing Protocols and Implementation of a VANET Terminal,” in *International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*, Dalian, China, 2017, pp. 1248–1252.
- [11] I. Abbasi and S. Khan, “A Review of Vehicle to Vehicle Communication Protocols for VANETs in the Urban Environment,” *Future Internet*, vol. 10, p. 14, 2018.

- [12] R. Chandra and V. Singh, "Performance Evaluation of Radio Propagation Model For Vehicular Ad Hoc Networks Using VanetMobiSim and NS-2," *International Journal of Distributed and Parallel systems*, vol. 3, 2012.
- [13] **R. G. Lazar**, V. Varga, and C. F. Caruntu, "TrueTime-based Analysis of a Distributed Generalized Predictive Control Architecture for CACC Systems," in *25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Iasi, Romania, 2021, pp. 612–617.
- [14] N. Cen, J. Jagannath, S. Moretti, Z. Guan, and T. Melodia, "LANET: Visible-light ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 84, pp. 107–123, 2019.
- [15] M. H. C. Garcia, A. Molina-Galan, M. Boban, J. Gozalvez, B. Coll-Perales, T. Şahin, and A. Kousaridas, "A Tutorial on 5G NR V2X Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1972–2026, 2021.
- [16] Z. Liu, X. Han, Y. Liu, and Y. Wang, "D2D-Based Vehicular Communication With Delayed CSI Feedback," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52 857–52 866, 2018.
- [17] S. E. Carpenter and M. L. Sichitiu, "Analysis of packet loss in a large-scale DSRC field operational test," in *International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*, Paris, France, 2016, pp. 1–6.
- [18] R. Jacob, W. Anwar, G. Fettweis, and J. Pohlmann, "Exploiting Multi-RAT Diversity in Vehicular Ad-Hoc Networks to Improve Reliability of Cooperative Automated Driving Applications," in *IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, Honolulu, HI, USA, 2019, pp. 1–7.
- [19] A. A. El-Saleh, A. Alhammadi, I. Shaye, W. H. Hassan, M. S. Honnurvali, and Y. I. Daradkeh, "Measurement analysis and performance evaluation of mobile broadband cellular networks in a populated city," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 66, pp. 927–946, 2023.
- [20] **R. G. Lazar**, A.-V. Militaru, C.-F. Caruntu, C. Pascal, and C. Patachia-Sultanoiu, "Real-time data measurement methodology to evaluate the 5G network performance indicators," *IEEE Access*, 2023.
- [21] M. M. Ahamed and S. Faruque, "5G Network Coverage Planning and Analysis of the Deployment Challenges," *Sensors*, vol. 21, 2021.
- [22] **R. G. Lazar**, A. V. Militaru, C. F. Caruntu, and C. Patachia–Sultanoiu, "Performance analysis of 5G communication based on distance evaluation using the SIM8200EA-M2 module," in *26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, Romania, 2022, pp. 37–42.
- [23] M. Klanjcic, L. Gauvin, M. Tizzoni, and M. Szell, "Identifying urban features for vulnerable road user safety in Europe," *EPJ Data Science*, vol. 11, no. 1, p. 27, 2022.
- [24] A. Colakovic, B. Memic, K. Bakir, and N. Goran, "Improvement of urban mobility supported with IoT technologies," in *International Conference on Advances in Traffic and Communication Technologies (ATCT)*, Washington, U.S.A., 2022.

- [25] M. J. Khan, M. A. Khan, S. Malik, P. Kulkarni, N. Alkaabi, O. Ullah, H. El-Sayed, A. Ahmed, and S. Turaev, “Advancing C-V2X for Level 5 Autonomous Driving from the Perspective of 3GPP Standards,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023.
- [26] G. Nardini, A. Virdis, and G. Stea, “Modeling Network-Controlled Device-to-Device Communications in SimuLTE,” *Sensors*, vol. 18, 2018.
- [27] E. V. Filho, P. M. Santos, R. Severino, A. Koubaa, and E. Tovar, “Improving the Performance of Cooperative Platooning With Restricted Message Trigger Thresholds,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45 562–45 575, 2022.
- [28] A. Ulsoy, H. Peng, and M. Cakmaci, *Automotive control systems*. Cambridge University Press, 05 2012.
- [29] M. Segata, S. Joerer, B. Bloessl, C. Sommer, F. Dressler, and R. L. Cigno, “Plexe: A platooning extension for Veins,” in *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2014, pp. 53–60.
- [30] G. Fragapane, R. de Koster, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, “Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda,” *European Journal of Operational Research*, vol. 294, no. 2, pp. 405–426, 2021.
- [31] K. F. Haque, A. Abdelgawad, and K. Yelamarthi, “Comprehensive Performance Analysis of Zigbee Communication: An Experimental Approach with XBee S2C Module,” *Sensors*, vol. 22, no. 9, 2022.