

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Šarūnas STANAITIS

TRANSPORTO PRIEMONIŲ RADIO
RYŠIO SAUGOS PRANEŠIMŲ
KOKYBĖS CHARAKTERISTIKŲ
TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algimantas KAJACKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

doc. dr. Aurimas ANSKAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

doc. dr. Saulius JAPERTAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Julius SKUDUTIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Oponentai:

prof. dr. Šarūnas PAULIKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Algimantas VALINEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2013 m. sausio 17 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2012 m. gruodžio 14 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 2069-M mokslo literatūros knyga.

© Šarūnas Stanaitis, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Šarūnas STANAITIS

**RESEARCH OF SAFETY MESSAGE
QUALITY CHARACTERISTICS IN
INTER-VEHICLE COMMUNICATION**

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

**TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)**



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Algimantas KAJACKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Assoc Prof Dr Aurimas ANSKAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Assoc Prof Dr Saulius JAPERTAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Julius SKUDUTIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Opponents:

Prof Dr Šarūnas PAULIKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Algimantas VALINEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 10 a. m. on 17 January 2013. Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +37052700112;

e-mail: doktor@adm.vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 14 December 2012. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Įvadas

Mokslo problemos aktualumas. Ryšys tarp automobilių yra nauja komunikacijų sritis, nes pagrindinis standartas IEEE 802.11p buvo patvirtintas tik 2010 m, todėl dar yra neišspręstų ryšio kokybės klausimų.

VANET yra unikalus tinklas, nes tinklo topologija yra decentralizuota, kur užmezgami atsitiktiniai ryšiai tarp labai dinamiškų mazgų – automobilių. Nagrinėjant VANET tinklus reikia įvertinti parametrus, nebūdingus įprastiniams stacionariems tinklams, pvz., mazgų skaičius vienoje aprėpties zonoje, konkretaus saugos pranešimo gavėjo nebuvimas ir kt.

Informacija VANET tinkle yra perduodama grandine. Pranešimai perduodami grandine gali būti maršrutizuojami keliais skirtingais būdais. Labai svarbus maršrutizavimo kriterijus yra vėlinimo laikas, nes saugos pranešimai turi pasiekti gavėjus laiku. Tokiu atveju iškyla dvejopas reikalavimas pranešimų perdavimui – perdavimas turi įvykti greitai ir patikimai. Norint įgyvendinti šį reikalavimą turi būti analizuojami du ribiniai maršrutizavimo algoritmai (greičiausio perdavimo ir didžiausio patikimumo), o surinkti duomenys apie gautą vėlinimo laiką palyginami su leistinu vėlinimo laiku.

Kita ryšio kokybės problema iškyla dėl duomenų paketų praradimo VANET tinkle, kuris atsiranda dėl kliūčių kelyje. Duomenų paketų praradimas reiškia, kad bus prarandami saugos pranešimai, o tai gali tapti avarijų kelyje priežastimi. Kliūčių problema nagrinėjama keliuose moksliniuose darbuose, kur pateikiami tyrimai analizuojantys radijo signalo slopinimą dėl kliūčių (Meireles 2010, Boban 2011), tačiau juose nėra pateikiami paketų praradimo modeliai, reikalingi saugos pranešimų perdavimo patikimumo įvertinimui. Taip pat buvo pastebėta, kad žinomiausi modeliavimo įrankiai nevertina automobilių kaip kliūčių, todėl vykdomi modeliavimai nėra realistiški. Siekiant išvengti avarinių situacijų, turi būti kuriami metodai, leidžiantys sumažinti prarandamų pavojaus pranešimų skaičių.

Apie pavojus kelyje vairuotojai gali būti perspėjami naudojant ryšį tarp automobilių vairuotojo informavimo sistemos pagalba, kuri turi apjungti informaciją iš kelių avarines situacijas nustatančių šaltinių. Informacija turi būti apjungiamą ir atvaizduojama viena patikimo važiavimo indekso išraiška, nes keli skirtingi pranešimai gali trukdyti vairuotojui suvokti situaciją kelyje. Patikimo važiavimo indeksas turi įvertinti tokius dydžius kaip, pvz., saugaus važiavimo atstumas ir patikimo ryšio nuotolis, nes jie gali prieštarauti vienas kitam.

Ryšio tarp automobilių aplinka susideda iš automobilių su žmonėmis, todėl tai yra ir socialinė aplinka. Melagingi pranešimai šiame tinkle gali sukelti

avarijas ir pasitikėjimas VANET gali sumažėti. Todėl reikia išanalizuoti pasitikėjimo, rizikos ir privatumo sąvokas ir pasiūlyti sprendimo būdus.

Tyrimų objektas. Tyrimų objektas – IEEE 802.11p standartu aprašyto ryšio tarp automobilių kokybės charakteristikos.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Pagrindinis darbo tikslas – ištirti ryšio tarp automobilių kokybės charakteristikas: vėlinimus ir paketų praradimus. Papildomai pasiūlyti metodus ir algoritmus, mažinančius prarandamų saugos pranešimų skaičių. Pasiūlyti vairuotojo pasitikėjimo indekso koncepciją ir skaičiavimo metodus.

Darbo tikslui pasiekti siekiama išspręsti sekančius uždavinius:

1. Apibrėžti ribinius perdavimo grandine algoritmus ir ištirti jų efektyvumą perduodant pranešimus grandine.
2. Išanalizuoti duomenų paketų praradimus dėl kliūčių ir pateikti atitinkamus aproksimavimo algoritmus, tinkamus modeliavimams.
3. Sukurti dubliuotų saugos pranešimų perdavimo metodą, kuris leistų sumažinti prarandamų saugos pranešimų skaičių.
4. Sukurti vairuotojo pasitikėjimo indekso koncepciją ryšio tarp automobilių tinkle ir pasiūlyti pasitikėjimo indekso dedamųjų skaičiavimo metodus.
5. Ištirti saugaus važiavimo atstumo priklausomybę nuo kelio sąlygų ir palyginti ją su patikimo ryšio nuotolio išraiška.

Tyrimų metodika. Darbe taikomi statistinės analizės metodai, atliekami eksperimentiniai tyrimai ir simuliacijos, sudaromi modeliai.

Mokslinis naujumas. Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijai reikšmingi rezultatai:

1. Ryšio tarp automobilių eksperimento rezultatai, parodantys prarandamų paketų dėl kliūčių kelyje pobūdį ir tai aprašantys matematiniai modeliai.
2. Pasiūlytas VANET pranešimų pakartotinio perdavimo būdas, skirtas ypatingai svarbių duomenų perdavimo patikimumui didinti.
3. Ištirtos ribinės pranešimų perdavimo grandine maršrutizavimo schemas ir modeliavimais parodytas jų tinkamumas įvairiems leistino vėlinimo atvejams.

4. Susietas saugaus važiavimo atstumas tarp automobilių su patikimo ryšio nuotoliu ir ta sąsaja gali būti naudojama vairuotojo asistento sistemose.

Praktinė vertė. Pasiękti rezultatai gali būti panaudojami sprendžiant VANET ryšio kokybės problemas. Perdavimo grandine modeliavimo rezultatai gali būti naudojami VANET tyrimams ir įgyvendinant maršrutizavimo schemas, kurios numato tam tikrus leistinus vėlinimo laikus. Prarandamų pranešimų skaičių sumažinantis dubliuotų paketų siuntimo metodas gali būti naudojamas kuriant IEEE 802.11p protokolus. Prarandamus paketus aproksimuojančios kreivės gali būti pritaikomos modeliavimo įrankiuose, tam, kad būtų realistiškai modeliuojamos automobilinės radijo signalo kliūtys. Pasitikėjimo indekso išraiška gali būti naudojama kuriant vairuotojo informavimo sistemas.

Ginamieji teiginiai

1. Prarandamų paketų dažnio priklausomybės nuo atstumo tarp automobilių ir tarpinių kliūčių įtakos gali būti aprašomos algebriniais polinomais, kurie gali būti naudojami modeliuojant.
2. Ypatingos svarbos pavojaus pranešimus perduodant dubliuotomis siuntomis, su 20 ms laiko tarpu, iki 62% sumažinama tų pranešimų praradimo tikimybė. Ši tikimybė mažėja didinant kartojimo laiko tarpą.
3. Maršrutizavimo algoritmo pasirinkimą daugelio šuolių grandinėse lemia leistinas vėlinimo laikas.
4. VANET ryšio patikimumo analizę būtina sieti su saugaus važiavimo atstumu. Kai kuriais atvejais, laikantis saugaus atstumo, ryšys tarp mašinų, atitinkantis IEEE 802.11p standartą, gali tapti nepatikimu.
5. V2V ryšiu perduodama informacija vairuotojui turėtų būti pateikiama integruotai su kitų automobilyje įrengtų jutiklių duomenimis susiejant juos vieningu patikimo važiavimo indeksu.

Darbo apimtis. Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Darbo apimtis yra 93 puslapiai, tekste panaudotos 48 numeruotos formulės, 44 paveikslai ir 8 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 64 literatūros šaltiniai.

1. Ryšio tarp automobilių aplinkų tyrimas

Dvi didžiausios problemos keliuose yra avarijos ir spūstys. Jos gali būti sumažinamos naudojant ryšį tarp automobilių ir tarp automobilių ir infrastruktūros įrenginių. Pačios svarbiausios ryšio tarp automobilių funkcijos yra: saugumas, eismo valdymas ir interneto prieiga. Ryšio sąlygos šiame tinkle keičiasi itin greitai, nes ryšio mazgai – automobiliai, juda greitai, o tiesioginio matomumo linija yra dažnai pertraukiama. Siekiant užtikrinti patikimą ir mažo vėlinimo duomenų perdavimą yra sukurtas ryšiui tarp automobilių skirtas IEEE 802.11p standartas. Šis standartas yra pakankamai naujas patvirtintas 2010 m, todėl dar nėra išgalėjusių praktiškų ir sistemingai pateiktų parametru, lemiančių ryšio tarp automobilių kokybę.

Ryšio tarp automobilių mazgai yra dinamiškoje aplinkoje ir juda patys, todėl čia yra svarbūs keli dydžiai, kurie nenagrinėjami statinio tinklo atveju: mazgų skaičius, ryšio aprėptis, duomenų paketų dydis, perdavimo greitis ir kiti parametrai, kurie svarbūs ir įprastiniams (stacionariems) priėigos taškams. Leistinas saugos pranešimų vėlinimo laikas yra vienas iš svarbiausių parametru, kuris yra naudojamas ir tyrimams aprašytiems sekančiuose skyriuose. Kiekvienas pranešimo tipas turi priskirtą leistiną vėlinimo laiką, pvz., perspėjimas apie susidūrimą su priekyje važiuojančiu automobiliu – 100 ms, neišvengiamo susidūrimo nustatymas – 20 ms ir kt. Pavojaus laikus galima suskirstyti į penkias grupes: 20, 100, 500, 1000 ir 2000 ms. Šie vėlinimo laikai naudojami tiriant perdavimą grandine ir analizuojant dubliuotų siuntų metodą.

Ryšys tarp automobilių remiasi IEEE 802.11p standartu. Šis standartas yra įprastinio IEEE 802.11 standarto papildymas. IEEE 802.11p nurodo skirtumus nuo įprastinio standarto, kurie yra reikiami WAVE komunikacijai įgyvendinti. IEEE 802.11 standartas aprašo MAC ir PHY lygmenis. IEEE 802.11p naudoja 802.11a PHY papildymą ir 802.11e MAC lygmens QoS papildymą. WAVE PHY naudoja OFDM. Radijo dažnis yra artimas IEEE 802.11a ir užima dažnių ruožą nuo 5,85 iki 5,925 GHz, kuris yra išskirstytas į kelis 10 ir 5 MHz kanalus.

Egzistuoja dvi pagrindinės ryšio tarp automobilių kokybės problemos: vėlinimai ir prarandami duomenų paketai.

Vėlinimų problema kyla dėl perdavimo grandine, kur kiekvienas tarpinis mazgas įneša vėlinimus. Perdavimo grandine vėlinimai nagrinėjami nedaugelyje darbų, kuriuose nėra išnagrinėtos ribinės maršrutizavimo schemas ir nepatikrintas jų tinkamumas įvairiems leistiniams saugos pranešimų tipams perduoti.

Šiame darbe tiriama prarandamų duomenų paketų problema atsiranda dėl dviejų priežasčių: atstumo tarp komunikuojančių automobilių ir kliūčių, kertančių ryšio liniją. Prarastų duomenų paketų problemą nagrinėja ne daug

autorių, o jų tyrimų duomenų nepakanka, kad būtų sukurti paketų praradimo modeliai, tinkantys modeliavimo įrankiams.

Kita ryšio tarp automobilių problema yra pavojaus situacijos atvaizdavimas vairuotojui. Vairuotojai turi gauti apjungtą ir apdorotą kelių skirtingų šaltinių informaciją apie situaciją kelyje ir atvaizduoti pavojaus lygį vieno saugaus važiavimo indekso pagalba. Egzistuojančios vairuotojų informavimo sistemos dažniausiai atvaizduoja vieną pavojaus tipą ir nepateikia metodų galinčių apjungti kelis pavojaus parametrus. Šiame darbe pateikiamas vieningo saugaus važiavimo indekso apskaičiavimo metodas, apjungiantis kelis skirtingus pavojaus parametrus.

2. Saugos pranešimų vėlinimo laikų tyrimas

Šiame skyriuje pateikiamas saugos pranešimų vėlinimo laikų tyrimas. Analizuojama vėlinimo laikų problematika ir nustatomi pagrindiniai vėlinamų pranešimų parametrai. Modeliuojami ribiniai komunikacijos atvejai ir gauti duomenys sugretinami su leistiniais vėlinimo laikais.

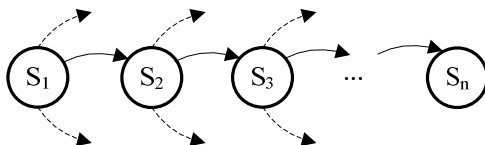
Saugos pranešimų perdavimas yra svarbiausia ryšio tarp automobilių užduotis. Saugos pranešimai turi pasiekti gavėjus laiku, t. y. jų leistinas vėlinimas yra ribotas. Ryšys tarp automobilių susideda iš daugelio mazgų kur informacija yra perduodama grandine, o kiekvienas tarpinis mazgas įneša vėlinimus. Vėlinimai, kuriuos įneša CSMA/CA teoriškai gali būti įvertinami apskaičiuojant laiko dedamąsias. EDCA mechanizmas yra naudojamas nekoordinuotam perdavimui. Šiuo atveju, laikas, reikalingas duomenų paketo perdavimui, susideda iš faktinio paketo perdavimo laiko bei, laiko tarp kadru ir prieigos prie eterio laiko:

$$t_{\text{exp}} = t_{\text{AIFS}} + \text{rand}(CW) \cdot t_{\text{slot}} + t_{\text{packet}}, \quad (1)$$

čia t_{exp} yra pilnutinis vieno duomenų paketo perdavimo laikas; t_{AIFS} – paskirstytos tarpkadrinės erdvės laikas ($t_{\text{AIFS}} = 9 \cdot t_{\text{slot}}$ nurodytas IEEE 802.11e AC0); $\text{rand}()$ – atsitiktinio skaičiaus funkcija; CW – varžymosi laikas; t_{slot} – sloto laikas ($t_{\text{slot}} = 9 \mu\text{s}$ nurodytas OFDM, IEEE 802.11a); t_{packet} – laikas reikalingas duomenų ir antraštės perdavimui, susidedantis iš fizinio lygmens preambulės ir antraštės laiko – t_{PLCP} , 30 baitų MAC antraštės perdavimo – t_{MAC} , MAC serviso duomenų laiko – t_{MSDU} ir 4 baitų kadro sekos patikrinimo laiko – t_{FCS} .

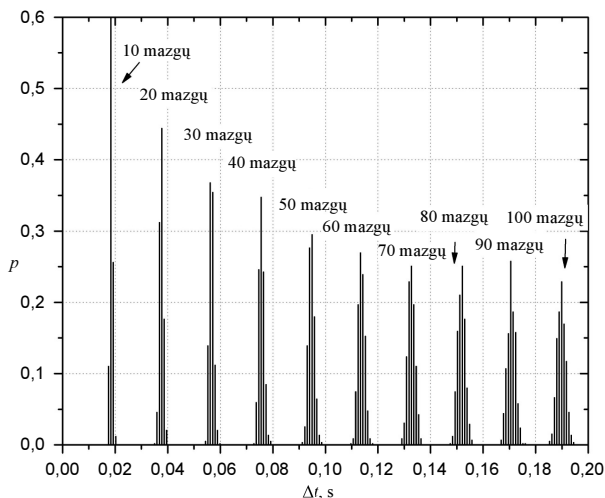
Kadangi naudojamas transliavimo režimas kitų vėlinimų (pvz., patvirtinimo laukimo) nėra.

Siekiant ištirti perdavimo grandine vėlinimo įtaką pranešimų perdavimui, buvo modeliuojami du ribiniai maršrutizavimo scenarijai: vieno pranešimo perdavimo scenarijus (mažiausias vėlinimas, mažiausias patikimumas) ir valdomo srauto scenarijus (didžiausias vėlinimas, didžiausias patikimumas).



1 pav. Vieno pranešimo perdavimas daugelio šuolių grandine

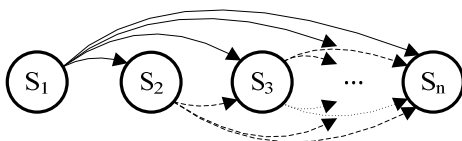
1 paveiksle parodytas scenarijus modeliuoja vieno saugos pranešimo perdavimą daugelio šuolių grandine. Visi mazgai yra toje pačioje radijo ryšio aprėpties zonoje ir dirba tuo pačiu kanalu, todėl jie dalijasi kanala vienodomis teisėmis. Kadangi visi paketai siunčiami transliavimo režimu, jie yra gautami visų stočių ir nėra patvirtinami. Siekiant valdyti „šuliavimą“ viena kryptimi, filtruojamas paketų persiuntimas ir jie nukreipiami šuolis po šuolio pirmyn, t. y. duomenų paketai siunčiami kryptimi $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3$ bet ne $S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$.



2 pav. Vėlinimo laikų skirstiniai įvairaus ilgio grandinėse

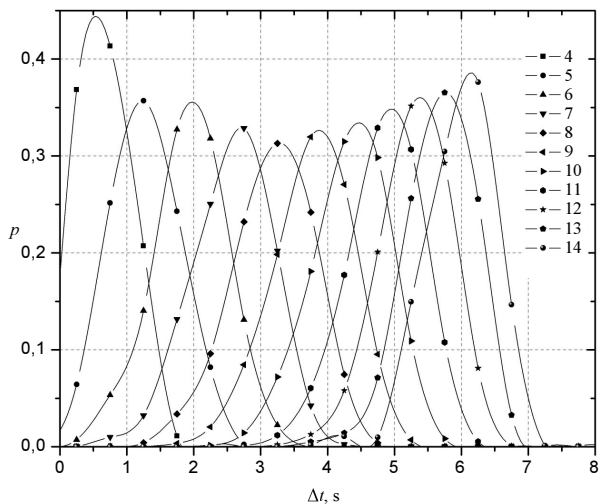
Vieno saugos pranešimo perdavimo scenarijaus atveju vėlinimai buvo skaičiuojami kiekviename mazge, o jų skirstiniai pateikti 2 paveiksle. Vidutinis 100 mazgų grandinės vėlinimas yra 189,3 ms, minimalus yra 184,4 ms, o maksimalus yra 194 ms. Vėlinimo laikų ir skirstinių nuokrypiai yra reliatyviai maži, nes kanalo apkrovimas yra nedidelis. Modeliuojamoje grandinėje vienu metu siunčiamas tik vienas paketas, todėl nevyksta varžymosi procedūra.

Kitas ribinis maršrutizavimo metodas – valdomo srauto scenarijus, parodytas 3 paveiksle.



3 pav. Pranešimo perdavimas valdomo srauto grandinėje

S_1 yra saugos pranešimo šaltinis. Pranešimas yra ištransliuojamas į eterį. Kiekvienas sekantis mazgas gavęs žinutę, retransliuoja tą pačią žinutę vėl laikydamasis sekančios taisyklės: jeigu šaltinio ID yra mažesnis negu mazgo ID, tai žinutę reikia retransliuoti. Jeigu atvirkščiai – žinutės neretransliuojamos.



4 pav. Vėlinimo laikų skirstinys 20 mazgų valdomo srauto scenarijaus atveju

Valdomo srauto scenarijaus atveju vėlinimo laikai yra daug didesni nei vieno pranešimo perdavimo scenarijaus atveju. Taip yra todėl, kad tinklas yra apkraunamas avarinio pranešimo kopijomis, kurių skaičius eksponentiškai didėja, didėjant mazgų skaičiui. Vėlinimų skirstiniai taip pat užima plačias ribas, nes vienu metu tinkle egzistuojant daug pranešimų, didėja susidūrimų skaičius ir įvyksta daug varžymosi procedūrų.

Maršrutizavimo algoritmo pasirinkimas priklauso nuo leistino vėlinimo laiko. Maršrutizavimo algoritmų tinkamumas skirtingiems vėlinimo laikams yra parodytas 1 lentelėje.

1 lentelė. Leidžiamas maksimalus mazgų skaičius grandinėje naudojant skirtingus maršrutizavimo algoritmus

Maršrutizavimo tipas Vėlinimo laikas, ms	Vienas pranešimas 0 Mbps	Vienas pranešimas 1 Mbps	Vienas pranešimas 2 Mbps	Valdomas srautas 10 mazgų	Valdomas srautas 20 mazgų
20	10	(neaišku <10)	(neaišku <10)	<1	(neaišku <4)
100	60	20	10	2	(neaišku <4)
500	>100	>100	70	7	(neaišku <4)
1000	>100	>100	>100	>10	(neaišku <4)
2000	>100	>100	>100	>10	4

3. Saugos pranešimų praradimo tyrimas

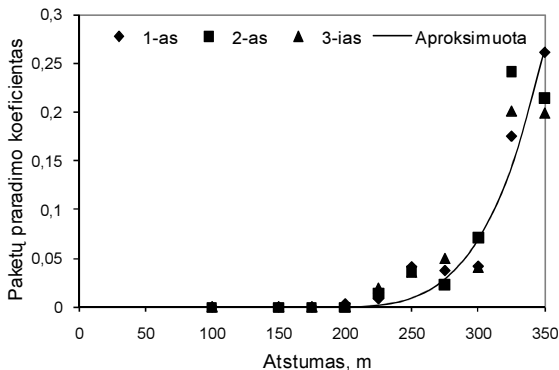
Šiame skyriuje pateikiami eksperimentinio tyrimo rezultatai, nagrinėjantys automobilių, kaip kliūčių, įtaką radijo signalui. Pateikiama detali prarandamų duomenų paketų pobūdžio analizė. Prarandamų paketų pobūdis gali būti aproksimuojamas algebriniais polinomais tiesioginio matomumo ir netiesioginio matomumo atvejams, tinkamais naudoti modeliavimo įrankiuose.

Prarandami duomenų paketai sudaro grupes, t. y., 1 prarastas paketas, 2 prarasti paketai iš eilės, n prarastų paketų iš eilės. Grupavimasis yra aprašytas naudojant geometrinį skirstinį. Šis metodas yra paprasčiausias, bet jo paklaida yra didžiausia. Prarandamos paketų grupės taip pat gali būti aprašomos

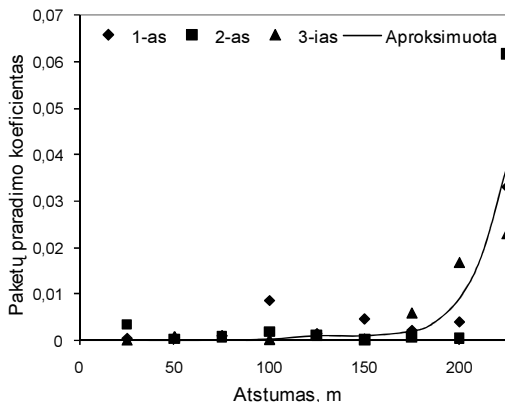
tikslesniais, bet sudėtingesniais ir reikalaujančiais tikslių matavimo duomenų Gilberto-Elioto ir N -būsenų Markovo modeliais.

Gauti rezultatai leidžia aprašyti komunikacijos kanalo modelį, kuris gali būti naudojamas modeliavimo įrankiuose. Komunikacijos kanalo modelis sudarytas tiesioginio ir netiesioginio matomumo atvejams.

Šio skyriaus pabaigoje pateikiamas prarandamų pranešimų skaičiaus sumažinimo metodas, kuris remiasi dubliuotų paketų siuntimu, kai pranešimas pakartojamas po tam tikro laiko tarpo.



5 pav. Paketų praradimai tiesioginio matomumo atveju



6 pav. Paketų praradimai esant kliūtims

Siekiant iširti prarandamų paketų problematiką buvo atlikti eksperimentiniai matavimai perduodant duomenų paketus tarp dviejų

automobilių. Tiesioginio matavimo atveju matavimai buvo atliekami nuo 25 m iki 350 m matuojant kas 25 m ir kartojant kiekvieną matavimą tris kartus. Tiesioginio matavimo atveju paketų praradimai prasideda nuo 200 m. Matuojant su kliūtimis – netiesioginio matavimo atveju, paketų praradimai prasideda jau nuo 25 m ir matavimai buvo vykdyti iki 225 m.

Tiesioginio ir netiesioginio matavimo atvejais prarastų paketų matavimo rezultatai pateikti 5 ir 6 paveiksluose.

Paketų praradimų matavimo rezultatai, parodyti 5 ir 6 paveiksluose, tiesiogiai negali būti naudojami modeliavimo įrankiuose. Norint rezultatus panaudoti, reikia rasti prarandamų paketų pobūdį atitinkančias aproksimuojančias kreives. Gauti rezultatai rodo, kad prarandamų paketų skaičius priklauso nuo atstumo ir gali būti aproksimuojamas naudojant sekančias formules.

Tiesioginio matavimo atveju aproksimavimo formulė yra:

$$p_{\text{LOS}}(l) = A(l - 175)^2 + B(l - 175)^4, \quad (2)$$

čia $A = 1 \cdot 10^{-7}$; $B = 2,8 \cdot 10^{-10}$; l – atstumas.

Netiesioginio matavimo atveju aproksimavimo kreivė yra:

$$p_{\text{NLOS}}(l) = \begin{cases} A(l - 50)^2, & \text{kai } l < 110, \\ A(l - 50)^2 + C(l - 150)^4, & \text{kai } l \geq 110, \end{cases} \quad (3)$$

čia $A = 1 \cdot 10^{-7}$; $C = 1,1 \cdot 10^{-9}$; l – atstumas.

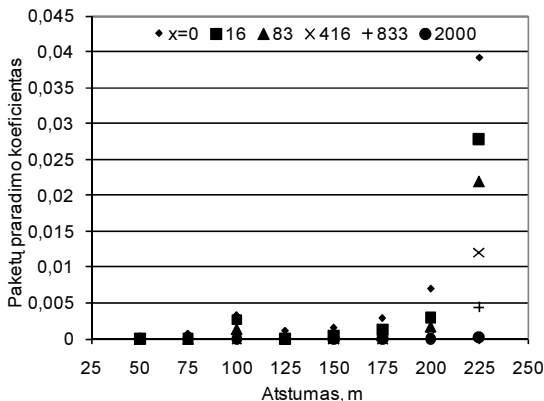
Parametrai A , B ir C rasti naudojant mažiausio kvadratinio nuokrypio kriterijų. Ketvirtojo laipsnio polinomi naudojami, kad būtų pasiekta tiksliausia aproksimavimo kreivė.

Saugos pranešimų perdavimas nėra visada užtikrinamas, todėl reikalingas prarandamų pranešimų skaičiaus sumažinimo mechanizmas. Paprasčiausias yra dubliavimo metodas, kur tas pats pranešimas pakartojamas po tam tikro laiko tarpo. Prarastų paketų koreliacija laiko poslinkiu x gali būti apskaičiuojama pagal sekančią formulę:

$$T_x = \frac{\sum_{i=0}^N (t_i \cdot t_{i+x})}{N}, \quad (4)$$

čia T_x – prarastų paketų skaičius; x – laiko poslinkis; t_i – prarasto paketo numeris; N – visų išsiųstų paketų skaičius, nagrinėjamu atveju $N = 20000$.

Atlikto eksperimento metu paketai buvo siunčiami vidutiniškai kas 1,2 ms, taigi mažiausias galimas laiko poslinkis $x = 1,2$ ms, o visi ilgesni poslinkiai yra x daugikliai. Prarastų pranešimų skaičius su skirtingais laiko poslinkiais, kurie atitinka maksimaliai leistinus vėlinimo laikus, yra parodytas 7 paveiksle.



7 pav. Prarastų pranešimų koeficiento palyginimas esant skirtingam poslinkiui

Gauti dubliuotų paketų siuntimo metodo rezultatai parodo, kad didinant kartojimo laiko tarpą, mažėja tikimybė prarasti pranešimą (7 pav). Taip yra todėl, nes prarandami paketai sudaro grupes: 1 prarastas paketas, 2 prarasti paketai iš eilės ir t.t. Tai reiškia, kad yra blogų ryšio sąlygų laikai, kurių metu paketai prarandami. Kartojimo laiko tarpo didinimas padeda eliminuoti blogo ryšio laikus, nes didėja tikimybė, kad pakartotinis paketas bus siunčiamas gero ryšio laiko tarpu.

4. Vairuotojo informavimo sistema

Šiame skyriuje pateikiamas vairuotojo informavimo sistemos tyrimas. Yra analizuojamos vairuotojo informavimo sistemos ir pateikiamas patikimo važiavimo indekso skaičiavimo algoritmas. Analizuojama patikimo važiavimo dedamoji – saugus atstumas. Įrodyta, kad saugus atstumas kai kuriais atvejais yra didesnis už patikimo ryšio atstumą.

Patikimo važiavimo indeksas susideda iš kelių pavojaus lygi apibūdinančių kintamųjų. Kiekvienas kintamasis turi daryti įtaką bendrai patikimo važiavimo reikšmei, todėl patikimo važiavimo išraiška yra:

$$\Theta_n = t_{\text{dist}} \cdot t_{\text{com}} \cdot t_v \cdot t_{\text{em}} \cdot t_{\text{beacon}} \cdot \dots \cdot t_n, \quad (5)$$

čia t – pavojaus lygis tam tikru atveju, kur t_{dist} – pavojus dėl nesaugaus atstumo nuo priekyje esančio automobilio; t_{com} – pavojus dėl nepatikimo ryšio atstumo su komunikuojančiu automobiliu; t_v – pavojus dėl per didelio greičio esamoje kelio atkarpoje; t_{em} – saugos pranešimo iš VANET lygis; t_{beacon} – pavojus dėl negaunamos švyturinės žinutės; t_n – n -asis pavojaus lygį aprašantis kintamasis.

Patikimo važiavimo vertė Θ_n dinamiškai keičiasi intervale $[0; 1]$, kuriame „1“ reiškia visiškai saugų važiavimą – jokie pavojaus, o „0“ reiškia nesaugų važiavimą – labai pavojinga. t reikšmės taip pat keičiasi intervale $[0; 1]$ ir parodo saugaus važiavimo/pavojaus lygį tam tikroje situacijoje. Ne visos t reikšmės daro tą pačią įtaką bendram patikimo važiavimo lygiui (pvz., sumažėjusio slėgio padangose pranešimas ir pavojaus signalas apie susidūrimą su priekyje važiuojančiu automobiliu), todėl kintamieji, atspindintys mažesnio pavojaus situaciją, neturėtų kisti nuo 0, bet kistų nuo didesnių reikšmių, t. y. turėtų būti nustatoma riba tarp avarinės ir pavojingos situacijos, kur Θ_n reikšmė intervale $[0; 0,5]$ parodo avarinę situaciją, intervale $(0,5; 1)$ pavojingą situaciją.

Patikimo važiavimo apskaičiavimo metodas pateiktas (5) formulėje yra lankstus, nes jame labai lengvai galima įvesti naujus pavojaus signalus ir taip pat lengvai pašalinti nereikiamus pavojaus signalus.

Labai svarbus pavojų parodantis kintamasis yra t_{dist} – pavojaus lygis dėl nesaugaus atstumo nuo priešais važiuojančio automobilio. Saugus atstumas yra apskaičiuojamas pagal (6) formulę:

$$D_{\text{sf}} = v_{n+1} \cdot t_r + \frac{v_{n+1}^2}{2g\mu_{n+1}} - \frac{v_n^2}{2g\mu_n}, \quad (6)$$

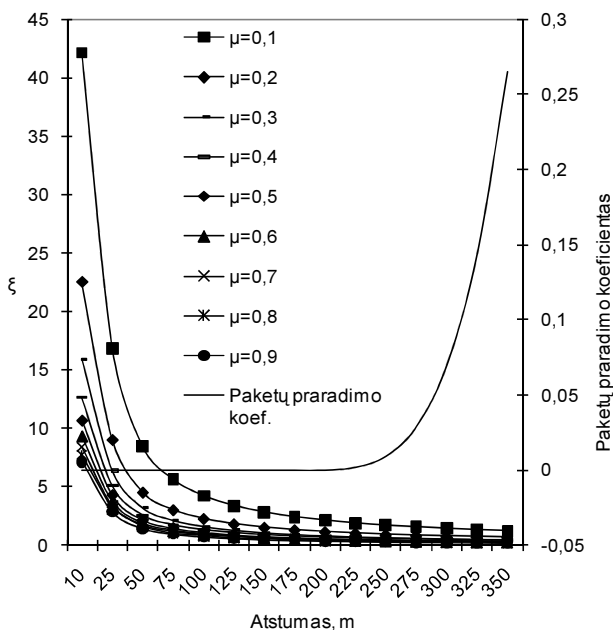
čia D_{sf} – saugus atstumas nuo priekyje esančio automobilio; t_r – sekančiojo automobilio vairuotojo reakcijos laikas; v , v_{n+1} – vedančiojo, sekančiojo automobilio greičiai; g – laisvojo kritimo pagreitis; μ_n , μ_{n+1} – vedančiojo, sekančiojo automobilio statinės trinties koeficientai.

Naudojant (6) formulę, gali būti išreiškiamas rizikos indikatorius:

$$\xi_{n+1}(t) = \left(v_{n+1} \cdot t_r + \frac{v_{n+1}^2}{2g\mu_{n+1}} \right) \frac{1}{d_{n,n+1}(t)}. \quad (7)$$

čia $d_{n,n+1}$ – atstumas nuo priekyje esančio automobilio.

Formulė (7) susieja rizikos indikatorius reikšmę su automobilio parametrais: greičiu, statinės trinties koeficientu ir atstumu tarp automobilių. Pagal užsiduotą rizikos lygį gali būti suskaičiuojami saugūs atstumai.



8 pav. Rizikos indikatoriaus priklausomybė nuo atstumo ($t_r = 1$ s, $v = 100$ km/h ir kintamos μ reikšmės)

Kreivės, atvaizduotos 8 paveiksle, susieja saugų atstumą su patikimo ryšio nuotoliu. Projektuojant VANET tinklus į tai reikia atsižvelgti, nes, kai kuriais atvejais, patikimo ryšio nuotolis yra mažesnis nei saugus važiavimo atstumas. Grafike (8 pav.) parodyta, kad esant slidžiai kelio dangai ($\mu = 0,1$) saugus važiavimo atstumas yra didesnis nei 225 m, o nuo 225 m ryšys tampa nepatikimas, nes atsiranda paketų praradimai.

Bendrosios išvados

1. Eksperimentų rezultatai patvirtina teorines išvadas, kad prarandamų paketų dažnis priklauso nuo atstumo tarp automobilių – mazgų ir bangų sklidimo kelius kertančių kitų automobilių. Pateiktos prarandamų paketų aproksimavimo funkcijos gali būti naudojamos modeliavimams, kurie įvertina automobilių įtaką paketų perdavimams.
2. Modeliavimo rezultatai rodo kaip maršrutizavimo algoritmo pasirinkimą lemia leistinas vėlinimo laikas:

- a) kai leidžiamas mažiausias 20 ms vėlinimas, gali būti naudojamas tik dešimties šuolių vieno pranešimo perdavimo maršrutizavimo algoritmas (blogiausias patikimumas, mažiausiai apkrauna kanalą);
 - b) kai leidžiamas 2 s vėlinimas, gali būti naudojamas dvidešimties mazgų valdomo srauto maršrutizavimo algoritmas (didžiausias patikimumas, labiausiai apkrauna kanalą). Šiuo atveju šuolių skaičius neturėtų viršyti keturių.
3. Remiantis eksperimento rezultatais nustatyta, kad ypatingos svarbos pavojaus pranešimus perduodant dubliuotomis siuntomis su 20 ms laiko tarpu, pranešimų praradimo tikimybė sumažėja iki 62% ir toliau mažėja didinant kartojimo laiko tarpą. Pateikta pranešimų kartojimo metodika gali būti naudojama kuriant WSM protokolus.
 4. Pasiūlyta VANET ryšio patikimumo sąlygas susieti su saugaus važiavimo atstumu. Iš šios sąsajos seka, kad:
 - a) geromis sąlygomis, kai važiavimo greitis 90 km/h, saugus atstumas yra apie 60 m, todėl vieno automobilio patikimo ryšio aprėpties zonoje yra trys – keturi automobiliai;
 - b) didėjant važiavimo greičiui, saugus atstumas didėja, todėl patikimas ryšys galimas tarp mažesnio automobilių kiekio;
 - c) slidžiame kelyje, kai važiavimo greitis 90 km/h, saugus atstumas yra apie 340 m, todėl, laikantis tokio atstumo, bus prarandama dalis išsiųstų paketų.
 5. Sukurtas patikimo važiavimo indekso algoritmas, kuriame besikeičianti saugaus važiavimo indekso reikšmė parodo pavojaus kelyje lygį ir vairuotojas gali atskirti kada yra perspėjimas, o kada avarinė situacija.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Kajackas, A.; Vindašius, A.; Stanaitis, Š. 2009a. Inter-Vehicle Communication: Emergency Message Delay Distributions, *Electronics and Electrical Engineering* 8(96): 33–38. ISSN 1392-1215 (Thomson Reuters Web of Knowledge)

Kajackas, A.; Mikėnas, K.; Stanaitis, Š. 2012. Investigation of Link Layer in Inter-Vehicle Wireless Communication, *Electronics and Electrical Engineering* 6(122): 71–74. ISSN 2029-5731 (Thomson Reuters Web of Knowledge)

Stanaitis, Š. 2010. Intervehicle Communication Research – Communication Scenarios, *Science – Future of Lithuania* 2(1): 77–80. ISSN 2029-2341 (Index Copernicus)

Kituose leidiniuose

Vindašius, A; Stanaitis, Š. 2010. Analysis of Emergency Message Transmission Delays in Vehicular Wireless Mesh Network, *IEEE Third International Conference on Advances in Mesh Networks*. Venice, 35–40. ISBN 978-0-7695-4092-4 (Conference Proceedings Citation Index)

Trumpos žinios apie autorių

Šarūnas Stanaitis gimė 1981 m. rugsėjo 16 d. Vilniuje. 2003 m. įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2005 metais įgijo mikrosistemų inžinerijos magistro laipsnį Vokietijos Furtvengeno taikomųjų mokslų universiteto Kompiuterių ir elektros inžinerijos fakultete. 2006 m. taip pat įgijo elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. Nuo 2008 iki 2012 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Nuo 2007 m. dirba įmonėje Schneider Electric, o nuo 2012 m. taip pat asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakulteto Telekomunikacijų inžinerijos katedroje.

RESEARCH OF SAFETY MESSAGE QUALITY CHARACTERISTICS IN INTER-VEHICLE COMMUNICATION

Topicality of the problem. Inter-Vehicle communication is a quite new communication field, as a main standard IEEE 802.11p is released in 2010. There are still some unsolved quality issues regarding Inter-Vehicle communication.

VANET is a unique network, because the network topology is decentralised, nodes are very dynamic and build stochastic connections. Therefore analyzing VANET it is necessary to consider parameters, which are not characteristic to stationary networks, i.e. node number in one hop, not known safety message destination, etc.

The lack of important vehicular parameter definition and summary leads to poor understanding of quality issues in the vehicular networks.

The information in VANET is transmitted using multi-hop communication. To route information in a multi-hop network, several routing scenarios are possible. Very important criterion for routing scheme is the message delay time, because an emergency message should reach receivers on

time. This sets twofold criterion: the message transmission should be fast and reliable. To implement this criterion boundary routing algorithms (the smallest delay and the biggest reliability) should be analyzed and the collected data compared to allowed latency time of different use cases.

Another quality issue in VANET is a packet loss, which occurs due to obstacles on the road. The packet loss means that emergency messages can be lost due to the obstacles, which can cause the road accidents. There are some papers analyzing the radio signal attenuation due to obstacles, but they do not build the packet loss models. The well-known modelling tools do not consider the communication path crossing vehicles as obstacles, causing non-realistic simulations.

A packet loss due to the obstacles on the road can cause the road accidents, because drivers will be not informed about the dangerous situation ahead. Therefore, the methods to reduce the lost emergency message number should be created.

Using the Inter-Vehicle communication, the drivers are informed about dangerous situations on the road. A method to inform a driver is the driver information system, which should unite safety information from several sources and, in order not to confuse a driver, present it in one unified manner. This can be done using the confidence index expression, which should process data from many sources and present a level of danger for the driver. The confidence index should compare, for example, such values as a safe following distance and a reliable communication distance, as they can be opposing each other.

The vehicular environment consists of vehicles with human drivers creating the social environment as well. The malicious emergency messages from the drivers with uncertain intentions can lead to the road accidents and so decrease a trust of VANET. Therefore the trust, risk and privacy issues should be analyzed and solutions proposed.

The object of research. The Object of research is quality characteristics of Inter-Vehicle communication, which is based on IEEE 802.11p standard.

Aim and tasks of the work. The main objective of current research is to investigate Inter-Vehicle communication quality characteristics: packet loss and delay. Additionally propose a redundant safety message transmission method and create the confidence index concept and the calculation method.

Following tasks should be accomplished to reach the objectives:

1. Define the boundary vehicular multi-hop transmission algorithms and investigate their performance for latency times defined in different use cases.

2. Analyze a packet loss caused by obstacles on the road and define approximation equations, for use in modelling tools.
3. Create the redundant packet transmission method for the lost safety message reduction.
4. Investigate the confidence index concept in a vehicular network and propose the confidence metrics calculation method.
5. Investigate the safe following distance dependency on road conditions and compare it to reliable communication distance.

Methodology of research. To investigate the object of research statistical analysis, experimental measurements, simulations and modelling are performed.

Scientific novelty. The theoretical and experimental research has brought the following new achievements for the science:

1. The experimental results of packet losses, which show lost packet trend due to obstacles and this trend describing mathematical models.
2. A proposed VANET message redundant transmission method, which increases reliability of safety message transmission.
3. The defined and analyzed boundary routing schemes for vehicular multi-hop chains and shown their suitability for different use cases using simulations.
4. A vehicle safe following distance is aligned to the reliable communication distance.

Practical significance of the results. The achieved results can be used for solving quality issues in VANET. The simulation results of multi-hop delay research can be used analysing VANET performance and implementing routing schemes for use cases with different allowed latency times. A redundant packet transmission method should be used in IEEE 802.11p protocols to increase the number of successfully transmitted emergency messages. The packet loss approximations can be applied to existing modelling tools, to get the realistic obstructing vehicle influence on transmitted packets. The confidence index expression can be used creating the driver information systems.

Defended propositions

1. A packet loss rate depends on the distance and obstacles and can be described using algebraic polynomials for use in modelling tools.

2. Sending very important messages redundantly with time shift 20 ms will reduce lost message 62% of the initial risk ratio and is getting lower with increased time shift.
3. The multi-hop routing algorithm selection is defined by allowed latency time of actual use case.
4. The VANET communication analysis should be related to a vehicle safe following distance because, in certain cases, keeping the safe following distance, the IEEE 802.11p communication can get unreliable.
5. The V2V information should be combined with onboard sensor information and presented for the driver with one unified Confidence index expression.

The scope of the scientific work. Dissertation consists of introduction, four chapters and general conclusions. The first chapter gives detailed overview of Inter-Vehicle environments and defines the main Inter-Vehicle communication parameters. The second chapter summarizes research of safety message transmission delays in vehicular multi-hop chains and gives modelling results of boundary communication scenarios. Experimental measurements were performed to investigate a packet loss due to obstacles on the road and results described in the third chapter. Given approximation equations, can be used in modelling tools and the redundant packet transmission method can be used to reduce a number of lost safety messages. The fourth chapter presents analysis of the driver information system, where flexible confidence index calculation algorithm is proposed. Dissertation includes 93 pages of text, 48 equations, 9 tables, 44 figures and 64 references. 4 scientific articles have been published by the author on the topic of the dissertation.

General conclusions

1. Experimental results prove theoretical conclusions that a packet loss trend depends on the distance between vehicles – nodes and LOS obstructing other vehicles. Given approximation equations can be used for modelling tasks, which consider vehicles as obstacles.
2. Simulations show how the latency time of current use case influences multi-hop routing algorithm selection:
 - a) when the allowed latency time is 20 ms, only a single message transmission scenario (worst reliability, lowest channel consumption) with 10 nodes chain can be used;

- b) when the allowed latency time is 2 s, a controlled flood scenario (reliable, most channel consuming) with 20 nodes can be used. In this scenario safety messages should be routed so, that a routing path will not be longer than 4 nodes.
3. Experimental results show that redundantly transmitting very important emergency messages with time shift 20 ms will reduce lost message number by 62% and gradually decreases with increasing time shift. This redundant transmission method can be used developing WSM protocols.
4. It is proposed to relate a reliable communication distance with a safe following distance:
 - a) in normal driving conditions, when a velocity is 90 km/h, a safe distance is ~60 m, therefore, the reliable communication in one hop is between three – four cars;
 - b) with increasing velocity, a safe distance increases, therefore, the reliable communication is between a fewer vehicles;
 - c) on the icy road, when a velocity is 90 km/h, a safe distance is ~340 m. Keeping this distance will lead to unreliable communication and part of transmitted packets will be lost.
5. Created the novel confidence index algorithm, where dynamic confidence value can show a level of danger for the driver, who then can distinguish between warning and emergency situations. The proposed algorithm can be easily implemented in the driver assistant systems.

About the author

Sarunas Stanaitis was born on 16th of September, 1981 in Vilnius, Lithuania. In 2003 he obtained bachelor of sciences degree in Electrical and Electronics engineering at Vilnius Gediminas technical University. Master of sciences degree was obtained in 2005 at Furtwangen University of Applied Sciences in Germany and in 2006 at Vilnius Gediminas technical University. Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas technical University in 2008–2012. Sarunas has been working in Schneider Electric since 2007 and since 2012 in Department of Telecommunication Engineering in Gediminas technical University.

Šarūnas STANAITIS

TRANSPORTO PRIEMONIŲ RADIO RYŠIO SAUGOS PRANEŠIMŲ
KOKYBĖS CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Šarūnas STANAITIS

RESEARCH OF SAFETY MESSAGE QUALITY CHARACTERISTICS IN
INTER-VEHICLE COMMUNICATION

Summary of Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering (01T)

2012 12 14. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius