



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Arnis Ancāns

AUTOTRANSPORTA BEZVADU SAKARU TĪKLU VEIKTSPĒJAS PĒTĪŠANA UN TĀS PAAUGSTINĀŠANA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Arnis Ancāns

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

**AUTOTRANSPORTA BEZVADU SAKARU
TĪKLU VEIKTSPĒJAS PĒTĪŠANA UN TĀS
PAAUGSTINĀŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
ERNESTS PĒTERSONS

RTU Izdevniecība

Rīga 2021

Ancāns, A. Autotransporta bezvadu sakaru tīklu veikspējas pētīšana un tās paaugstināšana. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 41 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2021. gada 17. maija lēmumu, protokols Nr. 2.

<https://doi.org/10.7250/9789934226588>

ISBN 978-9934-22-658-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 27. augustā Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Jurgis Poriņš
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Vadošais pētnieks *Dr. habil. sc. ing.* Manfreds Šneps-Šnepe
Ventspils Augstskola, Latvija

Profesors *Dr. habil. dat.* Juris Borzovs
Latvijas Universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Arnis Ancāns (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir piecas nodaļas, nobeigums, literatūras saraksts, 52 attēli, 14 tabulas, deviņi pielikumi, kopā 141 lappuse, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 182 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Tādas globālās attīstības tendences kā automobiļu skaita pieaugums, viedo ierīču ar bezvadu tīkla savienojumu skaita palielināšanās un pārraidāmās informācijas apjoma straujais pieaugums, veicina pieprasījumu pēc lielāka datu apmaiņas ātruma, mobilitātes un augstāka savienojamības līmeņa. Tādējādi tiek pieprasīti datu pārraides pakalpojumi arī tādos gadījumos, kad lietotāji pārvietojas ar autotransportu. Pieaugot automobiļu skaitam, jārisina arī problēmas, kas ir saistītas ar drošību uz ceļiem un transporta plūsmu vadību. Šīs problēmas akcentē nepieciešamību pēc mūsdienīgiem, tehniski un ekonomiski pamatotiem intelektuālo transporta sistēmu (*ITS*) sakaru risinājumiem. Viena no bezvadu tīklu tehnoloģijām, ko var izmantot *ITS* vajadzību nodrošināšanai, konkrēti automobiļu pasažieru nodrošināšana ar piekļuvi datu pārraides tīklam, ir *WLAN IEEE 802.11n/ac*. Realizējot šādus *WLAN* bāzētus automobiļu bezvadu sakaru piekļuves tīklus, ir jārisina vairāki jautājumi, kas galvenokārt ir saistīti ar ātri kustīgiem objektiem. Praksē izmantojams ir divrangu bezvadu sakaru tīkls, kas var nodrošināt piekļuvi interneta tīklam.

Promocijas darbā izveidotas un izpētītas vairākas divrangu autotransporta sakaru tīkla testgultnes, izmantojot *WLAN IEEE 802.11n* un *LTE* tehnoloģijas. Eksperimentāli novērtēts, kā mainās datu trafika raksturlielumi divrangu sakaru tīklā, izmantojot dažādu ražotāju *LTE* aparatūru. Pētīta šādu hibrīdu sakaru kanālu veiktspēja atkarībā no mobilo klientu pārvietošanās ātruma, klientu skaita un izmantotajiem kustības scenārijiem. Iegūtas jaunas integrētu *IEEE 802.11n* un *LTE* autotransporta sakaru tīklu veiktspēju raksturojošas likumsakarības, kas apraksta tīkla caurlaidspējas atkarību no mobilā klienta pārvietošanās ātruma. Promocijas darbā izveidota un izpētīta arī vienranga autotransporta sakaru testgultne, kas bāzēta *IEEE 802.11ac* tehnoloģijā. Pētījumā izstrādāts un realizēts uzlabots *IEEE 802.11v* standartā bāzēts pārslēgšanās procedūras (angļu val. *handover*) algoritms. Šādam vienranga automobiļu sakaru tīklam teorētiski novērtētas veiktspēju raksturojošas likumsakarības.

SATURA RĀDĪTĀJS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	6
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	8
Tēmas aktualitāte.....	8
Darba mērķis un uzdevumi	9
Pētījumu metodika.....	10
Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte	11
Promocijas darba praktiskā vērtība	12
Promocijas darba aizstāvamās tēzes.....	13
Rezultātu aprobācija	13
Darba apjoms un struktūra	15
PROMOCIJAS DARBA SATURS.....	17
Pirmā nodaļa.....	17
Otrā nodaļa	19
Trešā nodaļa	25
Ceturtnā nodaļa	28
Piektā nodaļa	32
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI.....	36
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	38

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

4G (*Fourth Generation*) – ceturtais paaudzes mobilie sakari

5G (*Fifth Generation*) – piektās paaudzes mobilie sakari

5G NR (*5G New Radio*) – 5G tehnoloģija NR

A

ACK (*Acknowledgement*) – apliecinājums

AL caurlaidspēja – aplikācijas līmeņa (slāņa) caurlaidspēja

AP (*Access Point*) – bezvadu piekļuves punkts

B

BSc (*Base Scenario*) – prognožu pamatscenārijs

BSS (*Basic Service Set*) – pamatpakalpojumu kopa

C

C-V2X (*Cellular-V2X*) – mobilā šūnu tīkla V2X sakari

CAV (*Connected and Automated Vehicle*) – savienots un automatizēts transportlīdzeklis

D

DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) – dinamiskā resursdatora konfigurācijas protokols

E

ES – Eiropas Savienība

F

FTP (*File Transfer Protocol*) – failu pārsūtīšanas protokols

G

GPS (*Global Positioning System*) – globālā pozicionēšanas sistēma

H

HP (*Hewlett-Packard*) – kompānija HP

I

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) – Elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts

IP (*Internet Protocol*) – interneta protokols

ITS (*Intelligent Transport Systems*) – intelektuālās transporta sistēmas; intelektiskas transporta sistēmas

L

L4 (*Layer 4; Transport Layer*) – transporta slānis

L7 (*Layer 7; Application Layer*) – lietojuma (aplikācijas) slānis

LAA (*Licensed Assisted Access*) – licencētā asistētā radiopiekļuve

LAN (*Local Area Network*) – lokālais datortīkls

LTE (*Long Term Evolution*) – starptautisko mobilo telesakaru sistēma LTE

LTE-U (Long Term Evolution-Unlicensed) – starptautisko mobilo telekomunikāciju sistēma
LTE koplietojamām (nelicencētām) frekvenču joslām

LWA (LTE-Wi-Fi Link Aggregation) – *LTE* un *Wi-Fi* savienojumu apvienošana

M

MAC (Medium Access Control) – vides piekļuves vadības protokols

MB (Megabyte) – megabaits

MSE (Mean Squared Error) – vidējā kvadrātiskā kļūda

O

OBU (On-Board Unit) – transportlīdzekļa aparatūra (bortaparātūra)

OSI (Open System Interconnection) – atvērto sistēmu sadarbība

R

RSRP (Reference Signal Received Power) – references signāla uztvertā jauda

RSRQ (Reference Signal Received Quality) – references signāla uztvertā signāla kvalitāte

RSS (Received Signal Strength) – uztvertā signāla stiprums

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – uztvertā signāla stipruma indikators

RSU (Roadside Unit) – ceļmalas aparatūra

S

Sc (Scenario) – prognožu scenārijs

SINR (Signal to Interference Noise Ratio) – signāla un traucējumu plus trokšņa attiecība

SNMP (Simple Network Management Protocol) – vienkāršais tīkla pārvaldības protokols

SSR (Sum of Squared Residuals) – noviržu kvadrātu summa

STA (Station) – 802.11 darbstacija

T

TCP (Transmission Control Protocol) – pārraides vadības protokols

TH (Threshold) – sliekšņvērtība (robežvērtība)

TL caurlaidspēja – transporta līmeņa (slāņa) caurlaidspēja

TM (Transition Management) – pārejas vadība

V

V2I (Vehicle-to-Infrastructure) – sakari “transportlīdzeklis-infrastruktūra”

V2N (Vehicle-to-Network) – sakari “transportlīdzeklis-tīkls”

V2P (Vehicle-to-Pedestrian) – sakari “transportlīdzeklis-kājāmgājējs”

V2V (Vehicle-to-Vehicle) – sakari “transportlīdzeklis-transportlīdzeklis”

V2X (Vehicle-to-Everything) – sakari “transportlīdzeklis-viss”

W

WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) – bezvadu piekļuve transportlīdzekļu vidē

Wi-Fi (Wireless Fidelity) – bezvadu lokālais tīkls

WLAN (Wireless Local Area Network) – bezvadu lokālais tīkls

WLC (Wireless LAN Controller) – bezvadu tīkla kontrolieris

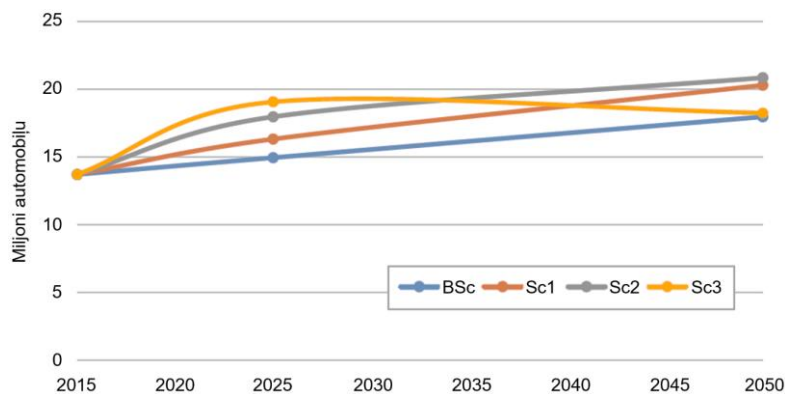
WPA (Wi-Fi Protected Access) – *Wi-Fi* aizsargāta pieeja

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pieaugošais datu pārraides apjoms bezvadu sakaru tīklos un pieprasījums pēc visuresošas savienojamības un mobilitātes mūsdienu bezvadu sakaru tīkliem nosaka aizvien lielākas prasības. Informācijas sabiedrība pieprasa augsta līmeņa savienojamības risinājumus ne tikai fiksētā vidē, bet arī atrodoties ceļā – pārvietojas ar autotransportu.

Automobiļu skaita pieaugums [53] un līdz ar to arī autotransporta ceļu noslodzes palielināšanās rada virkni problēmu, piemēram, pieaug ceļu satiksmes negadījumu skaits, palielinās sastrēgumi un pieaug piesārņojuma līmenis. Vieglo automobiļu prognozētie pārdošanas apjomi Eiropas Savienībā (ES) (1. att.) ietver vairākus scenārijus [53]. Atšķirībā no *Sc1*, *Sc2* un *Sc3* scenārijiem, kur tiek ņemta vērā savienoto un automatizēto automobiļu (angļu val. *Connected and Automated Vehicle – CAV*) tehnoloģiju ietekme, pamatscenārijā (angļu val. *Base Scenario – BSc*) šo tehnoloģiju ietekme netiek ņemta vērā. *Sc1*, *Sc2* un *Sc3* scenāriju līkņu raksturs mainās atkarībā no prognozētā tehnoloģiju attīstības, likumdošanas regulējuma un tehnoloģiju adoptācijas līmeņa. *Sc1* scenārijs paredz zemu minēto jomu attīstības līmeni, *Sc2* – vidēju, savukārt *Sc3* – augstu katras jomas attīstības līmeni. Atkarībā no izmantotā scenārija tiek prognozēts pasažieru automobiļu pārdošanas apjoma pieaugums: 2015.–2025. gadā no 18 % līdz 39 %; 2015.–2050. gadā no 33 % līdz 51 %. *Sc3* scenārijā ilgtermiņā prognozējamais pasažieru automobiļu pārdošanas apjoma samazinājums ir saistīts ar prognozēto automobiļu koplietošanas pakalpojumu dominēšanu nākotnē, kas varētu veicināt pieprasījuma samazināšanos pēc privātajiem automobiļiem.



1. att. Prognozētie vieglo automobiļu pārdošanas apjomi ES dažādos scenārijos [53].

Saskaņā ar Eiropas Komisijas datiem ES pasažieru automobiļu aktivitāte uz ceļiem pieaugs par 9 % un 30 % attiecīgi 2015.–2025. gadā un 2015.–2050. gadā. Savukārt kravas automobiļu aktivitāte uz ceļiem minētajā laikā pieaugs par 16 % un 46 % [53]. Prognozētās aktivitātes pieaugums uz autoceļiem ir saistīts ar savienoto un autonomo automobiļu pozitīvo ietekmi, automobiļu skaita pieaugumu, kā arī prognozēto ekonomiskās aktivitātes un izaugsmes pieaugumu. Tas nozīmē, ka iedzīvotāji kopumā vairāk laika pavadīs, pārvietojoties ar automobiļiem.

Ar automobiļu skaita pieaugumu saistītās problēmas, kas tika minētas iepriekš, efektīvi var risināt, izmantojot intelektuālās transporta sistēmas (angļu val. *Intelligent Transport Systems – ITS*), kas tiek sauktas arī par intelektiskām transporta sistēmām vai arī automatizētām transporta sistēmām. *ITS* aptver gan privātos transportlīdzekļus, gan komerctransportu, jo kopējā satiksmes drošības līmeņa paaugstināšana var tikt nodrošināta, iesaistot visus ceļu satiksmes dalībniekus, arī gājējus. Papildus *ITS* risina arī problēmas, kas ir saistītas gan ar pašu transportlīdzekļu, gan ar transportlīdzekļu pasažieru piekļuvi interneta tīklam, atrodoties kustībā. Katrs automobiļa pasažieris tiek uzskatīts par mobilo klientu, kuram ir jānodrošina piekļuve datu pārraides pakalpojumiem.

Cisco globālā prognoze rāda, ka viedo ierīču ar mobilā tīkla savienojumu īpatsvars attiecībā pret vienkāršajām (angļu val. *non-smart*) ierīcēm ar mobilā tīkla savienojumu 2022. gadā pieaugs līdz 73 %, salīdzinot ar 53 % 2017. gadā [18]. *Cisco* prognozē arī to, ka globālais mobilo datu trafiks no 2017. līdz 2022. gadam pieaugs gandrīz septiņas reizes, sasniedzot 77 eksabaitus mēnesī [18]. Minētās prognozes uzskatāmi parāda strauju pieprasījuma pieaugumu pēc datu tīkla pakalpojumiem.

Izanalizējot iepriekš apskatītās tendences, var secināt, ka transportlīdzekļu pasažieri aktīvi izmantos datu pārraides pakalpojumus, arī atrodoties ceļā. Apskatītās tendences pamato nepieciešamību pēc mūsdienīgiem *ITS* sakaru risinājumiem.

Darba mērķis un uzdevumi

Pamatojoties uz autotransporta sakaru tīklu attīstības virzienu novērtējumu, tika definēts **promocijas darba mērķis** – izpētīt un novērtēt integrētu, *IEEE 802.11n/ac* un *LTE* standartos bāzētu autotransporta sakaru tīklu veiktspēju un veikt *IEEE 802.11ac* bezvadu piekļuves tīkla veiktspējas paaugstināšanu.

Lai sasniegtu definēto mērķi, bija nepieciešams veikt vairākus **pamatuzdevumus**.

1. Veikt izpēti par autotransporta nozarē izmantotajiem un perspektīvajiem telekomunikāciju bezvadu tīklu risinājumiem pēc to lietojuma veida, veikt šādu tīklu nākotnes tendenču un attīstības virzienu novērtējumu.
2. Veikt izpēti par *WLAN* tehnoloģijas darbības principiem un realizētajiem drošības mehānismiem.
3. Veikt izpēti par *LTE* tehnoloģiju, izpētīt galvenos uztvertā *LTE* signāla parametrus. Izpētīt iespējamās *WLAN* un *LTE* konverģences risinājumus.
4. Izveidot testgultni integrētam *WLAN* un *LTE* automobiļu sakaru tīklam. Novērtēt tā veiktspēju, izmantojot dažādu ražotāju *LTE* aparatūru. Veikt šāda tīkla veiktspējas novērtējumu atkarībā no mobilo klientu skaita un izmantotajiem kustības scenārijiem.
5. Definēt parametrus divrangu *WLAN* un *LTE* autotransporta sakaru tīkla tehniski ekonomiskā pamatojuma izstrādei un saskaņā ar to veikt šāda tīkla tehniski ekonomisko novērtējumu.
6. Noteikt likumsakarību starp integrēta *WLAN* un *LTE* sakaru kanāla caurlaidspēju un automobiļa (mobilā klienta) kustības ātrumu. Minētā likumsakarība jānosaka gan transporta līmeņa (TL), gan aplikācijas līmeņa (AL) caurlaidspējai. Likumsakarību

noteikšanai nepieciešams veikt eksperimentālus mērījumus. Iegūtos mērījumu datus nepieciešams apstrādāt, izmantojot statistiskās datu apstrādes metodes.

7. Izstrādāt divrangu sakaru tīkla *LTE* daļas monitoringa risinājumu statistikas datu iegūšanai par *LTE* tīkla signāla stipruma un signāla kvalitātes parametriem.
8. Izpētīt *IEEE 802.11k/r/v* standartus. Izstrādāt risinājumu pārslēgšanās procedūras uzlabošanai *WLAN* tīklā, lai paaugstinātu *WLAN* bāzēta automobiļu sakaru tīkla kopējo veiktspēju. Veikt eksperimentālu veiktspējas parametru novērtējumu izstrādātā risinājuma ietvaros.
9. Izmantojot *WLAN* testgultnē eksperimentāli iegūtos datus un veicot teorētiskos aprēķinus, novērtēt likumsakarību starp uztvertā signāla jaudas līmeni un attālumu līdz raidītājam. Novērtēt datu pārraides kanāla caurlaidspēju atkarībā no attāluma līdz raidītājam. Abos gadījumos jāņem vērā uztvertā signāla jaudas līmeņa fluktuācijas.
10. Novērtēt iegūtos rezultātus un rekomendēt integrēta *WLAN* un *LTE* bezvadu datu pārraides tīkla izmantošanu autotransporta sakaru tīklos.

Pētījumu metodika

Promocijas darbā definēto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti analītiskie modeļi, veikti matemātiskie aprēķini, kā arī eksperimentāli mērījumi lauka un laboratorijas apstākļos.

Eksperimentālo mērījumu realizācijai izstrādātas vairākas autotransporta sakaru tīklu testgultnes. Mērījumos izmantota dažādu ražotāju bezvadu datu pārraides tīkla aparatūra, piemēram, *HP* (angļu val. *Hewlett-Packard*), *Cisco*, *Huawei*, *TP-Link*. *IEEE 802.11v* standarta ieviešana un tā modificētās versijas testēšana realizēta, izmantojot *TP-Link Archer C7 WLAN* maršrutētājus, un to oriģinālā aparātprogrammatūra aizstāta ar atvērtā koda aparātprogrammatūru *OpenWrt*.

Aplikācijas līmeņa (AL) datplūsmu ģenerēšanai un AL caurlaidspējas, atbildes laika un pārslēgšanās procedūras aiztures parametru novērtēšanai izmantota *IxChariot* [54] programmatūra, savukārt transporta slāņa (TL) datplūsmas tika ģenerētas un mērītas, izmantojot *iPerf* [55] programmatūru.

Eksperimentāli iegūto caurlaidspējas rezultātu aproksimācijai un paplašinātu scenāriju modelēšanai izmantots daudztermināļu sistēmas modelis. Izstrādājot likumsakarības starp datu pārraides ātrumu un mobilā klienta kustības ātrumu, eksperimentāli iegūto datu aproksimācijai izmantoti lineārie un nelineārie regresijas modeļi. Savukārt uztvertā signāla jaudas zudumu aprēķinos izmantots divstaru signālu izplatīšanās modelis, kas tika papildināts ar gadījuma signālu fluktuācijām. Rezultātā likumsakarības aprakstam izmantots logaritmiski normālais (angļu val. *log-normal*) modelis. Signālu svārstību aprakstīšanai izmantots Nakagami sadalījums.

Rezultātu novērtējumam izmantoti statistikas paņēmieni, piemēram, noteikti statistikas izkliedes rādītāji un noteiktas mērījumu un datu aproksimācijas kļūdas.

Matemātiskie aprēķini veikti, izmantojot *Matlab* programmatūru, savukārt eksperimentālo mērījumu rezultātu statistiskā apstrāde veikta *Excel* vidē. *WLAN* pārklājuma plānošanai un tā

novērtēšanai izmantota *Ekahau Pro* programmatūra. Testgultnes *LTE* tīkla daļā uztvertā signāla parametru statistikas datu uzkrāšana un to vizualizēšana realizēta, izmantojot *Zabbix* programmatūru.

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

Promocijas darba jaunieguvumi

1. Izstrādāts tehniski ekonomiskais pamatojums integrētam *WLAN* un *LTE* automobiļu sakaru tīklam. Novērtēti tādi tehniskie parametri kā caurlaidspēja un atbildes laiks. Savukārt kā efektivitātes rādītāji izmantoti tādi parametri kā risinājuma izmaksas un mobilā tīkla atslogošanas parametrs, kas ir jaunieviests lielums.
2. Izmantojot dažādu ražotāju *LTE* aparatūru, dažādu klientu skaitu un dažādus kustības scenārijus, eksperimentāli novērtēta divrangu *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru kanāla veikspēja, kā arī novērtēta datplūsmu sevlīdzīguma pakāpe.
3. Iegūta likumsakarība starp sakaru kanāla caurlaidspēju un automobiļa (mobilā klienta) kustības ātrumu. Minētā likumsakarība noteikta gan transporta līmeņa (TL), gan aplikācijas līmeņa (AL) caurlaidspējai.
4. Izstrādāts “*802.11v* tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras risinājums, kurā modificēts un eksperimentāli realizēts *IEEE 802.11v* standarts, izmantošanai *IEEE 802.11ac* autotransporta sakaru tīklos, kas ļauj paaugstināt šādu autotransporta bezvadu sakaru tīklu veikspēju. Izstrādātajā risinājumā *IEEE 802.11ac* autotransporta testgultnes tīklā tika palielināta vidējā AL caurlaidspēja, samazināts vidējais tīkla atbildes laiks, kā arī samazināta pārslēgšanās procedūras aizture.
5. Izmantojot eksperimentālos datus un teorētiskos aprēķinus, *IEEE 802.11ac* sakaru tīklam novērtēts uztvertā signāla jaudas līmenis un caurlaidspēja atkarībā no attāluma līdz raidītājam. Aprēķinos ņemtas vērā arī uztvertā signāla jaudas līmeņa fluktuācijas.

Promocijas darba galvenie secinājumi

1. Integrēta *WLAN* un *LTE* autotransporta sakaru tīkla izveide ir tehniski un ekonomiski pamatota gadījumā, ja tiek izmantota *WLAN* bāzēta, *LTE* koncentrēta mobilā tīkla atslogošana. Tas ir praktiski izmantojams automobiļu sakaru tīkls, lai nodrošinātu liela apjoma datu pārsūtīšanu un organizētu automobiļu pasažieru piekļuvi interneta tīklam.
2. Divrangu *WLAN* un *LTE* sakaru tīkla veikspēja ir atkarīga no tīkla mezglu tehniskajiem veikspējas parametriem. Izmantojot dažādus *LTE* maršrutētājus, autotransporta bezvadu sakaru tīkla AL caurlaidspēja var atšķirties par 10–20 %. Mobilo klientu pārvietošanās ātruma, klientu skaita un klientu pārvietošanās scenāriju izmaiņas ietekmē gan individuālo mobilo klientu AL caurlaidspēju, gan arī kopējo bezvadu tīkla veikspēju.
3. Neatkarīgi no tā, kāda ražotāja *LTE* maršrutētājs tiek izmantots divrangu *IEEE 802.11n* un *LTE* tīklā, tas neietekmē datu trafika raksturu. To rāda eksperimentālo mērījumu rezultātu analīze, kur datu trafika plūsmām tika novērtēti tādi parametri kā caurlaidspēja, korelācijas koeficients, dispersija un trafika sevlīdzīguma pakāpe.

4. Pārslēgšanās procedūra starp bezvadu piekļuves punktiem ir atkarīga no klienta ierīcē realizētā pārslēgšanās procedūras algoritma, WLAN tīkla arhitektūras risinājuma, kā arī realizētajiem bezvadu tīkla drošības mehānismiem.
5. Integrēta *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru kanāla caurlaidspēja mainās atkarībā no automobiļa (mobilā klienta) kustības ātruma (0–70 km/h) pēc otrās kārtas polinomiālās funkcijas likuma.
6. Integrētā *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru tīklā virstēriņi starp *L7* un *L4* vidēji ir līdz 36 %, ja mobilais klients pārvietojas ar ātrumu no 0 km/h līdz 70 km/h. Tas nozīmē, ka par tīkla caurlaidspēju nevar spriest, tikai balstoties uz mērījumiem, kas ir veikti transporta (*L4*) vai zemākos slāņos.
7. *IEEE 802.11ac* tīklā ar ātri kustīgiem objektiem (>20 km/h), savlaicīgi pieņemot pārslēgšanās procedūras lēmumu un izpildot pārslēgšanās procedūru, izmantojot *IEEE 802.11v* standarta “BSS pārejas vadības vaicājuma” un “BSS pārejas vadības pieprasījuma” ziņojumus ar izstrādāto modifikāciju, var paaugstināt bezvadu tīkla kopējo veiktspēju – vidējo aplikācijas līmeņa caurlaidspēju var palielināt līdz 75 %, vidējo tīkla atbildes laiku var samazināt līdz pat 67 %, kā arī iespējams nodrošināt mazākas vidējās pārslēgšanās procedūras aiztures, salīdzinot ar “Standarta” pārslēgšanās procedūru, kurā netiek izmantots *IEEE 802.11v* standarts.
8. Teorētiski veiktie aprēķini, tāpat kā eksperimentālie novērojumi un mērījumi, rāda, ka *IEEE 802.11ac* tīklā, mobilajam klientam attālinoties no raidītāja, uztvertā signāla jauda pavājinās, kā rezultātā samazinās arī caurlaidspēja. Uztvertā signāla jauda ir laikā mainīga un fluktuējoša, uztvertā signāla jaudas svārstības izraisa konstruktīva un destruktīva interference starp vairākceļu signāla izplatīšanās komponentēm, kas savukārt izraisa arī caurlaidspējas fluktuācijas.

Promocijas darba praktiskā vērtība

- Izveidota un izpētīta integrēta autotransporta bezvadu sakaru tīkla testgultne, izmantojot *IEEE 802.11n/ac* un *LTE* tehnoloģijas.
- Eksperimentāli novērtēta dažādu ražotāju bezvadu tīkla aparatūras veiktspēja divrangu *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru kanālu nodrošināšanai. Eksperimenti veikti ceļu satiksmes apstākļiem pietuvinātā vidē.
- Iegūtas jaunas, kombinēta *IEEE 802.11n* un *LTE* autotransporta sakaru tīkla veiktspēju raksturojošas likumsakarības.
- Izstrādāts un *IEEE 802.11ac* tīklā eksperimentāli novērtēts *IEEE 802.11v* standarta modifikācijā bāzēts uzlabotas pārslēgšanās procedūras risinājums – “802.11v tīkla asistēta” pārslēgšanās procedūra, kas rezultātā ļāva paaugstināt kopējo bezvadu tīkla veiktspēju.

Promocijas darbā iegūto rezultātu izmantošana

- Sagatavots pieteikums ERAF projektam “Viedais savienojamības risinājums autotransporta sakaru tīkliem (SCAN)”, Nr. 1.1.1.1/20/A/007.

- Iegūtos pētījumu rezultātus var izmantot tehniski un ekonomiski pamatotu, integrētu *WLAN* un *4G LTE/5G* automobiļu sakaru tīklu izveidei, kā arī *4G LTE* un *5G* tīklu atslogošanas risinājumos.
- Iegūtos pētījumu rezultātus var izmantot rekomendācijas sagatavošanai ar mērķi *IEEE 802.11* standartā iekļaut realizēto *IEEE 802.11v* modifikāciju, kas ļauj nodrošināt efektīvu pārslēgšanās procedūras risinājumu ātri kustīgiem klientiem.

Promocijas darba aizstāvamās tēzes

1. Realizējot integrētu, *IEEE 802.11n* un *LTE* standartos bāzētu autotransporta bezvadu sakaru tīklu, neatkarīgi no ražotāja un izmantotās *LTE* iekārtas šāda tīkla sakaru kanāla datu plūsmas raksturs nemainās.
2. Integrēta, *IEEE 802.11n* un *LTE* standartos bāzēta sakaru kanāla caurlaidspēja mainās atkarībā no automobiļa (kustīgā objekta) pārvietošanās ātruma (0–70 km/h) pēc otrās kārtas polinomiālās funkcijas likuma.
3. Izstrādātais “*802.11v* tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras risinājums *IEEE 802.11ac* tīklā ar ātri kustīgiem objektiem (>20 km/h) ļauj paaugstināt bezvadu tīkla kopējo veiktspēju, t. i., ļauj palielināt vidējo aplikācijas līmeņa caurlaidspēju līdz 75 %, samazināt vidējo tīkla atbildes laiku līdz 67 %, kā arī dod iespēju nodrošināt mazākas vidējās pārslēgšanās procedūras aiztures.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti septiņās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti astoņās publikācijās zinātniskajos žurnālos, četrās publikācijās pilna teksta konferenču rakstu krājumos, vienā zinātniskās monogrāfijas nodaļā.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. **Ancans A.**, Petersons E., Umanskis A. Hybrid Vehicular IEEE 802.11n and LTE Wireless Network Performance Evaluation in Non-Stationary Mode of Motion // *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. **Latvija**, Rīga, 15.–16. novembris, 2018.
2. **Ancans A.**, Petersons E., Ipatovs A. Vehicular Wireless Network Access Controller Parameter Estimation // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. **Singapūra**, 19.–22. novembris, 2017.
3. **Ancans A.**, Bogdanovs N., Petersons E., Ipatovs A. Integrated Wireless Network Performance Estimation for Moving Vehicles // *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. **Latvija**, Rīga, 2.–3. novembris, 2017.
4. **Ancans A.**, Petersons E. Wireless LAN and LTE Unified Data Channel Performance Evaluation at Various Types of Equipment and Measurement Methods of a Moving Object // *Riga Technical University 57th International Scientific Conference*. **Latvija**, Rīga, 14.–18. oktobris, 2016.

5. Ancans G., Stankevicius E., Bobrovs V., **Ancans A.** Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *Wireless Telecommunications Symposium (WTS). Global Wireless Communications: Europe and Beyond*. **Lielbritānija**, Londona, 18.–20. aprīlis, 2016.
6. **Ancans A.**, Petersons E., Ipatovs A. Development of a Measurement System for Evaluation of Heterogeneous Wireless Networks Performance Parameters // *Riga Technical University 56th International Scientific Conference*. **Latvija**, Rīga, 14.–16. oktobris, 2015.
7. **Ancans A.**, Ipatovs A. Analysis of Routing Protocols in Wireless Networks with Moving Objects // *Riga Technical University 55th International Scientific Conference*. **Latvija**, Rīga, 14.–16. oktobris, 2014.

Nodaļa zinātniskajā monogrāfijā

1. Jerjomins R., **Ancans A.**, Petersons E., Gerina-Ancane A. Improving Handover Mechanism in Vehicular WiFi Networks. In: *ICTE in Transportation and Logistics 2019, Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure (ICTE ToL 2019, LNITI)*. Ginters E., Ruiz Estrada M., Piera Eroles M., eds. **Switzerland**, Cham: Springer, 2020, pp. 243–261.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. **Ancans A.**, Petersons E., Jerjomins R., Grabs E., Ancans G., Ipatovs A. Evaluation of received signal power level and throughput depending on distance to transmitter in testbed for automotive WLAN IEEE 802.11ac communication network // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* (apstiprināta publicēšanai).
2. **Ancans A.**, Petersons E., Ancans G., Stetjuha M., Ipatovs A., Stankevicius E. Technical and Economic Analysis of Transport Telecommunication Infrastructure // *Procedia Computer Science*. 2019, No. 149, pp. 206–214.
3. **Ancans A.**, Petersons E. The Relationship between Transport Wireless Network Throughput and Vehicle Speed // *Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS)*. 2018, Vol. 52, Iss. 4, pp. 297–305.
4. Ancans G., Stafecka A., Bobrovs V., **Ancans A.**, Caiko J. Analysis of Characteristics and Requirements for 5G Mobile Communication Systems // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2017, Vol. 54, Iss. 4, pp. 69–78.
5. Ancans G., Bobrovs V., **Ancans A.**, Kalibatiene D. Spectrum Considerations for 5G Mobile Communication Systems // *Procedia Computer Science*. 2017, Vol. 104, pp. 509–516.
6. **Ancans A.**, Bogdanovs N., Petersons E., Ancans G., Umanskis A., Vishnevskiy V. Evaluation of Wi-Fi and LTE Integrated Channel Performance with Different Hardware Implementation for Moving Objects // *Procedia Computer Science*. 2017, Vol. 104, pp. 493–500.
7. Ancans G., Stankevicius E., Bobrovs V., **Ancans A.** Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *International Journal of*

Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN). 2016, Vol. 8, Iss. 1, pp. 35–44.

8. Bogdanovs N., **Ancans A.**, Martinsons K., Petersons E. Estimating the Speed of an Integrated Wireless Network for Transportation Applications // *Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS)*. 2014, Vol. 48, Iss. 5, pp. 274–281.

Publikācijas pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. **Ancans A.**, Petersons E., Umanskis A. Hybrid Vehicular IEEE 802.11n and LTE Wireless Network Performance Evaluation in Non-Stationary Mode of Motion // *Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. Latvia, Riga, 15–16 November, 2018, pp. 213–213.
2. **Ancans A.**, Petersons E., Ipatovs A. Vehicular Wireless Network Access Controller Parameter Estimation // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. Singapore, 19–22 November, 2017, pp. 2152–2159.
3. **Ancans A.**, Bogdanovs N., Petersons E., Ipatovs A. Integrated Wireless Network Performance Estimation for Moving Vehicles // *Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. Latvia, Riga, 2–3 November, 2017, pp. 203–207.
4. Ancans G., Stankevicius E., Bobrovs V., **Ancans A.** Analysis on Interference Impact of Wi-Fi on Digital Terrestrial Television Broadcasting // *Proceedings of Wireless Telecommunications Symposium (WTS). Global Wireless Communications: Europe and Beyond*. United Kingdom, London, 18–20 April, 2016, p. 13.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 141 lappuses. Darbā ir piecas nodaļas, nobeigums, literatūras saraksts un deviņi pielikumi.

Pirmās nodaļas ievadā dotas galvenās tendences, kas pamato veikto pētījumu aktualitāti. Tālāk ir izveidots pārskats par *ITS* sistēmām, apskatīti galvenie jautājumi, ko tās risina. Sniegti iespējamie *ITS* attīstības virzieni un veikts perspektīvo sakaru tīklu tehnoloģiju apskats. Nodaļā ir dotas tendences, kas pamato pētījumā iekļauto bezvadu sakaru tehnoloģiju izvēli. Turpinājumā apskatītas galvenās problēmas, kas pastāv automobiļu bezvadu sakaru tīklos, ja tiek izmantotas *WLAN IEEE 802.11n/ac* un *LTE* tehnoloģijas, kā arī ir dots līdzīgu pētījumu apskats. Nodaļas noslēgumā ir definēti promocijas darba galvenie pētījumu virzieni, kā arī apkopota informācija par promocijas darbā paveikto.

Darba otrajā nodaļā veikts *WLAN* un *LTE* tehnoloģiju apskats. Izpētīti tādi jautājumi kā *WLAN* un *LTE* tīklu konverģences iespējas ar mērķi palielināt *WLAN* klientu mobilitāti, kā arī veikta detalizēta izpēte par pieejamiem drošības mehānismiem *WLAN* tīklos. Nodaļas turpinājums veltīts eksperimentālu *IEEE 802.11n* un *LTE* tehnoloģijās bāzētu autotransporta sakaru tīklu veiktspējas novērtējumam. Izmantojot daudztermināļu sistēmas matemātisko modeļi, veikts bezvadu tīkla veiktspējas novērtējums arī stacionāram gadījumam. Nodaļas

noslēgumā prezentēts izstrādātais heterogēna divrangu *Wi-Fi* un *LTE* autotransporta sakaru tīkla tehniski ekonomiskais novērtējums.

Darba trešajā nodaļā ir dotas izstrādātās likumsakarības starp integrēta *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru kanāla transporta līmeņa (TL) vai aplikācijas līmeņa (AL) caurlaidspēju un automobiļa (mobilā klienta) pārvietošanās ātrumiem. Nodaļas ietvaros izstrādāts *LTE* tehnoloģijas signāla stipruma un signāla kvalitātes parametru uzraudzības risinājums un veikta iegūto rezultātu analīze.

Darba ceturtajā nodaļā novērtēti *IEEE 802.11k/r/v* standarti, ko var izmantot pārslēgšanās procedūras uzlabošanai *IEEE 802.11ac* tīklos. Nodaļas turpinājumā aprakstīts izstrādātais uzlabotas pārslēgšanās procedūras algoritms, kas balstīts *IEEE 802.11v* standartā, veikts izstrādātā risinājuma eksperimentāls veikspējas novērtējums un iegūto rezultātu analīze.

Darba piektajā nodaļā novērtēta likumsakarība starp uztvertā signāla jaudas līmeņa atkarību no attāluma līdz raidītājam. Aprēķinos izmantots logaritmiski normālais modelis, kurā tiek ņemtas vērā uztvertā signāla fluktuācijas, ko raksturo Nakagami sadalījums. Tālāk, izmantojot Šenona teorēmu un iepriekš veiktos aprēķinus, teorētiski novērtēta *WLAN* tīkla caurlaidspēja, mobilajam klientam attālinoties no raidītāja. Nodaļas noslēgumā teorētiski aprēķinātie caurlaidspējas rezultāti salīdzināti ar eksperimentāli iegūtajiem.

Promocijas darba nobeigumā apkopoti darba galvenie secinājumi un definēti turpmākie pētījumu virzieni. Pielikumos apkopoti konferenču, publikāciju un projektu saraksti, pievienoti eksperimentālos mērījumos iegūtie rezultāti, doti aprēķinos izmantotie *Matlab* kodi, kā arī atspoguļoti realizētajās testgultnēs izmantotā aprīkojuma tehniskās specifikācijas dati un mērījumu galvenie iestatījumi.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Pirmā nodaļa

Promocijas darba **pirmajā nodaļā** sniegts transporta sakaru tīklu attīstības virzienu novērtējums, apskatītas galvenās tendences un problēmas.

1.1. apakšnodaļā veikts *ITS* sistēmu apskats, var secināt, ka *ITS* lietojumi aptver ceļu satiksmes dalībnieku (transportlīdzekļu un to pasažieru, kā arī gājēju), transporta ceļu infrastruktūras, ceļu satiksmes vadības un attālināto datu pakalpojumu sistēmu savstarpējās komunikācijas risinājumus [31]. Ir definētas trīs galvenās pakalpojumu grupas, kur var izmantot *ITS*: 1) ceļu satiksmes drošība un brīdināšana; 2) transporta plūsmu vadība un transporta sistēmu pakalpojumi; 3) informācija un izklaide [44], [47], [48].

Informācijas un izklaides pakalpojumu kategorija attiecas tieši uz transportlīdzekļu pasažieriem, kuriem ir jānodrošina piekļuve interneta tīklam. Informācijas un izklaides pakalpojumus nepieciešams nodalīt no ceļu satiksmes drošības, brīdināšanas un transporta sistēmu pakalpojumu funkcijām, lai neietekmētu šo kritisko funkciju izpildi [47].

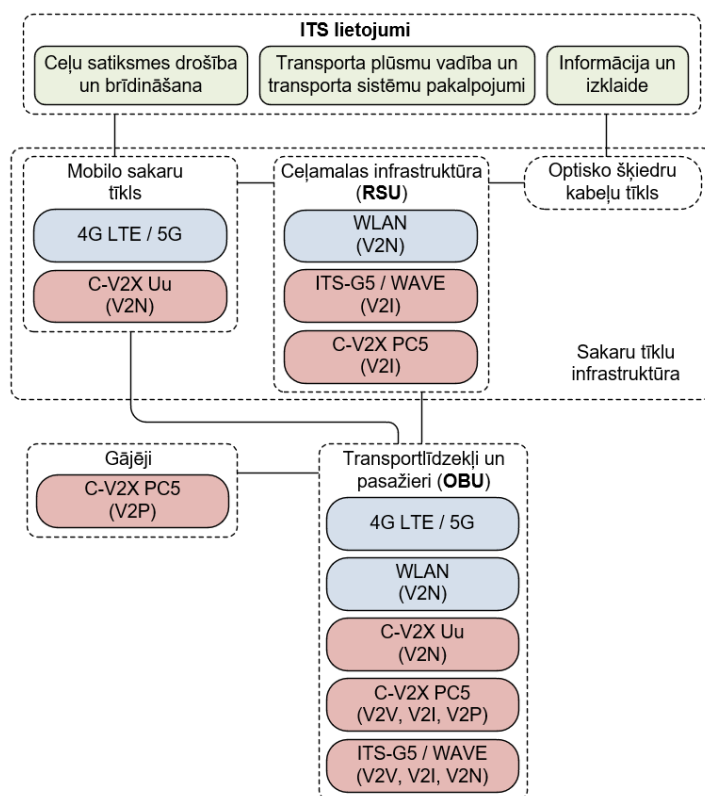
Patlaban pasaulē tiek attīstīti vairāki *ITS* projekti, kas izmanto dažādas transporta sakaru tīklu tehnoloģijas, kas nodrošina datu apmaiņu starp automobiļiem (angļu val. *Vehicle-to-Vehicle – V2V*), kā arī starp automobiļiem un infrastruktūru (angļu val. *Vehicle-to-Infrastructure – V2I*). Viens no *ITS* transporta sakaru tīklu tehnoloģiju veidiem ir specializēti, maza darbības attāluma sakari (angļu val. *dedicated short range communications*), kuros starp vadošajām tehnoloģijām ir *WAVE* (angļu val. *Wireless Access in Vehicular Environment*) tehnoloģija un intelektuālo transporta sistēmu tehnoloģija *ITS-G5* [52]. Minētās tehnoloģijas ir bāzētas *IEEE 802.11p* standartā [48]. Galvenie *IEEE 802.11p* standartā bāzēto tehnoloģiju trūkumi ir salīdzinoši mazā caurlaidspēja un fakts, ka tīkla kopējā veiktspēja krītas, tiklīdz pieaug tīkla noslodze [52]. Plānots, ka nākotnē *IEEE 802.11p* aizvietos jauns standarts *IEEE 802.11bd* [13], [90]. Atsevišķu *ITS* funkciju nodrošināšanai tiek izskatīti arī vairāki citi aktuālie *WLAN* (angļu val. *Wireless Local Area Network*) standarti: *IEEE 802.11n* [28], *IEEE 802.11ac* [28] un *IEEE 802.11ax* [19], [22], kā arī izstrādē esošais *IEEE 802.11be* [34].

ITS funkciju nodrošināšanai var izmantot arī tādas tehnoloģijas, kas izmanto mobilos šūnu tīklus. Izstrādātā *LTE C-V2X* (angļu val. *Cellular Vehicle-to-Everything*) tehnoloģija paredzēta darbam *LTE* tīklā, savukārt izstrādē esošā *5G C-V2X* tehnoloģija, kas tiek apzīmēta arī kā *5G NR-V2X*, paredzēta darbam *5G* tīklā [17]. Specifisku *ITS* vajadzību nodrošināšanai var izmantot arī mobilo tīklu tehnoloģijas, piemēram, *4G LTE* jeb *LTE* (angļu val. *Long Term Evolution*) [20], [32] un *5G* tehnoloģija [10], [17], [35]. *5G* bezvadu piekļuve ietver gan *5G NR* (angļu val. *New Radio*), gan arī *LTE* uzlabotās versijas (angļu val. *LTE Evolution*) [9]. Prognozējams, ka *5G* radiotīklus veidos *NR* un *LTE* tehnoloģijās balstīti tīkli [20], [51], kā arī *WLAN* tehnoloģijas [24].

Esošās *ITS* sistēmas (*ITS-G5/WAVE*, *LTE-V2X*) nav paredzētas transportlīdzekļu pasažieru piekļuves organizēšanai interneta tīklam, lai pārsūtītu liela apjoma datus [14], [15]. Prognoze par *Wi-Fi* trafiku rāda, ka līdz 2022. gadam no visa kopējā *IP* (angļu val. *Internet Protocol*) trafika 51 % trafika veidos datu plūsma caur *Wi-Fi* tīklu, salīdzinot ar 43 % 2017. gadā. Datu

trafikam nodrošinās gan mobilās divu režīmu viedierīces, gan tikai *Wi-Fi* ierīces [18]. Tiek prognozēts, ka līdz 2022. gadam atslogotais trafiks no mobilajām ierīcēm pieaugs aptuveni līdz 59 %, kur no mobilajām iekārtām pārsūtītais datu trafiks tiek novirzīts caur *Wi-Fi* tīkliem vai femtošūnām [16], [18].

Saskaņā ar iepriekš apskatītajām *ITS* tehnoloģijām, kā arī izvērtējot prognozes datu trafikam pēc piekļuves tehnoloģijas un tendencēm, kā tiks atslogoti mobilie tīkli, izveidota transporta sakaru tīklu tehnoloģiju apvienotā blokshēma (2. att.).



2. att. *ITS* apvienotā sakaru tīklu tehnoloģiju shēma.

Izanalizējot iepriekš minētos faktus un tendences par aktuālajām bezvadu tīklu tehnoloģijām, var secināt, ka autotransporta pasažieru piekļuvei interneta tīklam var izmantot *IEEE 802.11n/ac* (*WLAN*) tehnoloģijas. Tādējādi, lai pilnā apjomā nodrošinātu *ITS* pakalpojumus, var izmantot apskatīto atsevišķu sakaru tehnoloģiju kombināciju.

Galvenās problēmas, kas rodas, izmantojot *WLAN* tehnoloģiju kā mobilo klientu piekļuves metodi datu tīklam, ir saistītas ar veiktspējas (caurlaidspējas) samazināšanos, pieaugot mobilā klienta pārvietošanās ātrumam [12]. Tas galvenokārt ir saistīts ar klienta pārslēgšanās procedūras (angļu val. *handover*) izpildi starp *AP* (angļu val. *Access Point*), kas, pieaugot braukšanas ātrumam, kļūst nestabila un var tikt izpildīta novēloti.

Praksē izmantojams ir divrangu sakaru tīkls, kur pirmajā rangā ir *WLAN* piekļuves tīkls, otrajā – var tikt izmantota *4G LTE* vai *5G* tehnoloģija vai arī optisko šķiedru kabeļu tīkls. Tādēļ veiktspējas novērtējums ir jāveic arī divrangu sakaru tīklam.

1.2. apakšnodalā parādīts, ka pētnieki visā pasaulē strādā pie jauniem zinātniskajiem projektiem saistībā ar *IEEE 802.11* standarta tehnoloģiju izmantošanas iespējām, lai

nodrošinātu platjoslas bezvadu datu pārraides kanālus gan automobiļu pasažieru piekļuvei interneta tīklam, gan arī automobiļu nodrošināšanai ar bezvadu datu pārraides pieslēgumu dažādu specifisku uzdevumu risināšanai [33], [36]–[38], [41], [42]. Apskatītajos pētījumos viens no atslēgas veiktspējas parametriem, kas tiek novērtēts, ir datu kanālu caurlaidspēja. Tomēr iepriekš nav veikti pētījumi, kuros būtu mēģināts eksperimentāli lauka apstākļos noskaidrot likumsakarības starp automobiļu sakaru tīklu caurlaidspēju un mobilā lietotāja pārvietošanās ātrumu, izmantojot dažādu bezvadu sakaru tīkla aparatūru, dažādus kustības scenārijus un mainot klientu skaitu. Visi iepriekš veiktie pētījumi, kas ir saistīti ar pārslēgšanās procedūras uzlabošanu *WLAN* automobiļu sakaru tīklos, izmantojot *IEEE 802.11k/r/v* standartus, ir teorētiski pamatoti, taču nav eksperimentāli pārbaudīti.

Otrā nodaļa

Promocijas darba **otrajā nodaļā** pētīti divrangu bezvadu sakaru tīkli, kuros pirmo rangū veido *IEEE 802.11n* tehnoloģija, otro – *LTE* tehnoloģija. Eksperimentāli novērtēta šādu tīklu veiktspēja un iespējas izmantot tos automobiļu sakaru nodrošināšanai.

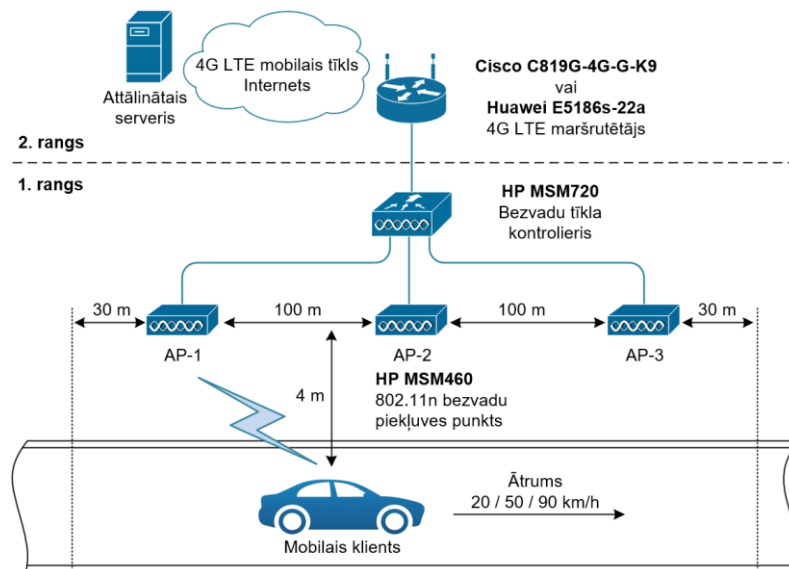
2.1. apakšnodaļā veikts *WLAN* tehnoloģiju apskats, iekļaujot arī ar drošības mehānismiem saistītos jautājumus. Secināts, ka bezvadu tīkla veiktspēju un datu trafika raksturu ietekmē *802.11 MAC* (angļu val. *Medium Access Control*) līmeņa pakāpeniska datu pārraides ātruma pielāgošana sesijas izveides sākumā un *802.11 MAC* līmeņa atkārtotas pazaudēto kadru pārsūtīšanas mehānisms. Bezvadu tīkla veiktspēja un trafika raksturs tiek ietekmēts arī *TCP* (angļu val. *Transmission Control Protocol*) līmenī, kur ir realizēti plūsmas kontroles un tīkla pārslodzes kontroles algoritmi, kas tiek izpildīti visas sesijas laikā, un tā rezultātā šie algoritmi, it īpaši *TCP* lēnā starta mehānisms, ievērojami samazina aplikācijas līmeņa caurlaidspēju [26], [46], [49]. *802.11 MAC* slānī, kur tiek izpildīta skenēšanas, atvērtās sistēmas autentifikācijas un asociācijas procedūra, vislielāko papildinājumu pārslēgšanās procedūras aiztūrei rada skenēšanas procedūra. Tā aizņem līdz pat 90 % no kopējās visu šo minēto procedūru aiztūres [21], [27], [40].

Transporta *IEEE 802.11* bezvadu tīklos tiek rekomendēts pāriet uz centralizētu *WLAN* tīkla pārvaldību, izmantojot bezvadu tīkla kontrolierus (angļu val. *Wireless LAN Controller – WLC*). Centralizēta *WLAN* tīkla pārvaldība atvieglo bezvadu tīklu uzturēšanu, izmantojot vadības plaknes funkcijas, kā arī piedāvā vienotu drošības līmeni un nodrošina koordinētu kontroles plaknes funkciju darbību [28]. *WLAN* drošības mehānismi, kas tiek izmantoti mobilo klientu autentifikācijai, atstāj ietekmi uz pārslēgšanās procedūras aiztūri, kas īpaši kritiski ir automobiļu sakaru tīklos. Dialogs starp bezvadu tīkla kontrolieri un autentifikācijas serveri, kā arī kriptogrāfisko atslēgu ģenerēšana un apmaiņa starp klientu un AP vai *WLC*, var aizņemt ievērojamu laiku [19], [22]. Projektējot automobiļu sakaru tīklus, tas ir jāņem vērā. Automobiļu sakaru tīklos ar centralizētu *WLAN* arhitektūru tiek rekomendēts ieviest *WPA2-Enterprise* vai *WPA3-Enterprise* drošības mehānismus, kas šobrīd nodrošina visaugstāko drošības līmeni bezvadu sakaru tīklos, kas jāintegrē kopā ar ātrās pārslēgšanās procedūras risinājumiem [1], [19]. Lai nodrošinātu vienlaidu pārslēgšanās procedūru, ir

jāizvairās no laikietilpīgās *DHCP* (angļu val. *Dynamic Host Configuration Protocol*) procedūras izpildes, klientam jānodrošina *IP* adreses saglabāšanas iespēja [22].

2.2. apakšnodaļā veikts *LTE* tehnoloģijas apskats, savukārt **2.3. apakšnodaļā** noskaidrots, ka *WLAN* un mobilo tīkla tehnoloģiju *LTE* vai *5G* apvienošanas risinājumi var nodrošināt nepieciešamo mobilitāti *WLAN* bāzētos automobiļu sakaru tīklos tādās vietās, kur *WLAN* pārklājums nav pieejams. Šāda pieeja ļauj palielināt arī kopējo mobilo tīklu kapacitāti un nodrošināt mobilā tīkla pamattehnoloģiju atslogošanu. Var izmantot tādus risinājumus kā *LTE-U* (angļu val. *LTE in Unlicensed*) / *LAA* (angļu val. *Licensed Assisted Access*) [50], *LWA* (angļu val. *LTE–Wi-Fi Link Aggregation*) un *MPTCP* (angļu val. *Multipath TCP*) [39].

2.4. apakšnodaļā pētīta divranga *IEEE 802.11n* un *LTE* automobiļu sakaru tīkla (3. att.) veiktspēja, veikti eksperimentāli mērījumi lauka apstākļos [2]. Testgultnes konfigurācija ļauj veikt datu pārraidi ne tikai *WLAN* tīklā, bet arī izmantojot publisko mobilo *LTE* tīklu līdz attālinātajam *FTP* (angļu val. *File Transfer Protocol*) serverim. Starp attālināto serveri un *IEEE 802.11n* mobilo klientu tika veikti AL caurlaidspējas mērījumi. Kā mobilais bezvadu tīkla klients tika izmantota portatīvā darbstacija, kas izvietota automobilī.



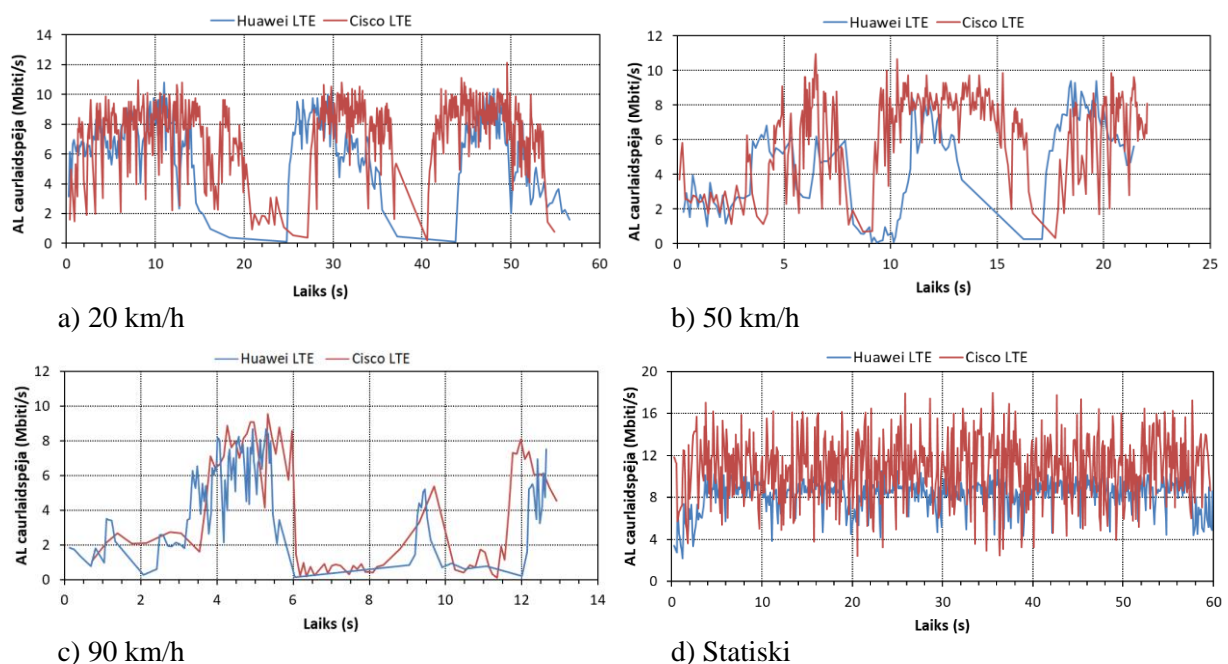
3. att. Testgultnes slēguma shēma.

Lai novērtētu iespējamo ietekmi uz integrētā *Wi-Fi* un *LTE* kanāla AL caurlaidspēju, tika izmantoti divu dažādu ražotāju (*Cisco* un *Huawei*) *LTE* maršrutētāji. Mērījumi tika veikti ar vienu transportlīdzekli dažādos braukšanas ātrumos (0 km/h, 20 km/h, 50 km/h un 90 km/h).

Kopējo tīkla veiktspēju un trafika raksturu var ietekmēt vairāki faktori, piemēram, izmantotās individuālās aparatūras veiktspēja, kas ir atkarīga no tādiem parametriem kā procesora veiktspēja, buferatmiņas apjoms un atbalstītie *IEEE 802.11* un mobilo šūnu tīklu standarti. Pieaugot automobiļu pārvietošanās ātrumam, mobilais klients ir spiests biežāk izpildīt pārslēgšanās procedūras starp bezvadu piekļuves punktiem. Līdz ar to aktīvās datu pārraides laiks *AP* zonā samazinās, proporcionāli vairāk laika tiek tērēts pārslēgšanās procedūras organizēšanai un tās izpildei, un tā rezultātā vidējā caurlaidspēja krītas. Papildus ir iespējama ietekme arī no dažādiem ārējo traucējumu avotiem. Lielākā pārvietošanās ātrumā

notiek intensīvāka radioviļņu atstarošanās, līdz ar to palielinās varbūtība, ka klienta dati var tikt pazaudēti vai bojāti.

Saskaņā ar iegūtajiem eksperimentālajiem rezultātiem (4. att.) var secināt, ka *Wi-Fi* un *LTE* integrētā sakaru kanāla veiktspēja ir atkarīga no izmantotā *LTE* maršrutētāja tehniskajiem parametriem, kā arī tiem var būt atšķirīga radiotraucējumu noturība. Izmantojot dažādus *LTE* maršrutētājus, autotransporta bezvadu sakaru tīkla AL caurlaidspēja var atšķirties par 10–20 %. Datu savienojuma vidējā AL caurlaidspēja ir atkarīga no pārslēgšanās procedūru ilguma. Ja mobilais klients pārvietojas ar ātrumu 20 km/h, pārslēgšanās procedūra starp bezvadu piekļuves punktiem tiek izpildīta korekti. Pārvietojoties ar lielāku ātrumu AL caurlaidspēja degradējas, un, ātrumam sasniedzot 90 km/h, pārslēgšanās procedūra starp *AP* kļūst nestabila.



4. att. AL caurlaidspējas salīdzinājums, izmantojot dažādu *LTE* aparatūru dažādos klienta pārvietošanās ātrumos.

2.5. apakšnodaļā, līdzīgi kā 2.4. apakšnodaļā, realizēta divrangu *IEEE 802.11n* un *LTE* automobiļu sakaru tīkla testgultne, kurā pētīta tās veiktspēja, izmantojot dažādu mobilo klientu skaitu un dažādus kustības scenārijus [3]. Šajā gadījumā tika izmantoti viens vai divi mobilie klienti (automobiļi) un atbilstoši viens vai divi attālinātie serveri. Pārējā testgultnes konfigurācija veiktajos mērījumos palika nemainīga. AL caurlaidspējas mērījumi veikti ar vienu un ar diviem mobilajiem klientiem dažādos to pārvietošanās ātrumos (20 km/h un 50 km/h). 1. tabulā apkopotas aprēķinātās vidējās AL caurlaidspējas vērtības $\bar{\eta}$ un dispersija D individuālām klientu *A1* un *A2* trafika plūsmām η_{A1} un η_{A2} , attiecīgi $\bar{\eta}_{A1}$ un $D_{\eta_{A1}}$, kā arī $\bar{\eta}_{A2}$ un $D_{\eta_{A2}}$. Tālāk aprēķināta kopējā vidējā AL caurlaidspēja starp abiem klientiem $\bar{\eta}_{A1A2}$, kā arī korelācijas koeficienti $K_{\eta_{A1}\eta_{A2}}$ starp abu klientu AL caurlaidspējas vērtību kopām. Tika noteikta arī kopējā dispersija $D_{\eta_{A1}\eta_{A2}}$.

Brīdī, kad transportlīdzekļi pārvietojas gar *Wi-Fi* infrastruktūru un pāriet no vienas *AP* apraides zonas uz citu, datu trafiks krītas. AL caurlaidspēja no maksimālajām vērtībām samazinās praktiski līdz nullei, un, kad pārejas process ir beidzies, AL caurlaidspēja pakāpeniski atkal pieaug līdz maksimālajām vērtībām. AL caurlaidspējas vērtību svārstības ir lielas, tāpēc tas rezultātā dod lielas dispersijas vērtības.

1. tabula

Eksperimentāli iegūtās vidējās AL caurlaidspējas un aprēķinātās korelācijas koeficienta un dispersijas vērtības

Ātrums v , km/h	Braukšanas scenārijs	$\bar{\eta}$, Mbiti/s		Kopējā $\bar{\eta}_{A1A2}$, Mbiti/s	$K_{\eta A1\eta A2}$	D		Kopējā $D_{\eta A1\eta A2}$
		$\bar{\eta}_{A1}$	$\bar{\eta}_{A2}$			$D_{\eta A1}$	$D_{\eta A2}$	
20	viens aiz otra	4,70	5,67	5,19	-0,06	8,28	5,50	13,66
	paralēli	6,68	4,12	5,40	0,14	7,17	5,14	12,59
	viens otram pretī	7,15	5,99	6,57	0,21	9,99	4,10	14,51
50	viens aiz otra	4,25	4,41	4,33	0,19	4,06	5,31	9,75
	paralēli	7,90	3,23	5,57	0,38	10,96	4,71	16,43
	viens otram pretī	6,30	5,64	5,97	-0,23	5,53	9,32	14,39

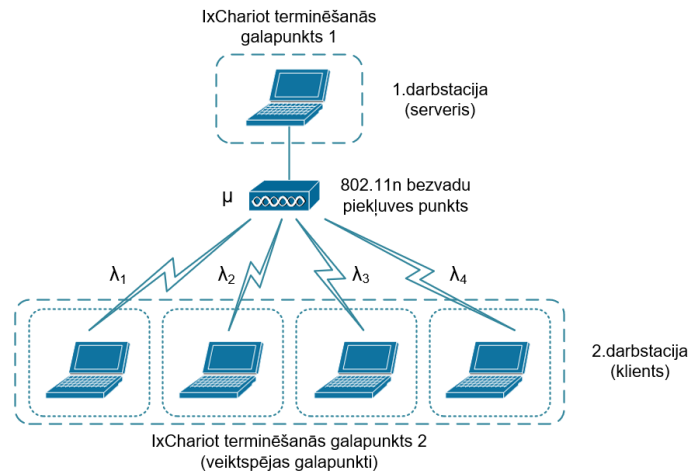
No 1. tabulas datiem redzams, ka starp abu transportlīdzekļu klientu AL caurlaidspējām pastāv korelācija, lai gan tā ir vāja ($K_{\eta A1\eta A2} < 0,5$) [11]. Tas ir saistīts ar to, ka abi transportlīdzekļu klienti vēršas pie vieniem un tiem pašiem bezvadu tīkla resursiem (*AP* un *WLC*). Testgultnē realizētā automobiļu *Wi-Fi* bāzēta sakaru tīkla resursu kapacitāte ir paredzēta lielam klientu skaitam, tāpēc var paredzēt, ka, palielinot klientu skaitu, korelācijas koeficients pieaugs.

Pēc eksperimentāli iegūto AL caurlaidspējas rezultātu analīzes var secināt, ka AL caurlaidspēja ir atkarīga gan no mobilo klientu kustības scenārija, gan klientu pārvietošanās ātruma, kā arī no *AP* apkalpošanas zonā vienlaikus esošu mobilo klientu skaita. Tas iespaido gan individuālo mobilo klientu AL caurlaidspējas rādītājus, gan arī kopējo bezvadu tīkla veiktspēju. Vienlaicīga vairāku mobilo klientu klātbūtne bezvadu tīklā nozīmē cīņu par bezvadu tīkla resursiem. Tas atspoguļojas arī iegūtajos mērījumu grafikos kā neregulāri trafika kritumi un vidējās AL caurlaidspējas samazinājums.

2.6. apakšnodaļā, līdzīgi kā 2.4. un 2.5. apakšnodaļās, realizēta divrangu *IEEE 802.11n* un *LTE* automobiļu sakaru tīkla testgultne. Izmantojot absolūto momentu (angļu val. *Absolute Moments*) metodi, tika novērtēts un analizēts Hersta parametrs (angļu val. *Hurst parameter – H*) eksperimentāli iegūtam AL caurlaidspējas trafikam scenārijos ar vienu un diviem mobilajiem klientiem (tika nodrošināts atbilstošs attālināto *FTP* serveru skaits) dažādos automobiļu kustības ātrumos: 20 km/h, 50 km/h un 90 km/h [6]. Eksperimentāli iegūtie rezultāti rāda, ka, pieaugot lietotāju skaitam bezvadu tīklā, Hersta parametrs mainās intervālā 0,7–0,89, tādēļ var secināt, ka mērījumos pārsūtītais datu trafiks ir sev līdzīgs. Prognozējams, ka, tālāk pieaugot mobilo klientu skaitam, pieaugs arī *H* parametrs.

2.7. apakšnodaļā eksperimentāli un analītiski novērtēta bezvadu tīkla kopējā AL caurlaidspēja atkarībā no ienākošo klientu datplūsmu skaita stacionārā režīmā, kā arī noteikta

individuālā AL caurlaidspēja vienam klientam, ja ir dažāds klientu skaits. Testgultni veidoja viens *AP* un divas darbstacijas, t. i., serveris un klients jeb veikspējas galapunkti, kas ģenerēja individuālas klientu datplūsmas (no 1 līdz 4) (5. att.).



5. att. Eksperimentālo mērījumu shēma.

Teorētiskajam novērtējumam tika izmantots daudztermināļu sistēmas matemātiskais modelis [6]. Tīkla veikspēju (AL caurlaidspēju) saskaņā ar šo modeli var izteikt kā:

$$\eta = (1 - p_0)\mu, \quad (1)$$

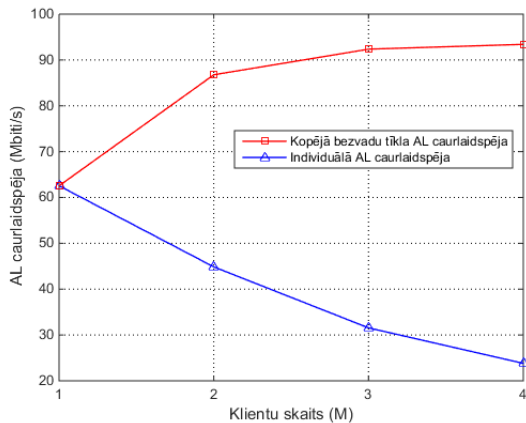
$$\eta_1 = (1 - p_0) \frac{\mu}{M}, \quad (2)$$

$$p_0 = \left[\sum_{k=0}^M \frac{M!}{(M-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right]^{-1} = \left[\sum_{k=0}^M \frac{M!}{(M-k)!} \rho^k \right]^{-1}, \quad (3)$$

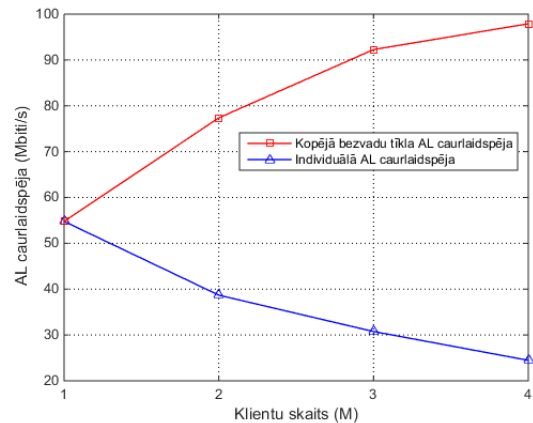
kur λ – pieprasījumu pienākšanas intensitāte; μ – pieteikumu apstrādes intensitāte; p_0 – varbūtība, ka kanāls ir brīvs, t. i., sistēma nesaņems pieprasījumus; η_1 – AL caurlaidspēja vienam klientam atkarībā no klientu skaita M ; ρ – noslodzes koeficients.

Izmantojot apskatīto modeli, var noskaidrot transportlīdzekļu bezvadu sakaru tīkla caurlaidspēju un tās atkarību no ienākošo plūsmu skaita *AP* pārklājuma zonā. 6. a un b attēlā apkopoti eksperimentāli iegūtie un, izmantojot daudztermināļu sistēmas modeli, analītiski aprēķinātie AL caurlaidspējas rezultāti. Noteikta individuālā AL caurlaidspēja vienam klientam un kopējā bezvadu tīkla AL caurlaidspēja atkarībā no klientu skaita. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka starpība starp eksperimentāli iegūtajiem datiem un analītiski noteiktajiem ir 16 % robežās.

6. a un b attēlā redzams, ka individuālā AL caurlaidspēja vienam klientam samazinās, pieaugot klientu skaitam tīklā. Klienta individuāli sasniedzamā caurlaidspēja ir atkarīga no katra klienta iekārtas veikspējas. Turpretī kopējā bezvadu tīkla AL caurlaidspēja, pieaugot bezvadu klientu skaitam, pieaug, jo bezvadu tīkla mezglu veikspēja tiek projektēta lielam klientu skaitam. Sakarā ar *TCP* mehānisma darbību AL caurlaidspējas kāpums ir nelineārs. Tālāk pieaugot klientu skaitam, tiks sasniegta tīkla mezgla (*AP*) veikspējas augšējā robeža.



a) Eksperimentālie mērījumi

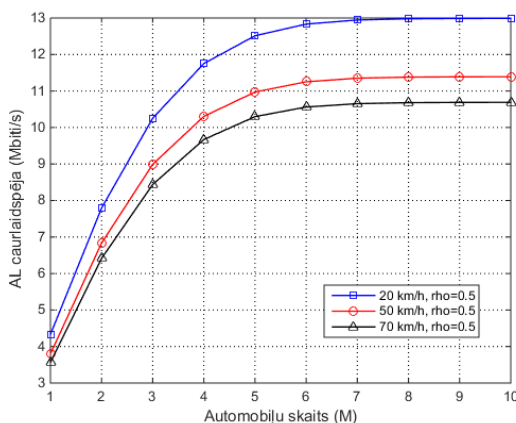


b) Matemātiskais modelis

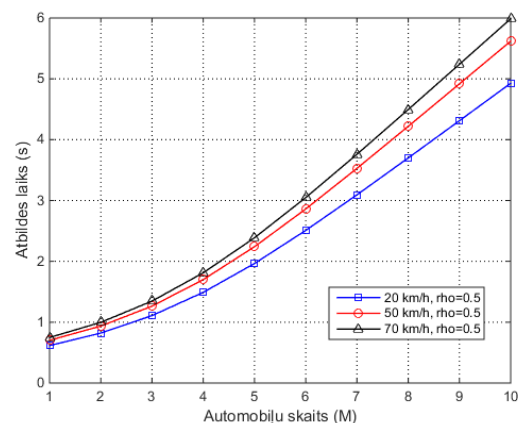
6. att. Noteiktās likumsakarības starp kopējo un individuālo AL caurlaidspēju un klientu skaitu.

2.8. apakšnodaļā veikts tehniski ekonomiskais novērtējums integrētam *Wi-Fi* un *LTE* sakaru kanālam un tiešam *LTE* kanālam. Novērtējumā izmantoti tādi tehniskie parametri kā AL caurlaidspēja [4] un atbildes laiks, kā arī novērtēti tādi efektivitātes rādītāji (angļu val. *efficiency indicators*) kā izmaksas un mobilā tīkla atslogošanas (angļu val. *offloading*) parametrs. Tehniskie parametri tika novērtēti tikai integrētam *Wi-Fi-LTE* kanālam [5]. Apakšnodaļā izmantoti eksperimentālos mērījumos iegūtie divrangu automobiļu sakaru tīkla AL caurlaidspējas rezultāti. Aproximējot eksperimentālos rezultātus vispārējam gadījumam un nosakot sistēmas AL caurlaidspēju η un vidējo atbildes laiku \bar{T} , tika izmantots daudzterminālu sistēmas modelis. Tīkla veikspēju, šajā gadījumā AL caurlaidspēju η , atbilstoši izmantotajam modelim var noteikt pēc 1. izteiksmes.

7. a attēlā redzama iegūtā likumsakarība starp tīkla AL caurlaidspēju η un automobiļu (klientu) skaitu M dažādos pārvietošanās ātrumos v (20 km/h, 50 km/h un 70 km/h), ja tīkla noslodzes koeficients $\rho = 0,5$. No iegūtajiem rezultātiem redzams, ka maksimālā sistēmas AL caurlaidspēja tiek iegūta, ja $M = 9$.



a)



b)

7. att. a) Divrangu bezvadu tīkla AL caurlaidspēja atkarībā no automobiļu skaita, ātruma un tīkla noslodzes; b) Vidējais atbildes laiks atkarībā no automobiļu skaita, ātruma un tīkla noslodzes.

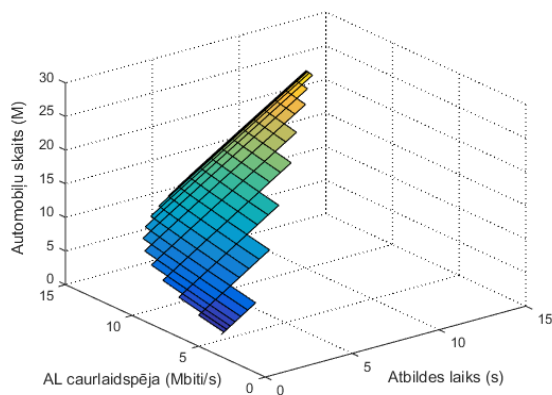
Saskaņā ar [13] sistēmas vidējais atbildes laiks ir:

$$\bar{T} = \frac{M}{\mu(1 - p_0)} - \frac{1}{\lambda}. \quad (4.)$$

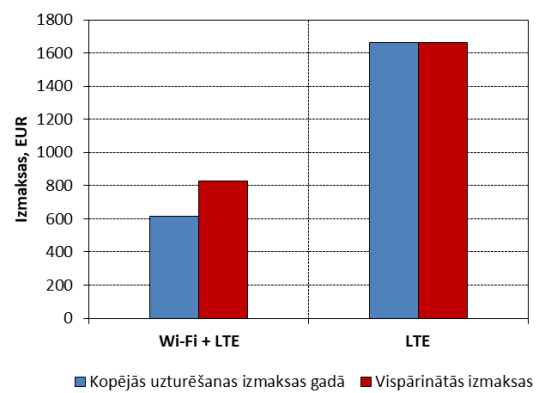
7. b attēlā redzama iegūtā likumsakarība starp vidējo atbildes laiku \bar{T} un automobiļu (klientu) skaitu M dažādos braukšanas ātrumos, ja tīkla noslodzes koeficients $\rho = 0,5$.

Tehnisko parametru AL caurlaidspējas un atbildes laika likumsakarība atkarībā no automobiļu (klientu) skaita uz ceļa redzama 8. a attēlā ($v = 20$ km/h; $\rho = 0,2$; $M = 26$).

Pētāmo automobiļu telekomunikāciju tīklu aprēķinātās izmaksas redzamas 8. b attēlā. Ja tīklā ir seši klienti un katram klientam tiek piešķirts tiešais *LTE* kanāls, šo *LTE* pieslēgumu kopējās un vispārinātās izmaksas pārsniedz *Wi-Fi* un *LTE* bāzēta risinājuma, kurā izmanto vienu *LTE* pieslēgumu, infrastruktūras izbūves un uzturēšanas izmaksas 260 m garā ceļa posmā.



a)



b)

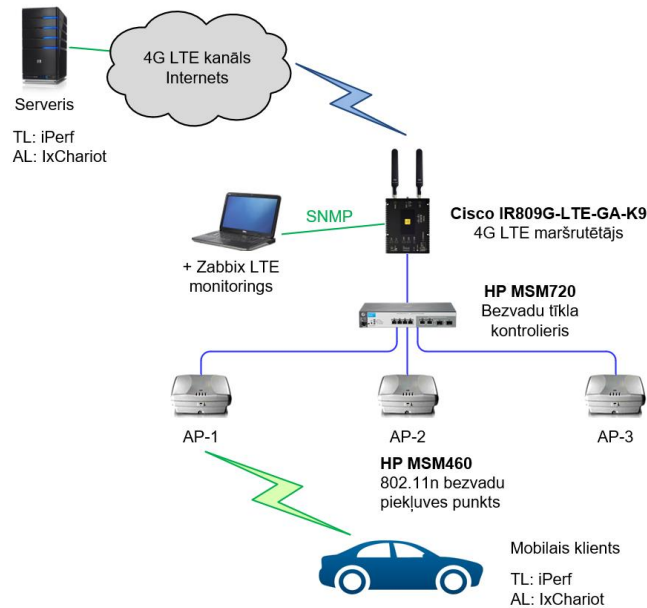
8. att. a) Tehnisko parametru AL caurlaidspējas un atbildes laika atkarība no automobiļu skaita; b) Automobiļu sakaru tīklu izmaksas.

Wi-Fi bāzēta un *LTE* koncentrēta atslogošana ļauj atslogot mobilo tīklu un samazināt ikgadējās kopējās transporta sakaru tīkla izmaksas. Veicot tehniski ekonomiskā novērtējuma rezultātu analīzi tiešam *LTE* kanālam un integrētam *Wi-Fi* un *LTE* sakaru kanālam, var secināt, ka hibrīda *Wi-Fi* un *LTE* autotransporta sakaru tīkla izmantošana apjomīgu datu pārsūtīšanai, piemēram, transporta maršruta karšu atjaunināšana vai video informācijas pārsūtīšana, kā arī automobiļu pasažieru nodrošināšana ar piekļuvi interneta tīklam, ir tehniski un ekonomiski pamatota.

Trešā nodaļa

Promocijas darba **trešajā nodaļā** aprakstīti veiktie eksperimentālie mērījumi, veikta iegūto mērījumu rezultātu apstrāde un datu aproksimācija, lai noteiktu likumsakarību starp transporta sakaru tīkla caurlaidspēju un automobiļa pārvietošanās ātrumu.

3.1. apakšnodaļā aprakstīta sagatavotā eksperimentālo mērījumu testgultne (9. att.) un mērījumu metodika. Eksperimentālajos mērījumos tika novērtēta gan transporta līmeņa (TL), gan aplikācijas līmeņa (AL) caurlaidspēja [4], [8]. TL un AL maksimālās caurlaidspējas novērtēšanai tika izmantota attiecīgi *iPerf* (TCP trafiks) un *IxChariot* (FTP trafiks) programmatūra.

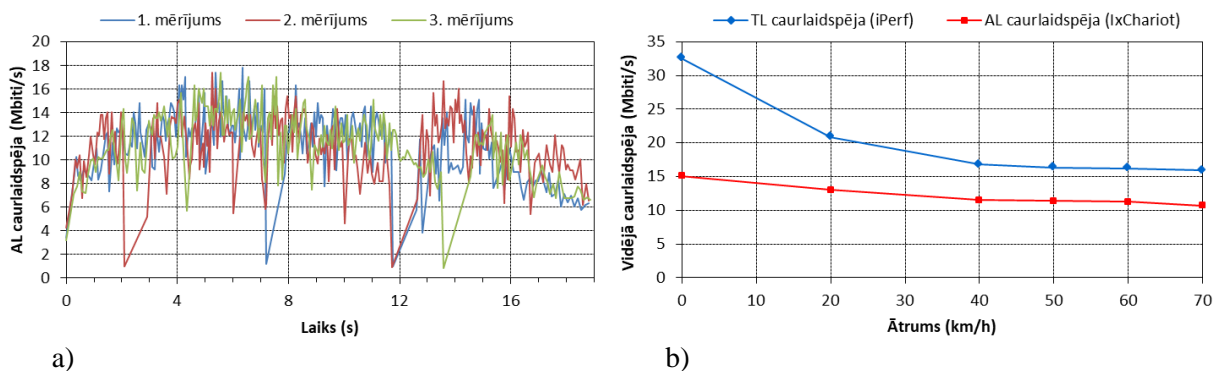


9. att. Testgultnes slēguma shēma.

Visos mērījumos izmantots viens automobīlis (mobilais klients). Mērījumi veikti dažādos automobiļa pārvietošanās ātrumos: 0 km/h, 20 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h.

3.2. apakšnodaļā izstrādāts *LTE* mobilā tīkla signāla stipruma un tā kvalitātes parametru uzraudzības risinājums *Zabbix* uzraudzības sistēmā [56]. Izveidota *LTE* signāla parametru uzraudzības veidne *Cisco LTE* maršrutētājam, kurā datu iegūšana notiek, izmantojot *SNMP* (angļu val. *Simple Network Management Protocol*) protokolu. Ar šī risinājuma palīdzību tika uzraudzīts *LTE* mobilā tīkla signāla stiprums *RSSI* (angļu val. *Received Signal Strength Indicator*) un mobilā tīkla kvalitātes parametri *RSRP* (angļu val. *Reference Signal Received Power*), *RSRQ* (angļu val. *Reference Signal Received Quality*) un *SINR* (angļu val. *Signal to Interference Noise Ratio*), kā arī izmantotais pakešu radiopakalpojums (angļu val. *Packet Service*) jeb mobilā tīkla piekļuves tehnoloģija un šūnas identifikators (angļu val. *Cell ID*).

3.3. apakšnodaļā apkopoti eksperimentālo mērījumu rezultāti un veikts to novērtējums. Kā piemērs (10. a att.) ir parādīti ar *IxChariot* programmatūru iegūtie AL caurlaidspējas mērījumu rezultāti, ja mobilais klients pārvietojas ar ātrumu 50 km/h.



10. att. a) AL caurlaidspējas mērījumu rezultāti, ja automobiļa braukšanās ātrums ir 50 km/h; b) Sakaru kanāla vidējā TL un AL caurlaidspēja atkarībā no automobiļa kustības ātruma.

2. tabulā apkopota informācija par eksperimentālajos mērījumos iegūtajiem vidējiem datu pārraides ātrumiem divrangu sakaru tīklā atkarībā no transportlīdzekļa pārvietošanās ātruma un izmantotā programnodrošinājuma.

2. tabula

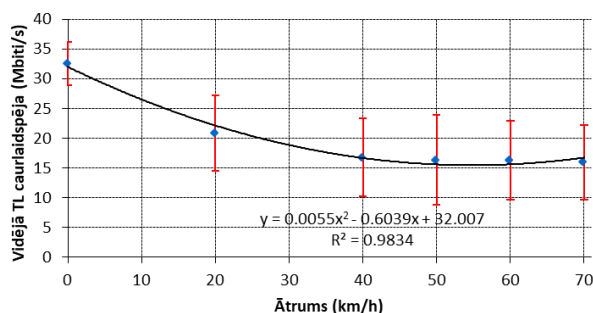
Vidējā caurlaidspēja atkarībā no automobiļa braukšanas ātruma divrangu tīklā

Automobiļa braukšanas ātrums v , km/h	Vidējā caurlaidspēja un kļūdas						Procentuālā atšķirība, %
	Vidējā TL caurlaidspēja $\bar{\varphi}$ (<i>iPerf</i>), Mbiti/s	Vidējā standartkļūda $s_{\bar{\varphi}}$, Mbiti/s	Vidējā relatīvā standartkļūda $s_{\bar{\varphi}\%}$, %	Vidējā AL caurlaidspēja $\bar{\eta}$ (<i>IxChariot</i>), Mbiti/s	Vidējā standartkļūda $s_{\bar{\eta}}$, Mbiti/s	Vidējā relatīvā standartkļūda $s_{\bar{\eta}\%}$, %	
0	32,56	±0,46	1,43	15,11	±0,06	0,37	54
20	20,86	±0,91	4,34	12,99	±0,10	0,79	38
40	16,78	±1,30	7,82	11,48	±0,18	1,70	32
50	16,32	±1,74	10,81	11,39	±0,17	1,50	30
60	16,25	±1,60	10,10	11,24	±0,22	1,90	31
70	15,93	±1,68	10,62	10,69	±0,24	2,24	33

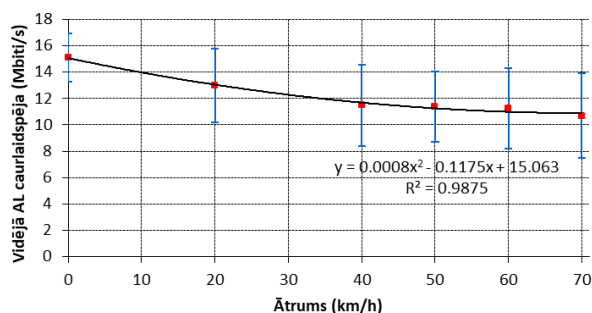
Apkopojot (2. tab.) aprēķinātās vidējās TL un AL caurlaidspējas vērtības, 10. b attēlā parādītas iegūtas likumsakarības vidējai TL un AL caurlaidspējas atkarībai no mobilā klienta pārvietošanās ātruma. Veicot AL caurlaidspējas (*OSI* (angļu val. *Open System Interconnection*) slānis *L7* (angļu val. *Layer 7*)) un TL caurlaidspējas (*OSI* slānis *L4* (angļu val. *Layer 4*)) eksperimentāli iegūto datu apstrādi un to analīzi, tika noskaidroti radītie *OSI* modeļa starpslāņu virstēriņi (angļu val. *overheads*). Virstēriņi starp *L7* un *L4* slāņiem vidēji veido līdz 36 %, ja mobilais klients pārvietojas ar ātrumu no 0 km/h līdz 70 km/h. Virstēriņus rada šo slāņu iesākuma jeb galvenes dati (angļu val. *header*), apliecinājuma (angļu val. *acknowledgement – ACK*) ziņojumi un *TCP* atkārtotas datu pārsūtīšanas mehānisms. Galvenie iemesli *TCP* protokola organizētai datu atkārtotai pārsūtīšanai tīklā ir datu pārraides kļūdas un datu trafika sastrēgumi tīklā, kas izraisa datu pakešu pazaudēšanu [45].

Izmantojot lineāro un nelineāros regresijas modeļus, tika veikta eksperimentāli iegūto datu aproksimācija ar mērķi noteikt tādu funkciju, kas vislabāk apraksta iegūtos mērījumu datus (2. tab. un 10. b att.), t. i., kas dod vismazāko aproksimācijas kļūdu. Tas ļaus secināt, pēc kāda likuma mainās TL un AL caurlaidspējas vidējās vērtības atkarībā no pārvietošanās ātruma, tādējādi tiks iegūtas jaunas likumsakarības.

Novērtējot iegūtos aproksimācijas kvalitātes un precizitātes (aproksimācijas kļūdas) kritērijus – determinācijas koeficientu R^2 , noviržu kvadrātu summu *SSR* (angļu val. *Sum of Squared Residuals*) un vidējo kvadrātisko kļūdu *MSE* (angļu val. *Mean Squared Error*), var secināt, ka vislabākos aproksimācijas rezultātus vidējās TL caurlaidspējas un vidējās AL caurlaidspējas mērījumu datiem dod datu aproksimācija ar polinomiālo funkciju (11. a, b att.).



a) Aproximācija ar polinomiālo funkciju



b) Aproximācija ar polinomiālo funkciju

11. att. a) Vidējo transporta līmeņa (TL) un b) aplikācijas līmeņa (AL) caurlaidspējas eksperimentālo datu aproksimācija.

Tiek secināts, ka tīkla vidējās TL caurlaidspējas un AL caurlaidspējas vērtības atkarībā no pārvietošanās ātruma mainās līdzīgi un visprecīzāk eksperimentāli iegūtās likumsakarības ar minimālu kļūdu apraksta otrās kārtas polinomiālā funkcija:

$$y(x) = Ax^2 + Bx + C, \quad (5.)$$

kur y – kopējā tīkla caurlaidspēja (TL caurlaidspēja vai AL caurlaidspēja); x – pārvietošanās ātrums v ; A, B, C – polinoma koeficienti.

Iegūtā aproksimācijas funkcija ir kvadrātiska, un datu aproksimācijai tiek izmantota aproksimācijas līknes (parabolas) krītošā segmenta daļa, kur ekstrēms ir lejā, ja pārvietošanās ātrums ir diapazonā no 0 km/h līdz 70 km/h.

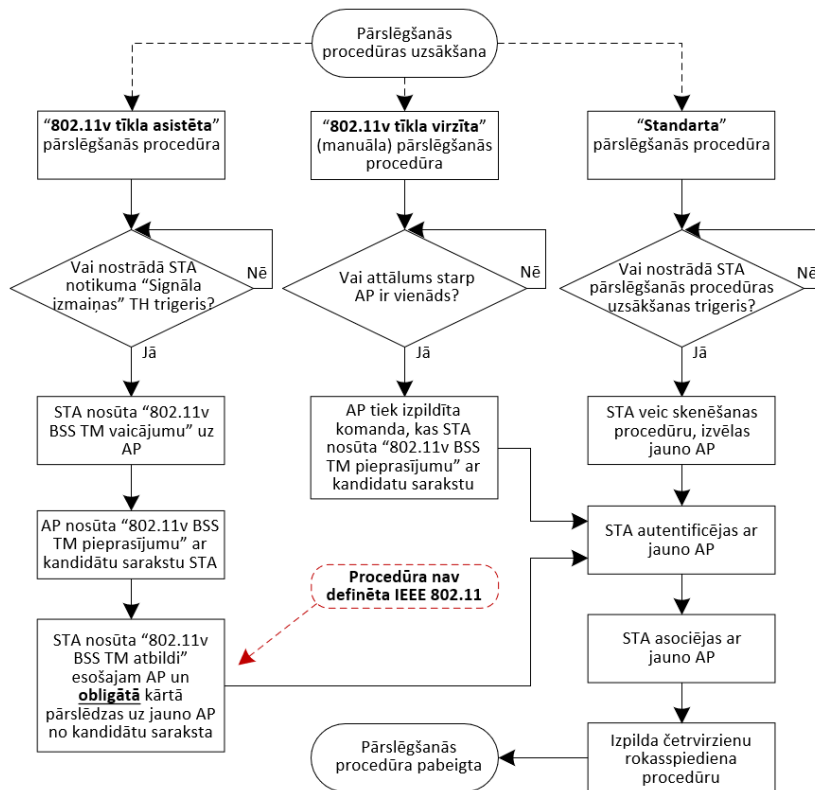
Ceturtnā nodaļa

Promocijas darba **ceturtnā nodaļa** veltīta *WLAN* pārslēgšanās procedūras uzlabošanai un iegūtās realizācijas novērtējumam.

4.1. apakšnodaļā veikts *IEEE 802.11k/r/v* standartu apskats [36], [42]. Detalizēti apskatīti *IEEE 802.11v* standarta “*BSS* pārejas vadības (angļu val. *Transition Management – TM*) vaicājuma”, “*BSS* pārejas vadības pieprasījuma” un “*BSS* pārejas vadības atbildes” ziņojumu formāti [29].

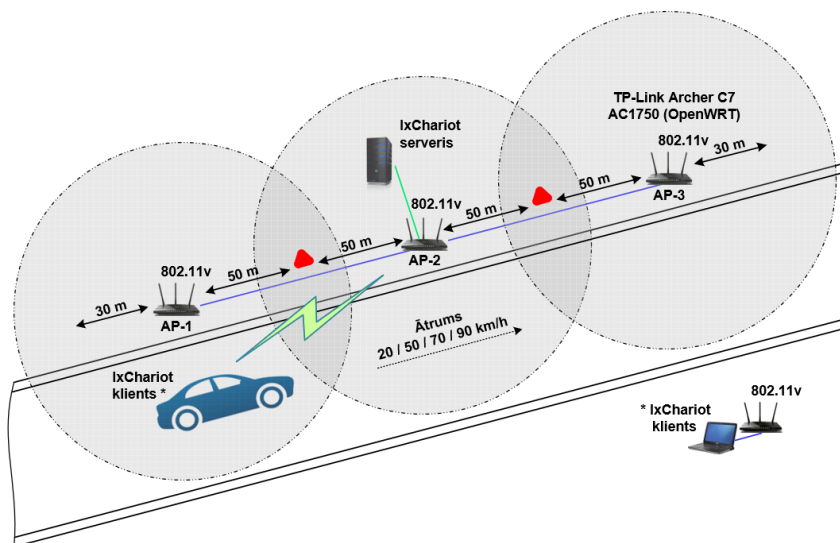
4.2. apakšnodaļā izstrādāti jauni pārslēgšanās procedūras algoritmi, kas ir bāzēti modificētā *IEEE 802.11v* standartā [30]. 12. attēlā redzama apvienotā “Standarta” un izstrādāto “*802.11v* tīkla virzīta” (manuāla) un “*802.11v* tīkla asistēta” pārslēgšanās procedūru algoritmu shēma. Eksperimentālajos mērījumos katrs algoritms tika testēts atsevišķi.

Izstrādātā “*802.11v* tīkla asistēta” pārslēgšanās procedūras risinājuma principālā atšķirība un efektivitāte, salīdzinot ar “Standarta” pārslēgšanās procedūras risinājumu, slēpjas divos aspektos: 1) asociētais *AP* klientam nosūta informāciju par nākamo *AP*, tādējādi klientam nav jātērē laiks tīkla skenēšanai; 2) asociētais *AP* klientam nosūta speciālu komandu veikt obligātu pārslēgšanos uz jauno *AP*.



12. att. Apvienotā pārslēgšanās procedūras algoritmu shēma.

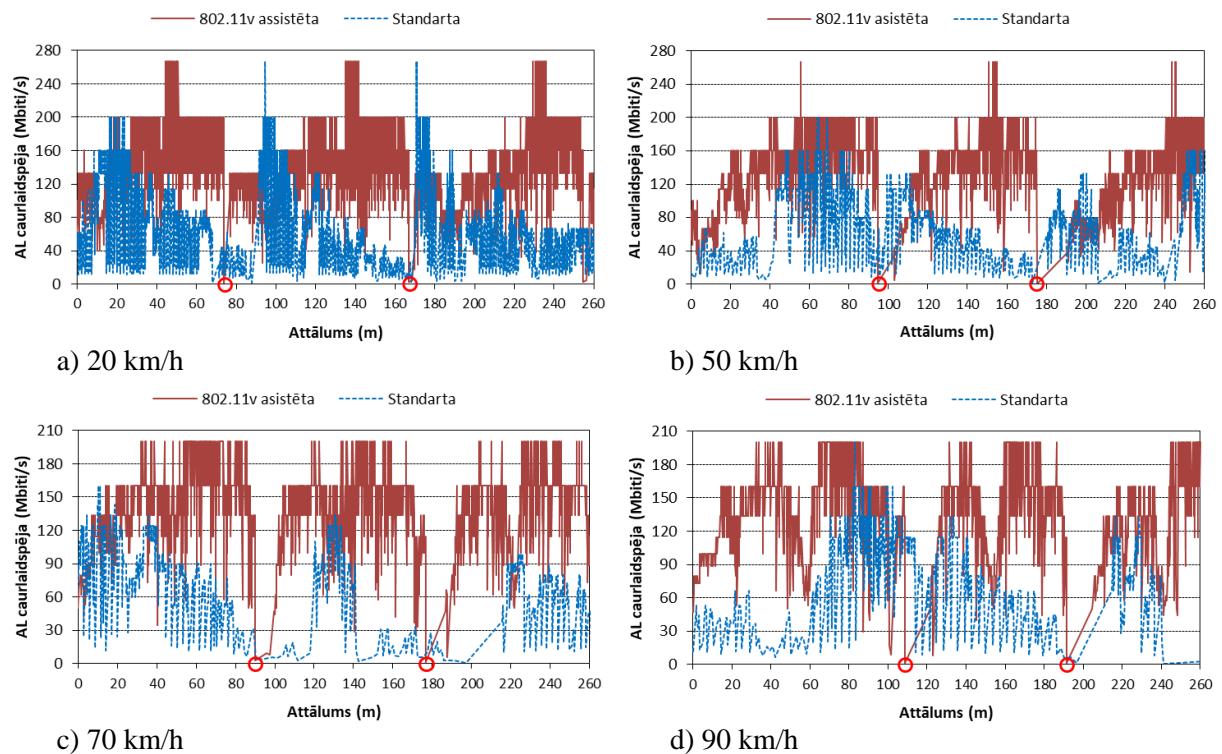
4.3. apakšnodaļā aprakstītas eksperimentālo mērījumu veikšanai sagatavotās *IEEE 802.11ac* bezvadu tīkla testgultnes (13. att.). Eksperimenti tika veikti, realizējot 4.2. apakšnodaļā aprakstītos pārslēgšanās procedūru algoritmus. Eksperimentos tika izmantots viens automobils (ar mobilo klientu), kas pārvietojās dažādos ātrumos: 20 km/h, 50 km/h, 70 km/h un 90 km/h. Eksperimentāli tika novērtēta AL caurlaidspēja, atbildes laiks, kā arī pārslēgšanās procedūru aiztures.



13. att. WLAN *IEEE 802.11ac* automobiļu sakaru tīkla testgultne ar ieviestu modificētu *IEEE 802.11v* standartu.

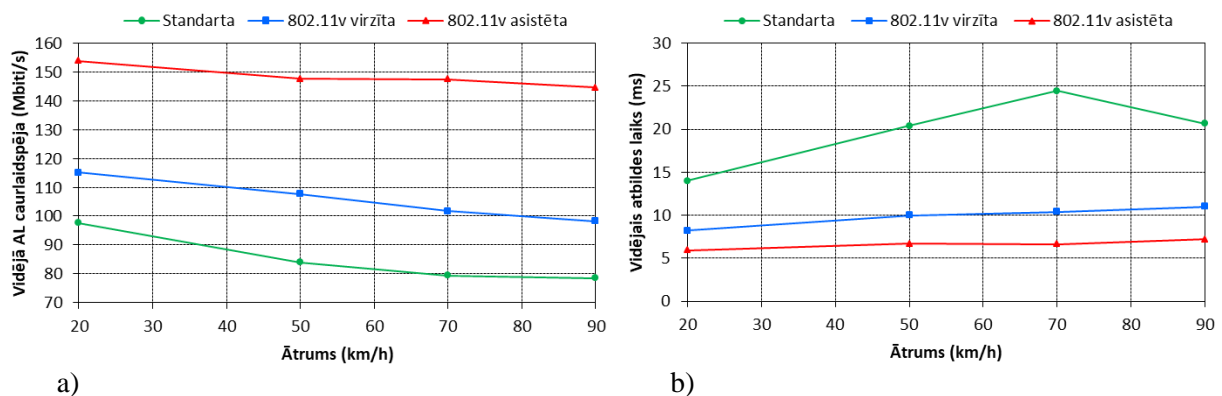
4.4. apakšnodaļā veikts eksperimentāajos mērījumos iegūto veiktspējas parametru (AL caurlaidspēja, atbildes laiks un pārslēgšanās procedūras aiztures) novērtējums.

Salīdzināšanai (14. a–d att.) ir parādīti eksperimentāli iegūti AL caurlaidspējas grafiki “Standarta” un “802.11v tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras mehānismiem dažādos automobiļa pārvietošanās ātrumos *IEEE 802.11ac* tīklā. “Standarta” pārslēgšanās procedūras gadījumā, ja pārvietošanās ātrums ir >20 km/h, pārslēgšanās procedūra notiek nokavēti, 90 km/h – nekorekti, jo kāds no testgultnes *AP* var tikt ignorēts un izlaists.



14. att. AL caurlaidspēja, ja braukšanas ātrums ir 20 km/h, 50 km/h, 70 km/h un 90 km/h, izmantojot “802.11v tīkla asistētu” un “Standarta” pārslēgšanās procedūras metodes.

15. a attēlā redzamas aprēķinātās vidējās AL caurlaidspējas raksturlīknes, kur aprēķiniem tika izmantoti eksperimentāli iegūtie mērījumu dati dažādos mobilā klienta pārvietošanās ātrumos un izmantojot dažādas pārslēgšanās procedūras metodes.

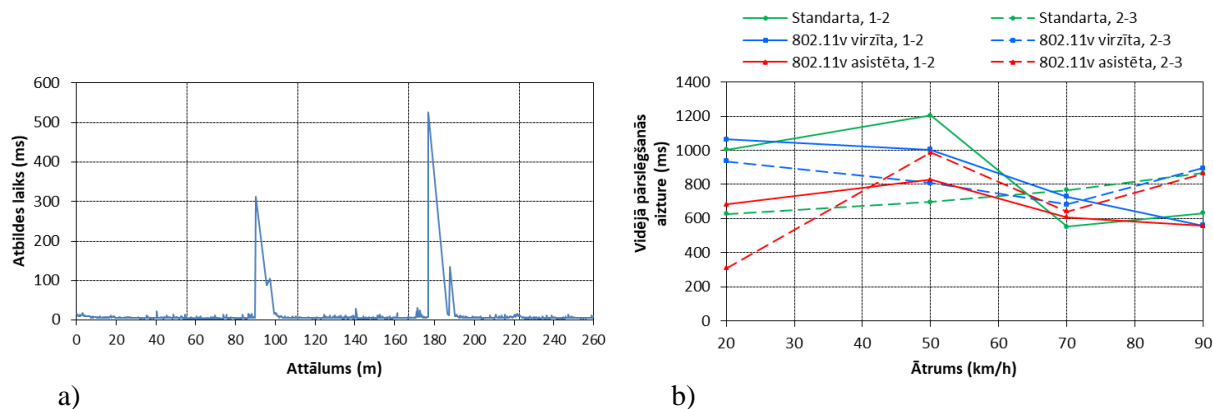


15. att. a) Vidējā AL caurlaidspēja; b) Vidējais atbildes laiks.

No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka vislielāko AL caurlaidspējas vidējo vērtību un vismazākos izkliedes rādītājus (standartnovirze un variācijas koeficients) dod izstrādātais “802.11v tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras risinājums. Uzmanība ir jāpievērš iegūtajiem izkliedes rādītājiem, jo tie raksturo likumsakarību, kā mainās AL caurlaidspējas vidējā vērtība atkarībā no pārvietošanās ātruma. Jo mazāki ir izkliedes rādītāji, jo mazāks ir AL caurlaidspējas vidējās vērtības kritums, pārvietojoties ar lielāku ātrumu.

15. b attēlā redzamas aprēķinātās vidējās atbildes laika raksturlīknes, kur aprēķiniem tika izmantoti eksperimentāli iegūtie mērījumu dati, mobilajam klientam pārvietojoties dažādos ātrumos, un, izmantojot dažādas pārslēgšanās procedūras metodes. Pieaugot mobilā klienta kustības ātrumam, pieaug arī tīkla atbildes laiks. Katra pārslēgšanās procedūra palielina kopējo tīkla atbildes laika vērtību. “Standarta” pārslēgšanās procedūras gadījumā (15. b att.) vidējā atbildes laika raksturlīknes kritumu, ja pārvietošanās ātrums ir 90 km/h, var izskaidrot ar faktu, ka šajā gadījumā mobilais klients nav veicis pārslēgšanos starp visiem AP. Vismazāko atbildes laika vidējo vērtību un vismazākos aprēķinātos izkliedes rādītājus nodrošina izstrādātais “802.11v tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras risinājums.

Balstoties uz eksperimentāli iegūtajiem atbildes laika grafikiem, tika noteikts aptuvenais katras pārslēgšanās procedūras ilgums jeb aizture. Iegūtajos grafikos pārslēgšanās procedūras aiztures tiek novērotas kā izteikti atbildes laika vērtību pieaugumi (pīķi), un to laika momenti precīzi sakrīt ar AL caurlaidspējas grafikos novērotajiem datu trafika kritumiem. Kā piemērs (16. a att.) ir dots atbildes laika grafiks “802.11v tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras gadījumā, ja klienta pārvietošanās ātrums ir 70 km/h.



16. att. a) Atbildes laiks, ja braukšanas ātrums ir 70 km/h un izmanto “802.11v tīkla asistētu” pārslēgšanās procedūru; b) Vidējās pārslēgšanās aiztures starp AP pāri, izmantojot dažādas pārslēgšanās procedūras metodes.

16. b attēlā redzamas eksperimentāli novērtētās vidējās pārslēgšanās procedūras aiztures starp AP-1 un AP-2, kā arī starp AP-2 un AP-3, izmantojot dažādas pārslēgšanās procedūras metodes dažādos mobilā klienta pārvietošanās ātrumos. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka vismazākās vidējās pārslēgšanās procedūras aiztures vērtības tika sasniegtas, izmantojot “802.11v tīkla asistētas” pārslēgšanās procedūras risinājumu.

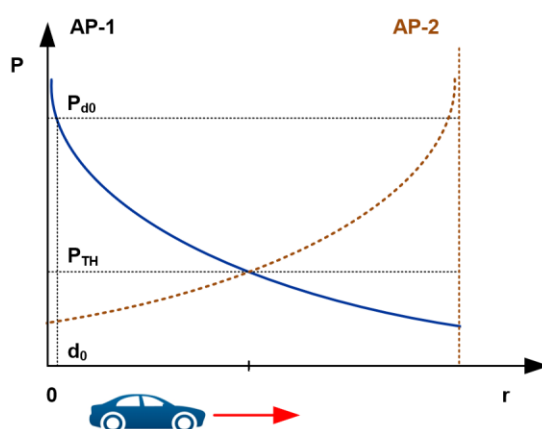
Pēc eksperimentāli iegūto rezultātu analīzes var secināt, ka, savlaicīgi pieņemot pārslēgšanās procedūras lēmumu un izmantojot IEEE 802.11v standarta “BSS pārejas vadības vaicājuma” un “BSS pārejas vadības pieprasījuma” ziņojumus ar izstrādāto modifikāciju

savienojumā ar *IEEE 802.11ac* standartu, var izmantot ātri kustīgu objektu (>20 km/h) pārslēgšanās procedūras nodrošināšanai. Rezultātā vidējā aplikācijas līmeņa caurlaidspēja tika palielināta par 75 %, salīdzinot ar “Standarta” pārslēgšanās procedūru, kurā netika izmantots *IEEE 802.11v* standarts. Kā arī par 67 % tika samazināts vidējais tīkla atbildes laiks un tika nodrošinātas mazākas vidējās pārslēgšanās procedūras aiztures.

Piektā nodaļa

Promocijas darba **piektajā nodaļā**, izmantojot gan eksperimentālos datus, gan teorētiskos aprēķinus, tika noteikti tādi transportlīdzekļu sakaru kanālu veiktspējas parametri kā uztvertā signāla jaudas līmenis un sakaru kanāla caurlaidspēja atkarībā no transportlīdzekļa attāluma līdz raidītājam. Aprēķinos ņemtas vērā arī uztvertā signāla fluktuācijas, kas ir saistītas ar signāla vairākceļu izplatīšanos [7].

5.1. apakšnodaļā noteikta signāla jaudas līmeņa atkarība no attāluma līdz raidītājam. Eksperimentāli tika novērots, ka, mobilajam klientam attālinoties no AP (17. att.), uztvertā signāla jaudas līmenis P (šajā gadījumā *RSS* (angļu val. *Received Signal Strength*)) samazinās, kā arī *RSS* signāla līmenis ne tikai samazinās, bet arī fluktuē ap tā vidējo vērtību. Eksperimentālie mērījumi tika veikti vienranga *IEEE 802.11ac* tīklā, izmantojot standarta bezvadu tīkla klientu. Eksperimentāli iegūtie dati [23], [30] tika izmantoti turpmākajos teorētiskajos aprēķinos (6. vienādojums).



17. att. Uztvertā signāla jaudas parametra P izmaiņas atkarībā no attāluma līdz raidītājam.

Izmantojot divstaru plakanas zemes virsmas (angļu val. *two-ray flat-earth*) modeli [23], kuram pievienotas gadījuma fluktuācijas, iegūst logaritmiski normālo modeli. Modeļa pieraksts vispārīgā formā dots 6. vienādojumā. Modelis ļauj noteikt uztvertā signāla jaudas līmeni P atkarībā no attāluma r starp raidītāju un uztvērēju [23], [25], [27].

$$P(r) = P(d_0) - 10u \log_{10} \left(\frac{r}{d_0} \right) + X_{\sigma}, \quad (6.)$$

kur $P(r)$ – uztvertā signāla jaudas līmenis (atbilst *RSS*) atkarībā no r , dBm; d_0 – attālums no bezvadu piekļuves punkta (AP) līdz transportlīdzeklim, m; r – attālums starp raidītāju un uztvērēju, m; $P(d_0)$ – uztvertā signāla jaudas līmenis, kad klients atrodas tieši pretī bezvadu

piekļuves punktam, dBm; u – trases zudumu rādītājs (angļu val. *path loss exponent*); X_σ – gadījuma izlases mainīgie, dB.

Uztvertā signāla sadalījums, ar kuru iespējams modelēt Releja (*Rayleigh*) vai Raisa (*Rician*) statistiku, ir Nakagami sadalījums (7. vienādojums).

$$f(x; \alpha, \omega) = \frac{2\alpha^\alpha x^{2\alpha-1}}{\omega^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{\alpha x^2}{\omega}}, \quad (7.)$$

kur α – formas (angļu val. *shape*) parametrs (ja $\alpha = 1$, tad tas ir Releja sadalījums, ja $\alpha > 1$, tad tas ir Raisa sadalījums.); ω – vidējās jaudas novērtējums rimšanas apliecējā (angļu val. *fading envelope*); x – vispārīgs gadījumskaits, kas pakļauts Nakagami sadalījumam.

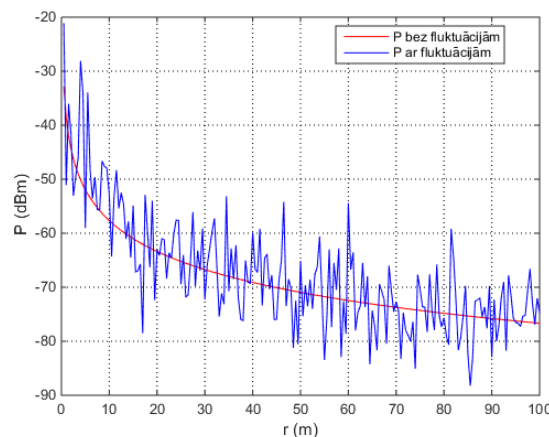
Vidējā uztvertā signāla jaudas svārstību vērtība aprēķināma pēc 8. izteiksmes.

$$\bar{X}_\sigma = \int_0^\infty x f(x; \alpha, \omega) dx = \int_0^\infty x \left(\frac{2\alpha^\alpha x^{2\alpha-1}}{\omega^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{\alpha x^2}{\omega}} \right) dx. \quad (8.)$$

Aprēķinos tiek pieņemts, ka $\alpha = 1$, tādējādi 8. izteiksme vienkāršojas:

$$\bar{X}_\sigma = \int_0^\infty \frac{2x^2}{\omega} e^{-\frac{x^2}{\omega}} dx. \quad (9.)$$

Izmantojot 9. izteiksmi un papildu aprēķinus, tika noteikta pievienoto signāla fluktuāciju X_σ ietekme uz $P(r)$ (18. att.).



18. att. Teorētiski aprēķinātā uztvertā signāla jauda P atkarībā no attāluma līdz raidītājam bez un ar jaudas fluktuācijām.

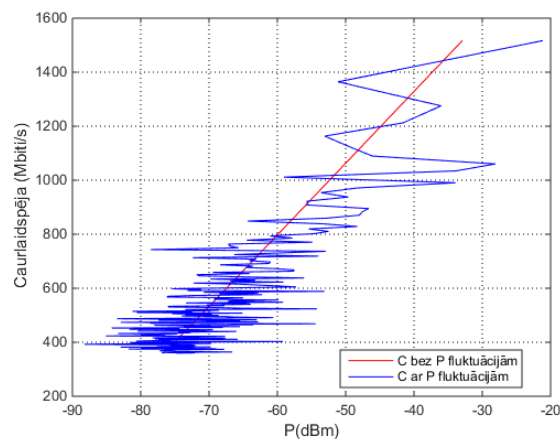
5.2. apakšnodaļā noteikta caurlaidspējas atkarība no uztvertā signāla jaudas līmeņa un attāluma līdz raidītājam.

Sakaru kanāla caurlaidspējas augšējās robežas jeb kanāla kapacitātes C aprēķinam tika izmantota Šenona frekvenču kanāla kapacitātes teorēma [10], [43]:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (10.)$$

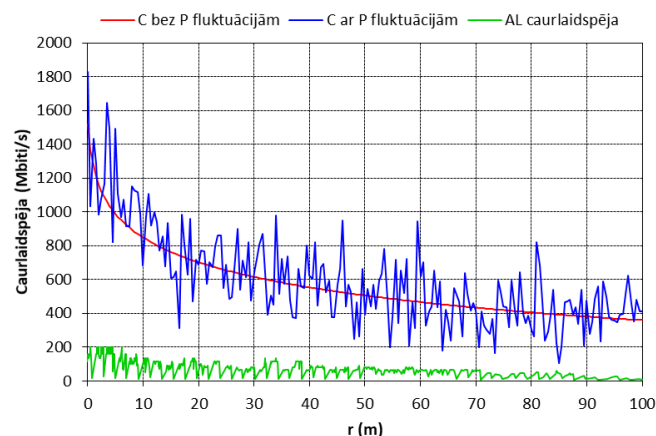
kur C – frekvenču kanāla kapacitāte, biti/s; B – frekvenču kanāla joslas platums, Hz; S – uztvertā signāla vidējā jauda kanālā, W; N – trokšņa vai traucējumu signāla vidējā jauda kanālā, W.

Izmantojot 10. un 6. izteiksmi, tika aprēķināta teorētiskā caurlaidspēja C ideālam sakaru kanālam. Mainīgais S atbilst 6. izteiksmes parametram $P(r)$. 19. attēlā redzams iegūtais aprēķinu rezultāts, kur parādīts, kā mainās sakaru kanāla maksimālā caurlaidspēja (kapacitāte) C atkarībā no uztvertā signāla jaudas līmeņa P bez un ar uztvertā signāla jaudas līmeņa fluktuācijām.



19. att. Teorētiski aprēķinātā caurlaidspēja C atkarībā no uztvertā signāla jaudas P bez un ar jaudas fluktuācijām.

Tālāk tika aprēķināta sakaru kanāla caurlaidspēja C atkarībā no attāluma līdz raidītājam. Teorētiski iegūtie caurlaidspējas rezultāti (sarkanā un zilā līkne) tika apvienoti vienā grafikā ar eksperimentāli iegūtajiem AL caurlaidspējas rezultātiem (zaļā līkne) (20. att.).



20. att. Teorētiski aprēķinātā caurlaidspēja C bez un ar P fluktuācijām un eksperimentāli iegūtā AL caurlaidspēja atkarībā no attāluma līdz raidītājam.

Teorētiskie aprēķini, tāpat kā veiktie eksperimentālie novērojumi un mērījumi, rāda, ka WLAN tīklā, mobilajam klientam attālinoties no raidītāja, uztvertā signāla jauda pavājinās un rezultātā samazinās arī caurlaidspēja. Uztvertā signāla jauda P ir laikā mainīga un fluktuējoša.

Uztvertā signāla jaudas svārstības izraisa konstruktīva un destruktīva interference starp vairākceļu signāla izplatīšanās komponentēm. Tas izraisa arī caurlaidspējas fluktuācijas. Teorētiski aprēķinātā bezvadu sakaru kanāla kapacitāte jeb maksimāli iespējamā caurlaidspēja C ir vairākas reizes lielāka, salīdzinot ar eksperimentāli iegūto aplikācijas līmeņa (AL) caurlaidspēju. Līkņu tendence un raksturs ir līdzīgs, taču absolūtās vērtības atšķiras, jo Šenona teorēma paredz datu pārraides ātruma noteikšanu ideālam kanālam, tā ir fizikālā vide, un aprēķinos netiek ņemta vērā augstāku *OSI* modeļa slāņu ietekme.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Veicot definēto uzdevumu izpildi, ir iegūti vairāki **galvenie promocijas darba rezultāti un secinājumi**.

1. Integrēta *WLAN* un *LTE* autotransporta sakaru tīkla izveide ir tehniski un ekonomiski pamatota gadījumā, ja tiek izmantota *WLAN* bāzēta, *LTE* koncentrēta mobilā tīkla atslogošana. Tas ir praktiski izmantojams automobiļu sakaru tīkls, lai nodrošinātu liela apjoma datu pārsūtīšanu un organizētu automobiļu pasažieru piekļuvi interneta tīklam.
2. Divrangu *WLAN* un *LTE* sakaru tīkla veikspēja ir atkarīga no tīkla mezglu tehniskajiem veikspējas parametriem. Izmantojot dažādus *LTE* maršrutētājus, autotransporta bezvadu sakaru tīkla AL caurlaidspēja var atšķirties par 10–20 %. Mobilo klientu pārvietošanās ātruma, klientu skaita un klientu pārvietošanās scenāriju izmaiņas ietekmē gan individuālo mobilo klientu AL caurlaidspēju, gan arī kopējo bezvadu tīkla veikspēju.
3. Neatkarīgi no tā, kāda ražotāja *LTE* maršrutētājs tiek izmantots divrangu *IEEE 802.11n* un *LTE* tīklā, tas neietekmē datu trafika raksturu. To rāda eksperimentālo mērījumu rezultātu analīze, kur datu trafika plūsmām tika novērtēti tādi parametri kā caurlaidspēja, korelācijas koeficients, dispersija un trafika sevlīdzīguma pakāpe.
4. Pārslēgšanās procedūra starp bezvadu piekļuves punktiem ir atkarīga no klienta ierīcē realizētā pārslēgšanās procedūras algoritma, *WLAN* tīkla arhitektūras risinājuma, kā arī realizētajiem bezvadu tīkla drošības mehānismiem.
5. Integrēta *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru kanāla caurlaidspēja mainās atkarībā no automobiļa (mobilā klienta) kustības ātruma (0–70 km/h) pēc otrās kārtas polinomiālās funkcijas likuma.
6. Integrētā *IEEE 802.11n* un *LTE* sakaru tīklā virstēriņi starp *L7* un *L4* vidēji ir līdz 36 %, ja mobilais klients pārvietojas ar ātrumu no 0 km/h līdz 70 km/h. Tas nozīmē, ka par tīkla caurlaidspēju nevar spriest, tikai balstoties uz mērījumiem, kas ir veikti transporta (*L4*) vai zemākos slāņos.
7. *IEEE 802.11ac* tīklā ar ātri kustīgiem objektiem (>20 km/h), savlaicīgi pieņemot pārslēgšanās procedūras lēmumu un izpildot pārslēgšanās procedūru, izmantojot *IEEE 802.11v* standarta “*BSS* pārejas vadības vaicājuma” un “*BSS* pārejas vadības pieprasījuma” ziņojumus ar izstrādāto modifikāciju, var paaugstināt bezvadu tīkla kopējo veikspēju – vidējo aplikācijas līmeņa caurlaidspēju var palielināt līdz 75 %, vidējo tīkla atbildes laiku var samazināt līdz pat 67 %, kā arī iespējams nodrošināt mazākas vidējās pārslēgšanās procedūras aiztures, salīdzinot ar “Standarta” pārslēgšanās procedūru, kurā netiek izmantots *IEEE 802.11v* standarts.
8. Teorētiski veiktie aprēķini, tāpat kā eksperimentālie novērojumi un mērījumi, rāda, ka *IEEE 802.11ac* tīklā, mobilajam klientam attālinoties no raidītāja, uztvertā signāla jauda pavājinās, kā rezultātā samazinās arī caurlaidspēja. Uztvertā signāla jauda ir laikā mainīga un fluktuējoša, uztvertā signāla jaudas svārstības izraisa konstruktīva un destruktīva interference starp vairākceļu signāla izplatīšanās komponentēm, kas savukārt izraisa arī caurlaidspējas fluktuācijas.

Promocijas darbā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti un definēti iespējamie turpmākie pētījumu virzieni.

1. Mobilitātes paplašināšanas risinājumu izstrāde *WLAN* bāzētu autotransporta sakaru tīklu klientiem, izstrādāto risinājumu veikspējas novērtēšana. Savienojamības risinājums paredzētu adaptīvu *WLAN* un *4G LTE/5G* sakaru kanālu izmantošanu problemātiskajās pārklājuma zonās. Piedāvātais risinājums *ITS* tīklos ļautu nodrošināt stabilus platjoslas datu pārraides pakalpojumus un būtu vērsts uz multimediju datu pārraidi.
2. *IEEE 802.11k* standarta padziļināta izpēte un risinājuma izstrāde, lai nodrošinātu automātiski aizpildāmu datubāzi ar bezvadu piekļuves punktu (*AP*) kandidātu sarakstu, kas iekļautu arī *AP GPS* datus. Pārslēgšanās procedūras algoritms varētu tikt papildināts ar jaunām *AP* izvēles metrikām, piemēram, klienta pozicionēšanas dati, kustības virziens un ātrums. Izstrādāto risinājumu veikspējas un efektivitātes novērtēšana.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Alcantara C., Darchis N., Henry J., Jimenez J., Ziliotto F. CCIE Wireless v3 Study Guide. – Cisco Press, 2019. – p. 520.
- [2] **Ancans A.**, Bogdanovs N., Petersons E., Ancans G., Umanskis A., Vishnevskiy V. Evaluation of Wi-Fi and LTE Integrated Channel Performance with Different Hardware Implementation for Moving Objects // *Procedia Computer Science*. – 2017. – Vol. 104. – pp. 493–500.
- [3] **Ancans A.**, Bogdanovs N., Petersons E., Ipatovs A. Integrated Wireless Network Performance Estimation for Moving Vehicles // *Conference on Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, Riga. – 2017. – pp. 203–207.
- [4] **Ancans A.**, Petersons E. The Relationship between Transport Wireless Network Throughput and Vehicle Speed // *Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS)*. – 2018. – Vol. 52, Iss. 4. – pp. 297–305.
- [5] **Ancans A.**, Petersons E., Ancans G., Stetjuha M., Ipatovs A., Stankevicius E. Technical and Economic Analysis of Transport Telecommunication Infrastructure // *Procedia Computer Science*. – 2019. – No. 149. – pp. 206–214.
- [6] **Ancans A.**, Petersons E., Ipatovs A. Vehicular Wireless Network Access Controller Parameter Estimation // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Singapore. – 2017. – pp. 2152–2159.
- [7] **Ancans A.**, Petersons E., Jerjomins R., Grabs E., Ancans G., Ipatovs A. Evaluation of received signal power level and throughput depending on distance to transmitter in testbed for automotive WLAN IEEE 802.11ac communication network // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences (apstiprināta publicēšanai)*.
- [8] **Ancans A.**, Petersons E., Umanskis A. Hybrid Vehicular IEEE 802.11n and LTE Wireless Network Performance Evaluation in Non-Stationary Mode of Motion // *Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*. – 2018. – pp. 213–213.
- [9] Ancans G., Bobrovs V., **Ancans A.**, Kalibatiene D. Spectrum Considerations for 5G Mobile Communication Systems // *Procedia Computer Science*. – 2017. – Vol. 104. – pp. 509–516.
- [10] Ancans G., Stafecka A., Bobrovs V., **Ancans A.**, Caiko J. Analysis of Characteristics and Requirements for 5G Mobile Communication Systems // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2017. – Vol. 54, Iss. 4. – pp. 69–78.
- [11] Arhipova I., Bāliņa S. Statistika ekonomikā un biznesā. Risinājumi ar SPSS un Microsoft Excel. – Datorzinību Centrs, 2006. – 352 lpp.
- [12] Bogdanovs N., **Ancans A.**, Martinsons K., Petersons E. Estimating the Speed of an Integrated Wireless Network for Transportation Applications // *Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS)*. – 2014. – Vol. 48, Iss. 5. – pp. 274–281.
- [13] Bolch G., Greiner S., De Meer H., Trivedi K.S. *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation With Computer Science Applications*. Second Edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2006. – p. 896.

- [14] CEPT Report 71. Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to study the extension of the Intelligent Transport Systems (ITS) safety-related band at 5.9 GHz // Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). 2019. – p. 42.
- [15] Chen S., Hu J., Shi Y., Zhao L., Li W. A Vision of C-V2X: Technologies, Field Testing and Challenges with Chinese Development // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Vol. 7, Iss. 5. – pp. 3872–3881.
- [16] Cheng N., Lu N., Zhang N., Shen X. S., Mark J. W. Vehicular WiFi offloading: Challenges and solutions // Vehicular Communications. – 2014. – Vol. 1, Iss. 1. – pp. 13–21.
- [17] Cheng X., Zhang R., Yang L. 5G-Enabled Vehicular Communications and Networking. – Springer, 2019. – p. 177.
- [18] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022. White paper. – Cisco, 2019. – p. 33.
- [19] Coleman D. D., Westcott D. A., Harkins B. E. CWSP Certified Wireless Security Professional Study Guide: Exam CWSP-205. 2nd Edition. – Sybex, John Wiley & Sons, 2017. – p. 701.
- [20] Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. – Academic Press, 2018. – p. 466.
- [21] Dutta A., Schulzrinne H. Mobility Protocols and Handover Optimization: Design, Evaluation and Application. – John Wiley & Sons Ltd., 2014. – p. 442.
- [22] Edgeworth B., Rios R. G., Hucaby D., Gooley J. CCNP and CCIE Enterprise Core ENCOR 350-401 Official Cert Guide. – Cisco Press, 2020. – p. 1073.
- [23] Emmelmann M., Bochow B., Kellum C. C., eds. Vehicular Networking: Automotive Applications and Beyond. – John Wiley & Sons Ltd, 2010. – p. 296.
- [24] Fei H., eds. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. – p. 577.
- [25] Fei H., eds. Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communications: A Technical Approach. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. – p. 346.
- [26] Hadaller D., Keshav S., Brecht T., Agarwal S. Vehicular opportunistic communication under the microscope // MobiSys '07 Proceedings of the 5th international conference on Mobile systems, applications and services, San Juan, Puerto Rico. – 2007. – pp. 206–219.
- [27] Hasan S. F., Siddique N., Chakraborty S. Intelligent Transport Systems: 802.11-based Vehicular Communications. Second Edition. – Springer International Publishing, 2018. – p. 183.
- [28] Hucaby D. CCNA Wireless 200-355 Official Cert Guide. – Pearson Education, Cisco Press, 2016. – p. 570.
- [29] IEEE Computer Society: IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium

- Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2016, 7 December 2016. – p. 3534.
- [30] Jerjomins R., **Ancans A.**, Petersons E., Gerina-Ancane A. Improving Handover Mechanism in Vehicular WiFi Networks // ICTE in Transportation and Logistics 2019, Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure (ICTE ToL 2019, LNITI). – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – pp. 243–261.
- [31] Karagiannis G., Altintas O., Ekici E., Heijenk G., Jarupan B., Lin K., Weil T., Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2011. – Vol. 13, Iss. 4. – pp. 584–616.
- [32] Lauridsen M., Gimenez L. C., Rodriguez I., Sorensen T. B., Mogensen P. From LTE to 5G for Connected Mobility // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, Iss. 3. – pp. 156–162.
- [33] Li B. Z., Luan T. H., Hu B., Chen S. Z. Efficient MAC protocol for drive-thru Internet in a sparse highway environment // IET Communications. – 2017. – Vol. 11, Iss. 3. – pp. 428–436.
- [34] Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, Iss. 9. – pp. 113–119.
- [35] Marsch P., Bulakci O., Queseth O., Boldi M., eds. 5G System Design. Architectural and Functional Considerations and Long Term Research. – John Wiley & Sons, 2018. – p. 608.
- [36] Meschke R., Krohn M., Daher R., Gladisch A., Tavangarian D. Novel handoff concepts for roadside networks using mechanisms of IEEE 802.11k & IEEE 802.11v // ICUMT. – 2010. – pp. 1232–1238.
- [37] Mourad A., Heigl F., Hoehner P. A. Performance Evaluation of Concurrent IEEE 802.11 Systems in the Automotive Domain // 41st IEEE Conference on Local Computer Networks, Dubai. – 2016. – pp. 655–661.
- [38] Mouton M., Castignani G., Frank R., Engel T. Enabling vehicular mobility in city-wide IEEE 802.11 networks through predictive handovers // Vehicular Communications. – 2015. – Vol. 2, Iss. 2. – pp. 59–69.
- [39] Perez A. Wi-Fi Integration to the 4G Mobile Network. – ISTE, John Wiley & Sons, 2018. – p. 288.
- [40] Roshan P., Leary J. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. – Cisco Press, 2004. – p. 312.
- [41] Sadiq A. S., Abu Bakar K., Ghafoor K. Z., Gonzalez A. J. Mobility and Signal Strength – Aware Handover Decision in Mobile IPv6 based Wireless LAN // International Multiconference of Engineers and Computer Scientists. – 2011. – Vol. 1. – pp. 664–669.
- [42] Sanchez M.I., Boukerche A. On IEEE 802.11k/r/v amendments: Do they have a real impact? // IEEE Wireless Communications. – 2016. – Vol. 23, Iss. 1. – pp. 48–55.

- [43] Saunders S. R., Aragon-Zavala A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. – John Wiley & Sons Ltd, 2007. – p. 516.
- [44] Singh P. K., Chattopadhyay S., Bhale P., Nandi S. Fast and Secure Handoffs for V2I Communication in Smart City Wi-Fi Deployment // International Conference on Distributed Computing and Internet Technology. – 2018. – Vol. 10722. – pp. 189–204.
- [45] Stallings W. Data and Computer Communications. Tenth Edition. – Pearson Education, 2014. – p. 912.
- [46] Varma S. Internet Congestion Control. – Elsevier, 2015. – p. 286.
- [47] Vegni A. M., Loscri V., V. Vasilakos A. V., eds. Vehicular Social Networks. – CRC Press, 2017. – p. 208.
- [48] Wang X., Mao S., Gong M. X. An Overview of 3GPP Cellular Vehicle-to-Everything Standards // GetMobile: Mobile Computing and Communications. ACM Digital Library. – 2017. – Vol. 21, Iss. 3. – pp. 19–25.
- [49] Welzl M. Network Congestion Control: Managing Internet Traffic. – John Wiley & Sons, 2005. – p. 282.
- [50] Xu S., Li Y., Gao Y., Liu Y., Gacanin H. Opportunistic Coexistence of LTE and WiFi for Future 5G System: Experimental Performance Evaluation and Analysis // IEEE Access. – 2017. – Vol. 6. – pp. 8725–8741.
- [51] Zaidi A., Athley F., Medbo J., Gustavsson U., Durisi G., Chen X. 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components. – Academic Press. Elsevier, 2018. – p. 322.
- [52] 5G Automotive Vision. European Commission, 2015. / Internets. – <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White-Paper-on-Automotive-Vertical-Sectors.pdf>, skatīts 17.04.2020.
- [53] Alonso Raposo M., Grosso M., Despres J., Fernandez Macias E., Galassi C., Krasenbrink A., Krause J., Levati L., Mourtzouchou A., Saveyn B., Thiel C., Ciuffo B. An analysis of possible socio-economic effects of a Cooperative, Connected and Automated Mobility (CCAM) in Europe. European Commission, 2018. / Internets. – <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC111477/kjna29226enn.pdf>, skatīts 12.04.2020.
- [54] Instant performance assessment of complex networks from pre- to post-deployment. Keysight Technologies. / Internets. – <https://www.keysight.com/zz/en/products/network-test/performance-monitoring/ixchariot.html>, skatīts 11.09.2020.
- [55] iPerf – The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP. / Internets. – <https://iperf.fr/>, skatīts 27.05.2020.
- [56] Zabbix Documentation 3.0, Zabbix appliance. / Internets. – <https://www.zabbix.com/documentation/3.0/manual/appliance>, skatīts 05.09.2020.