



UNIVERSITY OF PETROȘANI
DOCTORAL SCHOOL
SYSTEM ENGINEERING DOMAIN

PhD THESYS

COORDINATOR:

Prof.univ.habil.dr.ing. Monica Leba

Ph.D. CANDIDATE:

ing.drd. Alin Costandoiu

PETROȘANI
2022

UNIVERSITY OF PETROȘANI
DOCTORAL SCHOOL

SYSTEM ENGINEERING DOMAIN

**RESEARCH ON THE INTEGRATION OF V2X (VEHICLE-
TO-EVERYTHING) COMMUNICATIONS IN VEHICLES
FOR TRAFFIC SAFETY IMPROVEMENTS**

**CERCETĂRI PRIVIND INTEGRAREA COMUNICAȚIEI
V2X ÎN AUTOVEHICULE ÎN VEDEREA ÎMBUNĂȚĂȚIRII
SIGURANȚEI ÎN TRAFFIC**

COORDINATOR:

Prof.univ.habil.dr.ing. Monica Leba

Ph.D. CANDIDATE:

ing.drd. Alin Costandoiu

PETROȘANI
2022

Abstract

Mobilitatea individuală și sistemele de transport moderne trec printr-o continuă transformare spre soluții mai reactive, mai inteligente și mult mai sigure. O gama largă de scenarii și noi aplicații își fac apariția în noul ecosistem al autovehiculelor, accelerate de cele mai recente tehnologii de comunicare fără fir. Dorința tot mai mare a indivizilor de a călători și de a face naveta a depășit limitele infrastructurilor de transport actuale și ale tehnologiilor wireless existente. Cu ajutorul inovațiilor emergente și al creșterii puterii de calcul, paradigma siguranței traficului poate fi abordată în mod eficient. În consecință, cercetarea și contribuția asupra V2X a părut o idee optimă pentru această teză de doctorat, având în vedere pregătirea autorului în domeniul telecomunicațiilor și al ingineriei sistemelor. Lucrarea compilează o imagine de ansamblu amplă și cuprinzătoare a ecosistemului actual, de la începuturile V2X până la cele mai recente specificații ale standardelor, care sunt încă în curs de dezvoltare de către organisme de standardizare consacrate, cum ar fi IEEE, ITU, 3GPP și 5GPP. Întrucât preocupările legate de siguranța traficului trebuie să fie abordate cât mai devreme posibil, teza propune un sistem hibrid de avertizare pentru notificarea șoferilor atunci când se apropie de un tronson rutier periculos. Mergând mai departe cu această idee, a fost propusă integrarea cu un sistem îmbunătățit de control al vitezei de croazieră (Cruise Control). Această soluție abordează subiectul îngrijorător al siguranței traficului prin utilizarea tehnologiilor actuale, cum ar fi infrastructura celulară existentă împreună cu GPS pentru poziționare precisă, combinată cu controlere Fuzzy și concepte de mașini cu stare finită (FSM). Teza pune bazele unui sistem de comunicare inteligentă V2X care ar putea fi extins și implementat la nivel național. Sunt propuse îmbunătățiri și optimizări suplimentare ale sistemului de avertizare fără fir, împreună cu sugestii de integrare a tuturor îmbunătățirilor propuse într-o unitate de control a sistemului performantă. Un astfel de sistem de comunicare inteligent ar putea fi implementat, de asemenea, în alte industrii verticale, pentru a crește eficiența și siguranța.

Cuprins

Chapter 1 - General introduction	Error! Bookmark not defined.
1.1 Background and motivation	Error! Bookmark not defined.
1.2 Thesis outline	Error! Bookmark not defined.
1.3 Research methodology	Error! Bookmark not defined.
Chapter 2 - A global overview of the vehicular networks	Error! Bookmark not defined.
2.1 V2X Communication introduction	Error! Bookmark not defined.
2.1.1 European standardization and industry efforts	Error! Bookmark not defined.
2.1.2 U.S. standardization and industry efforts	Error! Bookmark not defined.
2.1.3 Radio frequency resources harmonization	Error! Bookmark not defined.
2.2 IEEE 802.11p based communications	Error! Bookmark not defined.
2.2.1 European framework – Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)	Error! Bookmark not defined.
Bookmark not defined.	
2.2.2 US framework – Dedicated Short Range Communication (DSRC)	Error! Bookmark not defined.
Bookmark not defined.	
2.2.3 Message dissemination schemes	Error! Bookmark not defined.
2.2.4 Geolocation and clustering – GeoNetworking	Error! Bookmark not defined.
2.2.5 Security in VANET	Error! Bookmark not defined.
2.2.6 Commercial solutions	Error! Bookmark not defined.
2.3 3GPP Cellular-V2X based communications	Error! Bookmark not defined.
2.3.1 C-V2X Protocol stack description	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 Lower access layers overview: PHY & MAC	Error! Bookmark not defined.
2.3.3 Commercial solutions	Error! Bookmark not defined.
2.4 IEEE 802.11p vs. 3GPP Cellular V2X	Error! Bookmark not defined.
2.5 Evolution of radio access technologies for V2X communications	Error! Bookmark not defined.
not defined.	
2.5.1 IEEE 802.11bd: Evolution of IEEE 802.11p	Error! Bookmark not defined.
2.5.2 New Radio (NR) V2X: Evolution of C-V2X	Error! Bookmark not defined.
2.6 European ecosystem for future developments	Error! Bookmark not defined.
Chapter 3 - Hybrid V2I solution proposal	Error! Bookmark not defined.
3.1 Hardware components	Error! Bookmark not defined.
3.1.1 Cellular communication module and development kit	Error! Bookmark not defined.
defined.	
3.1.2 Arduino Uno – Development kit description	Error! Bookmark not defined.
3.2 Software components	Error! Bookmark not defined.
3.2.1 GNSS positioning and NMEA sentences	Error! Bookmark not defined.

3.2.2	MQTT protocol and applications	Error! Bookmark not defined.
3.3	Complete solution description	Error! Bookmark not defined.
3.3.1	Smart Road Side Unit (S-RSU) detailed block diagram	Error! Bookmark not defined.
3.3.2	Road Side Unit Warning System (RSU-WS) description	Error! Bookmark not defined.
Chapter 4 - Modeling the wireless channel and an enhanced cruise control unit – simulations and analysis		Error! Bookmark not defined.
4.1	Transmitter-Receiver model with a reflecting wall	Error! Bookmark not defined.
4.2	Simulation results for the “transmitter – receiver” proposed model	Error! Bookmark not defined.
4.3	Model-Based system design and model simulations	Error! Bookmark not defined.
4.4	Cruise Control design with Finite State Machine (FSM) and Fuzzy controller	Error! Bookmark not defined.
4.4.1	Warning type: Informative only (I)	Error! Bookmark not defined.
4.4.2	Warning type: Moderate danger (A)	Error! Bookmark not defined.
4.4.3	Warning type: Imminent danger (H)	Error! Bookmark not defined.
Chapter 5 - Personal contributions and future research proposals		Error! Bookmark not defined.
5.1	Theoretical and research methodology contributions	Error! Bookmark not defined.
5.2	Practical and solution-oriented contributions	Error! Bookmark not defined.
5.3	Solution validation through Octave and MATLAB simulations	Error! Bookmark not defined.
5.4	Conclusions and future directions of research	Error! Bookmark not defined.
5.5	Further ideas of implementation for the proposed solution	Error! Bookmark not defined.

Rezumat

Unul dintre pilonii importanți ai unei societăți moderne este mobilitatea. Mobilitatea persoanelor și transportul de bunuri sunt vitale pentru o economie prosperă. În consecință, volumul de trafic rutier crește progresiv, în special în zonele metropolitane. Mobilitatea individuală, în special, provoacă probleme prin crearea ambuteiajelor în trafic. Cele mai recente tehnologii de comunicare vor asigura o creștere sustenabilă și vor contribui la îmbunătățirea siguranței și eficienței traficului.

Îmbunătățirea sistemelor de transport realizată prin metode convenționale, cum ar fi construcția de noi drumuri sau extinderea capacității rutiere, își atinge adesea limitele în ceea ce privește constrângerile legate de spațiu și lipsa de acceptare din partea publicului. Principala consecință a acestor metode tradiționale este scăderea proporției de spațiu verde în zonele metropolitane. Din aceste motive, este absolut necesar să se studieze și să se înțeleagă cum se poate aborda acest subiect problematic. Societatea trebuie să progreseze și să evolueze prin controlul și gestionarea inteligentă a traficului, împreună cu sensibilizarea publicului și încercarea de a reduce apariția fenomenului de trafic cu un singur pasager în vehicul. O alternativă viabilă ar fi dezvoltarea conceptului de car-sharing și extinderea acestuia la vehiculele autonome, care ar aduce beneficii în ceea ce privește siguranța și eficiența traficului.

Împreună cu creșterea densității traficului, statisticile arată că un standard acceptabil de siguranță a traficului nu mai poate fi atins cu metodele tradiționale. Prin urmare, îmbunătățirea siguranței participanților la trafic, cum ar fi pasagerii autoturismelor, pietonii și bicicliștii, a devenit unul dintre principalele obiective ale autorităților guvernamentale din întreaga lume.

Inginerii și oamenii de știință studiază noi metode și tehnologii pentru a îmbunătăți fluiditatea traficului prin intermediul sistemelor inteligente și autonome de gestionare a traficului. Obiectivul acestei abordări nou dezvoltate, cunoscută pe scară largă sub denumirea de sistem de transport inteligent (STI), este de a spori siguranța traficului, de a evita aglomerațiile și de a crește eficiența generală a traficului. Digitalizarea integrală, pornind de la elementul unic, cum ar fi vehiculele personale, și mergând către toate elementele sistemului de transport, oferă baza generală pentru o evoluție continuă a conceptelor de transport existente. Plecând de la progresul în inginerie din industria auto către conducerea autonomă, împreună cu dezvoltarea sistemelor avansate de asistență a șoferului (ADAS) și adăugând sistemele de comunicare recent standardizate pentru participanții la trafic, stimulăm progresul sistemelor de transport tradiționale. Pentru a asigura un astfel de schimb fiabil de mesaje de siguranță, este necesar un sistem de comunicații mobile scalabil și adaptabil nevoilor viitoare. Acest sistem de comunicații ar trebui să fie capabil să funcționeze la parametri acceptabili chiar și în scenarii în care participanții la trafic se deplasează la viteze mari, în care acoperirea nu este optimă cu o singură tehnologie de acces radio și în care condițiile de acces la rețeaua de comunicații sunt dificile.

Astfel de cerințe, care nu au fost suportate în trecut de tehnologiile de comunicații mobile existente, definesc punctul de plecare pentru o evoluție a aplicațiilor de siguranță și deschid calea pentru conectivitatea omniprezentă în ecosistemul auto. Aceasta deschide ușa către un ecosistem celular pregătit pentru viitor, care converge cu industria auto. Convergența acestor sisteme este cunoscută sub numele de sistem de transport inteligent cooperativ (C-ITS).

Siguranța traficului și congestia rutieră sunt probleme majore în întreaga lume, în special în țările în curs de dezvoltare rapidă care nu și-au adaptat infrastructurile la cerințele actuale de trafic. Apariția transportului individual conduce la mari provocări în ceea ce privește gestionarea traficului și creșterea

impactului asupra mediului. Dincolo de orice îndoială, ambuteiajele se înrăutățesc în multe zone urbane din întreaga lume și sunt dăunătoare pentru costurile generale de călătorie, siguranța participanților și protecția mediului. Un număr tot mai mare de vehicule personale face ca aceste probleme să aibă un impact și mai mare.

Având în vedere cantitatea crescută de date generate, transportate și procesate în timp real, aceste sisteme au un mare potențial de îmbunătățire a siguranței rutiere și a eficienței transportului rutier. Datorită acestor beneficii preconizate și având în vedere costurile globale rezonabile legate de implementarea lor, există un interes public și guvernamental puternic pentru a permite o adoptare rapidă la scară globală, care se va traduce printr-o introducere rapidă pe piață, teste preliminare extensive și, în cele din urmă, implementări globale la nivel comercial.

Comunitatea științifică a acceptat provocările cu aproape două decenii în urmă și a început să se concentreze asupra acestui aspect, realizând studii specializate și oferind soluții durabile. Sistemele de transport inteligent cooperativ (C-ITS) utilizează tehnologii care permit vehiculelor să comunice în mod eficient cu alte vehicule din vecinătate, cu semnele de circulație și cu infrastructura de pe marginea drumului, precum și cu pietonii sau cu alți utilizatori vulnerabili ai șoselelor. Sistemele se bazează pe comunicații de la vehicul la vehicul (V2V), de la vehicul la infrastructură (V2I), de la vehicul la pieton (V2P) și de la vehicul la rețea (V2N). Toate aceste sisteme de comunicații emergente se reunesc pentru a crea comunicații de la vehicul către orice - "Vehicle-to-Everything" (V2X).

În publicația Comisiei Europene numită Vademecum, în 2018 [1], se poate observa că rata accidentelor rutiere mortale din UE în 2017 a fost la cel mai scăzut nivel din istorie, cu 49 de morți la un milion de locuitori, ca medie pentru toate statele membre ale UE. Țările cu cea mai mică rată a deceselor rutiere la fiecare milion de locuitori au fost Suedia (25), Regatul Unit (27), Țările de Jos (31), Danemarca (32), Irlanda (33) și Estonia (36), în timp ce țările cu cele mai slabe performanțe în materie de siguranță rutieră, ceea ce înseamnă cele mai mari rate de decese, sunt Croația (80), Bulgaria (96) și România (98).

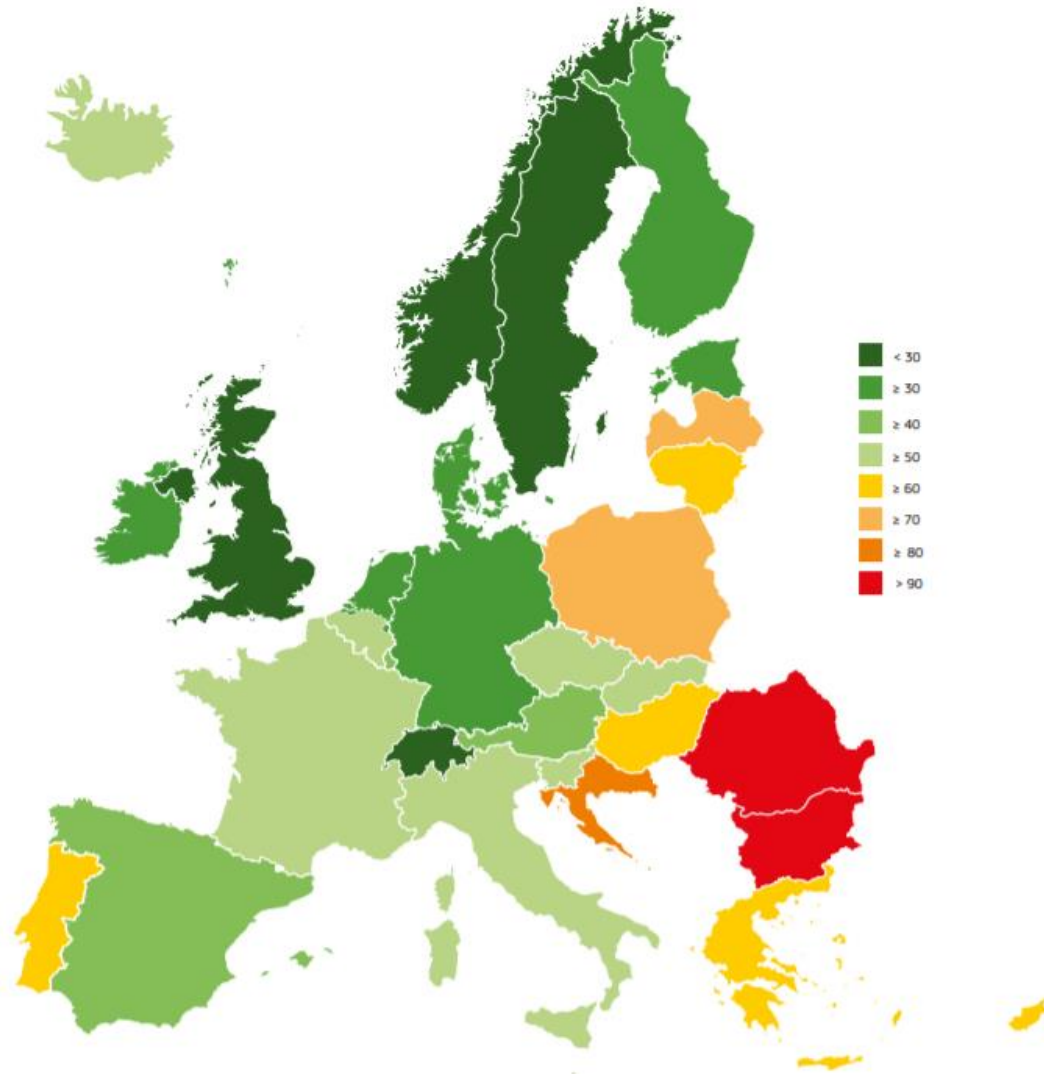


Fig. 1 EU Road fatality rates 2017 [1]

Din păcate, România se află la sfârșitul listei, fiind țara membră a UE cu cea mai mare rată a mortalității din întreaga regiune a UE. România trebuie să ia în considerare de urgență îmbunătățirea infrastructurii și să investească în tehnologii inovatoare pentru a aborda această realitate dureroasă.

Acest loc îngrijorător în topul celor mai periculoase locuri de condus din Europa, precum și lipsa unui sistem național unificat pentru creșterea siguranței rutiere, m-au determinat să aleg această temă pentru cercetarea mea. În plus, din punct de vedere științific, a fost identificată o lacună tehnică înainte de începerea acestei lucrări, prin urmare, a fost o combinație ideală de factori care m-a motivat să abordez acest subiect.

1.1 Schema tezei de doctorat

Capitolul 1 - Introducere generală, oferă cititorului o deschidere asupra conceptului de Sistem Inteligent de Transport (STI) și motivează alegerea acestui subiect pentru elaborarea tezei mele de doctorat.

Capitolul 2 - O prezentare generală a rețelelor de vehicule, abordează conceptul de sporire a siguranței în trafic, începând cu faza sa inițială din 2002 (a se vedea secțiunea 2.1 - Introducere privind

comunicațiile V2X), când statisticile privind accidentele rutiere au început să ridice serioase îngrijorări cu privire la numărul mereu în creștere al accidentelor rutiere care cauzează vătămări grave și, în multe cazuri, decese.

Acest capitol este structurat organic, începând cu o examinare detaliată a istoriei comunicațiilor V2X, prezentând conceptul generic de V2X și adoptarea acestuia în diferite regiuni ale lumii. Apoi, îl conduce pe cititor într-o incursiune inedită care prezintă abordarea caracteristică pe care fiecare organizație regională de standardizare (de exemplu, IEEE, ETSI, ITU, 3GPP etc.) a avut-o în legătură cu acest subiect, în Europa, Statele Unite și Asia.

Secțiunea 2.2 - Comunicațiile bazate pe IEEE 802.11p și secțiunea 2.3 - Comunicațiile bazate pe 3GPP Cellular-V2X, oferă o perspectivă tehnică completă și amănunțită asupra celor două tehnologii distincte (bazate pe Wi-Fi și bazate pe tehnologia celulară) care vizează același subiect al siguranței și eficienței în trafic, pregătind totodată terenul pentru viitoarele vehicule autonome. Aceste secțiuni sunt structurate într-un mod ușor de urmărit și cuprinzător, conducând cititorul de la istoricul dezvoltării și elementele de bază ale celor două tehnologii, până la cele mai detaliate tehnici de diseminare a mesajelor, scheme de securitate și proceduri de armonizare a spectrului de frecvențe radio.

Faptul că am avut șansa de a aprofunda fiecare abordare regională, mi-a oferit ocazia de a observa impactul asupra evoluției tehnologiei a diferitelor modele de dezvoltare socială din fiecare regiune majoră și a valorilor pe care le promovează fiecare dintre acestea. Unele regiuni pun preț pe siguranță și stabilitate, în timp ce altele acordă mai multă importanță laturii economice și eficienței monetizării acestui concept, sau alte regiuni sunt pur și simplu orientate către tehnologie, căutând să inoveze și să optimizeze mereu pentru un viitor mai bun și mai sigur. O astfel de fragmentare este, de cele mai multe ori, contraproductivă, deoarece împiedică o abordare globală constructivă, utilizarea eficientă a resurselor și implementarea globală a unei tehnologii optimizate care respectă un set unic de standarde.

Acesta a fost cazul așa-numitului V2X clasic, bazat pe standardul IEEE 802.11p (de exemplu, DSRC și C-ITS), care a suferit recent un decădere rapidă și a pierdut sprijinul din partea industriei. Motivul principal este faptul că a fost nevoie de mult mai mult de 10 ani pentru a ajunge la maturitate și, în plus, nu a fost construit pe un singur set global de standarde, deși fiecare regiune și-a dezvoltat propriile particularități, ceea ce a transformat-o într-o tehnologie greu de adoptat la scară globală. Fiecare regiune a urmat propriul set de politici și directive, conducând dezvoltarea tehnologiei în direcții diferite, care nu erau compatibile între ele. Motivul simplu pentru care industria a sprijinit această tehnologie învechită la început este că a fost prima disponibilă pe piață care a acceptat provocarea de a îmbunătăți siguranța și eficiența traficului. În 2010, aceasta promitea o eficiență îmbunătățită a traficului, o mai mare siguranță a participanților la trafic, deschizând calea către vehiculele autonome. Fiecare organism de standardizare din marile regiuni a încercat să rezolve provocările inovației în felul său, acceptând noi tehnici în standard fără a testa și califica în profunzime avantajele și dezavantajele și, cel mai important, fără a acorda prea multă importanță compatibilității și interoperabilității fiecărei tehnologii dezvoltate în fiecare regiune. Aceasta a fost o adevărată rețetă pentru dezastru, lucru care s-a întâmplat odată ce o alternativă a fost disponibilă, venind din partea 3GPP, organizația de standardizare care a dezvoltat toate seturile de standarde celulare de la 2G la 5G și care continuă să inoveze cu eficacitate spre 6G și către alte tehnologii.

În cele din urmă, marii producători de echipamente din industria auto (precum Volkswagen, Cadillac, BMW, Mercedes, Audi și producătorii de automobile din Asia), împreună cu producătorii de chipset-uri, marii integratorii de sisteme și producătorii de dispozitive certificate în industria auto, s-au organizat în consorții și alianțe (de ex, C2C-CC, C-Roads Platform, Amsterdam Group, CEF, CEDR, ASECAP, POLIS etc.), pentru a îndruma dezvoltarea și evoluția tehnologiei către o cale comună, făcând

presiuni asupra organizațiilor de standardizare din diferite regiuni în vederea armonizării benzilor de frecvență, a tehnicilor de transmisie-recepție, a normelor de politică de siguranță și securitate și a unor proceduri mai eficiente de diseminare a mesajelor. Beneficiile au fost imediate și se dovedește în realitate că un proces de armonizare la scară globală era imperios necesar. Acest proces este încă în curs de derulare și multe provocări sunt în curs de rezolvare, datorate în principal unor motive economice și uneori inclusiv politice. Cu toate acestea, în unele cazuri, armonizarea resurselor de radiofrecvență a condus la limitări ale lățimii de bandă alocate pentru fiecare tehnologie, cum ar fi DSRC sau C-ITS, prin urmare, mai puține servicii au putut fi dezvoltate în continuare din cauza resurselor de radiofrecvență restricționate, iar mecanismele de siguranță suplimentare pentru evitarea interferențelor și a întreruperilor de servicii cauzate de standardele concurente a fost necesară dezvoltarea și consumarea de eforturi și timp (a se vedea **secțiunea 2.1.3 - Armonizarea resurselor de radiofrecvență**).

În Statele Unite, agențiile guvernamentale, interesate să ghideze și să influențeze dezvoltarea tehnologiilor viitoare, au intervenit și au încercat să dirijeze puternic evoluția tehnică și să favorizeze o parte în detrimentul celeilalte, impunând utilizarea unei anumite tehnologii. În 2013, Administrația Națională pentru Siguranța Traficului pe Autostrăzi (National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA) din SUA a impus ca producătorii de automobile să echipeze toate mașinile nou produse cu tehnologia DSRC (a se vedea **secțiunea 2.1.2 - Standardizarea în SUA și eforturile industriei**). Acest mandat disperat a venit ca răspuns la evoluția rapidă a tehnologiei bazate pe tehnologia celulară, denumită C-V2X (Cellular Vehicle to Everything).

Câțiva dintre marii producători de automobile, precum Cadillac sau Volkswagen, au dorit să fie pionieri în materie de tehnologie și au adoptat rapid DSRC și C-ITS, redenumindu-le în pWLAN (a se vedea **secțiunea 2.2.6 - Soluții comerciale**) sau alte denumiri comerciale atractive. Principalul motiv pentru această adoptare rapidă a fost impunerea de către Departamentul de Stat al SUA a tehnologiei IEEE802.11p pentru toate mașinile nou produse în SUA. După ce o parte a industriei, producătorii de chipset-uri celulare și alianțele existente au protestat și au contestat acest mandat, guvernul l-a retras pentru a permite o competiție corectă care să decidă ce tehnologie oferă cea mai bună și mai eficientă modalitate de a transforma traficul aglomerat și periculos într-unul mai eficient și mai sigur.

Consortiul Car 2 Car Communication Consortium (C2C-CC) și Platforma C-Roads, o asociație larg răspândită la nivelul UE, au ajuns la un consens pentru a iniția și, în cele din urmă, a semna un memorandum de înțelegere care să permită o colaborare armonioasă între autoritățile de stat, industria auto, autoritățile rutiere și operatorii de infrastructură rutieră pentru planificarea implementării serviciilor inițiale C-ITS pe teritoriul Europei.

Unul dintre primii de pe piață cu o platformă software V2X stabilă și optimă, și anume Commsignia, a oferit o soluție complet integrată, dezvoltată pentru a concentra specificațiile tuturor organizațiilor majore de standardizare, cum ar fi ISO, ETSI, IEEE, SAE sau C2C-CC, într-o soluție de comunicare profesională cu o arhitectură flexibilă. Pachetul software a fost conceput ca un cadru modular, fiind evaluat și certificat în cadrul unor proiecte US DOT și EU C-Roads. Acest produs oferă o soluție completă de conectivitate, atât ca RSU (unitate de infrastructură), cât și ca OBU (unitate instalată la bord), pentru a susține atât DSRC, cât și ITS-G5, și promite să fie pregătit pentru setul de protocoale C-V2X bazat pe tehnologia celulară.

Odată cu publicarea primului set de standarde în 2013, producătorii de automobile membri ai C2C-CC au semnat un acord pentru implementarea și omologarea sistemului C-ITS. Planurile de implementare au fost elaborate de Grupul Amsterdam, o alianță strategică a părților interesate de C-ITS în Europa. Parteneri precum CEDR, ASECAP sau POLIS, reprezintă principalele părți interesate de implementarea

infrastructurii STI pe autostrăzi și în orașe, oferind o platformă solidă de gestionare a traficului. Proiectele pilot de implementare facilitează introducerea noului sistem și evaluarea performanțelor. Unul dintre numeroasele platforme de testare, un coridor trilateral C-ITS care interconectează Viena - Frankfurt - Rotterdam, a fost echipat cu un sistem inovator de protecție a lucrătorilor rutieri pe autostrăzi în 2018 (a se vedea **secțiunea 2.1.1 - Eforturile europene de standardizare și ale industriei**).

În 2016, Comisia UE a inițiat Platforma C-Roads, care a vizat interconectarea și facilitarea cooperării între numeroasele proiecte C-ITS din întreaga UE și diverse experimente pilot. Platforma C-Roads a încurajat o evaluare în mod cooperant a specificațiilor tehnice actuale, verificând interoperabilitatea, furnizând rapoarte cuprinzătoare și propunând îmbunătățiri ulterioare acolo unde au fost identificate deficiențe și limitări la nivel tehnic. Fondată inițial pentru a sprijini doar proiectele de tip C-ITS, platforma C-Roads a început să sprijine toate evaluările de interoperabilitate și perfecționările de specificații din Europa. Principalele state membre ale UE care sprijină această inițiativă din partea Comisiei Europene sunt: Franța, Germania, Ungaria, Austria, Belgia, Republica Cehă, Finlanda, Italia, România, Țările de Jos, Slovenia, Suedia și Regatul Unit. Între timp, alte state membre ale UE s-au alăturat platformei, precum Spania, Portugalia și Turcia.

România a contribuit în mod activ prin intermediul unui proiect cofinanțat de Comisia Europeană. Accentul principal a fost pus pe serviciile suplimentare de tip C-ITS în cadrul programului "Day 1.5", care au contribuit la crearea unei parcări mai sigure pentru camioane. Acest proiect a fost finalizat din februarie 2018, iar utilizatorii pot beneficia de o aplicație web dedicată pentru a observa camerele de supraveghere și, de asemenea, pentru a verifica dacă există locuri libere și pentru a rezerva un loc înainte de sosire. Proiectul a fost integrat într-o rețea europeană de parcări certificate, sigure și securizate. În plus, în cadrul acestui proiect au fost finalizate și studiile pentru construirea altor două locuri de parcare protejate și securizate pe coridorul rețelei de bază Rin-Dunăre. În cele din urmă, ca rezultat principal, au fost dezvoltate un centru de comandă software ITS și o aplicație mobilă specială, cu scopul de a furniza șoferilor europeni de camioane informații esențiale despre locurile de parcare libere într-un mediu protejat și garantat.

În SUA, standardizarea comunicațiilor V2X a început odată cu alocarea benzii de frecvență de 5,9 GHz, aprobată în cele din urmă în 2002, dedicată intercomunicării între vehicule și infrastructură. Acest demers a precedat cu mult eforturile UE de dezvoltare a C-ITS cu ITS-G5. Pentru comunicațiile între vehicule, organizația de standardizare IEEE s-a concentrat asupra unei tehnologii specifice, și anume Dedicated Short-Range Communication (DSRC), care este concepută pentru a sprijini o multitudine de aplicații și scenarii de utilizare și care se bazează pe o modificare a IEEE802.11, și anume IEEE802.11p. Principala motivație pentru a investi în aceste proiecte de cercetare și pentru a instala dispozitive de comunicare bazate pe DSRC este de a permite utilizarea aplicațiilor de prevenire a coliziunilor ca un pachet standard de funcționalități care vor face parte din fiecare vehicul de pe șosea. Aceste tipuri de aplicații necesită o frecvență ridicată a schimburilor de pachete de date între vehicule și între vehicule și infrastructura rutieră. Departamentul Transporturilor (DOT) și Administrația Națională pentru Siguranța Traficului pe Autostrăzi (NHTSA) din SUA au efectuat numeroase studii și au evaluat faptul că comunicațiile de la vehicul la vehicul (V2V) ar putea avea un impact pozitiv asupra a până la 82% din toate accidentele de pe drumurile din SUA, având potențialul de a salva mii de vieți și miliarde de dolari în daune colaterale și costuri medicale.

Departamentul Transporturilor (DOT) din SUA, împreună cu marii producători de automobile, precum General Motors, Ford, Toyota, Honda și Mercedes-Benz, au convenit să colaboreze în cadrul unui consorțiu numit proiectul Vehicle Safety Communications (VSC). Acesta avea ca scop realizarea unor studii extinse, a unor campanii de evaluare și testarea privind interoperabilitatea diferitelor dispozitive

bazate pe DSRC. Proiectul consorțiului VSC, finalizat în 2009, a validat fezabilitatea și maturitatea principalelor aplicații de siguranță V2V, cum ar fi avertizarea de coliziune frontală (FCW), luminile electronice de frânare de urgență (EEBL), avertizarea privind unghiul mort (BSW), asistența la deplasarea în intersecție (IMA), avertizarea de a nu depăși (DNPW), avertizarea de pierdere a controlului (CSW) și multe altele (a se vedea **secțiunea 2.1.2 - Eforturile de standardizare și ale industriei din SUA**).

Au fost organizate diverse alte evenimente de testare și campanii de validare, în cadrul cărora au fost studiate îmbunătățiri și optimizări în permanență. Mai recent, U.S. DOT și NHTSA au evaluat eficiența sistemului de comunicații "vehicle-to-everything" bazat pe tehnologia celulară. Cel mai probabil, viitorul va rezerva o cale în care DSRC și V2X celular vor coexista și se vor completa reciproc.

Au fost efectuate cu succes numeroase teste pe teren cu soluții comerciale bazate pe IEEE 802.11p. Unul dintre primele și cele mai mari teste de funcționare a dispozitivelor bazate pe IEEE 802.11p a fost finanțat de US DOT (în Wyoming, Tampa și New York). Acesta s-a desfășurat pe mai mult de zece mii de vehicule de la diverși producători de automobile, echipate cu dispozitive DSRC aparținând unor producători diferiți, care au implementat aplicații diversificate.

O controversă tehnologică de lungă durată este în curs de desfășurare între abordarea inițială din SUA, începută în 2002, dezvoltată de institutul de cercetare IEEE, și anume standardul IEEE 802.11p, cunoscut și sub numele de DSRC, și tehnologia mai recent dezvoltată, începută în 2012-2013 și susținută de celebra organizație de standardizare celulară numită 3GPP. Se poate observa în mod clar că fiecare organizație de standardizare, din regiunile majore cu un fundal economic puternic (Statele Unite, Europa și Asia), a încercat să rezolve provocările legate de creșterea siguranței și eficienței traficului în felul său, acceptând noi tehnici în standard fără un proces de testare, viabilitate și verificare amănunțită a interoperabilității. Aceasta a fost o rețetă pentru dezastru tehnic, irosire de resurse și risipă de bani publici.

Organizația 3GPP, cunoscută și sub numele de 3rd Generation Partnership Program (Programul de parteneriat pentru generația a treia), care este organizația globală de standardizare din spatele bine-cunoscutelor standarde celulare 3G, 4G și 5G, a început să definească specificațiile de bază care susțin conceptul C-V2X în 2013, împreună cu versiunea 12 a specificațiilor sale (Release 12).

Echipamentele prototip bazate pe IEEE 802.11p au început să se confrunte cu limitări tehnice atunci când au fost efectuate experimente de testare la scară largă. De asemenea, eficiența a fost mai scăzută în comparație cu C-V2X, chiar de la începuturi (a se vedea secțiunea 2.4 - IEEE 802.11p vs. 3GPP Cellular V2X). Unul dintre avantajele importante ale C-V2X este exploatarea rețelei celulare existente, fără a fi necesară instalarea de echipamente fizice suplimentare, ci doar actualizări la nivel de software. Un astfel de avantaj se traduce în economii financiare, prin faptul că nu trebuie construită de la zero o infrastructură complet nouă pentru utilizarea unui dispozitiv de tip IEEE 802.11p. Din punct de vedere realist, chiar și rețelele celulare au deficiențe de acoperire. Acoperirea poate fi îmbunătățită în continuare în funcție de cerințe. Trebuie să recunoaștem că este întotdeauna mai eficient să se pornească de la o infrastructură existentă care oferă o acoperire globală decât să se construiască una nouă de la zero pentru o tehnologie care nu poate fi calificată ca fiind viabilă în viitor.

Inițial, organizațiile de standardizare au propus o abordare hibridă, în care atât IEEE 802.11p, cât și tehnologiile V2X celulare ar putea coexista. Dintr-o perspectivă generală, acest compromis pare a fi unul rezonabil. Atunci când ne uităm mai atent la detalii și analizăm cantitatea de eforturi care trebuie depuse pentru a dezvolta toate mecanismele de anulare a interferențelor și de interoperabilitate, atunci începe să devină o idee mai puțin promițătoare.

În consecință, marii producători de componente auto și producătorii de dispozitive certificate pentru industria auto, care se concentrau inițial pe tehnologia bazată pe IEEE802.11p, au început să se orienteze mai mult către C-V2X în detrimentul IEEE802.11p, renunțând la o abordare hibridă. Mai multe motive i-au determinat pe toți acești agenți importanți din ecosistem să își schimbe orientarea, unul dintre cele mai importante fiind faptul că V2X celular, susținut și îmbunătățit în continuare de 3GPP, dezvoltă și menține un set unic de standarde care facilitează implementarea la nivel global. O utilizare mai eficientă a spectrului RF disponibil este un alt avantaj principal al V2X celular, datorită schemelor de modulație și de codificare mult superioare utilizate în standardele celulare, care au fost foarte bine optimizate și pot fi considerate cele mai eficiente și mai robuste dintre cele disponibile până în prezent.

Comunicarea V2X celulară se bazează pe un concept, destinat inițial marketingului și publicității, publicat în versiunile anterioare ale 3GPP, începând cu versiunea 12 a 3GPP, finalizată în martie 2015. Acest set de standarde a fost îmbunătățit și optimizat în continuare pentru comunicațiile între vehicule în versiunea 13, finalizată în martie 2016. Conceptul a fost denumit comunicații de la "dispozitiv la dispozitiv" (D2D), definit ca parte a serviciilor de comunicații în proximitate (ProSe). La origine, a fost conceput ca un serviciu de radiocomunicație comercială prin care telefoanele mobile dintr-o zonă puteau primi o notificări pentru anunțuri publicitare. Având în vedere interesul tot mai mare pentru comunicațiile de la dispozitiv la dispozitiv (D2D) în industria automobilelor, membrii organizației 3GPP au considerat că există o oportunitate de a dezvolta și de a îmbunătăți în continuare această nouă capabilitate cu funcții de siguranță și utilitate sporită pentru comunicațiile de la vehicul la vehicul (V2V). Protocolul LTE "dispozitiv la dispozitiv" (D2D) descrie un sistem autonom de comunicare directă pe distanțe lungi. Acest protocol celular a fost supus unor optimizări continue pentru a îndeplini cerințele mature și din ce în ce mai stricte ale sistemelor de transport inteligente proiectate și implementate în întreaga lume, în care IEEE 802.11p era unicul actor de pe piață.

Funcționalitatea avansată LTE D2D din versiunea 13 a standardului 3GPP a fost îmbunătățită și optimizată în continuare în versiunea 14, publicată în martie 2017, pentru a răspunde cerințelor stricte ale industriei auto și pentru a depăși performanțele obținute de tehnologia concurentă bazată pe IEEE802.11p. Astfel, a luat naștere interfața PC5, cunoscută și sub numele de SideLink la nivelul fizic, pentru comunicarea directă V2V. Această interfață a fost îmbunătățită în continuare pentru scenarii cu vehicule, în special pentru a aborda cazurile de utilizare la viteze mari, de până la 250 Km/h sau 500 Km/h viteză relativă, și scenarii în care densitatea mare a dispozitivelor era esențială, pentru cazurile de utilizare urbană densă.

Luând în considerare ambele tehnologii V2X, C-V2X și IEEE802.11p, producătorii de vehicule vor să beneficieze de o tehnologie wireless interoperabilă și de viitor, cu o perspectivă de evoluție către următoarea generație de comunicații de la vehicul la orice (V2X). Tehnologiile existente, și anume ITS-G5 și LTE-V2X, nu sunt interoperabile, prin urmare, decizia producătorilor de automobile este dificilă. Obiectivul comun al ambelor tehnologii este de a crește siguranța și eficiența traficului pentru un mediu mai sigur și mai curat la scară globală. Astfel, interoperabilitatea joacă un rol esențial, având în vedere că vehiculele capabile de IEEE 802.11p circulă deja pe drumurile publice. Este necesar să existe un concept unic care să integreze ambele tehnologii, atât cele existente, cât și cele viitoare, pentru a armoniza implementarea și funcționalitățile de siguranță, având în vedere obiectivele comune de siguranță și de mediu și nu doar concurența din punct de vedere economic.

Obiectivul principal al industriei este unificarea tehnologiilor existente într-o soluție armonizată, guvernată de un set unic de standarde. Continental AG a acceptat această provocare încă din 2019 și a câștigat un proiect care prevedea punerea în valoare a avantajelor tehnologiilor curente 4G, DSRC și C-

V2X [2]. Soluția hibridă propusă de Continental integrează tehnologiile celulare pentru accesul la rețelele 4G și 5G pentru a putea accesa tot conținutul de pe sistemul de infotainment, împreună cu soluția matură de comunicare dedicată cu rază scurtă de acțiune (DSRC) și cu ultima generație de comunicații de la vehicul la orice, și anume Cellular-V2X (C-V2X). Această soluție vine să ajute producătorii de vehicule premium să depășească o provocare imposibilă până în prezent, atunci când integrează tehnologia V2X în mașinile de serie nouă din întreaga lume. Având în vedere că tehnologiile au evoluat diferit în întreaga lume, datorită influenței organizațiilor de standardizare, a centrelor de cercetare și din motive economice, sarcina de a implementa o soluție flexibilă la nivel mondial a devenit o provocare dificilă. Diferite regiuni, în special Statele Unite, preferă soluțiile bazate pe DSRC, regiunea europeană preferă soluțiile bazate pe ITS-G5, iar altele, precum China, tind să investească mai mult timp și resurse în standardul Cellular-V2X, care va fi lansat în curând. Cu soluția hibridă V2X de la Continental, toate aceste provocări sunt adresate și se propune o soluție unică care utilizează același hardware și o platformă software flexibilă pentru a susține standardele de comunicare existente, reducând astfel costurile și complexitatea integrării la scară globală a comunicațiilor V2X în vehiculele nou fabricate în întreaga lume.

Secțiunea 2.4 - IEEE 802.11p vs. 3GPP Cellular V2X prezintă o comparație amănunțită între standardele bazate pe Wi-Fi și cele bazate pe tehnologia celulară, ajutând la formularea unor concluzii clare cu privire la cea mai eficientă tehnologie pentru viitorul comunicațiilor V2X.

Diverse asociații independente, alianțe și institute de cercetare, împreună cu universități tehnice din întreaga lume, au realizat studii de analiză în cadrul cărora au fost comparate ambele tehnologii într-un concurs echitabil și transparent. Universități tehnice de renume din Germania, Franța, Spania și Suedia au realizat studii de fezabilitate și au publicat numeroase rapoarte pe acest subiect fundamental. Un număr substanțial de rapoarte au ajuns la un acord asupra faptului că C-V2X este o tehnologie care se pretează mai bine pentru aplicațiile STI, care este pregătită pentru viitor și are potențialul de a fi utilizată la nivel mondial. În plus, organizația 3GPP actualizează și perfecționează continuu specificațiile, împreună cu specificațiile pentru rețelele celulare 5G și 6G ale viitorului. Spre final, se face o introducere pentru direcții și evoluție, stabilind perspectivele pentru viitor.

Secțiunea 2.5 - Evoluția tehnologiilor de acces radio pentru comunicațiile V2X, prezintă noul standard IEEE802.11bd (evoluție a IEEE802.11p) și noul standard radio NR-V2X (evoluție a C-V2X, care se baza pe tehnologia celulară 4G). Ambele tehnologii de acces radio, și anume 802.11bd și NR-V2X, includ tehnici inovatoare și revoluționare de transmisie-recepție și mecanisme de diseminare a mesajelor de siguranță în comparație cu precedentele tehnologii de acces radio. Se preconizează că acestea vor îmbunătăți în mod semnificativ principalii indicatori de performanță, cum ar fi latența, capacitatea de transmisie și fiabilitatea ratei de transmisie, care sunt esențiale pentru un sistem robust care să faciliteze aplicațiile de siguranță și eficiența a traficului fără fir.

Implementările comerciale la scară largă ale NR-V2X sunt încă un obiectiv îndepărtat în viitor. Există încă o serie de provocări tehnice și privind fezabilitatea care trebuie rezolvate, însă progresele sunt consistente, iar sprijinul din partea sectorului public și a industriei este din ce în ce mai puternic. HORIZON 2020 este un program susținut de Comisia Europeană împreună cu organizația 5GPP. Programul H2020 finanțează o serie de proiecte experimentale de coridoare de trafic pentru certificarea conectivității transfrontaliere fără întreruperi cu 4G și 5G pentru vehiculele autonome care utilizează funcționalitățile Cooperative Connected and Automated Mobility (CCAM).

5G-MOBIX este un proiect H2020 în curs de desfășurare, finanțat de UE, care vizează dezvoltarea, testarea și optimizarea funcționalităților vehiculelor automate utilizând specificațiile de bază 5G pentru inovații tehnologice de-a lungul mai multor coridoare transfrontaliere și locații de experimentare la nivel

metropolitan. Au fost realizate numeroase proiecte pentru a asigura pilotarea autonomă pe principalele rute de trafic europene, precum și în China și Coreea, cu echipamente prototip 5G V2X. Beneficiile preconizate ale 5G vor fi evaluate în timpul testelor pe coridoarele transfrontaliere 5G (cum ar fi Grecia-Turcia și Spania-Portugalia) și în diverse țări din UE, precum și în China și Coreea, care participă activ la dezvoltarea tehnologiei 5G de ghidare autonomă.

Capitolul 3 - Propunere de soluție hibridă V2I, descrie în detaliu o soluție originală de semnalizare și avertizare a secțiunilor rutiere periculoase. Scopul acestei teze este de a se propune realizarea unei soluții inovatoare și a unui concept care ar putea deveni o fundație pentru un sistem de transport mai sigur și viabil pentru viitor în România.

Soluția propusă constă din trei componente majore care sunt interconectate prin intermediul rețelelor comerciale celulare:

- Smart Road Side Unit (S-RSU) - montat în interiorul autovehiculelor sau integrat în indicatoarele de avertizare existente pe marginea drumului, amplasate în locurile în care se desfășoară lucrări de reparații rutiere sau modernizare
- Sistemul de avertizare pentru unitățile de pe marginea drumului (RSU-WS) - montat ca dispozitiv secundar în interiorul vehiculului și care măsoară constant distanța față de unitățile S-RSU din apropiere
- MQTT Broker - principalul canal logic de comunicare între S-RSU și RSU-WS. O platformă Cloud construită ca un client al brokerului MQTT ar putea acționa ca o platformă de gestionare și monitorizare pentru întregul sistem.

Secțiunea 3.3 - Descrierea completă a soluției, oferă o imagine de ansamblu a diagramei bloc aferentă sistemului și a tuturor componentelor logice care intra în componența acestuia. Pseudocodurile fiecărei funcții dezvoltate pentru microcontrolerul care orchestrează întreaga funcționare atât a S-RSU, cât și a RSU-WS, sunt descrise în mod detaliat. Descrierea pseudocodurilor a fost preferată, în locul descrierii codului C++, pentru a oferi libertatea de a alege orice limbaj de programare adecvat pentru reproducerea unui astfel de sistem de comunicații.

Un astfel de concept ar putea fi extins în continuare pentru a include alte funcții esențiale, integrat în vehiculele produse la scară largă sau re-proiectat în alte scopuri.

Capitolul 4 - Modelarea canalului de transmisie și a unei unități îmbunătățite de control al vitezei de croazieră - simulări și analize, detaliază despre proiectarea canalului fără fir pentru un scenariu ales și analizează răspunsul total al semnalului pe partea de recepție. În partea a doua se propune o soluție de îmbunătățire a unei unități de control al vitezei de croazieră prin modelare utilizând Matlab. Ca mediu de simulare pentru modelarea a canalului de transmisie a fost utilizat software-ul OCTAVE, unde rezultatul a fost reprezentat grafic pentru a permite o analiză vizuală.

Acest capitol prezintă un set de algoritmi și simulări care descriu un model simplificat al unui sistem de comunicații fără fir. Algoritmii au fost adaptați pentru un model emițător-receptor cu un perete reflector. Analiza principală se face pe o formă de undă a semnalului care revine de la peretele reflector și care este recepționat de vehicul. Implementarea și simularea au fost dezvoltate cu ajutorul Octave, care este un limbaj de programare de nivel înalt conceput pentru calcule numerice.

Octave face parte din cadrul proiectului GNU, prin urmare este un software gratuit care este utilizat în mediile academice în cazul în care nu sunt necesare interfețe grafice pentru proiectele de simulare.

În continuare, acest capitol descrie rezultatele obținute în urma simulării folosind Octave. Rezultatul a fost pus în formă grafică pentru o analiză vizuală și pentru a valida faptul că respectivele calcule inițiale se bazează pe modelul matematic dezvoltat. Acest lucru demonstrează că modul efectiv de calcul al răspunsului receptorului la forma de undă a semnalului corespunde graficelor vizuale obținute prin Octave. Această validare confirmă faptul că întreaga soluție de transmisie-recepție funcționează corect și este dimensionată în mod corespunzător în cadrul scenariului ales.

În continuare, se face o introducere a diferitelor controlere de sistem pentru a modela și îmbunătăți o unitate obișnuită de control al vitezei de croazieră cu care sunt echipate majoritatea vehiculelor moderne. Aceste modele matematice sunt apoi modelate cu MATLAB. Se efectuează numeroase simulări, iar rezultatele sunt reprezentate grafic cu ajutorul MATLAB Simulink. Au fost efectuate mai multe analize comparative ale modelelor pentru identificarea modelului optim. În cele din urmă, a fost propusă o combinație inovatoare între un controler Fuzzy și o mașină cu stări finite îmbunătățită pentru a comanda o unitate de control al vitezei de croazieră a unui vehicul.

Capitolul se încheie cu o validare a soluțiilor propuse, prin rularea unei serii de scenarii și generarea de diagrame comparative. Acestea au fost utilizate pentru o analiză cuprinzătoare a comportamentului întregului sistem și pentru confirmarea corectitudinii modelării și integrării sistemului propus.

Capitolul 5 - Contribuții personale și propuneri de cercetare viitoare, oferă o sinteză explicită a contribuțiilor personale aduse în această lucrare, atât din punct de vedere al metodologiei de cercetare, cât și din punct de vedere al soluțiilor propuse. Metodologia de cercetare și elaborarea tuturor informațiilor despre stadiul actual al cercetărilor, împreună cu necesitățile tehnice identificate în timpul studiului pe care l-am efectuat în acest domeniu, au fost prezentate în mod clar în prima parte a acestui capitol.

A doua parte oferă o imagine de ansamblu a aplicației practice propuse în cadrul acestei teze, explicând în mod clar fiecare element constitutiv și scopul final al acestei aplicații hardware. În continuare sunt prezentate concluziile și direcțiile viitoare de cercetare, în vederea validării faptului că toate obiectivele stabilite la începutul acestei lucrări au fost atinse cu succes.

Este prezentată o analiză a modelului final propus pentru o unitate de control al vitezei de croazieră îmbunătățită cu un controler Fuzzy și un FSM. Avantajele sunt evidențiate într-o manieră cuprinzătoare, făcându-se comparații între mai multe scenarii și moduri de implementare, indicând în final direcții potențiale de îmbunătățire prin continuarea cercetărilor pe această temă.

Spre finalul acestui capitol, se prezintă modul în care acest concept de proiect propus ar putea fi extins și îmbunătățit în continuare cu noi funcții și echipamente periferice. Acest concept, cu modificări și adaptări minore, ar putea fi reutilizat și pentru alte industrii. Industria minieră de suprafață, șantierele de exploatare a lemnului sau șantierele de construcții care se extind pe teritorii mari ar putea, de asemenea, să profite de soluții similare cu ajustări minime pentru o platformă eficientă și versatilă.

1.2 Metodologia cercetării

Această teză de doctorat contribuie la cercetarea științifică aplicată pe tema siguranței rutiere. Aceste cercetări contribuie la definirea bazelor tehnologice pentru vehiculele autonome, unde securitatea șoferului și a altor participanți la trafic este imperativă.

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat este de a aduce un impact pozitiv în materie de siguranță a traficului în România. Trăind și călătorind în diverse locații din întreaga lume, mi-a oferit ocazia

de a observa cât de avansate și conștiente de subiectul siguranței traficului sunt alte țări și regiuni. Combinarea acestor observații cu pregătirea mea tehnică în domeniul științific al electronicii și telecomunicațiilor și cu expertiza mea în sectorul Internet of Things (IoT), de-a lungul experienței mele profesionale, mi-a oferit o oportunitate unică de a propune o soluție practică pentru îmbunătățirea siguranței traficului în țara mea natală.

Următoarele obiective au constituit elementele de bază ale tezei mele de cercetare doctorală:

- **Obiectivul 1 – Identificarea unei probleme cu un impact social major, și anume siguranța traficului în România**

Observarea diferitelor studii privind siguranța traficului în Europa, realizate de Comisia Europeană și de organizațiile afiliate acestora, și analiza atentă a rezultatelor acestor studii, m-au ajutat să identific obiectivul principal pentru cercetarea mea. Motivația alegerii acestei teme și rezultatele studiilor menționate mai sus sunt detaliate în secțiunea 1.1 a acestei teze de doctorat.

Abordarea unui subiect atât de sensibil și important pentru România a părut o sarcină interesantă pe care am îmbrățișat-o atunci când am decis să urmez obținerea titlului de Doctor. Conștientizând că aș putea aduce o soluție utilă pentru problema identificată și pentru țara mea natală și, în același timp, să cercetez și să învăț atât de multe informații noi și interesante despre cele mai recente tehnologii dezvoltate în această direcție, mi-a dat energia și motivația de a mă angaja la o asemenea provocare.

- **Obiectivul 2 – Realizarea unei analize cuprinzătoare a literaturii de specialitate cu privire la stadiul actual al cercetării și identificarea lacunelor tehnice pentru a contribui cu cercetarea mea**

Odată identificată problema siguranței traficului în România, a fost realizat un studiu aprofundat al literaturii de specialitate existente. Începând de la primele etape ale definirii conceptului V2X, în 2002-2003, până în prezent, a fost realizată o analiză amănunțită a diferitelor specificații și implementări ale specificațiilor V2X. Ca rezultat al acestei analize, în capitolul 2 este prezentat un raport cuprinzător și structurat într-un format exclusiv. Acest capitol îl poartă pe cititor prin istoria V2X, îl poartă în diferite regiuni puternice din punct de vedere economic, precum SUA, Europa și Asia, pentru a prezenta diferite căi de evoluție a tehnologiei V2X. Apoi, ajută la pregătirea contextului pentru noile tehnologii viitoare pe care 5G și 6G le aduc pe această temă particulară a consolidării siguranței în trafic.

Întrucât evoluțiile tehnologice și progresul în definirea specificațiilor au avansat mai lent decât au prevăzut organizațiile de standardizare și industria, am dorit să propun o soluție hibridă, cu un impact semnificativ pe termen scurt, utilizând tehnologia celulară existentă, care să abordeze problema bine cunoscută a siguranței traficului .

Acest obiectiv a fost atins prin compilarea unei analize a literaturii de specialitate structurate în mod exclusiv, care oferă o imagine de nivel înalt a tuturor regiunilor relevante din lume care au contribuit la inovarea și optimizarea tehnologiilor V2X existente și viitoare.

- **Obiectivul 3 – Propunerea unei soluții care să utilizeze tehnologia existentă pentru creșterea siguranței în trafic**

Obiectivul fundamental al acestei teze de doctorat este de a propune o soluție la o problema majoră din România, și anume situarea pe ultimul loc în ceea ce privește siguranța traficului. Cunoscând contextul actual al situației traficului din România și al condițiilor de infrastructură rutieră, în care se desfășoară

continuu lucrări de drumuri, modernizări și extinderi, am propus o soluție hibridă pentru a rezolva aceste probleme.

Această soluție folosește tehnologia celulară existentă 2G / 3G / 4G, unde nu mai este necesară instalarea de echipamente suplimentare de infrastructură. Este o soluție scalabilă și ajustabilă, care este agnostică față de tehnologia de comunicare (2G, 3G, 4G, 5G sau viitoarea 6G). Această soluție se adresează în special tronsoanelor de drumuri periculoase, unde se efectuează lucrări de întreținere, consolidare sau modernizare a drumurilor. În numeroase circumstanțe, lipsa semnalizării corespunzătoare a acestor tronsoane de drum duce la incidente și accidente, cu vătămări corporale semnificative, pagube materiale și, în cele din urmă, pierderi de vieți omenești.

Pentru a atinge acest obiectiv, am utilizat mai multe componente hardware, am dezvoltat algoritmi adecvați și coduri sursă pentru operarea microcontrolerului și a tuturor perifericelor atașate la sistemul proiectat pentru creșterea siguranței traficului (a se vedea capitolul 3).

- **Obiectivul 4 – Propunere de integrare a comunicațiilor V2I într-o unitate de control al vitezei de croazieră**

Soluția propusă și realizată prin obiectivul anterior poate fi integrată în unitățile de control al vitezei de croazieră existente cu care sunt echipate vehiculele moderne. Această etapă ulterioară ar oferi o soluție completă cu indicatoare rutiere inteligente, o infrastructură pentru difuzarea mesajelor de avertizare și un sistem de avertizare viabil integrat în vehicule pentru notificarea eficientă a șoferilor, făcând astfel traficul mai sigur.

Acest obiectiv a fost atins prin propunerea unei unități îmbunătățite de control al vitezei de croazieră, care integrează un controler Fuzzy și o mașină cu stare finită care guvernează întregul sistem. Această soluție a fost modelată cu ajutorul MATLAB Simulink și au fost rulate numeroase scenarii pentru a valida funcționalitatea sistemului propus.

- **Obiectivul 5 – Propunerea unui model, simularea și validarea soluției**

Propunerea unei soluții tehnice nu ar fi suficientă, din punctul de vedere al cercetării științifice, fără o validare temeinică a soluției prin intermediul unui model matematic și al unor simulări. Pentru a atinge acest obiectiv, am derivat un nou model matematic care este adaptat pentru aplicația propusă de mine. Acest model matematic definește funcțiile de bază ale unui sistem de comunicații fără fir emițător-receptor, în care partea de recepție captează forma de undă a semnalului direct și forma de undă a semnalului reflectat de un perete reflector sau de orice alt obiect din mediul înconjurător. Analiza primară și simularea se fac pe o forma de undă a unui semnal care este transmis de un generator de forme de undă care este un semnal sinusoidal nemodulat. Receptorul va achiziționa semnalul direct de la emițător împreună cu forma de undă a semnalului reflectat care revine de la peretele reflector.

Implementarea modelului matematic nou elaborat, dezvoltarea algoritmilor necesari și rezultatele simulării au fost realizate cu ajutorul software-ului gratuit Octave. Acesta este un instrument de simulare eficient, care utilizează un limbaj de programare de nivel înalt, conceput pentru calcule matematice complexe. Acest instrument este utilizat cu succes de către numeroase universități și centre de cercetare, ca o alternativă a bine-cunoscutului mediu de simulare MATLAB, care poate fi utilizat doar pe bază de licență.

Rezultatele grafice ale simulării ajută la validarea modelului matematic (a se vedea secțiunea 4.2) și, împreună cu calculele prelabile efectuate pentru a verifica soluția propusă (a se vedea secțiunea 4.1),

ajută la atingerea acestui obiectiv și la verificarea faptului că acest model este corect dimensionat și conceput.

- **Obiectivul 6 – Concluziile, propuneri de optimizări ulterioare și prezentarea unor domenii alternative în care această soluție ar putea fi implementată**

Teza de doctorat se finalizează cu un set de concluzii legate de soluția propusă și de stadiul actual al cercetării. Apoi stabilește mai multe idei de îmbunătățire a soluției propuse, cu diverse idei de implementare și dezvoltare ulterioară. O sinteză integrală a contribuțiilor teoretice și practice este descrisă în detaliu în secțiunile 5.1 și 5.2. Aceste secțiuni descriu ideea de a grupa tehnologiile pe baza traiectoriei lor de evoluție la nivel regional și de a observa modul în care diverse organizații de standardizare cercetează și inovează în vederea obținerii unui set de specificații optimal și cu o implementare fiabilă, care să fie adoptat de producătorii de dispozitive și dezvoltatorii de aplicații din întreaga lume.

În plus, secțiunile 5.4 și 5.5 ajută la formularea de concluzii privind direcțiile viitoare de cercetare și alte idei de implementare pentru soluția practică propusă.

Prezentarea pe parcursul capitolului 5 a tuturor concluziilor, a contribuțiilor personale și a viitoarelor direcții de cercetare a facilitat atingerea acestui ultim obiectiv al tezei mele de doctorat.