

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Jānis JANSONS

**AUTOTRANSPORTA MOBILĀ BEZVADU TĪKLA
EKSPERIMENTĀLAIS UN ANALĪTISKAIS PĒTĪJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2013

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Transporta elektronikas un telemātikas katedra

Jānis JANSONS

Doktora studiju programmas „Transporta datorvadības, informācijas un elektroniskās sistēmas” doktorants

**AUTOTRANSPORTA MOBILĀ BEZVADU TĪKLA
EKSPERIMENTĀLAIS UN ANALĪTISKAIS PĒTĪJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
E.PĒTERSONS

RTU izdevniecība
Rīga 2013

UDK 656:004.732(043.2)

Ja 606 a

Jansons J. Autotransporta mobilā bezvadu tīkla eksperimentālais un analītiskais pētījums. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2013.-39 lpp.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».



Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2013.gada 27.jūnija lēmumu, protokols Nr.16.

ISBN 978-9934-10-458-9

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.gada 10. oktobrī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 auditorijā, plkst. 16:30.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.sc.ing. Gunārs Lauks
Rīgas Tehniskā universitāte, Elektronikas un telekomunikācijas fakultāte

Profesors, Dr.sc.comp. Mihails Broitmans
Elektronikas un datorzinātņu institūts, Datoru tīklu pārvaldības problēmu laboratorija

Profesore, Dr.sc.ing. Irina Jackiva
Transporta un sakaru institūts, Matemātisko metožu un modelēšanas katedra

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu (vai cita) doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Jānis Jansons.....(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur 5 nodaļas, slēdzienu vai secinājumus, literatūras sarakstu, 9 pielikumus, 50 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 146 lappuses ar pielikumiem. Literatūras sarakstā ir 154 nosaukumi.

VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Lai globāli un vietējā mērogā risinātu autotransporta plūsmas pieauguma radītās sekas, autotransporta nozarē nepieciešams ieviest augstās tehnoloģijas. Tāpēc autotransporta tīklošanas priekšizpēte ir aktuāla un to uzskata par jaunu izaicinājumu un iespējām gan zinātnei, gan auto industrijai.

Jauno iniciatīvu galvenais uzdevums ir izveidot intelektuālu transporta sistēmu(ITS), kas, izmantojot sakaru un informācijas sistēmu risinājumus, ļautu samazināt autotransporta negatīvo ietekmi, palielinātu transportēšanas efektivitāti un nodrošinātu pasažieriem piekļuvi interneta resursiem.

Moderno šūnu sakaru sistēmas teorētiskā lejupielāde ir līdz 150Mbit/s, bet praksē datu apmaiņa ir desmitiem reižu zemāka. Izmaksas ziņā pastāvīgi izmantot šādu sakaru sistēmas datu apmaiņu pakalpojumus ir vismaz četras reizes augstākas nekā stacionāru interneta pieslēgumiem. Tāpēc ir nepieciešami mobilo sakaru tehnoloģiskie risinājumi autotransporta vidē, kuri būtu plaši pieejami kā šūnu tīkli, izmaksas stacionāra interneta pieslēguma līmenī un caurlaidspēju augstāka nekā modernākajām šūnu sakaru sistēmām.

Pateicoties vairākiem kopējiem industrijas, pētniecības, valdības un standartizācijas organizāciju centieniem, tika izveidots starptautisks standarts - IEEE802.11p [2], kas ir zināms kā bezvadu piekļuve autotransporta vidē. Standarta pamatā ir IEEE802.11a standarts ar divreiz zemāku caurlaidspēju. Šādas tehnoloģiskās izmaiņas palielināja bezvadu sakaru darbības rādiusu un mobilitāti, tostarp ir uzlabota noturība pret daudzstaru izplatīšanos un Doplera nobīdi. Uzlabotais standarts spēj darboties vienlaicīgi infrastruktūras (V2I) un ad-hoc (V2V) režīmos. Šādu izmaiņu dēļ netika saglabāta savietojamība ar bāzes standartu, līdz ar to nav zināms, cik plaši tas tiks izmantots un kādas būs iekārtu izmaksas.

Turpretim, jaunāki bezvadu lokālā tīkla tehnoloģiskie risinājumi, tādi kā, piemēram, IEEE802.11n[3], var nodrošināt savietojamību ar iepriekšējiem standartiem, ir plaši pieejami un iekārtu izmaksas ir 10 -100 reizes zemākas nekā šūnu tīkliem. IEEE802.11g/n standartu sakaru risinājumi teorētiski nodrošina līdz 600Mbit/s augstu caurlaidspēju stacionāriem un lēni kustīgajiem lietotājiem, bet, neskatoties uz šo faktu, nav nekādu ierobežojumu šo standartu izpētīt autotransporta vidē.

Darba mērķis: izpētīt pasažieru datu piekļuves kvalitātes paaugstināšanas iespējas un to tīkla infrastruktūru; izpētīt maksimālas caurlaidspējas esamības autotransporta bezvadu lokālā tīklā. Lai šos promocijas darba mērķus sasniegtu, ir izvirzīti šādi uzdevumi:

- izanalizēt autotransporta tīklošanas attīstības tendences un to ietekmi uz ceļa satiksmi;
- izanalizēt lietotāju skaitu atkarībā no autotransporta dinamikas bezvadu lokālā tīkla darbības zonā;
- izpētīt esošus autotransporta kustības analītiskos modeļus, izvēloties piemērotu modeli mobila bezvada lokālā tīkla tālākai pētīšanai;
- izveidot bezvadu lokālā tīkla eksperimentālo testgultni autotransporta vidē;
- izpētīt bezvadu lokālā tīkla uzvedību reālajā laikā pie dažādiem lietotāju pārvietošanās ātrumiem;
- ar rindošanas teorijas iespējām izveidot autotransporta tīklošanas analītisku modeli, kurš tiek balstīts uz iepriekš iegūtiem tuvinātiem datiem no autotransporta kustības modeļa un bezvadu lokālā tīkla eksperimentālās izpētes;
- izanalizēt autotransporta tīklošanas datora imitācijas iespējas ar mērķi izmantot piemērotu imitācijas rīku bezvadu lokālā tīkla turpmākai pētīšanai;
- salīdzināt autotransporta bezvadu sakaru un integrēta analītiskā modeļa risinājumu rezultātus ar datora imitācijas analīzes rezultātiem.

Pētījuma **objekts** ir jaunāko tehnoloģiju bezvadu lokālā tīkla mijiedarbības procesi ar augsti mobiliem lietotājiem. Pētījuma **priekšmets** ir autotransporta kustības parametru dinamika, bezvadu lokālā tīkla veiktspēja, kā arī risinājumi zemu izmaksas un augstu caurlaidspējas autotransporta sakaru tīklu izveidošanai.

Pētījuma metodika

Pētījumā tika izmantotas četras metodes:

- Literatūras analīze: Nepieciešamā literatūra tika iegūta no IEEE, SCOPUS, Science Direct, ACM datu bāzēm, kā arī no citiem zinātniskiem informatīviem avotiem (zinātniskie žurnāli un grāmatas, konferenču un tiešsaistes materiāli) un apkopota tekstuāli un tabulās klasificējot apkopotos rezultātus;
- Praktiskie eksperimenti: Testgultnē (lidlaukā “Rumbula”) tika veikti bezvadu lokālā tīkla veiktspējas eksperimentālie mērījumi autotransporta vidē;
- Teorētiskie aprēķini: Balstoties uz praktisko mērījumu un autotransporta kustības analītisko rezultātu aproksimāciju, pielietojot rindošanas teoriju, tiek izveidots autotransporta sakaru risinājuma modelis;

- Simulācijas eksperimenti: Ar atbilstošu datoru imitācijas rīku palīdzību tiek izbūvēts autotransporta tīklošanas modelis, kuru rezultāti tiek salīdzināti ar teorētiskajiem aprēķiniem.

Rezultāti un zinātniskā novitāte

Bezvadu lokālā tīkla pētīšana atkarībā no autotransporta plūsmas parametriem ir plašs jēdziens, kas sevī var iekļaut vairākus izpētāmos objektus. Šajā darbā tika veikti vairāki eksperimentāli un analītiski pētījumi, lai pamatā novērtētu bezvadu lokālā tīkla veiktspēju autotransporta vidē. Darbā galvenie **zinātniskie jaunieguvumi** ir sekojoši:

- Pierādīts, ka izmantojot modernas tehnoloģijas un plaši pieejamas un zemu izmaksas iekārtas var izveidot autotransporta bezvadu lokālo tīklu, kurš dod iespēju ne tikai nodrošināt ceļas satiksmes drošību un efektivitāti, bet arī nodrošinot pasažieriem pieeju internetam, mobīlam ofisam un citiem servisiem, saglabājot augstus pakalpojuma kvalitātes parametrus;
- Izejot no eksperimentāliem datiem, analītiska modeļa un imitācijas rīka pielietošanas ir pierādīts fakts, ka eksistē bezvadu tīkla risinājums, kas ir sasaistīts ar autotransporta kustības dinamikas un bezvada lokālā tīkla veiktspējas parametriem;
- Ne tikai ar promocijas darbā veiktiem eksperimentiem un analītiskiem rezultātiem, bet arī no jaunākajām publikācijām ir pierādīts, ka autotransporta bezvadu lokālā tīklā eksistē svārstīgs trafiks ar austiem uzplaukumiem un kritumiem;
- Izejot no apjomīgas jaunākās publikācijas analīzes tika identificēts efektīvs programmnodrošinājums (t.i. Estinet). Uz tā bāzes tika izveidota autotransporta bezvadu lokālā tīkla imitators, kura rezultāti ir salīdzināti ar eksperimentāliem un analītiskiem rezultātiem;
- Ir izveidots imitācijas modelis, kurš var tikt izmantots tālākos pētījumos, nodrošinot nepieciešamos rezultātus par autotransporta kustību un bezvadu lokālā tīkla uzvedību saistībā ar augsti mobilo lietotāju apkalpošanu.

Tēzes

1. ka izmantojot komerciāli darbderīgu IEEE802.11g/n standarta lokālā tīkla aparatūru ar bezvadu sadalījuma sistēmu(WDS) autotransporta vidē (V2I) uzrāda pietiekošu veiktspēju, nodrošinot pasažieriem piekļuvi interneta resursiem;
2. ka vidē ar zemu signālu atstarošanu automobiļu kustībā radītā starp kanālu interference (ICI) IEEE802.11g/n standartā izmantotās modulācijas zvaigznāja kļūdu vektora lielums(EVM) nepārsniedz standarta noteiktās robežas;
3. ka starp autotransporta ātruma un IEEE802.11g/n standarta bezvadu lokālā tīkla parametru ir iegūtas saistošas izteiksmes ar nelineāru raksturu;

4. ka starp integrējamiem imitācijas rīkiem ar atgriezenisko saiti, kas spēj nodrošināt autotransporta mobilo sakaru tīklu simulāciju ar vienu notikumu secību, EstiNet dod iespēju ātrāk un precīzāk verificēt bezvadu lokālā tīkla uzvedību autotransporta vidē (V2I);
5. ka bezvadu lokālā tīkla lietotājam ir iespējams sasniegt caurlaidspējas maksimālo vērtību, ja autotransporta pārvietošanās ātrums ir diapazonā 70-100km/st, pierādot šo faktu matemātiskās modelēšanas un praktisko eksperimentu rezultātā.

Rezultātu praktiskais pielietojums

Atbilstoši izvirzītiem mērķiem darba praktiskā vērtība ir sekojoša:

- Izstrādāts autotransporta bezvadu lokālā tīkla analītiskais modelis;
- Izveidots autotransporta bezvadu lokālā tīkla imitators, kuru pamatā ir universāla datoru programma Estinet bezvadu lokālo tīkla projektēšanai un priekšizpētei;
- Izveidota metodoloģija, kura analītiskā veidā dod iespēju efektīvi un precīzi novērtēt bezvadu lokālā tīkla veiktspēju saistot to ar konkrētu vidi.

Darba aprobācija

Galvenie promocijas darba izpētes rezultāti tika atspoguļoti sekojošās zinātniskajās konferencēs:

1. RTU 50. studentu zinātniskās un tehniskās konference, Rīga, Latvija, 2009. g.;
2. Baltic Conference „Advanced Topics in Telecommunication”, Rostoka, Vācija - Tartu, Igaunija, 2009. g.;
3. The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University: Section "Electronics, Telecommunications and eSociety", Rīga, Latvija, 2011.g.;
4. The 15th International Conference ELECTRONICS 2011, Kauņa un Viļņa, Lietuva, 2011.g.;
5. The 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012), Tallina, Igaunija, 2012.g.;
6. The 2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC2012), Klaipēda, Lietuva, 2012.g.;
7. The 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC 2012), Viļņa, Lietuva, 2012.g.;
8. The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, Kauņa, Lietuva, 2012.g.;
9. The 16th International Conference ELECTRONICS 2012, Palanga, Lietuva, 2012.g.;
10. The 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Barselona, Spānija, 2013.g.;

11. The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering, Konja, Turcija, 2013.g.

Promocijas darbā veiktie pētījumi un to rezultāti tika izmantoti un atspoguļoti **zinātniski pētnieciskajos projektos**:

- 1) Valsts pētījuma programma: INFORMĀCIJAS TEHNOLOĢIJU ZINĀTNISKĀ BĀZE 5. projekts „Jaunas elektronisko sakaru tehnoloģijas”;
- 2) Valsts pētījuma programma: INOVATĪVU DAUDZFUNKCIONĀLU MATERIĀLU, SIGNĀLAPSTRĀDES UN INFORMĀTIKAS TEHNOLOĢIJU IZSTRĀDE KONKURĒTSPĒJĪGIEM ZINĀTŅU IETILPĪGIEM PRODUKTIEM (IMIS) Projekts Nr. 2 „Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas viedu un efektīvu elektronisko sistēmu radīšanai”.

Publikācijas

Promocijas darba veiktie rezultāti ir atspoguļoti 7 publikācija zinātniskajos žurnālos, 9 publikācijas pilna teksta konferenču krājumos un 3 publikācijas konferenču tēžu krājumos:

1. Jansons J., Ipatovs A., Pētersons E. Estimation of Doppler Shift for IEEE 802.11g Standard // Baltic Conference "Advanced Topics in Telecommunication". - Rostoka, Vācija: Rostokas Universitātes izdevniecība, 2009. - 73.-82. lpp.;
2. Jansons J. IEEE 802.11n Evaluation in Vehicular Communication Systems // Abstracts of the 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University: Section "Electronics, Telecommunications and eSociety", Latvija, Rīga, 13.-14. oktobris, 2011. – 26. lpp.;
3. Ipatovs A., Pētersons E., Jansons J. Model for Wireless Base Station Goodput Evaluation in Vehicular Communication Systems // Electronics and Electrical Engineering. Nr.5(111), : Technologija, 2011. - 19.-22. lpp.;
4. Bogdanovs N., Jansons J., Ipatovs A. Parameter Estimation for Model of Vehicular Network // 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvija, Rīga, 13.-14. oktobris, 2011. - 1.-26. lpp.;
5. Bogdanovs N., Ipatovs A., Jansons J. Research of a 2-layer Closed Vehicular Network // RTU zinātniskie raksti. 7. sēr., Telekomunikācijas un elektronika. - 11. sēj. (2011), 34.-40. lpp.;
6. Jansons J., Pētersons E., Bogdanovs N. A Measurement Study of WLAN Link Recovery Using WDS in a Vehicular Environment // Proceedings of the 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012), Igaunija, Tallina, 3.-5. oktobris, 2012. - 173.-174. lpp.;
7. Jansons J., Barancevs A., Pētersons E., Bogdanovs N. IEEE802.11a Standard Performance in Mobile Environment // International Journal on New Computer Architectures and Their Applications. - Vol.2, No.3. (2012) 497.-500. lpp.;
8. Jansons J., Doriņš T. Analyzing IEEE 802.11n Standard: Outdoor Performance // The Second International Conference on Digital Information Processing and Communications

- (ICDIPC2012): Proceedings, Lietuva, Klaipėda, 10.-12. jūlijs, 2012. - 26.-30. lpp.;
9. Jansons J., Doriņš T., Bogdanovs N. Analyzing the Basic Performance of IEEE802.11g/n // International Journal on New Computer Architectures and Their Applications. - Vol.2, No.3. (2012) 465.-470. lpp.;
 - 10 Jansons J. Goodput Analysis in Short Range Vehicle Network depends on Auto Traffic Parameters // The Second International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC2012): Proceedings, Lietuva, Klaipėda, 10.-12. jūlijs, 2012. - 22.-25. lpp.;
 - 11 Jansons J., Pētersons E., Bogdanovs N. IEEE802.11n Standard's Capability to Support Wireless Device in Vehicular Environment // Electrical and Control Technologies (ECT-2012): The 7th International Conference, Lietuva, Kauņa, 3.-4. maijs, 2012. - 44.-47. lpp.;
 - 12 Bogdanovs N., Pētersons E., Jansons J. Modeling Results of Vehicular Network for File Transfer // The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies, Lietuva, Kauņa, 3.-4. maijs, 2012. - 60.-63. lpp.;
 - 13 Jansons J., Barancevs A. Using Wireless Networking for Vehicular Environment: IEEE 802.11a Standard Performance // The Second International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC2012): Proceedings, Lietuva, Klaipėda, 10.-12. jūlijs, 2012. - 5.-9. lpp.;
 - 14 Jansons J., Pētersons E., Bogdanovs N. Vehicle-To-Infrastructure Communication Based on 802.11n Wireless Local Area Network Technology // The 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC 2012): IEEE Conference Proceedings: IEEE Xplore Digital Library, Lietuva, Viļņa, 25.-27. aprīlis, 2012. - 26.-31. lpp.;
 - 15 Jansons J., Bogdanovs N., Ipatovs A. Vehicle-to-Infrastructure Communication Based on IEEE 802.11g // International Journal of Digital Information and Wireless Communications. - Vol.2, No.1. (2012) 858.-862. lpp.;
 - 16 Jansons, J., Pētersons, E., Bogdanovs, N. Analyses and Evaluation of Wireless Local Area Network in Vehicular Mobility Scenarios. Electronics and Electrical Engineering, 2013, Vol.19, No.2, 97.-100.lpp.;
 - 17 Bogdanovs, N., Pētersons, E., Jansons, J. Two Layer Model for Performance Evolution of V2I Network. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, 2013, Vol.19, No.3, 98.-101. lpp.;
 - 18 Jansons J., Pētersons E., Bogdanovs N. WiFi for Vehicular Communication Systems // IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Spānija, Barselona, 25.-28. marts, 2013. - 425.-430. lpp.;
 - 19 Bogdanovs, N., Pētersons, E., Jansons, J. Simulation to Evaluate Performance of Two Layer Vehicular Networks. No: The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE2013), Turcija, Konja, 9.-11. maijs, 2013. Konya: Mevlana University, 2013, 548.-553.lpp.

Darba apjoms un struktūra

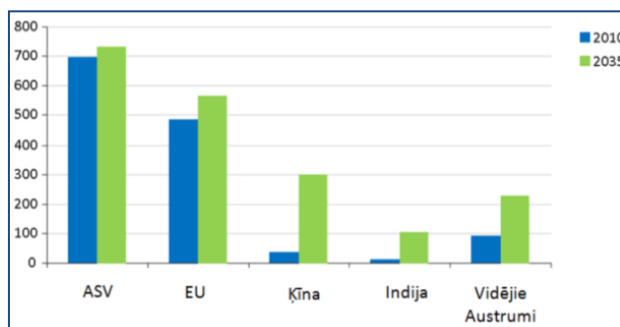
Promocijas darba apjoms ir 146 lappuses ar pielikumiem. Darbs sastāv no sešām nodaļām, kur pirmajā nodaļā ir ievads un sestajā nodaļā ir galvenie secinājumi, bibliogrāfija un deviņi pielikumi. Ievadā pamatota veikto pētījumu aktualitāte un noteikti promocijas darba pētījumu virzieni un uzdevumi.

Pirmā nodaļā tiek analizēta augošās autotransporta plūsmas problemātika, un intelektuālās transporta sistēmā sasniegumi un izaicinājumi, kā arī veikti pētījumi autotransporta tīklošanā izmantojot bezvadu lokālā tīkla standartus. Otrā nodaļā tiek analizēta autotransporta kustības parametri, lai analītiskajā ceļā iegūtu autotransporta vienību skaitu attiecībā pret pārvietošanās ātrumu. Trešajā nodaļā tiek apskatīti mobilo bezvadu tīklu risinājumi autotransporta tīklošanai, ar mērķi pamatot bezvadu lokālā tīkla priekšrocības attiecībā pret citiem mobilo sakaru risinājumiem. Ceturtajā nodaļā tiek aprakstīti eksperimentālie scenāriji, analītiskais modelis un to rezultāti bezvadu lokālā tīkla caurlaidspējas novērtēšanai atkarībā no autotransporta kustības parametra. Piektajā nodaļā tiek analizētas autotransporta tīklošanas datoru imitācijas iespējas un atspoguļoti simulācijas rezultāti. Sestajā nodaļā tiek apkopoti rezultāti un rekomendācijas turpmākiem izpētes uzdevumiem un novirzieniem, lai paplašinātu esošo pētījumu.

DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

Pirmā nodaļa

Autotransporta plūsma palielinās pastāvīgi, piemēram, no 2000. līdz 2008. gadam Eiropas valstīs piegums ir 7% un globāli tiek lēsts, ka līdz 2035. gadam automobiļu skaits pasaulē divkāršosies un sasniegs 1,7 miljardus vienību [7], kā ilustrēts 1.1. att. Iespējams, pieaugums veidojies, pateicoties degvielas cenām, ceļa infrastruktūras attīstībai un vājam vides aizsardzības nostājai.



1.1.att. Autotransporta skaits uz 1000 iedzīvotājiem[8]

Šāda attīstības tendence autotransporta vidē izpaužas ar autotransporta sastrēgumu un ceļu satiksmes negadījuma skaita pieaugumu, kā arī ar ceļā pavadītā laika, transportēšanas izmaksu un izmešu pieaugumu.

Autotransporta izmantošana ir ikdienas nepieciešamība, lai nokļūtu no dzīves vietas līdz darbvietai. Vidēji katrs ASV iedzīvotājs šādu vajadzību nodrošināšanai izlieto 48,6 minūtes, lai nokļūtu līdz darbam un atpakaļ [7]. Turpretim Kanādas statistika rāda ikdienā darba ņēmējs ceļā no/uz darbvietu vidēji patērē 63 minūtes [8], bet sastrēguma dēļ šajā pašā ceļā darba ņēmēji papildus pavada 18 dienas gadā [9].

Ik gadus visā pasaulē ceļu satiksmes negadījumos iet bojā liels iedzīvotāju skaits. Eiropas valstīs 2009. gadā tika reģistrēti 34 817 gadījumi ar letālajiem iznākumiem [10]. Savukārt ASV šajā pašā gadā no 5,5 miljonu ceļa satiksme negadījumiem 38 808 ir ar letālajiem iznākumiem [11].

Nākotnes autotransporta sistēma balstīsies ne tikai uz ceļa seguma konstrukciju un esošo infrastruktūru, bet arī būs lielā mērā atkarīga no vairākiem integrētiem tehnoloģijas jauninājumiem. Šāda pieeja dos iespēju izmantot esošo ceļa kapacitāti ar maksimālu noslodzi.

Jau kopš 1990. gada tiek attīstītas intelektuālās transporta sistēmas (ITS), kurām ir plašs konceptuāls risinājums un kas pēc savas būtības tiek aprakstītas kā sinerģiskais pielietoto tehnoloģiju un sistēmu inženierzinātnes koncepts ar globālu mērķi - attīstīt un uzlabot visa veida transportu sistēmas [13]. ITS ļauj autotransporta satiksmei būt prognozējamai, dinamiskai un elastīgai - tādai, kuru ir iespējams pielāgot esošiem apstākļiem. Līdzīgi kā gaisa satiksmes kontroles un vadības sistēmas, ITS autotransporta vidē tiks balstīta uz specifiskiem tīkla sensoriem, mikrokontroleriem un bezvadu mobiliem sakariem, kuru uzdevums būs centralizēti ievākt un apstrādāt informāciju autosatiksmes plūsmas kontrolei un vadībai, kā arī decentralizēti reaģējot uz pēkšņām izmaiņām autotransportu kustības dinamikā.

ITS galvenais mērķis autotransporta vidē ir, pielietojot sakaru un informācijas sistēmas, izveidot savstarpēju sadarbību starp transporta līdzekļiem, ceļa infrastruktūru un gājējiem, lai sasniegtu augstu drošības pakāpi, komforta un transportēšanas efektivitātes līmeni, rezultātā panākot ekoloģiskā, sociālā un ekonomiskā stāvokļa uzlabojumu.

Informācija par drošību uz ceļiem, satiksmes plūsmu, pārvietošanās ātrumu, nobraukumu, kā arī citu dienesta informāciju ir īsu ziņojumu formāta apjomā, kas nepārsniedz 160 rakstu zīmes. Šādas informācijas nosūtīšanai ir nepieciešami droši un stabili sakari, lai autotransporta vadītājs spētu pieņemt lēmumu 2-3 sekunžu laikā. Mobilo sakaru tehnoloģijas risinājumi, kuri ir izveidoti un kurus tiek plānots izveidot (t.i., WAVE), ir spējīgi nodrošināt šādu informācijas apmaiņu.

Pieaugot vajadzībām ceļot, autotransporta pasažieriem būs jāpavada vairāk laika autotransportā. Piekļuves nepieciešamība pie datu tīkliem pieaugs, jo pasažieriem būs vēlme lietderīgāk pavadīt transportēšanas laiku, izmantojot mobilo sakaru tīkla iespējas interneta un attālināto tīklu resursu piekļuvei. Tādā gadījumā pasažiera pieprasītais informācijas apmaiņas apjoms pārsniegs to, kas nepieciešams ceļa satiksmes drošības un efektivitātes uzlabošanai.

Lai nodrošinātu ITS piekļuvi interneta resursiem šādai informācijas apmaiņai mobilā vidē, kur ātrums var sasniegt līdz 120 km/st, ir nepieciešami mobilo sakaru risinājumi ar caurlaidspēju, kas

ir augstāka, nekā to spēj nodrošināt esošie mobilo sakaru risinājumi (t.i., GSM/UMTS, WiMax u.c.).

Bezvada lokālā tīkla pētīšana autotransporta vidē ir aktuāla kopš 2002.gada un tiek uzskatīta par jauno izaicinājumu zinātnei un industrijai visā pasaulē. Neskatoties uz to, ka šo problēmu jau apzinājās pirms vairākiem gadiem, izpēte turpinās, un tiek iegūti jauni teorētiskie un praktiskie rezultāti, kas tiek publicēti starptautiskajos žurnālos un elektroniskajās datu bāzēs. Autoru darbos[26],[31-36] ir atspoguļoti pētījumi par bezvadu tīkla veiktspēju ad-hoc režīmā ar diviem un vairākiem lietotājiem, bet bezvadu piekļuves punkta caurlaidspēja tiek pētīta ar vienu mobilu lietotāju vai ad-hoc režīmā ar diviem autotransporta līdzekļiem, kas nav pietiekoši, lai dotu pilnu priekšstatu par WLAN veiktspēju ar vairākiem mobilajiem lietotājiem.

Otrā nodaļa

Autotransporta mobilā bezvadu tīkla pētīšanā ir svarīgi apzināties lietotāju skaitu, kā arī to, ar kādu ātrumu lietotāji pārvietojas viena bezvadu sakaru tīkla mezgla darbības zonā.

Transporta satiksmes nozares pētījumu galvenie uzdevumi ir analizēt savstarpējās mijiedarbības starp autotransporta līdzekļiem, to vadītājiem un ceļa infrastruktūru. Automobiļu dinamika ir sarežģīts process, ko nosaka cilvēku uztvere un lēmuma pieņemšana dažādās situācijās uz ceļa.

Šajā nodaļā tiks izskatīti automobiļa dinamikas pamatprincipi un automobiļu kustības analītiskie modeļi, lai apzinātu svarīgus automobiļu kustības parametrus un identificētu modeli, kurš vistuvāk atspoguļo automobiļu kustību.

Automobiļa kustības dinamiku sāka analītiski aprakstīt kopš pagājušā gadsimta sākuma. Br. Greenshields[50] publicēja pirmos pētījumus, iepriekš veicot vairākus mērījumus ar fotografēšanas metodi, un noteica likumsakarības starp satiksmes plūsmu, blīvumu un ātrumu:

$$q = \rho \times v , \quad (2.1)$$

kur q – plūsma, autotransporta vienības/st;
 ρ – blīvums, autotransporta vienības/km;
 v – ātrums, km/st.

Greenshields atbilstoši sākotnējiem pieņēmumiem nonāca pie šādas lineāras ātruma un blīvuma attiecības:

$$v(\rho) = v_{max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{sa}}\right), \quad (2.2)$$

kur $v(\rho)$ – ātruma funkcija no blīvuma, km/st;
 v_{max} – maksimālais pieļaujamais ātrums, km/st;
 ρ – blīvums, vienības/km;
 ρ_{sa} – autotransporta blīvums sastrēgumā, vienības/km.

Balstoties uz minētajiem empīriskajiem rezultātiem, kā arī uz citiem jaunākiem atklājumiem [51], satiksmes plūsmu iedala trijos stāvokļos - brīvā, sinhronā un sastrēguma plūsma.

Sastrēguma plūsmas samazinoties līdz nullei, var nonākt līdz maksimāli pieļaujamam blīvumam (ρ_{max}) un tas ir atkarīgs no autotransporta garuma (l), atstarpes starp autotransporta līdzekļiem (s_0) un novērojamā ceļa posma garuma (d). Pie nosacījuma, ka atstarpes starp novērotiem automobiļiem ir vienādas un automobiļu izmēri ir vienādi, maksimālo automobiļu skaitu var izteikt šādi:

$$\rho_{max} = \frac{d}{(s_0+l)}, \quad (2.3)$$

kur d – novērotā ceļa posma garums, m;
 s_0 – atstarpe starp autotransporta līdzekļiem, m;
 l – autotransporta garums, m.

Nemot vērā blīvuma maksimālos un minimālos lielumus, Greenshielda ātruma un blīvuma attiecībās tika identificēti trūkumi - pie noteikta blīvuma maksimālo un minimālo ātrumu sasniegt nevar. Lai atrisinātu šo problēmu, Greenshielda izteiksme tika paplašināta ar vairākiem nosacījumiem un konstantēm, kā arī ar maksimālām un minimālām vērtībām:

$$v(\rho) = \begin{cases} v_{min}, & \text{jā } \rho < \rho_{min} \\ v_{min} + (v_{bri} - v_{min}) \left(1 - \left(\frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}}\right)^a\right)^b, & \text{jā } \rho \in [\rho_{min}, \rho_{max}] \\ v_{min}, & \text{jā } \rho > \rho_{max} \end{cases}, \quad (2.4)$$

kur v_{min} – minimālais ātrums, km/st;
 $v_{bri} = v_{max}$ – maksimāli pieļaujamais ātrums, km/st;
 ρ_{min} – minimālais blīvums, vienības/km;
 ρ_{max} – maksimālais blīvums, vienības/km;
 a, b – dažādu modeļu parametri.

Šī pamatideja tiek izmantota jaunākajos automobiļu kustības modeļos, lai atkarībā no automobiļu kustības parametriem modelētu automobiļu tuvu reālo kustību.

Kopš 1950. gada pētnieki sāka aprakstīt satiksmes plūsmas fizikālās izmaiņas, izmantojot makroskopiskos un mikroskopiskos modeļus. Vairāki empīriskie satiksmes plūsmas modeļi bija balstīti uz fundamentālām īpašībām un nebija pietiekoši detalizēti, lai autotransporta plūsmas fenomenu novērtētu pilnībā.

Tikai kopš 1990. gada zinātnisko atklājumu daudzums un nozīmīgums satiksmes modelēšanā pieauga, pateicoties analīzes rezultātiem, kuri sasniegti, balstoties uz kvalitatīvākiem autotransporta satiksmes datiem un augstu skaitļošanas jaudu. Šobrīd satiksmes plūsmas modeļi tiek plaši izmantoti satiksmes stāvokļa novērtēšanai, lai pamatoti paplašinātu ceļa tīkla struktūru, kā arī nodrošinātu ITS sistēmu attīstību, testēšanu un pilnveidošanu.

Lai novērtētu datu tīklu veiktspēju, ceļa satiksmes plūsmas dinamikas modelēšanā pārsvarā izmanto divus modeļus – makroskopisko un mikroskopisko. Papildus šim modeļu sadalījumam var minēt arī mezoskopiskos modeļus, kuri savā ziņā ir šo divu modeļu apvienojums. Šajā modelī

katrs individuāls autotransporta līdzeklis pārvietojas atbilstoši dinamikas likumiem, kurus nosaka makroskopiskie lielumi [53].

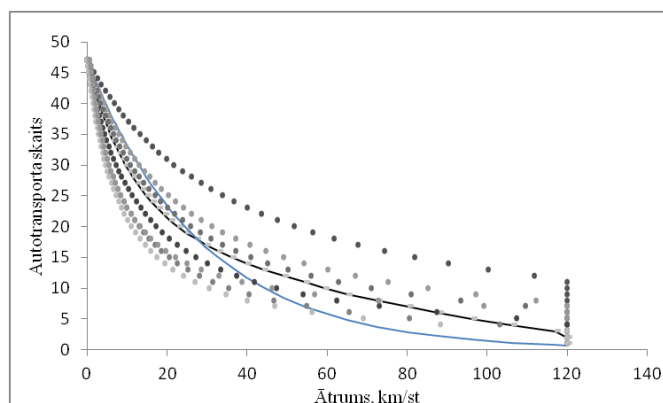
Turpretim Kraussa un IDM modeļu rezultāti atspoguļo automobiļu kustību, kura vairāk atbilst realitātei. Salīdzinot Kraussa modeli ar IDM modeli - Kraussa modelis kustību imitē ar daudz straujākām izmaiņām nekā IDM modelis.

Lai varētu novērtēt autotransportlīdzekļu skaitu atkarībā no to pārvietošanās ātruma, turpmāk tiek izmantota IDM autora darbā [64] pielietotā sakarība:

$$v(\rho) = \min[v_{des}, \frac{\rho_{max} - \rho}{T \rho_{max} \rho}], \quad (2.17)$$

kur v_{des} - autotransporta jaunais izvēlētais ātrums, km/st;
 T - drošs pārvietošanās laiks līdz priekšā braucošajam autotransportam, st;
 ρ_{max} - maksimālais autotransporta blīvums, vienības/km;
 ρ - novērotais autotransporta blīvums, vienības/km.

Pie nosacījuma, ka autotransporta jaunās izvēles ātrums ir konstants un tiek definēts kā maksimāli pieļaujama ($v = 120$ km/st), tad atkarībā no drošā pārvietošanās ātruma un novērotās autotransporta blīvuma izmaiņas 2.7. attēlā ar tumšu līniju ir atzīmēta vidējā lieluma izmaiņas līkne, pēc kuras tiek iegūta tuvināta sakarība starp ātrumu un automobiļu skaitu. Kā jau iepriekš tika minēts, autotransporta līdzeklim pārvietojoties ar augstāku ātrumu, ir tendence palielināt distanci līdz priekšā braucošajam automobilim. Turpretim ar zemāku ātrumu distance starp automobiļiem tiek samazināta. Drošs pārvietošanās laiks līdz priekšā braucošajam automobilim var būt intervālā $[0.6s < T < 3s]$. Īsāks laiks par 0.6 sekundēm vairākās Eiropas valstīs tiek uzskatīts kā ceļa satiksmes pārkāpums, bet 2-3 sekundes tiek rekomendētas.



2.7.att. Autotransporta skaits no pārvietošanās ātruma

Tuvinot IDM modeļa rezultātus, pie nosacījuma, ka distance $d=300$ metri un maksimālais pārvietošanās ātrums ir 120km/st, tika iegūta sekojoša sakarība starp autotransporta skaitu un pārvietošanās ātrumu:

$$N(v) \approx \rho_{max} \cdot e^{-0.0349v}, \quad (2.19)$$

kur $N(v)$ - autotransporta skaits atkarībā no pārvietošanās ātruma, vienības/ 300m;

ρ_{\max} – maksimālais autotransporta blīvums, vienības/300m.

Aprēķinot iegūtās izteiksmes lineārās ciešuma pakāpes mēru jeb korelācijas koeficientu (r) ar sekojošu izteiksmi:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.20)$$

kur x_i – x paraugkopas i -tās vērtības;
 y_i – y paraugkopas i -tās vērtības;
 n – x, y paraugkopas apjoms;
 \bar{x}, \bar{y} – x, y paraugkopas vidējais aritmētiskais.

Iegūto sakarību vidējā kvadrātiskā novirze jeb kļūda (δ) var būt izteikta sekojoši:

$$\delta = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (2.21)$$

kur r – korelācijas koeficients;
 n – paraugkopu skaits.

Iegūtās izteiksmes (2.19) vidējā kvadrātiskā kļūda ir $\delta = 0,00264$ un rezultātu var uzskatīt par ticamu (ar varbūtību 95%), jo korelācijas koeficients $r = 0,9914$ ir lielāks nekā korelācijas koeficienta kritiskā robeža ($|r| > r_{0,05;43}$), atbilstoši tabulas datiem [65].

300 metri distance netiek izvēlēta nejauši, bet tiek ņemta kā pamats, ko vidēji spēj apkalpot viens bezvadu lokālā tīkla piekļuves mezgls.

Šajā nodaļā ir izanalizēti un salīdzināti vairāki autotransporta satiksmes modeļi un izvēlēts piemērots modelis turpmākai analīzei. No IDM tuvinātiem rezultātiem tika iegūta viegli apstrādājama izteiksme, ar kuras palīdzību ir iespējams noteikt lietotāju skaitu novērotā ceļa posmā.

Trešā nodaļa

Šajā sadaļā tiek izskatīti mobilie bezvadu tīkli, kuri tiek un varētu tikt pielietoti autotransporta tīklošanā. Galvenā uzmanība tiek veltīta bezvadu mobilo tīklu tehnoloģijām, kuras tiek salīdzinātas ar bezvadu lokāliem tīkliem. Radīsies jautājums, kāpēc tieši bezvadu lokālie tīkli?

Viens no bezvadu pilsētīklu tehnoloģijas piemēriem ir IEEE 802.16 standarts jeb WiMax, kas ir platjoslas bezvadu sakaru sistēma ar pakešu komutācijas servisu stacionārajai, pārnēsājama un mobilai piekļuvei. WiMax bāzes stacija spēj nodrošināt līdz 50 kilometru pārklājumu un līdz 70 Mbit/s datu caurlaidspēju, bet tehnoloģijas trūkums ir to mezglu izmaksas un zems pielietojums, jo tā pagaidām vēl netiek integrēta plaši izmantotajās sakaru iekārtās, kā, piemēram, mobilajos telefonos, planšet datoros un portatīvajos datoros.

Līdzīgi kā WiMax, šūnu tīkli var nodrošināt mobilam lietotājam pastāvīgus sakaru savienojumus, turpretī bezvadu lokālie tīkli šobrīd tiek izmantoti īslaicīgajam savienojumam. Bet, salīdzinot izmaksas un tīkla caurlaidspēju, šūnu tīklu izbūve, uzturēšana un modernizācija prasa lielus ieguldījumus, kā arī šūnu tīkla abonētu datu pakalpojuma izmaksas ir augstākas nekā

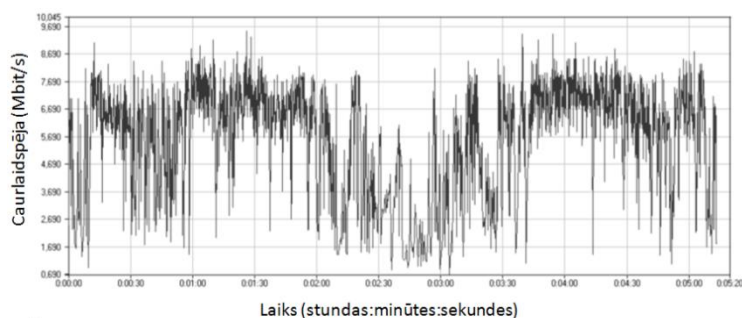
stacionāriem interneta pieslēgumiem. Viena GSM un UMTS bāzes stacijas pārklājuma zona ārpus pilsētas var sniegt līdz 15 km, ja antena izvietota vismaz 130 metrus augstumā. Šāds pārklājums nodrošina lielu lietotāju skaitu un līdz ar to samazina katram lietotājam pieejamos tīkla resursus. Jaunākās šūnu tīkla tehnoloģiju (4G) bāzes stacijas ir paredzēts izvietot tuvāk (vidēji 0.6 -1.4 km), lai nodrošinātu datu caurlaidspēju (līdz 150Mbit/s), bet praktiskie mērījumi uzrāda samērā zemu radītājus. Atbilstoši 3.1. tabulas datiem, ASV mobilo tīklu ar augstākiem vidējiem mērījuma rādītāji spēja nodrošināt tikai 6.44 Mbit/s. Līdzīgi rezultāti tika iegūti veicot mērījumus „Rumbulas” lidlaukā, kā ilustrēts 3.1. att., kur mobilais lietotājs var sasniegt 5.307 Mbit/s vidējo caurlaidspēju.

3.1. tabula

Mērījumu rezultāti 13 brīvi izvēlētajās ASV pilsētās [67]

Mobila tel. operadora nosaukums	Vidējais lejupielādes ātrums (Mbit/s)	Vidējais augšupielādes ātrums (Mbit/s)	Aizture (ms)
Verizon	6.44	5.00	128
T-Mobile	2.83	0.85	173
AT&T	2.48	1.05	169
Spring	2.15	0.61	214

Turpretim bezvadu lokālie tīkli (WLAN) darbojas lokāli un īsās distancēs (līdz 300 metriem), bet nodrošina augstu caurlaidspēju līdz 600 Mbit/s un spēj uzturēt vairākus simts aktīvus lēnus kustīgus un stacionārus lietotājus.



3.1. att. 4G tīkla veikspējas testa rezultāti

Nākotnē, ieviešot jebkādu jaunu sakaru sistēmu, vienmēr būs vairāki jautājumi, kuru risinājums būs nepieciešams, pieņemot svarīgus lēmumus. Ja sakaru sistēmai ir izteikta skaidra vajadzība un noteiktas prasības, viens no aktuālākajiem jautājumiem būs aptuvenās izmaksas, ieviešot un uzturot sistēmu. WLAN izmaksas ir zināmas un tās var uzzināt, apmeklējot tuvāko datora veikalu vai internetā, bet GSM/UMTS un WiMAX izmaksas pilnībā nav pieejamas. 3.2. tabulā ir apkopoti aprēķini, ņemot vērā GSM/UMTS un WiMAX aptuvenās izmaksas no vietējiem rakstiem un citu autoru darbiem[73-85].

3.2. tabula

GSM/UMTS, WiMAX un WLAN izmaksu salīdzinājums 1 km garam ceļa posmam

NOSAUKUMS	APTUVENĀS IZMAKSAS (LVL)		
	GSM/UMTS (1xBS)	WiMAX (1xBS)	WLAN (7xAP)
Bāzes staciju (BS) izvietojuma izbūve	40 000	NV	NV
BS mezgls/ AP	42 000	30 000	3 150
BS kontrolieris	3 500	NV	NV
Tīkla vadības sistēma (30%)	25 650	NV	NV
Frekvences licence	303 100	17 500	NV
Instalācijas izmaksas	5 550	1 600	1050
<i>Attīstības izmaksas kopumā</i>	416 300	49 100	4 200
Elektroenerģijas patēriņš gadā (<3%)	2 500	900	126
Ekspluatācijas darbi gadā (<5%)	5 000	1 500	210
Iekārtu izvietojuma īre gadā	2 000	1 420	315
<i>Uzturēšanas izmaksas kopumā</i>	9 500	3 820	651
<i>Kopējās izmaksas par gadu</i>	425 800	52 920	4 851
<i>Kopējās izmaksa procentuāli</i>	100%	12.4%	1.1%
<i>Teorētiskā caurlaidspēja(Mbit/s)</i>	Līdz 150	Līdz 128	Līdz 600

Lai izveidotu autotransporta mobilo sakaru bezvadu tīklu viena kilometra garajam ceļa posmam ar WLAN risinājumu un to viena gada garumā uzturētu, izmaksa būtu vismaz 90 reizes zemākas nekā GSM/UMTS un 11 reizes zemākas nekā WiMAX sakaru risinājumiem, bet WLAN tīkla caurlaidspēja pēc tehniskajiem datiem ir vismaz četras reizes augstāka nekā pārējām tehnoloģijām. Saskaņā ar analīzes datiem WLAN priekšrocības attiecībā pret citām plaši izmantotajām mobilo sakaru tehnoloģijām ir vērā ņemamas, lai šo mobilo sakaru tehnoloģiju izpēti autotransporta vidē.

Ceturtnā nodaļa

Bezvadu lokālā tīkla veiktspējas analīze autotransporta vidē ir komplekss pasākums. Realizēt praktiskus mērījumus šādā vidē ir sarežģīti, un tas prasa iesaistīt lielus resursus (t.i., testa laukums, autotransports, testētāji u.c.). Analizējot tīkla atsevišķas raksturīgās iezīmes, var iegūt tuvinātus rezultātus. Veicot mazizmēra praktiskos mērījumus, var sākotnēji secināt par bezvadu tīkla piemērotību autotransporta vidē un tuvinātos rezultātus var izmantot analītiskajos modeļos, novērtējot autotransporta bezvadu mobilā tīkla veiktspēju.

Autotransporta vide pēc iepriekšējās analīzes ir lielā mērā saistīta ar pārvietošanās ātrumu un autotransporta plūsmu, kas nosaka klientu skaitu un to atrašanās vietu vai pavadīto laiku viena bezvada tīkla piekļuves punkta darbības zonā. Mobilitāte ir viens no galvenajiem bezvadu tīklu caurlaidspējas samazinājuma iemesliem [31], [32], [38], kas izriet no radio sakaru kanāla noturības pret daudzstaru izplatību un Doplera efekta ietekmi, kā arī no bezvadu lokālā tīkla uzbūves (t.i., pārtvere, ātruma pielāgošanās metode, kanālu kapacitātes sadale starp lietotājiem).

Šajā daļā tiek novērtēta bezvadu piekļuves punkta veiktspēja atkarībā no autotransporta kustības parametriem, kas nosaka to mobilo terminālu skaitu bezvada piekļuves punkta darbības zonā. Bezvadu piekļuves punkta caurlaidspējas novērtēšanai tiek izmantoti reāli mērījumi no maza apjoma autotransporta kustības scenārija, lai tos integrētu lielapjoma autotransporta kustības scenārija analītiskajā modelī.

Eksperimentālie mērījumi tika veikti IEEE802.11g/n standarta WLAN, lai tālāk RTU TeTk laboratorijā varētu izanalizēt un novērtēt caurlaidspēju, datu pārraides ātruma pielāgošanās atkarībā no attāluma, Doplera efekta un, izmantojot bezvadu sadalījuma sistēmas (WDS) tehnoloģiju, pārtveres ietekmi. Atsevišķi tika veikti eksperimentālie mērījumi, lai noskaidrotu stacionāro lietotāju skaita ietekmi uz kopējo caurlaidspēju.

Testgultne:

„Rumbulas” lidlaukā tika veikti vairāki praktiski WLAN veiktspējas mērījumi autotransporta vidē ar vienu mobilo lietotāju. Kā ilustrēts 4.1. attēlā, lidlauka skrejceļš ir vismaz 1500 metrus garš un piemērots praktisko testu veikšanai, jo tas atrodas Rīgas teritorijas nomalē un tur ir zema izstarotāju aktivitāte WLAN diapazonā. Lidlauka skrejceļa sānu malas ir vismaz 150 metrus platumā, un tur neatrodas radio signāla atstarojoši elementi.

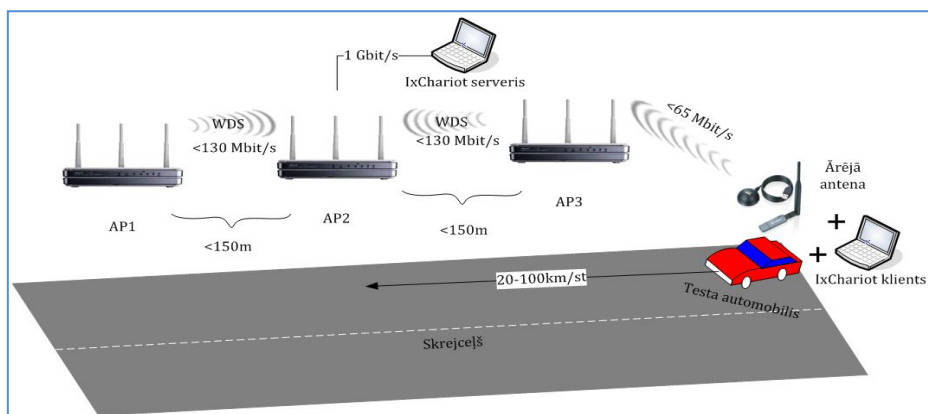


4.1.att. Testgultne „Rumbulas” lidlauka skrejceļš

Testēšanas iekārtas un rīki:

WLAN iekārtas tika izvēlētas, pamatojoties uz tehniskajiem parametriem un izmaksām, lai varētu veikt mērījumus saskaņā ar iepriekš sagatavotiem scenārijiem. Pārsvārā mērījumos tika izmantotas zemo izmaksu iekārtas (t.i., 20 Ls robežās) un bezmaksas pieejamā programmatūra, lai varētu veikt mērījumus un apkopot to rezultātus. Bezvadu WLAN tīkla pētīšanā tika izmantoti IEEE802.11b/g standarta piekļuves punkti Linksys (WRT54GL v.1.1) un IEEE802.11n standarta piekļuves punkti ASUS (RT-N16 v.1.0.0.6).

Pateicoties sadarbībai ar Rohde&Schwarz Denmark firmas pārstāvniecību Latvijā, bija iespēja izmantot augstas precizitātes WLAN signālu ģeneratoru un spektra un signālu analizatoru.



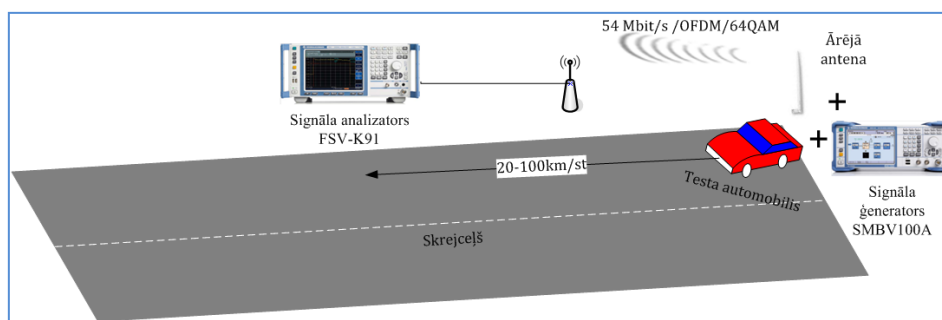
4.7. att. WLAN IEEE802.11n eksperimenta scenārijs

Mērījumu scenāriji:

Eksperimentāliem WLAN veikspējas mērījumiem tika iepriekš sagatavots scenārijs kā uzskatāmi ilustrēts 4.7. att., lai novērtētu WLAN caurlaidspēju pie dažādiem pārvietošanās ātrumiem. Testa automobilis sākotnēji tika novietots ārpus WLAN piekļuves punktu darbības zonām, lai automobilis, pirms ienāktu darbības zonā, jau būtu sasniedzis nostādīto pārvietošanās ātrumu.

Visi trīs WLAN piekļuves mezgli tika savā starpā savienoti ar bezvadu tīklu, izmantojot bezvadu sadales sistēmas (WDS) tehnoloģiju. Šī sistēma nodrošina starpsavienojumu, lai paplašinātu WLAN darbības rādiusu ar bezvadu tīkla risinājumu, un tajā pašā laikā nodrošina bezvadu savienojumu ar mobilo terminālu. Izmantojot šādas sistēmas, mobilās bezvadu ierīces var pārslēgties no viena WLAN piekļuves mezgla uz citu, nezaudējot savienojumu.

Turpretim Doplera efekta ietekmes mērījumus tika veikti, izmantojot signāla ģeneratoru SMVBV100A un signāla analizatoru FSV-K91, scenārijā kā ilustrēts 4.9. attēlā.



4.9. att. Doplera efekta ietekmes mērījumu scenārijs

4.10. att. atspoguļotais signālu ģenerators tika uzstādīts testa automobilī, un elektroapgāde tika nodrošināta ar nepārtrauktas barošanas iekārtu APC RS1000 VA. Signālu analizators tika izvietots nekustīgajā vidē skrejceļa malā un pievienots caur Back-UPS APC RS 500VA pie ģenerators HONDA EU INVERTER 20i maiņstrāvas elektropadevei.

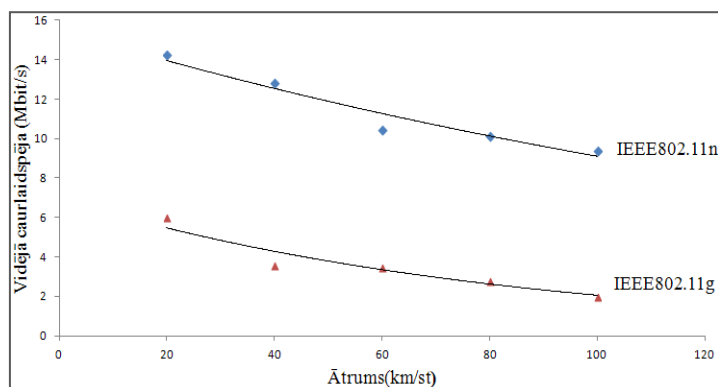


4.10. att. Eksperimentālo mērījuma iekārtas un to izvietojums mērījuma laikā

Signāla analizatora antena EUSSO UWA2610-ID piestiprināta pie trīskāju balsta un pievienota ar koaksiālo kabeli pie signāla analizatora. Uztverošās antenas augstums tika pielāgots attiecībā uz raidošās antenas augstumu, lai iegūtu maksimāli tiešu redzamību un izvairītos no signālu bloķēšanas. Mērīšanas metodika, kura tika izmantota eksperimentā, atbilst vispārīgi pieņemtiem testēšanas standartiem [90].

Rezultāti:

No diagrammas 4.11. attēlā un arī citu autoru secinājumiem [29], [31], [32], [38] izriet, ka, palielinoties pārvietošanas ātrumam, WLAN standarta tīkla vidējā aplikācijas līmeņa caurlaidspēja samazinās. IEEE802.11g standarta WLAN tīklam aplikācijas līmeņa caurlaidspējas kritums ātruma intervālā no 20 līdz 100 km/st ir vidēji 65%, bet izmantojot IEEE802.11n standartu aplikācijas līmeņa caurlaidspējas samazinājums ir vidēji 30%.



4.11.att. WLAN tehnoloģiju veikspējas salīdzinājums mobilā vidē

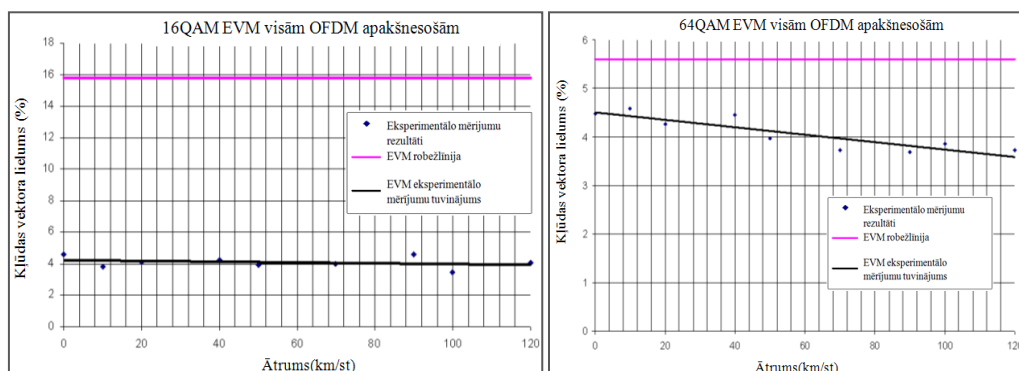
Tuvinot iegūtos rezultātus, starp WLAN vidējo caurlaidspēju un automobiļa kustības ātrumu var iegūt viegli apstrādājamu sakarību:

$$\mu_{IEEE802.11n} = 15,524e^{-0,005v}, \quad (4.1)$$

$$\mu_{IEEE802.11g} = 6,9881e^{-0,012v}, \quad (4.2)$$

kur abos gadījumos v – automobiļa kustības ātrums, km/st;
 μ - WLAN caurlaidspēja, Mbit/s.

Aprēķinot ar (2.20), iegūto rezultātu tuvinājuma izteiksmei ir cieša sakarība (t.i. $0.7 < |r| < 0.99$) un var uzskatīt par ticamu (ar varbūtību 95%), jo korelācijas koeficients $r=0,9317$ ir lielāks nekā korelācijas koeficienta kritiskā robeža [68] $r_{0,05;5}$.

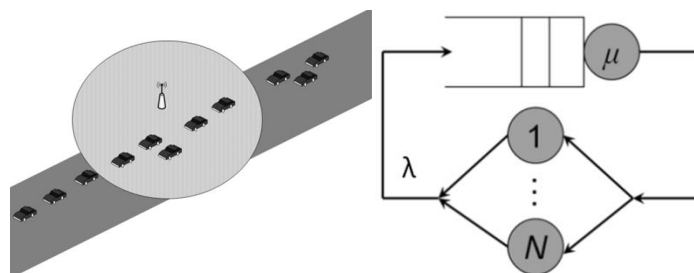


4.13.att. Doplera efekta ietekmes rezultāti 16 un 64 QAM modulācijai

Doplera efekta ietekmi uz WLAN ir vērojama, pārvietojoties ar ātrumu līdz 120 km/st un frekvences nobīde var palielināt zvaigznāja kļūdas vektora lielums, ar ko var pamatot caurlaidspējas kritumu. Kā atspoguļots 4.13.att. kļūdas vektora moduļa vērtība pie visiem pārvietošanās ātrumiem ir nemainīgā un vidēji tā ir 4% robežās. Šāda novirze ir nemainīga un nepārsniedz standarta noteikto EVM robežu.

Braucot ar ātrumu līdz 120 km/st, klasiskā Doplera nobīde ātrumiem vērā ņemamu ietekmi uz OFDM nerada [92] un šādu modulāciju var pielietot arī pie daudz lielākiem pārvietošanās ātrumiem, kā to apstiprina citu autoru eksperimentālie rezultāti [93]. Kā rezultātā var secināt, ka Doplera efekta ietekme uz WLAN veiktspēju ir minimāla.

Izmantojot tuvinātus praktiskus un teorētiskus rezultātus, tos integrējot rindošanas teorijas elementos, tika izveidots analītiskais modelis, kura pamatā ir M/M/1/N rinda. Šāda modeļa izmantošana bezvadu tīkla veiktspējas priekšizpētē, lai dotu pamata priekšstatu par WLAN caurlaidspējas izmaiņām autotransporta vidē, ir jauninājums akadēmiskajā vidē, jo tikai gadu iepriekš paralēli līdzīgu analizēs metodi atspoguļoja savā darbā Ķīnas Universitātes pētnieki [110].



4.22. att. Konceptuālais un analītiskais modelis

Lai salīdzinātu divus WLAN standartus, tika izmantoti caurlaidspējas eksperimentālie rezultāti (t.i., tuvinājumi (4.16) un (4.17)). Šajā analītiskajā modelī, kas atspoguļots 4.22. att., tiek pieņemts, ka ir sakaru sistēma ar vienu apkalpojošu bezvada mezglu jeb serveri, kuram ir bezgalīgi liela bufera atmiņas un tas spēj apkalpot ierobežotu lietotāju daudzumu $N(v)$, kuru skaits mainās atkarībā no autotransporta pārvietošanās ātruma (t.i., tuvinājums (2.19)). Izmantojot $M/M/1/N(v)$ rindas modeli, vidējo aplikācijas līmeņa caurlaidspēju katram individuālam mobilajam lietotājam var noteikt pēc vienādojuma:

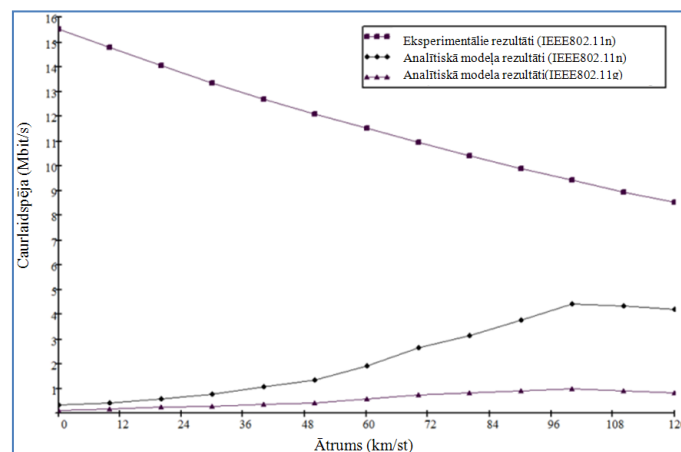
$$goodput(v)_N = goodput(v) \cdot (1 - p_0) / N(v), \quad (4.23)$$

kur p_0 ir varbūtība, ka sistēmā nav neviena apkalpojama mobilā lietotāja, un tā tiek izteikta sekojoši:

$$p_0 = \left[\sum_{j=0}^{N(v)} \frac{N(v)!}{(N(v)-j)!} \cdot \frac{\lambda^j}{\mu^j} \right]^{-1}, \quad (4.24)$$

kur nākamais skaitlis $j = 1, 2, 3, \dots, N(v)$;
 μ - bitu intensitāte, ar kādu notiek datu pārraide starp stacionāro bezvadu mezglu un atsevišķu mobilo terminālu;
 λ - ienākošo bitu intensitāte sistēmā.

Pie nosacījuma, ka katrs autotransporta līdzeklis ir aprīkots ar bezvadu mobilo sakaru mezglu, analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka pie zemākiem autotransporta pārvietošanās ātrumiem, stacionārajam piekļuves punktam ir jāapkalpo vairāki mobilie bezvadu mezgli nekā pie augstākiem pārvietošanās ātrumiem. Tas nozīmē, ka tīkla resursi tiek dalīti starp vairākiem lietotājiem, kas savukārt ietekmē katra individuāla lietotāja caurlaidspēju. Pieaugot pārvietošanās ātrumam līdz 50 km/st, caurlaidspējas raksturlīkne uzrāda, kā ilustrēts 4.23. attēlā, ka katram individuālajam mobilajam mezglam bitu plūsma ievērojami nepieaug. Šādas izmaiņas raksturlīknē ir saistītas ar to, ka, pieaugot pārvietošanās ātrumam, samazinās kopējā piekļuves punkta caurlaidspēja.

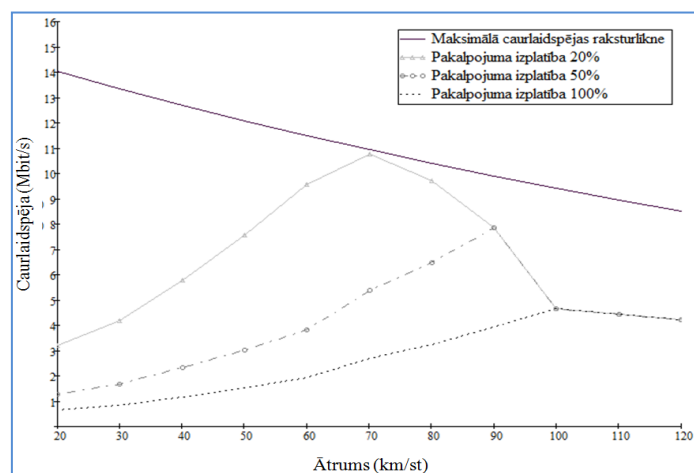


4.23. att. Mobilā termināla caurlaidspēja atkarībā no pārvietošanās ātruma

Pie turpmākā ātruma pieauguma sistēmā samazinās kopējais mobilo lietotāju skaits, rezultātā katram individuālajam mobilajam mezglam pie 100 km/st var sasniegt maksimālo caurlaidspēju. Pēc maksimālās vērtības sasniegšanas caurlaidspēja samazinās proporcionāli piekļuves punkta maksimālajam pieslēguma ātrumam.

Paplašinot izpēti, var pieļaut, ka būs situācijas, kad ne visi autotransporta līdzekļi būs aprīkoti ar bezvadu tīkla piekļuves risinājumiem, kā arī būs autotransports, kas neizmanto bezvadu piekļuves iespējas. Daļu no autotransporta, kura ir aprīkota ar bezvadu pieslēguma iespēju, var interpretēt kā pakalpojuma izplatības rādītāju p. Sakaru terminālu izplatības rādītājs ir termins, ko parasti lieto telekomunikāciju statistikā, lai aprakstītu aktīvo terminālu skaitu (parasti procentos) uz noteiktu iedzīvotāju skaitu. Šajā gadījumā iedzīvotāju skaits tiek aprakstīts kā kopējais autotransporta skaits, kas mainās atkarībā no pārvietošanās ātruma, viena bezvada piekļuves punkta darbības zonā.

Kā ilustrēts 4.24. att. grafikā, pie zemas pakalpojuma izplatības, t.i., ja 20% no visa autotransporta ir nodrošināts ar pieslēgumu pie lokālā tīkla vai lietotāji aktīvi neizmanto tīkla resursus, maksimālā caurlaidspēja var tik sasniegta ar pārvietošanās ātrumiem līdz 70 km/st.



4.24. att. Mobilā termināla caurlaidspēja atkarībā no pārvietošanās ātruma un pakalpojuma izplatību

Turpretim palielinot pakalpojuma izplatību un tas ir sasniedzis tādu līmeni, ka katrs otrais transporta līdzeklis jeb lietotājs izmanto tīkla resursus, var konstatēt, ka maksimālā caurlaidspēja samazinās ~1.5 reizi un to ir iespējams sasniegt, pārvietojoties ar ātrumu 90 km/st. Ar maksimālu pakalpojuma nodrošinājumu individuālā lietotāja WLAN pieslēguma caurlaidspēja pieaug proporcionāli pārvietošanās ātrumam un sasniedz maksimālu vērtību pie 100 km/st.

Piektā nodaļa

Simulācijas rīku izmantošana ir aktuāla autotransporta tīklošanas veiktspējas izpētē. Programmatūras risinājumi ir dažādi, un to pielietojums desmit gadu garumā gan industrijā, gan akadēmiskajā vidē var sniegt priekšstatu, kādu risinājumu izmantot, lai varētu iegūt vajadzīgos rezultātus. Kā rāda 5.1. tabulas dati, kas ir publicēti no 2004.-2013. gadam IEEE Xplore un ACM digitālajās bibliotēkās, imitācijas rīku pielietojamība autotransporta tīklošanā ir plaša, un imitācijas rīki tiek izmantoti, lai pārbaudītu analītiskos aprēķinus simulācijas vidē. Rezultātā akadēmiskajā vidē attiecīgie imitācijas rīki tiek pielietoti plašāk. 5.1. tabulas datu analīze rāda, ka tīkla simulācijas rīki (ns-2 un ns-3) visplašāk (t.i., 52% no izskatītajiem zinātniskajiem rakstiem) tiek pielietoti autotransporta tīklošanas izpētē, kas ir izskaidrojams ar to, ka imitācijas rīks ir pieejams bez maksas un akadēmiskā vide to aktīvi izmanto gan apmācības, gan izpētes procesos. Turpretim autotransporta tīklošanas izpētē dažu simulācijas rīku izmantošanas tendences vairāk balstās uz rīka izcelsmes reģionālo principu. OPNET tiek plaši pielietots ASV, bet NCTUns (Estinet) vairāk tiek izmantos Āzijas valstīs.

Autotransporta sakaru tīklu imitācijas rīkus var iedalīt divās klasēs - brīvi integrēti un cieši integrēti datora programmatūras risinājumi.

5.1. tabula

Autotransporta tīklošanas imitācijas rīku pielietojums zinātniskajos pētījumos

Nr. p.k.	Autotransporta tīklošanas izmantotā imitācijas rīka nosaukums	Publikāciju skaits IEEE Xplore digitālajā bibliotēkā	Publikāciju skaits ACM digitālajā bibliotēkā	Procenti no kopējā skaita	Pēdējās izmaiņas (gads)
1.	ns-2	51	139	42%	2013
2.	ns-3	20	27	10%	2013
3.	JiST/SWANS	7	28	8%	2005
4.	OMNeT++	10	23	7%	2013
5.	NCTUns	11	13	5%	2013
6.	VISSIM	2	21	5%	2013
7.	OPNET	7	15	5%	2013
8.	GloMoSim	2	14	4%	2000
9.	Veins	2	13	3%	2012
10.	GrooveNet	1	7	2%	2007
11.	citi (t.i. QualNet, Straw, SimITS, ASH, TraCI, TraNS)	9	29	8%	2005-2013

Brīvi integrētie imitācijas rīki lieto atsevišķus mobilos un sakaru tīklu imitācijas modeļus. Mobilitātes imitācijas modeļi ģenerē autotransportlīdzekļu kustību un ieraksta rezultātus atsevišķos failos. Savukārt, lai modelētu mobilo lietotāju kustību, sakaru tīklu imitācijas rīki izmanto iepriekš ģenerētos failus. Cieši integrēti imitācijas rīki nelieto atsevišķus failus, bet spēj apvienot abas imitācijas vienā autotransporta sakaru tīklu imitācijas modelī.

Jaudīgiem komerciāliem mikroskopiskas mobilitātes jeb satiksmes imitācijas rīkiem ir augstāka precizitāte, jo tos ir validējušas valsts organizācijas, un to priekšrocības, ka tie tiek plaši izmantoti transporta sistēmas plānošanā. Turpretim komerciālo rīku vislielākais trūkums ir tas, ka tie nav brīvi pieejami un to izpildījums nav pārāk orientēts uz autotransporta tīklošanas veiktspējas novērtēšanu. Nekomerčiālie rīki, ko izstrādā universitātes vai atsevišķas laboratorijas, ir daudz elastīgāki un dod iespēju lietotājiem izmantot visas atvērtā koda iespējas, samazinot vai palielinot kādu atsevišķu parametru vērtības un importēt rezultātus tādos sakaru tīklu imitācijas rīkos kā OPNET, QualNet, ns-2/3 vai OMNeT++.

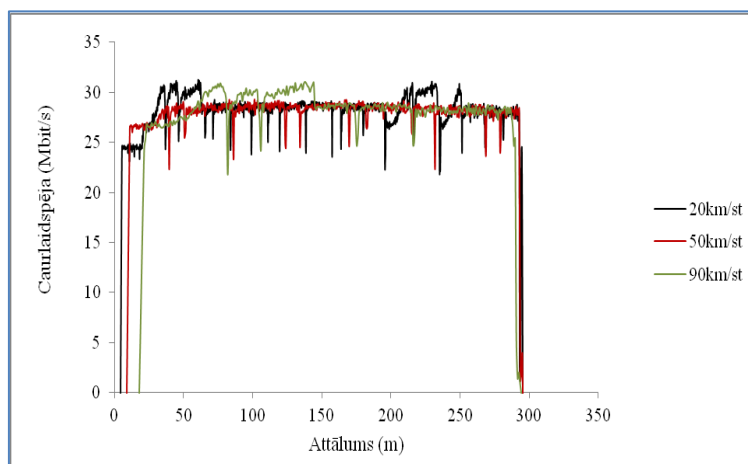
Sakaru imitācijas rīku pielietošana autotransporta tīklošanas izpētei, līdzīgi autotransporta kustības imitācijas rīku izmantošanai, ir lielā mērā atkarīga no to pieejamības jeb atklātā koda sistēmas. Daudzas universitātes ir uzkrājušas lielu pieredzi aktīvi uzmantojot ns sakaru tīkla imitācijas rīkus, lai studentiem dotu iespēju praktizēties. Šāda studējošo ievirze uzrāda augstu publicitāti un projektu skaitu ns vidē. Neskatoties uz to, ns un citi iepriekš minētie sakaru tīklu imitācijas rīki bez papildus modeļiem nespēj nodrošināt savietojamību ar autotransporta kustības imitācijas rīkiem. Turpretim, lai varētu nodrošināt divvirzienu informācijas apmaiņu un uzrādītu bezvadu lokālā tīkla imitāciju reālā autotransporta vidē, ir nepieciešami integrēti risinājumi, kas apvieno kustības un tīklu modeļus vienā imitācijas vidē.

Šobrīd nav izveidots standarts vai izteikti validēts imitācijas rīks, ar kuru varētu veikt autotransporta tīklošanas analīzi. Pavisam nesen ir izstrādāti cieši integrēti imitācijas rīki (Veins, Estinet (NCTUns), TraNS, iTetris u.c.), kas kombinē autotransporta kustības un sakaru tīkla komponentus vienā aplikācijā. Uzlabotie imitācijas rīki spēj nodrošināt divvirzienu komunikāciju starp autotransporta kustību un tīklu komponentiem, lai veidotu atgriezenisko saiti starp tīklu un autotransporta kustību.

Lielākajai daļai no atvērto kodu imitācijas rīkiem izmantošanā ir nepieciešamas specializētas zināšanas un pieredze, lai varētu vadīt un kontrolēt sastādīto simulāciju, iegūstot vajadzīgos rezultātus. Stabilitātes nodrošināšana simulācijas laikā ir atvērtā koda imitācijas rīku attīstības izaicinājums. Šādi trūkumu arī tika identificēti izmantojot atvērtā koda imitācijas rīku NCTUns 6.0, bet šo rīku komercializētajā versijā Estinet 7.0 šie trūkumi tika novērsti.

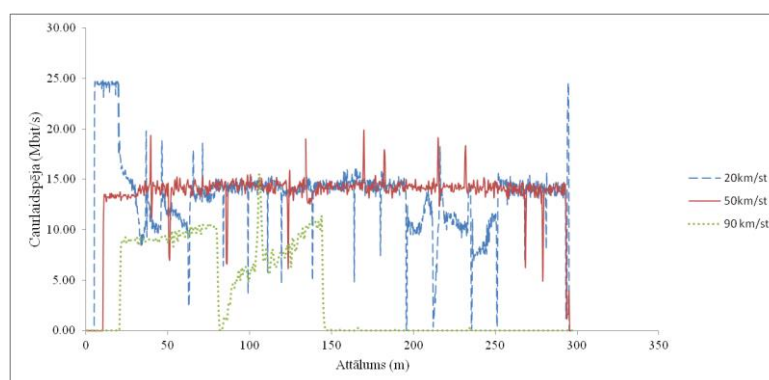
Apskatot pirmo gadījumu, kad automobiļi ar WLAN mobilajiem termināliem pārvietojas ar ātrumu no 20 līdz 90 km/st, maksimālais pieslēguma ātrums ir 54 Mbit/s. Eksperimentālie rezultāti uzrāda zemāku pārraides ātrumu (līdz 32Mbit/s), aplikācijas līmeņa caurlaidspēja nesasniedz maksimālo datu pārraides ātrumu un tā ir mainīga ar kāpumiem un kritumiem. Tas izskaidrojams ar to, ka lietderīgā informācija tiek iekapsulēta zemākā līmeņa protokolos, radot papildus virstēriņus. Uzplaukumi un kritumi ir saistīti ar signāla kvalitāti un uztvērēja spēju atjaunot bitu secību, kuras rezultātā, ja nepieciešams, tiek pieprasīts kļūdaino datu paketi pārsūtīt

atkārtoti. Pie augstākiem pārvietošanās ātrumiem WLAN slēguma izveidei ar mobilo terminālu ir nepieciešama garāka distance, kas atbilstoši ir saistīta ar pārvietošanās ātrumu un laiku (5.10. att.).



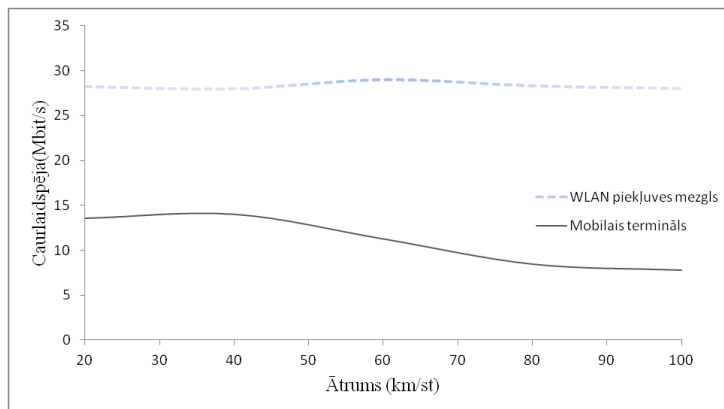
5.10. att. WLAN piekļuves punkta simulācijas modeļa rezultāts

Ar izmantoto imitācijas rīka palīdzību nav iespējas simulēt datu pārraides ātruma pielāgošanas metodes ietekmi uz WLAN caurlaidspēju, līdz ar to, mobilajam terminālam nonākot WLAN piekļuves punkta darbības zonā, uzreiz tiek nodrošināts maksimālais datu pārraides ātrums. Iepriekš minētās ieejas un izejas fāzes simulācijas modeļa uzrādītajos rezultātos nav īpaši izteiktas, kā tas tika identificēts eksperimentālajos mērījumos testgultnē.



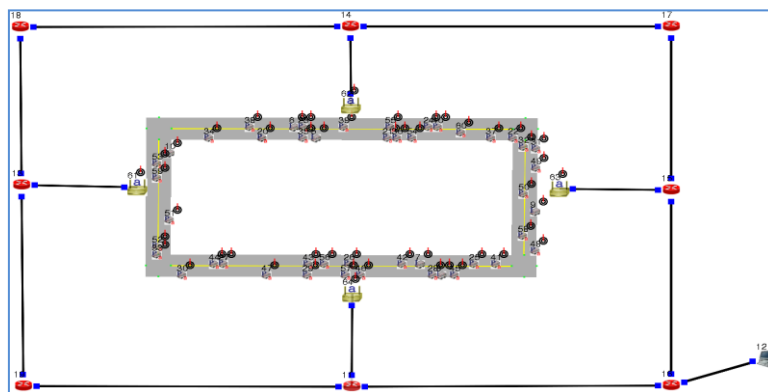
5.11. att. Zondes autotransporta WLAN simulācijas rezultāti pie dažādiem ātrumiem

Zondes autotransporta WLAN mobilā termināla caurlaidspējas raksturlīkne (5.11.att.) parāda, ka pie zemajiem ātrumiem trafiks ir svārstīgs, ir gan kāpumi, gan kritumi. Pārvietojoties ar ātrumu, kas ir raksturīgs pilsētas videi ar zemu autotransporta plūsmu, trafiks svārstības ir mazākas. Turpretim, palielinoties zondes autotransporta pārvietošanās ātrumam, WLAN mobilā termināla vidējā caurlaidspēja samazinās (5.12.att.).



5.12. att. Mobila bezvadu tīkla simulācijas rezultāti

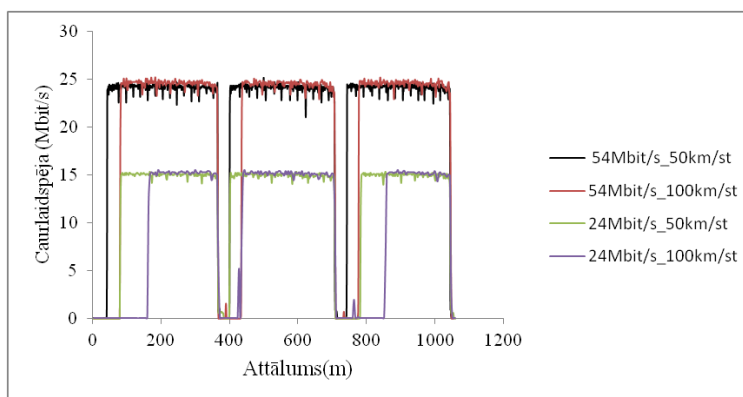
Ņemot vērā ceļa satiksmes drošības rekomendācijas [144], drošās pārvietošanās laiks līdz priekšā braucošajam autotransportam labos laika apstākļos sastāda vidēji 2 sekundes. Izejot no otrās nodaļas (2.19) vienādojuma, autotransporta vienību skaits ir mainīgs un atkarīgs no pārvietošanās ātruma. Šie parametri tika ņemti vērā, izveidojot tuvu reālajam autotransporta bezvadu lokālo tīklu. Kā ilustrēts 5.13. attēlā, imitācijas vidē tika izveidots simulācijas modelis ar izvērsta autotransporta bezvadu lokālā tīkla arhitektūru, lai analizētu atsevišķa tīkla segmentus. Pēc simulācijas rezultātiem var secināt, ka jebkuras izmaiņas - autotransporta pārvietošanās ātruma un datu pārraides ātruma maiņa - ietekmē bezvadu tīkla kopējo veiktspēju.



5.13. att. Izvērsts autotransporta mobilais bezvadu lokālais tīkla scenārijs

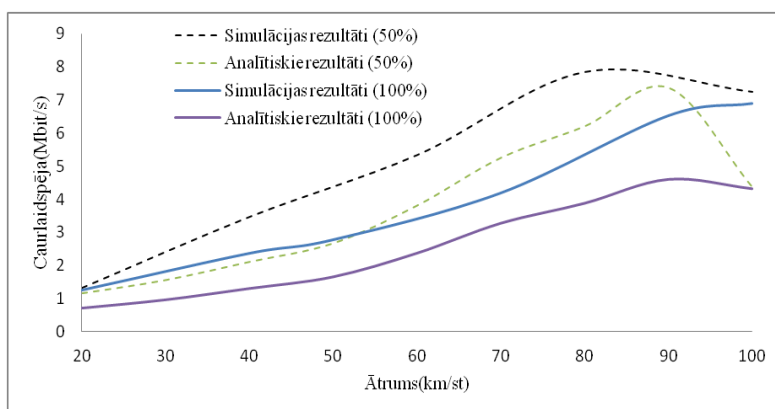
Situācijās, kad WLAN bezvadu tīkla transportlīdzeklis pārvietojoties pārslēdzas no viena piekļuves punkta uz otru jeb veic pārtveres procedūru, tīkla veiktspēja tiek traucēta. Rodas caurlaidspējas kritumi, kas ilgst vidēji 2-5 sekundes, kamēr tiek veikta autentifikācija ar cita tīkla segmentu.

Kā attēlots 5.14. att. bezvadu tīkla savienojuma simulācijas rezultāti tiek uzrādīti visos gadījumos neatkarīgi no pieļaujamā pārvietošanās ātruma izmaiņas (50 vai 100 km/st) un pieslēguma datu pārraides ātruma izmaiņas (24-54 Mbit/s).



5.14. att. Četru simulācijas scenāriju rezultāti

Turpretim praktiskajos mērījumos, kuri tika atspoguļoti ceturtajā nodaļā, caurlaidspējas raksturlīknes kritums bija atkarīgs no pārvietošanās ātruma, pārtveres procesa posmā caurlaidspējas līkne ir daudz lēzenāka un savienojums netiek pārtraukts. Bezvadu sadalījuma sistēmu(WDS) ar izvēlēto imitācijas rīku modelēt pilnībā nav iespējams. Turpretim, izmantojot imitācijas rīka mobilā IP protokola iestatījumus, ir izveidots modelis, ar kura palīdzību var turpināt sesiju, neiniciējot atkārtotu datu nosūtīšanu adresātam.



5.18. att. Analītisko un simulācijas rezultātu salīdzinājums

Salīdzinot simulācijas rezultātus ar šī darba ceturtais nodaļas teorētiskajiem rezultātiem, ir novērojams, ka WLAN caurlaidspējas raksturlīknes izmaiņas ir līdzīgas. Katra individuālā mobilā terminālā caurlaidspēja ir mainīga atkarībā no ātruma. Kā tika aprakstīts iepriekšējās nodaļās, caurlaidspēja katram individuālam lietotājam ir lielā mērā atkarīga no citu lietotāju esamības tīklā un to aktivitātēm. Šajā sakarā simulācijā katrs individuālais lietotājs vai mobilā termināla aktivitāte, kura tika iestatīta, ir izveidota tā, lai TCP ģenerētais trafiks spētu maksimāli noslogot WLAN kanālu jeb nodrošināt piesātinātu caurlaidspēju.

Pie šādiem nosacījumiem tuvu reālajam scenārijam, pieaugot autotransporta ātrumam, pieaug katra lietotāja caurlaidspēja, kas ir pretēji scenārijam, kad WLAN piekļuves punkts nodrošina datu apmaiņu vienam vai šajā gadījumā trijiem mobilajiem bezvadu lokālā tīkla mezgliem. Turpretim

mainot servisa izplatību scenārijā, kad autotransporta vienību skaits mainās atkarībā no maksimāli pieļaujamā vai vēlamā ātruma, un tikai katrs otrais autotransporta līdzeklis ir aprīkots ar WLAN mobilo terminālu, ir vērojamas caurlaidspējas izmaiņas. Kā attēlots 5.18. att., var identificēt, ka simulācijas scenārijā ar servisa izplatības koeficientu $p=0.5$ ir vērojams katra individuālā mobilā mezgla caurlaidspējas pieaugums. Šis pieaugums ir iepriekš teorētiskajā daļā izanalizētais pieņēmums, ka pie noteiktā pārvietošanās ātruma ir iespējams panākt maksimālo caurlaidspēju. Šis kāpums ir vērojams ātruma intervālā no 50 līdz 80 km/st, sasniedzot maksimālo vērtību pie 80 km/st, kas ir tuvs iepriekš veiktās teorētiskās analīzes rezultātiem, kur maksimālā caurlaidspēja pie līdzīgiem servisa izplatības rādītājiem ir 90 km/st. Pieaugot servisa izplatības rādītājam līdz 100%, caurlaidspējas kāpums saglabājas līdz 100 km/st nesasniedzot vidējo maksimālo vērtību.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Bezvadu lokālā tīkla pētīšana atkarībā no autotransporta kustības parametriem ir plašs jēdziens, kas sevī var iekļaut vairākus izpētāmos objektus. Šajā darbā tika veikti vairāki eksperimentāli un analītiski pētījumi, lai pamatā novērtētu bezvadu lokālā tīkla veikspēju autotransporta vidē un darbā galvenie secinājumi ir sekojoši:

- Autotransporta tīklošanas attīstības tendences un to ietekmi uz ceļa satiksmi analīze ļāva identificēt autotransporta augošās plūsmas sekas, kā arī intelektuālās transporta sistēmas attīstību un to nozīmi, lai nākotnē samazinātu autotransporta izmantošanas problēmas, pielietojot bezvadu mobilo tīkla risinājumus;
- Izmantojot modernas tehnoloģijas un plaši pieejamas un zemu izmaksas iekārtas var izveidot autotransporta bezvadu lokālo tīklu, kurš dod iespēju ne tikai nodrošināt ceļas satiksmes drošību un efektivitāti, bet arī pasažieriem pieeju internetam, mobilam ofisam un citiem servisiem saglabājot augstus pakalpojuma kvalitātes parametrus;
- Analizējot lietotāju skaitu un to dinamiku novērotā ceļa posmā, pielietojot autotransporta kustības dinamikas pamatprincipus un to analītiskos modeļus, tika apzināts, ka ne visi pielietotie modeļi spēj atspoguļot reālu autotransporta kustību, kā arī autotransporta pārvietošanās ātrums ir viens no galvenajiem parametriem, kas raksturo autotransporta blīvumu;
- Eksperimentāli veicot praktiskus bezvadu lokālā tīkla veikspējas mērījumus autotransporta vidē ar vienu mobilo lietotāju, tika izpētīta bezvadu lokālā tīkla uzvedība reālā laikā pie dažādiem mobilo lietotāja pārvietošanās ātrumiem, secinot, ka bezvadu lokālie tīkla caurlaidspēja ir atkarīga no lietotāja pārvietošanās ātruma, un šo lielumu raksturs ir nelineārs, kā arī tika secināts, ka Doplera efekta ietekme uz WLAN veikspēju ir minimāla;
- Analizējot autotransporta bezvadu tīklošanas datora imitācijas iespējas tika apzināts, ka ne visi atvērtā koda imitācijas rīki spēj nodrošināt informācijas apmaiņu starp autotransporta kustības

un tīkla imitācijas modeļiem, šo rīku sazarota attīstība uzrāda augstu publicitāti, turpretim tikai daži risinājumu nodrošina pilnībā integrētu imitācijas vidi, dodot iespēju detalizētāk analizēt autotransporta mobilā bezvadu lokālā tīkla veiktspēju;

- Izejot no apjomīgas jaunākās publikācijas analīzes tika identificēts efektīvs programmnodrošinājums (t.i. Estinet). Uz tā bāzes tika izveidota autotransporta bezvadu lokālā tīkla imitators, kura rezultāti ir salīdzināti ar eksperimentāliem un analītiskiem rezultātiem;
- Ir izveidots imitācijas modelis, kurš var tikt izmantots tālākos pētījumos, verificējot autotransporta bezvadu lokālā tīkla veiktspējas raksturojošos parametrus;
- Izejot no eksperimentāliem, analītiskā modeļa un imitācijas rīka rezultātiem ir pierādīts fakts, ka eksistē tīkla risinājums, kas ir saistīts ar autotransporta kustību un bezvada lokālā tīkla veiktspējas parametriem, nodrošinot maksimālu caurlaidspēju.

Atbilstoši izvirzītiem mērķiem darba praktiskā vērtība ir sekojoša:

- Izstrādāts autotransporta bezvadu lokālā tīkla analītiskais modelis;
- Izveidots autotransporta bezvadu lokālā tīkla imitators, kuru pamatā ir universāla datoru programma Estinet bezvadu lokālo tīkla projektēšanai;
- Izveidota metodoloģija, kura analītiskā veidā dod iespēju efektīvi un precīzi novērtēt bezvadu lokālā tīkla veiktspēju saistot to ar konkrētu vidi.

Pētījuma rezultātā tika identificēti šādi neatrisināti uzdevumi autotransporta mobilā bezvadu tīkla veiktspējas analīze atkarībā no autotransporta plūsmas parametriem:

- Eksperimentāli neizdevās novērtēt WLAN IEEE802.11n veiktspēju autotransporta vidē ar maksimālo datu pārraides ātrumu;
- Eksperimentāli un analītiski netika ņemta vērā mobilā lietotāju izvietojuma un ģenerētā trafika ietekme uz WLAN veiktspēju;
- Atbilstoši Estinet 7.0 licences noteikumiem, iegūtos imitācijas rezultātus nav atļauts salīdzināt ar imitācijas rīku iegūtajiem rezultātiem (t.i., SUMO-Veins-OMNET++-, SUMO-TraNs-ns2, SUMO-iCIS-ns3 u.c.);
- Lai samazinātu WLAN veiktspējas ietekmējošus faktorus, līdz minimumam tika samazināta iekārtu darbības sinhronizācijas procedūra, atslēdzot automātiskās adresācijas un drošības pasākumus.

BIBLIOGRĀFIJA (norādītas visas atsauces, kuras izmantotas pamatdarbā)

1. **Eiropas Komisija.** DIRECTIVE 2010/40/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 7 July 2010. [direktīva] Luksemburga : Eiropas Savienība, 2010. gada.
2. **IEEE.** Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments. New York : The

- Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. gada 15. jūlijs. ISBN 978-0-7381-6324-6.
3. —. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. gada 11. septembris. ISBN: 978-0-7381-6046-7.
 4. **Eiropas Komisija**. Baltā grāmata: Ceļvedis uz Eiropas vienoto transporta telpu — virzība uz konkurētspējīgu un resursefektīvu transporta sistēmu. Brisele : Eiropas Komisija, 2011. COM(2011) 144 galīgā redakcija.
 5. —. Eiropas Komisijas 2001. gadā publicētās Transporta baltās grāmatas vidusposma pārskats. Brisele : EU, 2006.gada 22. jūnijs. COM(2006) 314 galīgā redakcija.
 6. —. EU transport in figures. Luxemburg : Publication office of the European Union, 2011. ISBN: 978-92-79-19508-2.
 7. —. Impact assessment. Brisele : EU, 2011. SEC(2011) 358 final.
 8. **IEA**. International Energy Agency. International Energy Agency web site. [Tiešsaiste] 2011. gada 9. novembris. [Citēts: 2012. gada 16. novembris.] http://www.iea.org/media/weoweb/2011/WEO2011_Press_Launch_London.pdf.
 9. **Coyne A.** Macleans.ca. [Tiešsaiste] 2011. gada 11. janvāris. [Citēts: 2011. gada 01. novembris.] <http://www2.macleans.ca/2011/01/11/stuck-in-traffic/>.
 10. **Schrank D., Lomax T., Eisele B.** TTI's 2011 Urban Mobility Report. Texas : Texas Transportation Institute, 2011. lpp. 51. <http://mobility.tamu.edu>.
 11. **Ezell S.** Explaining International IT Application Leadership: Intelligent Transportation System. Washington : The Information Technology & Innovation Foundation (ITIF), 2010. <http://www.itif.org>.
 12. **Staley S., Moore A.** Mobility First: A New Vision for Transportation in a Globally Competitive Twenty-first Century. bez viet. : Rowman & Littlefield Publishers, 2008. ISBN-10: 0742558797.
 13. **Eiropas ceļu satiksmes negadījuma datu bāze (CARE)**. Road safety evolution in EU. Brisele : CARE, 2011. gada.
 14. **Nacionālā automaģistrāles satiksmes drošības administrācija (NHTSA)**. Fatality Analysis Reporting System data table. [INTERNET datu bāze] ASV : NHTSA, 2011. gada.
 15. **Eiropas Komisijas paziņojums**. Ceļvedis virzībai uz konkurētspējīgu ekonomiku ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni 2050. gadā. Brisele : Eiropas Komisija, 2011. COM(2011) 112.
 16. **IEEE**. ITS. [Tiešsaiste] 2011. gada. <http://ewh.iee.org/tc/its/>.
 17. **RITA**. Intelligent Transportation Systems Joint Progm Office. Research planning. [Tiešsaiste] RITA U.S. Department of Transportation, 2011. gada 16. jūlijs. [Citēts: 2011. gada 01. augusts.] http://www.its.dot.gov/research_planning.htm.
 18. **ERTOCO**. CVIS. About Cooperative System. [Tiešsaiste] [Citēts: 2011. gada 28. novembris.] <http://www.cvisproject.org>.
 19. **University of Stuttgart**. SAFESPOT. [Tiešsaiste] [Citēts: 2011. gada 29. novembris.] <http://www.safespot-eu.org>.
 20. **Austria Tech**. COOPER project. [Tiešsaiste] [Citēts: 2011. gada 12. decembris.] <http://www.coopers-ip.eu>.
 21. **Eiropas Komisija**. Transport Research Knowledge Center. Transport Research Knowledge Center mājas lapa. [Tiešsaiste] [Citēts: 2010. gada 12. decembris.] <http://www.transport-research.info>.

22. **Schulze M.** DRIVE C2X. Publications. [Tiešsaiste] 2011. gada 20. oktobris. [Citēts: 2011. gada 11. novembris.] <http://www.driver-c2x.eu>.
23. **Cacheiro E., Iturriaga J.L.P., Garcia - Linares F.** FOTsis Consortium. FOTsis. [Tiešsaiste] 2011. gada 30. 04. [Citēts: 2011. gada 21. 05.] <http://www.fotsis.com>.
24. ITS MODEL DEPLOYMENT INITIATIVES FOR TRANSITIONAL COUNTRIES. **Sanghoon B., Hwnag I-S.** Tokyo : Association for Planning Transportation Studies, 2005. ISSN: 1881-1124.
25. **Mission information technology.** Mission group. News. [Tiešsaiste] MissionGroup, 2011. gada 17. maijs. [Citēts: 2012. gada 05. augusts.] <http://www.missiongroup.com.cn/english/detail.asp?id=4>.
26. **Vehicle Information and Communication System Center.** VICS. [Tiešsaiste] 1995. gada jūlijs. [Citēts: 2010. gada 23. novembris.] <http://www.vics.or.jp>.
27. **Japan Highway Industry Development Organization.** Introduction to VICS.
28. **Nacionālais Zemes un Infrastruktūras vadības institūts (NILIM).** Nationwide Deployment of ITS Spot Service. Tsukuba : NILIM, 2011. No.36.
29. Wireless LAN Performance Under Varied Stress Conditions in Vehicular Traffic Scenarios. **Singh J.P., Bambos N., Srinivasan B., Clawin D.** Birmingham : IEEE, 2002. Sēj. 2. ISBN: 0-7803-7467-3.
30. Performance Anomaly of 802.11b. **Heusse M., Rousseau F., Berger-Sabbatel G., Duda A.** San Francisco : IEEE Digital Library, 2003. ISBN: 0-7803-7752-4.
31. Drive-thru Internet: IEEE 802.11b for “Automobile” Users. **Ott J., Kutscher D.** Hong Kong : INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2004. ISBN: 0-7803-8355-9.
32. Measurements of In-Motion 802.11 Networking. **Gass R., Scott J., Diot C.** Orcas Island : IEEE Digital library, 2006. ISBN: 0-7695-2439-7.
33. A Measurement Study of Vehicular Internet Access Using In Situ WiFi. **Bychkovsky V., Hull B., Miu A., Balakrishnan H., Madden S.** Los Angeles : ACM MobiCom, 2006. ISBN: 1-59593-286-0.
34. Vehicular Opportunistic Communication Under the Microscope. **Hadaller D. Keshav S., Brecht T., Agarwal S.** San Juan : ACM MobiSys, 2007. ISBN: 978-1-59593-614-1.
35. **Bella L., Pangalos P., Frederikos V.** Femtocell versus wifi: a quantitative and qualitative experimental performance analysis. Barselona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
36. Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication. **Wewetzer C., Caliskan M., Meier K., Luebke A.** Sophia Antipolis : IEEE, 2007. ISBN: 1-4244-1178-5.
37. Performance Evaluation of IEEE 802.11-based WLANs in Vehicular Scenarios. **Wellens M., Westphal B., Mahonen P.** Dublin : IEEE, 2007. ISBN: 1-4244-0266-2.
38. Measuring the Capacity of in-car to in-car vehicular networks. **Rubinstein M. G., Ben Abdesslem F., De Amorim M.D., Cavalcanti S.R., Dos Santos Alves R., Costa, L.H.M.K., Duarte, O.C.M.B. un Campista, M.E.M.** 11, Piscataway : IEEE Communication Magazine, 2009. gada, Sēj. 47. ISSN: 0163-6804.
39. Performance evaluation of IEEE 802.11n devices for vehicular networks. **Yoshimura K., Aust S., Ito T., Kondo Y.** Zurich : 3rd IEEE LCN Workshop on User MObility and Vehicular Networks (ON-MOVE 2009), 2009. ISBN: 978-1-4244-4488-5.
40. Cabernet: Vehicular Content Delivery Using WiFi. **Eriksson J., Balakrishnan H., Madden S.** San Francisco : ACM, 2008. ISBN: 978-1-60558-096-8.

41. Modulation Rate Adaptation in Urban and Vehicular Environments: Cross-layer Implementation and Experimental Evaluation. **Camp J., Knightly E.** San Francisco : ACM, 2008. ISBN: 978-1-60558-096-8.
42. RAM: Rate Adaptation in Mobile Environments. **Chen X., Gangwal P., Qiao D.** 3, Los Alamitos : IEEE Computer Society, 2012. gada, Sēj. 11. ISSN: 1536-1233.
43. Fair time sharing protocol: a solution for IEEE802.11b hot spot. **Munaretto M., Fonseca M., Agha K., Pujolle G.** Fortaleze : Springer Berlin Heidelberg, 2004. ISBN: 978-3-540-22571-3.
44. Eliminating the performance anomaly of 802.11b. **Yoo S., Choi J-H., Hwang J-H., Yoo C.** Reunion Island : Springer Berlin Heidelberg, 2005. ISSN: 0302-9743.
45. Mv-max: Improving wireless infrastructure access for multi-vehicular communication. **Hadaller D., Keshav S., Brecht T.** New York : ACM, 2006. ISBN: 1-5959-572-X.
46. On cooperative and opportunistic channel access for vehicle to roadside (V2R) communication. **Jhang M-F., Wanjiun L.** Taipei : IEEE Globecom 2008, 2008. ISBN: 978-1-4244-2324-8.
47. A lifetime-based routing protocol for connecting VANETs to the Internet. **Barghi S., Benslimane A., Assi C.** Kos : WoWMoM 2009, 2009. ISBN: 978-1-4244-4440-3.
48. Impact of Human Mobility on the Design of Opportunistic Forwarding Algorithms. **Chaintreau A., Hui P., Crowcroft J., Diot C., Gass R., Scott J.** Barcelona : INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications., 2006. ISBN: 1-4244-0221-2.
49. Density-Aware Routing in Highly Dynamic DTNs: The RollerNet Case. **Tournoux P.-U., Leguay J., Benbadis F., Whitbeck J., Conan V., de Amorim M.D.** 12, bez viet. : IEEE Transactions on Mobile Computing., 2011. gada, Sēj. 10. ISSN: 1536-1233.
50. A Disconnection-Tolerant Transport for Drive-thru Internet Environments. **Ott J., Kutscher D.** Miami : IEEE INFOCOM 2005, 2005. ISBN: 0-7803-8968-9.
51. On the locality of vehicle movement for vehicle-infrastructure communication. **Lan K.C., Huang C.M., Tsai C.Z.** Phuket : ITST 2008, 2008. ISBN: 978-1-4244-2857-1.
52. Toward reproducibility and comparability of IVC simulation studies: A Literature Survey. **Joerer S., SommerCh., Dressler F.** 10, bez viet. : IEEE Communications, 2012. gada, Sēj. 50. ISSN: 0163-6804.
53. A Study of Traffic Capacity., **Greenshields B.D.** Washington, DC : Highway Research Board, 1939. Sēj. 14, lpp. 228–477.
54. Experimental properties of complexity in traffic. **Kerner B.S., Rehborn H.** 5, bez viet. : Physical Review E, 1996. gada, Sēj. 53.
55. **Auto asociācijas padome.** Automašīnu klasifikators. [internets] Rīga : Auto Asociācija, 2013. gada.
56. Mesoscopic simulation with ANIMAL: Optimal utilization of downstream traffic detector data and the propagation of information. **Kates R., Bogenberger K. Hoops M.** NewYork : Spring, 1999. ISBN:9789813083875.
57. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long, crowded roads. **Lighthill M.H., Whitham G.B.** London : The Royal Society of London, 1955. Sēj. 229, lpp. 317-345.
58. An analysis of traffic flow. **Greenberg H.** New York : INFORMS, 1959. Sēj. 7, lpp. 79-85.
59. Traffic Patterns in unstable traffic flow on freeways. **Kuhne R.** Rotterdam : AA Balkema, 1991.
60. An Example of Microscopic Car Models Validation Using the Open Source Traffic Simulation SUMO. **Krajzewicz D., Hertkorn G., Wagner P.,.** Dresden : 14th European Simulation Symposium, 2002. ISBN: 3-936150-21-4.

61. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. **Gazis D.C., Herman R., Rothery R.W.** 4, bez viet. : Operations Research, 1961. gada, Sēj. 9.
62. **Krauß S.** Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investi- gation of Collision Free Vehicle Dynamics. Berlīne : Berlīnes Tehniskā Universitāte, 2001.
63. **Smartmotorist.** Traffic and Safety . Smartmotorist. [Tiešsaiste] Smartmotorist, 2008. gada 11. maijs. [Citēts: 2012. gada 9. septembris.] <http://www.smartmotorist.com/traffic-and-safety-guideline/maintain-a-safe-following-distance-the-3-second-rule.html>.
64. **Road Safety Authority.** The two-second rule. Rules of the Road. [Tiešsaiste] Road Safety Authority, 2011. gada 13. decembris. [Citēts: 2013. gada 30. aprīlis.] http://www.rotr.ie/rules-for-driving/speed-limits/speed-limits_2-second-rule.html.
65. **Fiore M., Härri J., Filali F., Bonnet C.** Vehicular mobility simulation for VANETs. Norfolk : 40th IEEE/SCS Annual Simulation Symposium, 2007. 0-7695-2814-7.
66. Vehicular Mobility Simulation for VANETs. **Fiore M., Harri J. , Filali F., Bonnet C.** Norfolk : IEEE Xplore, 2007. ISBN: 0-7695-2814-7.
67. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. **Treiber M., Hennecke A., Helbing D.** 2, bez viet. : Physical Review E, 2000. gada, Sēj. 62. ISSN:1550-2376.
68. **Middle Tennessee state university.** Correlationtable. [internet] Murfreesboro : Middle Tennessee state university, 2012. gada.
69. **Dissanayake S.D., Karunasekara P.P.C., Lakmanarachchi D.D., Rathnayaka A., Samarasinghe A.T.L.** Zigbee Wireless Vehicular Identification and Authentication System. Colombo : IEEE Xplore digital library, 2008. 978-1-4244-2899-1.
70. **Sullivan M.** Article. 4G Wireless Speed Tests: Which Is Really the Fastest? [Tiešsaiste] PCWorld, 2011. gada 13. 5. [Citēts: 2012. gada 08. 8.] http://www.pcworld.com/article/221931/4g_speed_tests.html.
71. **FON.** FON Corporation. FON Coporation tīmeklis. [Tiešsaiste] 2011. gada. [Citēts: 2011. gada 27. decembris.] <http://www.fon.com>.
72. **Feeney L.M.** Swedish Institute of Computer Science. IP Routing in Simple Computer Networks. [Tiešsaiste] 2005. gada. [Citēts: 2011. gada 15. decembris.] http://www.nada.kth.se/kurser/kth/2D1490/05/lectures/feeney_mobile_adhoc_routing.pdf.
73. Financial Assessment of Citywide Wi-Fi / WiMAX Deployment. **Gunasekaran V., Harmantzis F.C.** 3, Montpellier : COMMUNICATIONS & STRATEGIES, 2006. gada, Sēj. 63.
74. **Wang, J.** Will WiMAX+WLAN Constitute a Substitute to 3G? – A Techno-Economic Case Study. [Maģistra darba projekts] Stokholma : KTH, 2004. gada. ISSN: 1400–9137.
75. **Rendón J., Kuhlmann F., Alanis J.P.** A business case for the deployment of a 4G wireless heterogeneous network in Spain. Stambula : 18th European Regional ITS Conference, 2007.
76. Towards a Wi-Fi ecosystem: Technology integration and emerging service models. **Gunasekaran V., Harmantzis F.C.** 3-4, Maryland Heights : Telecommunications Policy, 2008. gada, Sēj. 32. ISSN: 0308-5961.
77. **Schwartz R., Johansson M.** www.wireless2020.com. www.wireless2020.com/docs/. [Tiešsaiste] 2012. gada maijs. [Citēts: 2012. gada 11. oktobris.] www.wireless2020.com/docs/CarrierWiFiOffloadWhitePaper03202012.pdf.
78. **Vilicom.** The Commission for Communications Regulation. The Commission for Communications Regulation web site. [Tiešsaiste] 2009. gada 15. janvāris. [Citēts: 2012. gada 08. augusts.] www.comreg.ie/_fileupload/publications/ComReg0914a.pdf.

79. **Igaune S.** Dienas bizness. Dienas bizness mājas lapa. [Tiešsaiste] Dienasmēdiji, 2010. gada 15. septembris. [Citēts: 2012. gada 16. septembris.] <http://www.db.lv/tehnologijas/tele2-par-303-tukst-ls-izsole-izkaro-frekvencu-lietosanas-tiesibas-228775>.
80. **McKinsey.** Comparative Assessment of the Licensing Regimes for 3G Mobile Communications in the European Union and their impact on the Mobile Communications Sector. Luksemburga : Eiropas Komisija, 2002.
81. Measurements and Modelling of Base Station Power Consumption under Real Traffic Loads. **Lorincz J., Garma T., Petrovic G.** Basel : Sensors 2012, 2012. gada, Sēj. 12. ISSN: 1424-8220.
82. **Bartkevičs E.** Ogres novadu pašvaldības aģentūras "Ogres novada kultūras centrs" maksas pakalpojuma cenrādis. [Saistošie noteikumi Nr.55/2010] Ogre : Ogres novadu pašvaldība, Ogres novadu pašvaldība, 2010. gada.
83. **InfoDev.** Cost analysis for WiMAX. ICT Regulation Toolkit. [Tiešsaiste] InfoDev and the International Telecommunication Union, 2012. gada 10. oktobris. [Citēts: 2012. gada 10. oktobris.] <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/PracticeNote.aspx?id=2976>.
84. Competitive potential of WiMAX in the broadband access market: a techno-economic analysis. **Smura T.** Porto : 16th ITS European Regional Conference, 2005.
85. **Ruckus Wireless.** Ruckus Wireless Unveils First Outdoor Wi-Fi System with Dynamic Beamforming for Unmatched Range and Reliability. Ruckus web site. [Tiešsaiste] Ruckus Wireless, Inc., 2009. gada 20. Jūlijs. [Citēts: 2012. gada 15. oktobris.] <http://www.ruckuswireless.com/press/releases/20090720-outdoor-dual-band>.
86. **Ellison C.** ASUS RT-N16 Multi-functional Gigabit SuperSpeedN Router Reviewed - Performance-Routing, NAS, Wireless, Closing Thoughts . SmallNetBuilder. [Tiešsaiste] Pudai LLC, 2010. gada 26. janvāris. [Citēts: 2011. gada 15. aprīlis.] <http://www.smallnetbuilder.com/wireless/wireless-reviews/31058-asus-rt-n16-gigabit-n-router-reviewed?start=4>.
87. **EUSSO.** Antenna: EUSSO Technologies. EUSSO Technologies Web site. [Tiešsaiste] EUSSO Production, 2006. gada. [Citēts: 2011. gada 12. janvāris.] <http://www.eusso.com/Models/Antenna/UWA2610-ID/UWA2610-ID.htm>.
88. **OvisLink.** Production: WN-360USB. AirLive Web site. [Tiešsaiste] AirLive. [Citēts: 2012. gada 12. janvāris.] <http://www.airlive.com/product/WN-360USB>.
89. **IxChariot.** Production: IxChariot. IxChariot. [Tiešsaiste] Ixia, 2008. gada decembris. [Citēts: 2012. gada 18. novembris.] <http://www.ixchariot.com/products/datasheets/ixchariot.html>.
90. **Rohde&Schwarz.** Application Notes: Rohde&Schwarz. Rohde&Schwarz web site. [Tiešsaiste] Rohde&Schwarz, 2004. gada 28. jūlijs. [Citēts: 2011. gada 6. maijs.] http://www2.rohde-schwarz.com/en/service_and_support/Downloads/Application_Notes/?type=20&downid=616.
91. Analysis of Frequency Offsets and Phase Noise Effects on an OFDM 802.11 g Transceiver. **Melliti M., Hasnaout S., Bouallegue R.,** 4, Seoul : IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2007. gada, Sēj. 7. ISSN: 1738-7906.
92. **J, Jansons.** Doplera efekta ietekmes uz bezvadu tīklu izpēte un analīze transporta sakaru sistēmās. Rīga : RTU, 2009. Maģistra diplomdarbs.
93. Wireless Local Area Network Flight Demonstration for High Doppler Conditions. **D'Amico William P., Lauss Mark H.** 4, bez viet. : Johns Hopkins APL Technical Digest, 2004. gada.
94. **Kammerman A., Monteban L.** WaveLAN-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band. Bell Labs Technical Journal. 1997. gada, Sēj. 2, 3.

95. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless network. **Holland G., Vaidya N., Bahl P.** Rome : ACM MOBICOM, 2001.
96. Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks. **Wong S.H.Y., Yang H., Lu S., Bharghavan V.** NewYork : MobiCom '06, 2006. ISBN:1-59593-286-0.
97. **Bicket J.C.** Robust Rate Adaptation for 802.11 Wireless Networks. Massachusett : Massachusetts Institute of Technology, 2005.
98. On link rate adaptation in 802.11n WLANs. **Lakshmanan S., Sanadhya S., Sivakumar R.** Shanghai : INFOCOM 2011, 2011. ISBN: 978-1-4244-9919-9.
99. MiSer: An optimal low energy transmission strategy for IEEE 802.11a/h. **Qiao D., Choi S., Jain A., Shin G. K.** NewYork : ACM, 2003. ISBN:1-58113-753-2.
100. IEEE 802.11 Rate Adaptation:A Practical Approach. **Lacage M., Manshae M., Turletti T.** Venezia : MSWiM'04, 2004. ACM 1581139535/04/0010.
101. Ethernet: distributed packet switching for local computer networks. **Metcalf R. M., Boggs D. R.** 7, New York : ACM Communications, 1976. gada, Sēj. 19. ISSN: 395-404.
102. Window-based rate adaptation in 802.11n wireless networks. **Pefkianakis I., Hu Y., Lee S.B.** bez viet. : Springer, 2012. DOI: 10.1007/s11036-011-0347-x.
103. Accelerometer-Assisted 802.11 Rate Adaptation on Mass Rapid Transit System. **Lai Y.J., Kuo W.H., Chiu W.T., Chang S.T., Wei H.Y.** NewYork : ACM, 2010. ISBN: 978-1-4503-0201-2.
104. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function. 3, NewYork : IEEE Journal on Selected Area in Communication, 2000. gada, Sēj. 18. ISSN:535-547.
105. IEEE 802.11 distributed coordination function (DCF): analysis and enhancement. **Wu H., Cheng S., Peng Y., Long K., Ma J.** NewYork : 2002 IEEE International Conference on Communications, 2002. ISBN: 0-7803-7400-2.
106. **euroFOT.** About euroFOT. euroFOT projekta mājas lapa. [Tiešsaiste] ERTICO - ITS EUROPE, 2012. gada 15. maijs. [Citēts: 2012. gada 15. maijs.] http://www.eurofot-ip.eu/en/about_eurofot/.
107. **FOT-Net.** About FOT-Net. FOT-Net projekta mājas lapa. [Tiešsaiste] FOT-Net , 2011. gada 1. janvāris. [Citēts: 2012. gada 15. maijs.] http://www.fot-net.eu/en/about_fot-net/.
108. **FOTsis.** About FOTsis. FOTsis projekta mājas lapa. [Tiešsaiste] FOTsis, 2012. gada 15. maijs. [Citēts: 2012. gada 15. maijs.] <http://www.fotsis.com/index.php/about-fotsis/project-organization-chart>.
109. **DRIVEC2X.** Par DRIVE 2X projektu. DRIVE 2X mājas lapa. [Tiešsaiste] DRIVE 2X, 2012. gada 15. maijs. [Citēts: 2012. gada 15. maijs.] <http://www.drive-c2x.eu/project>.
110. Analytical Models and Performance Evaluation of Drive-thru Internet Systems. **Tan W.L., Lau W. C., Yue O., Hui T. H.,** 1, bez viet. : IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011. gada, Sēj. 29. ISSN:0733-8716.
111. **Center, McTrans.** Traffic Software Integrated System - Corridor Simulation. University of Florida. [Tiešsaiste] McTrans Center, 2012. gada 7. augusts. [Citēts: 2012. gada 22. oktobris.] <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>.
112. —. TRAFVU Animation and Graphics Module. University of Florida. [Tiešsaiste] McTrans Center, 31. gada 2012. oktobris. [Citēts: 2012. gada 11. novembris.] <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/version6/trafvu.htm>.
113. **Millington, R.** Community. QuadstoneParamics mājas lapa. [Tiešsaiste] Quadstone Paramics Ltd, 2009. gada 09. oktobrī. [Citēts: 2012. gada 12. decembrī.] http://www.paramics-online.com/view_news.php?news_id=130.

114. **MICROSIMULATION, PARAMICS.** PARAMICS. PARAMICS MICROSIMULATION. [Tiešsaiste] PARAMICS, 2012. gada 24. novembris. [Citēts: 2012. gada 24. novembris.] <http://www.paramics.com/>.
115. Possibility of Microsimulation Models Calibration – Case Study in the City of Split. **D. Cvitanić, D. Breški, I. Lovrić.** 3, Zagreb : Promet – Traffic&Transportation, 2012. gada, Sēj. 24. ISSN: 1848-4069.
116. **SHIFT team.** Smart-Ahs. California Partners for Advanced Transportation Technology (PATH). [Tiešsaiste] California PATH UC Berkeley, 1997. gada 26. janvāris. [Citēts: 2012. gada 10. decembris.] <http://www.path.berkeley.edu/smart-ahs/>.
117. Reducing Congestion in Obstructed Highways with Traffic Data Dissemination Using Ad hoc Vehicular Networks. **Hewer T.D., Nekovee M., Coveney P.V.** Cairo : Hindawi Publishing Corporation, 2010. gada. ISSN:1687-6172.
118. **Treiber M.** Microsimulation of road traffic flow. Traffic simulation. [Tiešsaiste] MTreiber, 2011. gada 1. jūnijs. [Citēts: 2012. gada 10. janvāris.] <http://www.traffic-simulation.de/>.
119. **Stepanov I.** Mobisim. Stuttgartes universitāte. [Tiešsaiste] 2005. gada 11. novembris. [Citēts: 2012. gada 20. janvāris.] <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de/mobisim/index.html>.
120. **Altman E., Groenevelt R., Nain P.** Relaying in Mobile Ad Hoc Networks: The Brownian Motion Mobility Model. Sophia Antipolis Cedex : Unité de recherche INRIA Sophia Antipolis, 2004. ISSN: 0249-6399.
121. Impact of the Gauss-Markov Mobility Model on Network Connectivity, Lifetime and Hop Count of Routes for Mobile Ad hoc Networks. **Meghanathan N.** 5, Oulu : Journal of networks, 2010. gada, Sēj. 5. ISSN:1796-2056.
122. Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model: Epoch Time, Direction Distribution, and Cell Change Rate. **Bettstetter Ch., Hartenstein H., Perez-Costa X.** New York : MSWiM '02 Proceedings of the 5th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems, 2002. ISBN:1-58113-610-2.
123. A meta-model and framework for user mobility in mobile networks. **Stepanov I., Hahner J., Becker C., Jing Tian , Rothermel K.** NewYork : ICON2003. The 11th IEEE International Conference on Networks, 2003. ISBN: 0-7803-7788-5.
124. Influence of the movement of the mobile station on the performance of a radio cellular network. **Thomas R., Gilbert H., Mazziotto G.** Copenhagen : Third Nordic Seminar on Digital Land Mobile Radio Communication, 1988.
125. **Härri J., Fiore M., Fethi F., Bonnet C.** VanetMobiSim. Eurecom. [Tiešsaiste] Eurecom, 2007. gada 14. februāris. [Citēts: 2012. gada 10. jūnijs.] <http://vanet.eurecom.fr/>.
126. **German Aerospace Center.** SUMO. German Aerospace Center mājas lapa. [Tiešsaiste] Institute of Transportation Systems, 2012. gada 4. decembris. [Citēts: 2012. gada 15. decembris.] <http://sumo.sourceforge.net/>.
127. SUMO – Simulation of Urban MObility: an Overview. **Behrisch M., Bieker L., Erdmann J., Krajzewicz D.** Barcelona : Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, Daniel Krajzewicz, 2011. ISBN: 978-1-61208-169-4.
128. **Chou, Chien-Ming.** Rapid Generation of Realistic Simulation for VANET. [Mājas lapa] Tainan : Laboratory for Experimental Network and System (LENS), 2012. gada.
129. **OPNET Technologies.** Solutions: Wireless Network Simulation. OPNET Technologies mājas lapa. [Tiešsaiste] OPNET Technologies, 2012. gada 12. decembris. [Citēts: 2012. gada 12. decembris.] http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler_wireless.html.
130. SIMULATION STUDY FOR PERFORMANCE COMPARISON WITH MOBILITY MODELS OF ROUTING PROTOCOLS IN MOBILE ADHOC NETWORK. **Mohd N.,**

- Danish Q.** 1, Kharghar : Journal of Information and Operations Management, 2012. gada, Sēj. 3. ISSN: 0976–7754.
131. Pursue Shortest Mobility Model with Delay and Retransmission Attempts in MANET. **Shaveta.** 3, Uttar Pradesh : International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2012. gada, Sēj. 1. ISSN:2277-1956.
132. Simulations of VANET scenarios with OPNET and SUMO. **Kaisser F., Gransart C., Berbineau M.** Berlin : Springer, 2012. ISBN: 978-3-642-29666-6.
133. **Mobile Systems Laboratory.** Research. UCLA mājas lapa. [Tiešsaiste] Mobile Systems Laboratory,, 2010. gada 1. janvāris. [Citēts: 2012. gada 13. decembris.] <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
134. **Scalable Network Technologies.** QualNet 5.1 Model Library Index. [Handbook] Los Angeles : Scalable Network Technologies, 2010. gada.
135. **Rehmani M.H.** Personal Notes on the Network Simulator NS-3. Paris : Networks and Performance Analysis research group, 2010.
136. **Center, Wireless Research.** NS2 versus NS3. Wireless Research Center mājas lapa. [Tiešsaiste] Wireless Research Center , 2010. gada 1. jūlijs. [Citēts: 2012. gada 14. decembris.] <http://wrc-ejust.org/crn/images/Tutorials/ns2vsns3.pdf>.
137. **iTETRIS Project Consortium.** iTETRIS Project Consortium mājas lapa. [Tiešsaiste] 2010. gada. [Citēts: 2012. gada 15. decembris.] <http://www.ict-itetris.eu/platform.htm>.
138. **WiCIP Lab.** NS2 or OMNeT++. Wireless Communication and Information Processing Research Laboratory mājas lapa. [Tiešsaiste] WiCIP Lab, 2012. gada 10. augusts. [Citēts: 2012. gada 15. decembris.] <http://www.wicip.ca/index.php/wicip-resources/82-wicip-main/wicip-resource-articles/74-wicip-ns2-or-omnetpp>.
139. **Simulcraft.** OMNEST - OMNeT++ Comparison. OMNEST. [Tiešsaiste] Simulcraft. [Citēts: 2012. gada 15. decembris.] <http://www.omnest.com/comparison.php>.
140. Realistic Simulation of Vehicular Communication and Vehicle-2-X Applications. **Schünemann B., Massow K., Radusch I.** Marseille : ACM, 2008. ISBN 978-963-9799-20-2.
141. **Bustamante F.E.** AquaLab project. SWANS++ -- EXTENSIONS TO THE SCALABLE WIRELESS AD-HOC NETWORK SIMULATOR. [Tiešsaiste] AquaLab, 2012. gada 20. decembris. [Citēts: 2012. gada 20. decembris.] <http://aqualab.cs.northwestern.edu/projects/143-swans-extensions-to-the-scalable-wireless-ad-hoc-network-simulator#resources>.
142. Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET. **Karnadi F.K., Zhi Hai Mo, Kun-chan Lan.,** Kowloon : IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007., 2007. ISBN: 1-4244-0658-7.
143. **mLab.** GrooveNet: A Vehicular Network Virtualization Platform. University of Pennsylvania mājas lapa. [Tiešsaiste] mLab, 2012. gada 6. oktobris. [Citēts: 2012. gada 20. oktobris.] <http://mlab.seas.upenn.edu/groovenet/>.
144. **T., Witten.** GrooveNet: A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks. CSUMB Networking Research mājas lapa. [Tiešsaiste] CSUMB, 2009. gada 24. jūnijs. [Citēts: 2011. gada 15. decembris.] <http://csumbnetworking.wordpress.com/2009/06/24/groovenet-a-hybrid-simulator-for-vehicle-to-vehicle-networks/>.
145. GrooveNet: A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks. **Mangharam R., Weller D., Rajkumar R., Mudalige P., Bai F.** San Jose : 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops, 2006. , 2006. ISBN: 0-7803-9791-6.
146. Systematic Protocol Design for Vehicular Networks. **Mangharam R., Weller D. S., Rajkumar R., Mudalige P., Fan Bai.** San Francisco : IEEE Globecom/AutoNet, 2006.

147. TraNS: Realistic Joint Traffic and Network Simulator for VANETs. **Piorkowski M., Raya M., A. Lezama Lugo P. Papadimitratos M. Grossglauser J.-P. Hubaux.** New York : ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications , 2008. doi: 10.1145/1374512.1374522.
148. **EPFL.** Traffic and Network Simulation Environment. LABORATORY FOR COMMUNICATIONS AND APPLICATIONS (LCA). [Tiešsaiste] EPFL, 2012. gada. [Citēts: 2012. gada 20. decembris.] <http://lca.epfl.ch/projects/trans/>.
149. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. **Sommer C., German R., Dressler F.** 1, Los Alamitos : IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011. gada, Sēj. 10. ISSN: 1536-1233.
150. **Sommer C.** Network and Road Traffic Simulation. C. Sommer mājas lapa. [Tiešsaiste] Veins project grupe, 2012. gada 25. maijs. [Citēts: 2012. gada 9. decembris.] <http://veins.car2x.org/>.
151. **M., Rondinone.** iTETRIS: The Integrated Wireless and Traffic Simulation Platform for Real-Time Road Traffic Management Solutions. München : COMeSafety project, 2010.
152. Welcome to iTETRIS community. iTETRIS mājas lapa. [Tiešsaiste] iTetris Project Consortium, 2010. gada. [Citēts: 2012. gada 10. decembris.] <http://www.ict-itetris.eu/10-10-10-community/>.
153. ASH: application-aware SWANS with highway mobility. **Ibrahim K., Weigle M. C.,** Phoenix : IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM '08), 2008. ISBN: 978-1-4244-2219-7.
154. VGSim: An integrated networking and microscopic vehicular mobility simulation platform. **Bojin L., Khorashadi B., Haining D., Ghosal D., Chen-Nee Chuah, Zhang M.** 5, Davis : IEEE Communications Magazine, 2009. gada, Sēj. 47. ISSN : 0163-6804.