

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

**Nikolajs Bogdanovs**

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

**MODEĻU IZSTRĀDE UN ANALĪZE AUTOTRANSPORTA  
HETEROGĒNA BEZVADU TĪKLA CAURLAIDSPĒJAS  
NOVĒRTĒŠANAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

**Rīga 2014**

Bogdanovs N. Modeļu izstrāde un analīze  
autotransporta heterogēna bezvadu tīkla  
caurlaidspējas novērtēšanai. Promocijas darba  
kopsavilkums.– R.: RTU, 2014.– 31 lpp.



Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes  
‘RTU P-08’ 2014. gada 13. novembrī lēmumu,  
protokols Nr. 144.2

**ISBN 978-9934-10-639-2**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. g. 8. janvārī, plkst. 14:30, Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un Telekomunikācija fakultātē, Āzenes iela 16/20, 215 auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr. sc. ing. Gunārs Lauks  
Rīgas Tehniskā universitāte, Elektronikas un Telekomunikāciju Fakultāte

Profesors, Dr. sc. ing. Irina Jackiva  
Transporta un sakaru institūts

vadošais pētnieks, direktors, Dr. sc. comp. Rihards Balodis-Bolužs  
Latvijas Universitātes Matemātikas un informātikas institūts

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Nikolajs Bogdanovs ..... (Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 1 pielikumu, 56 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 105 lappuses. Literatūras sarakstā ir 87 nosaukumi.

## SATURS

Vispārējais darba raksturojums .....	5
Darba atsevišķo nodaļu izklāsts .....	9
Pirmā nodaļa .....	9
Otrā nodaļa .....	10
Trešā nodaļa .....	11
Ceturtnā nodaļa .....	20
Piektā nodaļa .....	22
Promocijas darba galvenie rezultāti .....	25
Transporta tīkla analītisko un simulācijas modeļu pielietošanas rekomendācijas ....	26
Bibliogrāfija .....	27

## VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Transportlīdzekļu tīkli ir jauna bezvadu tīklu klase, kas ir parādījusies, pateicoties sasniegumiem bezvadu tīklu tehnoloģijā un autobūves nozarē. Transporta tīkli starp transportlīdzekļiem veidojas spontāni, tie ir aprīkoti ar bezvadu interfeisu, kam var būt homogēna vai heterogēna tehnoloģija.

Transport līdzekļu tīklus izstrādā tīkla operatori un pakalpojuma sniedzēji. Tie tiek izstrādāti arī ar operatoru, pakalpojumu sniedzēju un valdības iestāžu savstarpējas integrācijas palīdzību. Nesenie sasniegumi bezvadu tehnoloģijās un pašreizējās, progresējošās tendences ad hoc tīklu scenārijos pieļauj noteiktu skaitu transportlīdzekļu tīkla arhitektūras konstrukciju izvietojumu uz lielceļiem un pilsētas vidē.

Bezvadu tīklu izveide mobilajiem objektiem raisa vairākas problēmas, kuras būtu jārisina izstrādātājiem. Viena no problēmām ir mobilo objektu skaita noteikšana uz lielceļa atkarībā no to attāluma līdz bāzes stacijai. Šī problēma šobrīd ir aktuāla, jo klientu skaits, kuri atrodas bāzes stacijas darbības zonā, ietekmē efektīvo datu pārraides tempu (sauktu par "Goodput"). Šī efektīvā datu pārraides tempa noteikšana attiecībā uz ceļa satiksmi ir vēl viena mobilo objektu bezvadu tīkla izveides problēma. Šeit efektīvais datu pārraides temps bezvadu transporta tīklos ir noteikts saskaņā ar [3] kā faktiskais datu pārraides temps no iebūvētā datora lietotāja līmeņa uz bāzes staciju, ierēķinot laika aizturi.

Izpētes objekts – modeļa simbiozes izstrāde un analīze, kas nepieciešama transportlīdzekļu tīkla izveidei.

Lai noteiktu bāzes stacijas darbības zonā esošo transportlīdzekļu skaitu, ir jāņem vērā ceļu satiksmes īpatnības. Pastāv vairāki satiksmes izvērtēšanas modeļi, tie ir aprakstīti pirmajā nodaļā. Šos modeļus var iedalīt divās klasēs: makroskopiskie un mikroskopiskie. Šos modeļus var izmantot dažādu situāciju analīzei uz ceļa.

Dotajā darbā tiek apskatīti divi trafika kustības režīmi. Pirmajā režīmā tiek apskatīts nenoslēgts modelis ar neierobežotu transporta daudzumu ( $N = \infty$ ). Šajā režīmā tika apskatīta maģistrāle ar neierobežotu joslu skaitu un transporta plūsmas sadalījumu pēc Erlanga. Otrajā režīmā tika pētīts īss ceļa posms (200 m) ar transporta plūsmas sadalījumu pēc Puasona un ierobežotu transporta skaitu, šis režīms ir tīkla noslēgtais modelis. Otrā režīma galvenā īpatnība ir transporta kustības ātruma izmaiņas pēc eksponenciālā likuma.

Šajā darbā kā pirmais uzdevums tiek virzīts – noteikt kustīgo objektu skaitu atkarībā no to attāluma līdz bāzes stacijai un, izejot no tā, noteikt reālo ātrumu datu pārraidei no kustīgā objekta, kas atrodas bezvadu tīkla bāzes stacijas darbības zonā.

Darbā tika parādīti eksperimentālie dati, kas izvērtē datu pārraides ātrumu starp attālu objektu un bāzes staciju standarta 802.11n bezvadu tīklā. Tika atklāta likumsakarība starp datu pārraides ātruma izmaiņām un attālo objektu skaitu. Darbā parādītie eksperimentālie rezultāti tika izmantoti reāla datu pārraides ātruma novērtēšanai starp kustīgiem transportlīdzekļiem un bāzes staciju, kas strādā failu pārraides režīmā atbilstoši FTP protokolam. FTP protokols ir paredzēts lielu failu pārraidei. Eksperimenta gaitā tika mērīts reālais programmā Goodput datu pārraides noderīgais ātrums ar protokolu FTP, lai noteiktu liela apjoma datu pārraides ātrumu. Novērtēšana tika veikta, izmantojot programmu IxChariot. Galvenā īpatnība ir datu pārraides ātruma mērīšana atkarībā no tā, kādā attālumā kustīgais objekts atrodas no bāzes stacijas un no tā, kāds ir tā ātrums.

Otrais uzdevums – radīt analītisku modeli, ar kuru var novērtēt veiktspēju ne tikai kustīgam objektam Access point, bet arī tālāk no Access point – līdz attālinātajam serverim. Divrangu tīklā klienti ar AP savienojas caur protokolu 802.11n, tālāk AP caur internetu vai mobilo tīklu LTE savienojas ar attālināto serveri.

Kā adekvāts modelis šajā gadījumā var kalpot masveida apkalpošanas sistēmu noslēgtais tīkla modelis, kas sastāv no diviem mezgliem.

Sākuma mezgls modulē kustīgo objektu termināļus, ar to tiešā savienojumā atrodas modelis AP ar kontrolieri un maršrutētāju, kas savieno AP ar attālināto serveri, kurš modulē tīkla modeļa trešo mezglu.

Lai varētu noteikt modeļa parametrus, tādus kā – apstrādes intensitāte mezglos un pārejas iespējamība, ir nepieciešams veikt prototipa fizisko parametru novērtēšanu. Prototipa radīšanai tika izmantota firmas Cisco aparatūra. Izmantojot Cisco aparatūru, tika uzbūvēts transporta divrangu bezvadu tīkls.

Šis prototips spēlē ‘test-bed’ lomu Goodput atkarības pētīšanā no automobiļa pārvietošanās ātruma. Turklāt datu pārraides noderīgā ātruma mērīšana nosedz ne tikai pirmo rangu sistēmā ‘kustīgs objekts – PP (piekļuves punkts)’, bet arī tālākus datu pārraides kanālus no PP līdz attālinātajam serverim.

Dabiski, ka Gooput lielā mērā būs atkarīgs no datu pārraides ātruma starp AP un serveri, tas ir – no datu pārraides raksturojuma. Šādu pētījumu veikšanai tika pielietots maršrutētājs CISCO C819 M2M ar diviem izejas kanāliem. Viens kanāls nodrošina datu pārraidi GPRS režīmā. Otrs kanāls, kuru raksturo liels datu pārraides ātrums, izmanto LTE režīmu – nākamās paaudzes mobilo sakaru režīmu.

Pētījums parādīja, ka datu pārraides ātrums var ievērojami atšķirties no datiem, kas tika iegūti iepriekš, un ietvēra pirmo sistēmas rangu ‘kustības objekts-AP’. To izskaidro ar aizturi uz tīkla otro rangu līdz serverim.

Darba uzdevums: Izstrādāt modeļu kopumu, kas nodrošina transporta tīkla izveidi, kurš ir maksimāli pastāvīgs, ar satiksmes plūsmas īpašībām, kas balstās uz eksperimentālajiem pētījumiem par bezvadu datu pārraides tīklu elementiem.

### **Darba mērķis un uzdevumi**

Pamatojoties uz bezvadu tīkla datu pārraides elementu eksperimentālajiem pētījumiem, izstrādāt modeļu kopumu, kas veiktu transporta tīklu projektēšanu, un kurš maksimāli atbilst transporta plūsmas parametriem.

Lai sasniegtu šo mērķi, tika atrisināti šādi uzdevumi:

1. Kopā ar kolēģiem izstrādāt, uzstādīt un izpētīt LTE un 802.11n protokola datu pārraides vienranga tīkla veiktspēju ar trim piekļuves punktiem.
2. Izpētīt maksimālu bezvadu tīkla caurlaides veiktspēju dažādos transportlīdzekļu pārvietošanas ātrumos. Galvenais mērķis – noteikt modeļa parametrus transporta tīklu projektēšanā.
3. Izpētīt esošus satiksmes plūsmas modeļus autoceļos, izstrādāt savus modeļus, kas ir adekvāti pieņemami, lai noteiktu klientu skaitu bāzes stacijas zonā.
4. Izstrādāt datu pārraides tīkla modeli, kas nodrošina kustīgo objektu piekļuvi bāzes stacijām dažādās ceļa situācijās.
5. Izstrādāt, uzstādīt un eksperimentāli izpētīt datu pārraides vienranga tīklu, kas sastāv no trīs bāzes stacijām, mobilo tīklu koncentratora un šūnu tīkla transmieteriem, kas nodrošinātu mobilo klientu piekļuvi attālinātam serverim, izmantojot GPRS un LTE.
6. Izstrādāt datu pārraides divrangu tīkla modeli, kas nodrošina mobilo objektu piekļuvi attālinātiem serveriem, un, pamatojoties uz eksperimentāliem datiem, identificēt modeļa parametrus.
7. Noteikt, uzstādīt un izpētīt esošās paplašinātās simulācijas programmas, kas dod iespēju modelēt transportlīdzekļu stohastisko uzvedību ceļos un to mijiedarbību ar WiFi piekļuves punktu ceļmalas tīkliem.

8. Veikt transporta tīkla modeļu simulācijas rezultātu un reālo eksperimentu rezultātu salīdzināšanu.
9. Izstrādāt ieteikumus piedāvāto modeļu izmantošanā, lai veidotu transporta tīklu dažādās situācijās.

### **Rezultāti un zinātniskā novitāte**

Analītiskā modeļa novērtējums heterogēnai divrangu tīkla caurlaidei priekš protokola datu un GPRS/LTE kanālu pārraides, izmantojot transportlīdzekļu satiksmes plūsmas parametrus. Izveidotie analītiskie modeļi nosaka transportlīdzekļu bezvadu tīkla parametrus.

### **Darbā tiek izvirzītas šādas aizstāvamās tēzes.**

Autors šajā darbā aizstāv:

1. Salīdzinot jauniegūtos empīriskos un analītiskos pētījuma rezultātus, tika pierādīta likumsakarība starp mobilo klienta plūsmu un caurlaidspēju heterogēnā bezvadu tīklā;
2. Ar izveidotu slēgtās rindošanas tīkla modeli, paplašinot Gordona-Ņūvela teorēmas stacionāro varbūtības sadalījumu, ir iegūta likumsakarība starp mobilo klienta blīvumu un attālumu līdz divu rangu tīkla tuvākajam piekļuves punktam;
3. Pierādījums tam, ka difūzijas modeļa, kas var tikt izmantots mobilo klientu blīvuma noteikšanai vienranga tīkla mezglā nestacionārā režīmā, rezultāti uzrāda augstu Pīrsona korelācijas sasaisti ar stacionāra automobiļa kustības modeļa rezultātiem, kur standartnovirze nepārsniedz 7 %;
4. Eksperimentālais un analītiskais pierādījums tam, ka ceturtās paaudzes mobilo sakaru tīkls heterogēna bezvadu tīkla arhitektūrā dinamiskā vidē uzrāda 11 reizes augstāku veikspēju nekā pakešu radio servisa mobilo sakaru tīkls.

### **Darba aprobācija**

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti 8 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti 19 publikācijās zinātniskajos žurnālos.

### **Ziņojumi starptautiskajās konferencēs**

1. RTU 52. studentu zinātniskā un tehniskā konference, Rīga, Latvija, 2011. g.
2. The 15<sup>th</sup> International Conference of ELECTRONICS, Kauņa un Viļņa, Lietuva, 2011. g.
3. International Conference ELECTRONICS'2012, Palanga, Lietuva, 2012. g.
4. The 13<sup>th</sup> Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012), Tallina, Igaunija, 2012. g.
5. The 7<sup>th</sup> International Conference (ECT-2012), Kauņa, Lietuva, 2012. g.
6. The 8<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies, Kauņa, Lietuva, 2013. g.
7. The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE2013), Konija, Turcija, 2013. g.
8. The 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies, Kauņa, Lietuva, 2014. g.

Promocijas darbā veiktie pētījumi un to rezultāti tika izmantoti un atspoguļoti zinātniski pētnieciskajā projektā:

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”.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti ir atspoguļoti 19 publikācijās zinātniskajos žurnālos:

1. Pētersons E., **Bogdanovs N.** Performance Evaluation of Three Layer Vehicular Network. *Electronics and Electrical Engineering*, 2011, Vol 112, No. 6, pp. 25–28.
2. **Bogdanovs N.**, Ipatovs A., Jansons, J. Research of a 2-layer Closed Vehicular Network. *Telekomunikācijas un elektronika*. Nr. 11, 2011, 34.–40. lpp.
3. Jansons J., Pētersons E., **Bogdanovs N.** Vehicle-To-Infrastructure Communication Based on 802.11n Wireless Local Area Network Technology. No: 2<sup>nd</sup> Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC 2012): IEEE Conference Proceedings: IEEE Xplore Digital Library, Lietuva, Vilnius, 25.–27. aprīlis, 2012. Vilnius: IEEE, 2012, 26.–31. lpp.
4. Jansons J., Pētersons E., **Bogdanovs N.** IEEE802.11n Standard's Capability to Support Wireless Device in Vehicular Environment. No: Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2012), Lietuva, Kaunas, 3.–4. maijs, 2012. Kaunas: Technologija, 2012, 44.–47. lpp.
5. Ipatovs A., **Bogdanovs N.**, Pētersons E. Evaluation of the Rate of the Data Transfer between Vehicles and Base Stations in Wireless Networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, Vol. 46, Iss. 2, 76.–82. lpp.
6. Ipatovs A., Pētersons E., **Bogdanovs N.** Evaluation of the Rate of the Data Transfer between Vehicles and Base Stations in Wireless Networks // *Автоматика и вычислительная техника*. – 2. (2012), 31–41. lpp.
7. **Bogdanovs N.**, Pētersons E., Jansons J. Modeling Results of Vehicular Network for File Transfer. No: Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2012), Lietuva, Kaunas, 3.–4. maijs, 2012. Kaunas: Technologija, 2012, 60.–63. lpp.
8. Pētersons E., **Bogdanovs N.** Bandwidth Calculation of Short Range Communication Vehicular Network. No: The 9<sup>th</sup> International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2012): Conference Proceedings, Lietuva, Kaunas, 24.–25. maijs, 2012. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 2012, III-145.–III-151. lpp.
9. Jansons J., **Bogdanovs N.**, Ipatovs A. Vehicle-to-Infrastructure Communication Based on IEEE 802.11g. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications*, 2012, Vol. 2, No. 1, 46.–50. lpp.
10. Jansons J., Doriņš T., **Bogdanovs N.** Analyzing the Basic Performance of IEEE 802.11g/n. *International Journal on New Computer Architectures and Their Applications*, 2012, Vol. 2, No. 3, 465.–470. lpp.
11. Jansons J., Barancevs A., Pētersons E., **Bogdanovs N.** IEEE802.11a Standard Performance in Mobile Environment. *International Journal on New Computer Architectures and Their Applications*, 2012, Vol. 2, No. 3, 497.–500. lpp.
12. Jansons J., Pētersons E., **Bogdanovs N.** A Measurement Study of WLAN Link Recovery Using WDS in a Vehicular Environment. No: Proceedings of the 13<sup>th</sup> Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2012), Estonia, Tallinn, 3.–5. oktobris, 2012. Tallinn: Tallinn University of Technology Press, 2012, 173.–174. lpp.
13. **Bogdanovs N.**, Pētersons E., Šarkovskis S. Modelling of Vehicular Network for Short Range. No: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference „Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat-12), Latvija, Rīga, 17.–20. oktobris, 2012. Rīga: 2012, 195.–203. lpp.
14. 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.

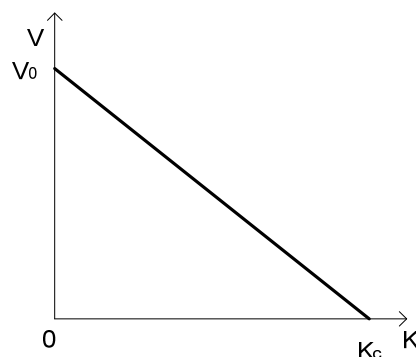
15. **Bogdanovs N.**, Pētersons E., Jansons J. Two Layer Model for Performance Evolution of V2I Network. Electronics and Electrical Engineering, 2013, Vol. 19, No. 3, 98.–101. lpp.
16. Jansons J., Pētersons E., **Bogdanovs N.** WiFi for Vehicular Communication Systems. No: 27<sup>th</sup> International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA 2013): Proceedings, Spānija, Barselona, 25.–28. marts, 2013. Fukuoka: 2013, 425.–430. lpp.
17. **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 (TAECE 2013), Turcija, Konya, 9.–11. maijs, 2013. Konya: Mevlana University, 2013, 548.–553. lpp.
18. **Bogdanovs N.**, Pētersons E. Road Traffic Non-Stationary Analysis of the Vehicular Wireless Network Goodput Evaluation. No: Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT-2014), Lietuva, Kaunas, 8.–9. maijs, 2014. Kaunas: Technologija, 2014, 46.–49. lpp.
19. **Bogdanovs N.**, Ancāns A., Martinsons K., Pētersons E., Performance evaluation of integrated vehicular network // Автоматика и вычислительная техника.– 5. (2014) 39–49. lpp.

## DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

**Pirmā nodaļa.** Kopumā, kad blīvums  $K$ , t. i., piesātinājuma līmenis, paaugstinās, autovadītāji palēnina ātrumu, lai nodrošinātu kustības drošību [2]. Tādēļ pastāv nozīmīga sakarība starp  $v$  un  $K$ , t. i., ātrumu  $v$  var aptuveni pielīdzināt vienmērīgi samazinošai blīvuma funkcijai  $K$ . Lai gan šīs funkcijas veidu nosaka ceļa īpašības, automobiļu veidi, plūsmas konsistence, laika apstākļi u. t. t., vienkāršākais veids ir lineārā tuvināšana [2], kas ilustrēta 1.1. att. Šī sakarība starp  $K$  un  $v$  parādīta vienādojumā:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{K}{K_c}\right), \quad (1.1)$$

šeit  $v$  ir brīvās kustības vai maksimālais ātrums, kas iespējams uz ceļa, bet  $K_c$  ir maksimālais plūsmas blīvums, kuru sasniedzot, visas automašīnas apstājas.



1.1. att. Aptuvena sakarība starp ātrumu un plūsmas blīvumu

### Satiksmes plūsmas statistiskās īpašības

Kustīgos transportlīdzekļus kopumā var iedalīt divās grupās, tā ir – brīvā kustība un sekošana līderim. Brīvā kustība pārvietojas bez šķēršļiem attiecībā pret citām automašīnām, kamēr mašīnu kustība, kas seko līderim, ir ierobežota ar priekšā braucošo automašīnu.

Laika intervālu  $h_1$  sadali brīvās kustības automašīnām var pieņemt kā eksponenciālu, nobīdītu uz pozitīvo vērtību  $\tau$ , kas vienāda ar minimālo intervāla starp transportlīdzekļiem vērtību, pie kuras tos varētu uzskatīt par brīvās kustības transportlīdzekļiem [1].

Sekojoši, intervālu blīvuma sadale  $f_1(h_1)$  starp šādām automašīnām ir definēta ar vienādojumu:

$$f_1(h_1) = \lambda_1 e^{-\lambda_1(h_1-\tau)}; h_1 \geq \tau, \quad (1.2)$$

kur  $\lambda_1 = 1/(\bar{h}_1 - \tau)$ , un  $\bar{h}_1$  – matemātiskā cerība  $h_1$ , t. i. vidējais brīvās kustības transportlīdzekļu intervāls.

No otras puses, eksperimenta rezultāti atklāja, ka laika intervālu  $h_2$  sadalījumu līderim sekojošās automašīnas var pietuvināt Erlanga  $k$ -kārtas sadalījumam ar vērtību  $k > 1$ .

$$f(h) = \varphi \lambda_1 e^{-\lambda_1(h-\tau)} + (1-\varphi) \frac{(k\lambda_2)^k h^{k-1} e^{-\lambda_2 kh}}{(k-1)!}, \quad (1.3)$$

kur pieņemam, ka pirmā vērtība ir vienāda ar nulli, un  $h < \tau$ .

Lai noteiktu transportlīdzekļu skaitu noteiktā ceļa posmā, ir nepieciešams izstrādāt savus modeļus, adekvāti pieņemamus, lai noteiktu klientu skaitu Transportlīdzekļu tīkla bāzes stacijas pārklājuma zonā. Šai problēmai tiks veltīta trešā nodaļa.

### Otrā nodaļa

Šajā nodaļā aprakstīti mobilie bezvadu tīkli, kurus var lietot transportlīdzekļu tīklā. Standarta 802.11p dod iespēju bezvadu pieejai transportlīdzekļu videi. 802.11p funkcijas ir 5.9 GHz diapazonā; šī tehnoloģija dod piekļuvi navigācijas izvēlei, multimediju informācijai un arī telemetrijai. Bezvadu tīkla izveidei, kas darbotos ar 802.11p standartu, ir nepieciešams dārgāks aprīkojums par IEEE bezvadu tīkla standartu, tādu kā 802.11n [5].

Ievērojams 802.11n standarta uzlabojums salīdzinājumā ar iepriekšējiem standartiem ir izejas datu temps bezvadu kanālam – līdz pat 600 Mbps – vairāk nekā divdesmitkārtējs uzlabojums par 27 Mbps 802.11n maksimālo datu ātrumu.

WiFi standarts 802.11n (kas darbojas 2.4 GHz frekvences joslā) atbalsta līdz pat  $4 \times 4$  MIMO, kas dod 600 Mbps lielu teorētiskā kanāla bitu ātrumu. Tabula 2.1 atspoguļo bezvadu protokola salīdzinošos ātrumus:

2.1. tabula

Bezvadu protokola salīdzinošie ātrumi priekš IEEE 802.11

Standarts	Frekvenču josla	Maks. MIMO	Maksimālais ātrums
IEEE 802.11a	5 GHz	None	54 Mbps
IEEE 802.11b	2.4 GHz	None	11 Mbps
IEEE 802.11g	2.4 GHz	None	54 Mbps
IEEE 802.11n	2.4 GHz	$4 \times 4$	600 Mbps

Datu plūsma ir sadalīta starp antenām, lai palielinātu ātrumu un padarītu saikni daudz uzticamāku. Lietojot OFDM un MIMO, LTE ļauj piegādāt datus ar 100 Mbit/s lejupraidīšanas un 50 Mbit/s augšupraidīšanas ātrumu pie vislabākajiem apstākļiem. 4G teorētiskais augšupraidīšanas ātrums ir 1 Gb/s. Nodrošinātais interneta pieslēgums dos lietotājiem pieeju visa veida pakalpojumiem, ieskaitot teksta, datu bāzes un multimediju pakalpojumiem.

LTE tehnoloģijai un 802.11n protokolam labākie rezultāti ir sasniegti transporta tīklā. LTE tehnoloģijas un 802.11n protokola parametri tiks izmantoti transporta tīkla modeļu izstrādei, un tie tiks aprakstīti trešajā nodaļā.

Mūsu mērķis ir pierādīt, ka WLAN tehnoloģija ir spējīga, pirmkārt, īstenot heterogēnu tīkla pieeju un dokumentēt mūsu novērotās komunikācijas īpašības ar dažādām mērījumu konfigurācijām, izmantojot TCP kā standarta transporta protokolu.

### Trešā nodaļa

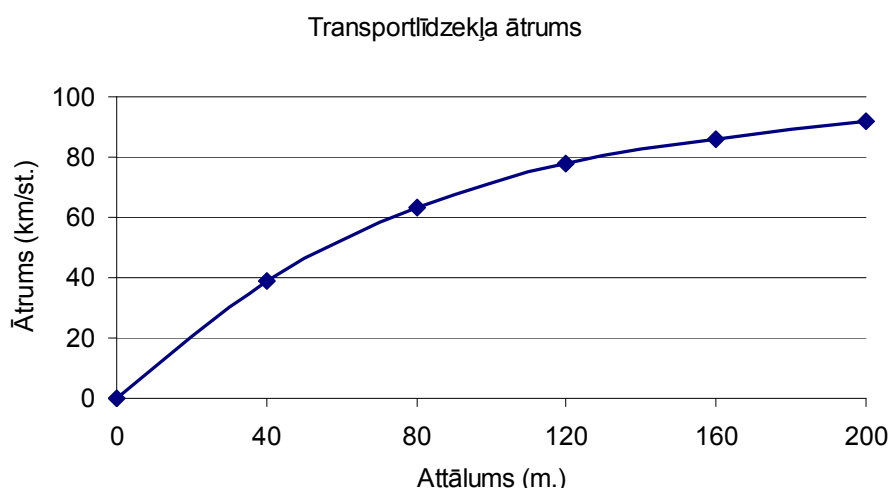
Pieņemam, ka pieprasījumu sadalījums ir eksponenciāls ar parametru  $\mu_i$ . Saskaņā ar šo pieeju transportlīdzekļa kustības ātrumu uz ceļa raksturo blīvums. Transportlīdzekļu izvietojumu uz metru var iegūt, izmantojot GreenShield modeļa formulu (1.1). Neskatoties uz to, ka šis modelis nav ideāls, tas ir diezgan precīzs un samērā vienkāršs. Tiek nodrošināts nejaušo transportlīdzekļu skaits sekundē katram intervālam, saskaņā ar pieprasījumu intensitāti un apstrādi [9, 10]. Ja intervāla garums ir vienāds ar  $S_i$ , un transportlīdzekļa kustības ātrums ir vienāds ar  $\mathcal{G}_i$ , tad transportlīdzekļa apkalpes intensitāte uz ceļa intervālu vienāda ar:

$$\mu_i = \frac{\mathcal{G}_i}{S_i}. \quad (3.1)$$

Atkarībā no transportlīdzekļu intensitātes pakalpojums būs atkarīgs no sākotnējās transportlīdzekļu plūsmas intensitātes ceļa intervālā, tāpat kā no transportlīdzekļu izvietojuma blīvuma ceļa intervālā (skatīt 3.1. att.).

$$\mathcal{G}_i = \mathcal{G}_0(1 - e^{-ar}), \quad (3.2)$$

kur  $r$  – attālums līdz bāzes stacijai,  $\mathcal{G}_0$  – 100 km/h.



3.1. att. Eksponenciāls vienādojums

### Buzena Algoritms slēgtam rindošanas tīklam

Rindošanas tīkls ir apkalpes iekārtu apkopojums, kas sakārtots tādā veidā, ka klientam ir jāpāriet no vienas iekārtas citā, lai apmierinātu pakalpojuma vajadzības.

Ņemsim par piemēru slēgtu rindošanas tīklu ar  $M$  apkalpes iekārtām un  $N$  riņķojošiem klientiem. Ierakstīsim klātesošo klientu skaitu ar  $n_i$  klientiem katrā  $i$ -jā iekārtā  $t$  laikā tā, lai

$$\sum_{i=1}^M n_i = N. \quad (3.3)$$

Apkalpes laiks klientam  $i$ -jā iekārtā ir izvēlēts kā eksponenciāli sadalīts nejaušs mainīgais ar  $\mu_i$  parametru, un pēc apkalpes īstenošanas  $i$ -jā iekārtā klients dosies uz  $j$ -to iekārtu ar varbūtību [12]. Sekojot Gordon-Newell teorijai, var iegūt līdzsvarotu šī modeļa sadalījumu:

$$P(n_1, n_2, \dots, n_M) = \frac{1}{G(N)} \prod_{i=1}^M (X_i)^{n_i}. \quad (3.4)$$

Ņemot vērā šī modeļa periodiskumu  $x_1 = 1$ , nākamais solis tiek aprēķināts sekojoši:

$$x_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2}, x_3 = \frac{\mu_1}{\mu_3}, \dots, x_M = \frac{\mu_1}{\mu_M}. \quad (3.5)$$

Transportlīdzekļa apkalpes intensitāte būs atkarīga gan no sākotnējā ātruma, šķērsojot ceļa posmu, gan arī no transportlīdzekļu izkārtojuma blīvuma šajā posmā.

Buzena algoritms ir viena no visefektīvākajām slēgtā tīkla analīzes metodēm, kā parādīts tabulā 3.1. Tā nosaukums atspoguļo metodi, kas izvērtē normalizēšanas konstanti  $G(N)$  no  $F_i(k_i)$ , kas ir analoga divu varbūtību funkciju konvolūcijai. Buzena matricu  $i$ -tajā rindā un  $j$ -tajā kolonnā var aprēķināt, izmantojot formulu [16]

$$g(i, j) = g(i, j-1) + g(i-1, j)x_j, \quad (3.6)$$

3.1. tabula

Buzena matrica

Nr.	$x_1 = 1$	$x_2 = 0.776$	$x_3 = 0.644$	$x_4 = 0.568$	$x_5 = 0.514$
0	1	1	1	1	1
...	...	...	...	...	...
9	1	4,111	10,630	22,535	42,284
10	1	4,190	11,038	23,835	45,569
...	...	...	...	...	...
19	1	4,443	12,377	28,432	57,991
20	1	4,447	12,414	28,562	58,370

kur  $G(N)$  – normalizēšanas konstante, kas iegūta, vai nu saskaitot un pielīdzinot vienam visas varbūtības, vai kas iegūta ar Buzena metodi. Dabiski, nav nekādu ierobežojumu pieprasījumiem (transportlīdzekļiem)  $i$ -jā intervālā.

Vidējais pieprasījumu (transportlīdzekļu) skaits  $i$ -jā intervālā:

$$E(n_i) = \sum_{K=1}^M (x_i)^K \frac{G(N-K)}{G(N)}. \quad (3.7)$$

Tabula 3.2 parāda vidējo pieprasījumu skaitu:

3.2. tabula

Vidējais transportlīdzekļu skaits

Klientu skaits	Zonas				
	1	2	3	4	5
N = 10	6	1	1	1	1
N = 20	15	2	1	1	1

*Ceļu satiksmes nestacionārā analīze transportlīdzekļu bezvadu tīkla caurlaides spēju novērtēšanai*

Ceļmalas piekļuves punktu var pielietot gar ceļmalu, lai nodrošinātu pārvietojošos lietotāju vairākkārtēju piekļuvi heterogēnai interneta sistēmai. Šim iemeslam var izmantot WiFi tehnoloģiju.

Galvenais jautājums, izmantojot Bezvadu tehnoloģiju, ir saistīts ar tīkla caurlaides spēju evolūciju. Caurlaide atkarīga ne tikai no bezvadu kanāliem un datu pārraides ātruma, bet arī no Piekļuves punkta klientu skaita (transportlīdzekļi PP darbības zonā).

Konkurējošo transportlīdzekļu skaits pārkļājuma zonā ir atkarīgs no transportlīdzekļa ātruma, to blīvuma uz ceļa un no ceļa satiksmes režīma.

Pastāv divi režīmi – stacionārais režīms, kuru var aprakstīt kā transportlīdzekļu plūsmu uz gariem galvenajiem ceļiem un nestacionārais režīms. Par nestacionārā režīma transportlīdzekļu sadalījuma analīzes pamatu var ņemt H. Kobaishi darbu [18, 19].

Pārbaudes labad, stacionārajam režīmam var izmantot divu pakāpju sistēmu. Joslas platuma vienādojums divu pakāpju tīklam:

$$X_1 = 1, X_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (3.8)$$

$$G(N) = \frac{N_2^{N+1} - 1}{X_2 - 1}. \quad (3.9)$$

Izejas plūsma ir vienāda ar ieejas plūsmu, un saskaņā ar šo plūsmas balansa likumu ir iespējams uzrakstīt vienādojumu. Transportlīdzekļu skaits tiek aprēķināts sekojoši:

$$n = \frac{N + 1}{(1 - X_2^{N+1})} - \frac{1}{(1 - X_2)} \quad (3.10)$$

Salīdzināsim iegūtos rezultātus ar difūzās tuvināšanas rezultātiem (skatīt 3.3. tabula):

3.3. tabula

Salīdzinošie rezultāti

p	Difūzijas aproksimācija	Cikliskais rindu modelis
0,75	8 vehicles	7,485 ≈ 8 vehicles
0,95	6 vehicles	5,51 ≈ 6 vehicles

Tabula 3.3 parāda, ka difūzijas aproksimācija ir pareiza.

*Salīdzinošās analīzes divi aprēķini*

Vidējais pieprasījumu (transportlīdzekļu) (3.10) skaits  $i$ -tajā intervālā stacionārajam režīmam ir parādīts 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Vidējais pieprasījumu skaits stacionārajā režīmā

Transportlīdzeklis (N)	1. zona	2. zona 2	3. zona	4. zona	5. zona
Ielāde 0,95					
10	5,81	1,03	0,92	0,76	0,69
20	15,69	1,65	1,04	0,85	0,76
Ielāde 0,75					
10	4,36	0,77	0,69	0,57	0,52
20	11,77	1,24	0,78	0,64	0,57

3.5. tabula aprēķina automašīnu skaitu katrā apakšzonā PP saskaņā ar  $x$   $y$  no laika, kā arī saskaņā ar divām ielādētajām vērtībām 0,75 un 0,95.

3.5. tabula

Vidējais pieprasījumu skaits nestacionāram režīmam

Transportlīdzeklis (N)	1. zona	2. zona	3. zona	4. zona	5. zona
Ielāde 0,95					
10	5,25	1,03	0,92	0,76	0,69
20	14,56	1,65	1,04	0,85	0,76
Ielāde 0,75					
10	3,94	1,03	0,917	0,761	0,689
20	10,91	1,24	0,78	0,64	0,57

3.4. un 3.5. tabula parāda laiku, kad transportlīdzekļu sadales process kļūst stacionārs. Balstoties uz šo darbu, sadales process kļūst par stacionāru, izmantojot eksponenta likumu.

#### *Erlanga sadalījums transportlīdzekļiem*

Šie sākotnējie dati ļauj veikt vidējo automašīnu skaitu novērtējumu uz ceļa. Pieņemsim, ka automašīnu ienākošā plūsma ir ar Erlanga  $k-1$ -kārtas sadalījumu, un  $k = 5$ . Transportlīdzekļu apkalpošanas laika vienība uz ceļa  $z$  ir nejaušs rādītājs, kas tiek izplatīts ar eksponenciālo likumu ar parametru  $q_z$ .

Lai novērtētu transportlīdzekļu skaitu, kas atrodas ceļa uzturēšanas zonā, nepieciešams izmantot modeli  $E_k / M / 1$ . Saskaņā ar [22] klientu skaits apkalpošanas sistēmā, t. i., vidējais automašīnu skaits ceļa posmā:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho^k}, \quad (3.11)$$

kur  $\rho$  – sistēmas slodzes koeficients.

Mūsu gadījumā:

$$\rho = \frac{\lambda_2}{q_z}. \quad (3.12)$$

Turklāt  $r_0$  – ir raksturvienādojuma risinājuma sakne, kas atrodas apgabalā  $\{0,1\}$ .

$$q_z \cdot r^{k+1} - (k \cdot \lambda_2 + q_z)r + k\lambda_2 = 0. \quad (3.13)$$

Dotajā situācijā  $k = 5$ . Ņemot vērā to, ka  $r_0$  ir salīdzināms ar  $\rho$ , tad risinājums (3.13) priekš  $r_0$  tiek veikts iteratīvi.

3.9. tabulā tiek atspoguļoti vienādojumu risinājumu rezultāti dažādiem slodzes koeficientiem  $\rho$ , kā arī automašīnu skaita rezultatīvie rādītāji ceļa posmā, kas ietilpst bāzes stacijas apkalpošanas zonā.

3.9. tabula

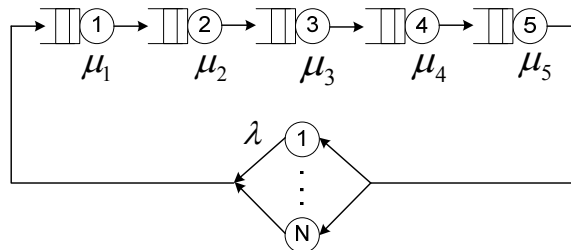
Automašīnu skaita rezultatīvie rādītāji ceļa posmā

$\rho$	0,25	0,5	0,6	0,75	0,8	0,9
$r_0$	0,56	0,76	0,84	0,88	0,9	0,92
$L = N$	0,265	0,67	1,031	1,588	1,954	2,64

### Cikliska rindošanas tīkla modeļa analīze

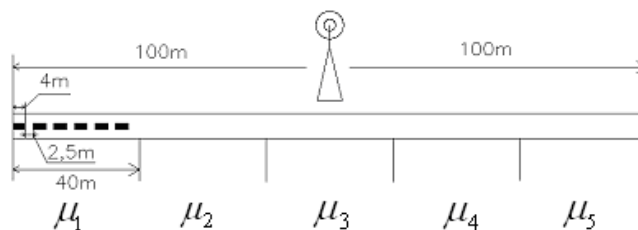
Transportlīdzeklis iziet visus  $M$  posmus pakāpeniski, bet transportlīdzekļu skaits bāzes stacijas darbības zonā ir  $N$ .

Šādu sistēmu var atspoguļot kā slēgtu cikliska tīkla sistēmu masveida apkalpošanai ar  $M$  apkalpošanas ierīcēm,  $N$  pieteikumiem un eksponenciāli pārdalītu apkalpošanas laiku [12, 14]. Pieteikuma apkalpošanas intensitāte  $i$ -tajā zonā ir vienāda ar  $\mu_i$  (skatīt 3.2. att.).



3.2. att. Slēgta cikliska sistēma

Tad ir zināma  $N \leq \min_i m_i$ . izlīdzinošās sadales galvenā forma, ja posma numurs ir pietiekami liels, un ja mēs pieņemam, ka  $\min_i m_i \geq 1$ . Kā parādīts 3.3. att., mūsu posma pirmajā apakšzonā var atrast 6 transportlīdzekļus. Sekojoši, katrā apakšzonā nebūs vairāk par 6 mašīnām, citviet arī  $m_i \leq m_1 \leq 6$ . Ņemot vērā iegūtos praktiskos rezultātus, tiks aprēķināta bāzes stacijas darbība mainīgam klientu skaitam. Mūsu gadījumā 200 metru garā bāzes stacijā darbības zonas ir sadalītas 5 zonās, 40 metru katrā, ar trešo zonu vistuvāk stacijai.



3.3. att. 200 metru gara bāzes stacija

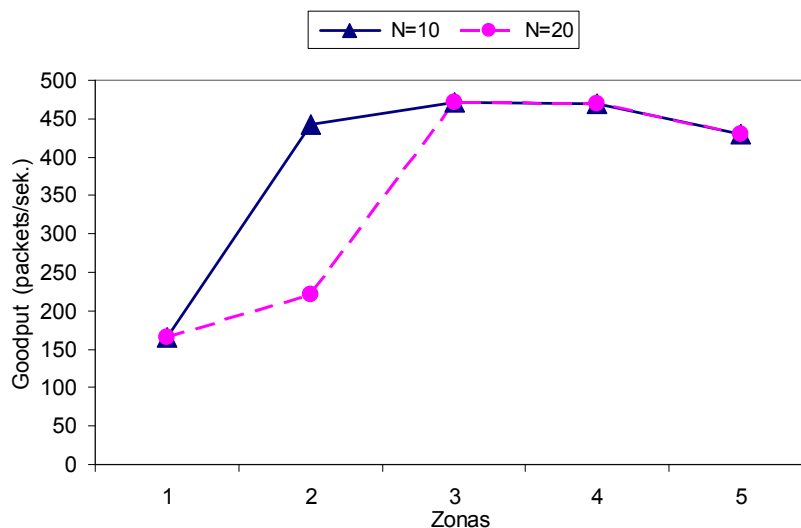
Ir pieņemts, ka  $N$  transportlīdzekļi šķērso bāzes stacijas darbības zonu. FTP caurlaides temps atkarīgs no transportlīdzekļu ātruma un attiecības pazemināšanās pret transporta līdzekļa ātrumu. Katrs transportlīdzeklis apakšzonā  $i$  var apmainīties ar bāzes staciju ar intensitātes  $\lambda_i$  paketēm. Izmantojot  $M/M/1//Ni$  modeli katrai apakšzonai  $i$ , mēs iegūstam iespējamo bāzes stacijas dīkstāvi:

$$P_0(i) = \left[ \sum_{k=0}^{E(n_i)} \left( \frac{\lambda_i}{\beta_i} \right)^k \frac{E(n_i)!}{(E(n_i) - k)!} \right]^{-1}. \quad (3.14)$$

Ņemot vērā transportlīdzekļu sadali pa bāzes stacijas klienta pakalpojuma zonas apakšzonām, ir iespējams veidot modeli reālai datu apmaiņas tempa evolūcijai starp objektu un bāzes staciju. Ar pirmo mezglu mēs pārstāvam transportlīdzekļus, kas veido paketes apstrādei bāzes stacijā.

Atkarībā no transportlīdzekļa attāluma no bāzes stacijas paketes apstrādes temps tajā un paketes apstrādes temps bāzes stacijā būs atšķirīgs. Datņu sūtīšanai parastais pieņemtais paketes garums ir  $l_p = 1500$  baiti.

Atkarībā no transportlīdzekļa attāluma līdz bāzes stacijai, datu apstrādes temps un datu apstrādes intensitāte bāzes stacijā atšķirsies ar eksponenciālu transportlīdzekļu sadalījumu, kā parādīts 3.4. att.

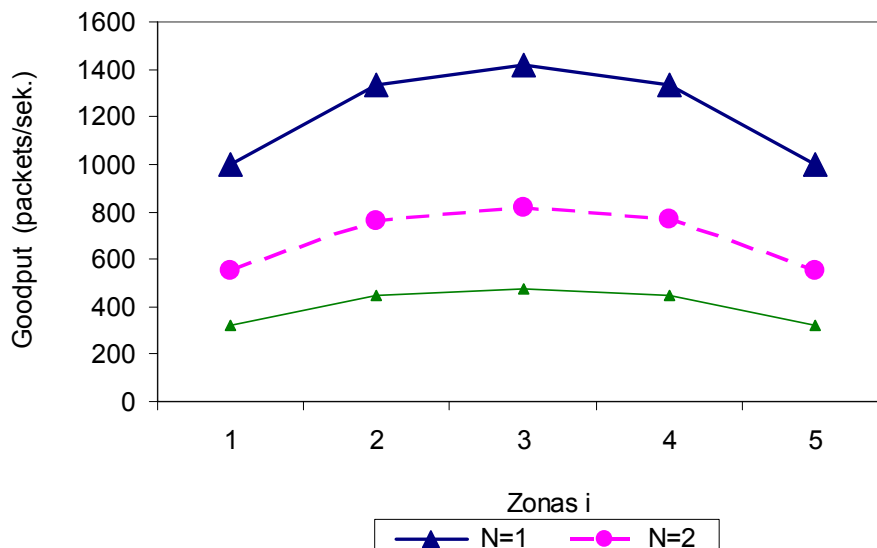


3.4. att. Caurlaides spēja 10 un 20 transportlīdzekļu kustībai

Zonas apkalpojošās stacijas caurlaides spēja būs:

$$\eta_i = (1 - P_0(i))\beta_i. \quad (3.15)$$

3.5. att. parāda tīklu caurlaides spēju pēc Erlanga transportlīdzekļu sadalījuma un varbūtību.



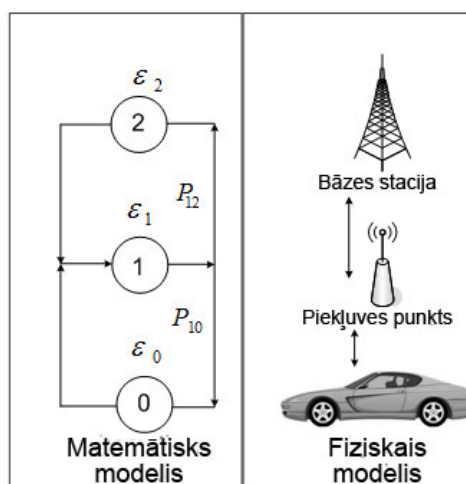
3.5. att. Caurlaides spēja bezvadu tīklā ar vienu maršrutētāju atkarībā no attāluma priekš 802.11n

Balstoties uz šiem datiem, var secināt, ka bāzes stacijas caurlaide ir piesaistīta transportlīdzekļu satiksmes parametriem, kā arī datu pārraides sistēmas parametriem. Aprēķinot caurlaidi, tika ņemts vērā iespējamais transportlīdzekļu skaits apakšzonā.

*Darbības izvērtēšana divu pakāpju transportlīdzekļu tīklā*

Datu pārraide no transportlīdzekļa uz lietotāja serveri un atpakaļ, kā arī komunikācijas fiziskā realizācija ir bezvadu tīkls. Pirmajā posmā dati tiek pārraidīti no mobilā objekta līdz tuvākajam PP ar protokolu 802.11n.

Tajā pašā laikā attālumam no objekta līdz PP ir jābūt mazākam par 200 metriem. Pēc tam no PP dati tiek pārraidīti attālai bāzes stacijai ar protokolu LTE. Šis variants nodrošina datu pārraidi attālumā līdz vairākiem kilometriem. Tādējādi pētījuma objekts ir bezvadu tīklu divu pakāpju sistēma. Šo objektu var izpaust kā divrangu tīkla modeli, kā tas ir atspoguļots 3.6. att. Nulles mezgls modelē datu pārraidi no mobilā objekta ar datu pārraides intensitāti  $\varepsilon_0$ .



3.6. att. Divrangu tīkla modelis

Otrais mezgls stimulē PP bezvadu tīklu, nodrošinot datu saņemšanu un pārraidi no mobilo objektu nulles mezgla. Datu apstrādes intensitāte ir vienāda ar  $\varepsilon_1$ .

$$\varepsilon_1 = \beta_i, \quad (3.16)$$

kur  $\beta_i$  – pārraides novērtējums bezvadu tīklā 802.11n atkarībā no attāluma līdz bāzes stacijai, kā tas parādīts 5.3.–5.5. att.

Atkarībā no transportlīdzekļa attāluma līdz bāzes stacijai, datu apstrādes temps un apstrādes intensitāte bāzes stacijā būs dažāda. Eksperimentāli tika aprēķināta bāzes stacijas caurlaide ar 1500 baitu lielu paketi datņu pārvešanai.

Savukārt PP, papildus bezvadu tīklam ar LTE, ir savienots arī ar tālvadības bāzes staciju. Otrā mezgla datu pārraides intensitāte ir pielīdzināma  $\varepsilon_2$ .

Datu pārraides maršruts tiek veidots, ejot no nulles mezgla līdz pirmajam, un pēc tam līdz otrajam, ja tiek pētīta datnes pārraide no automašīnas līdz bāzes stacijai. Bāzes stacija pārraida apstiprinājumu ACK pakešu pārraidei. Šajā gadījumā pārraides vidējais laiks atšķirsies: laika lielāka daļa tiks patērēta datu pārraidei, šis laiks ir apzīmēts ar  $E(t_i)$ .

Savukārt ACK pārraide aizņems mazāku laiku, kurš apzīmēts ar  $E(t_0)$ . Tādējādi datu apstrādes vidējais laiks pirmajā mezglā būs:

$$E(t_1) = \frac{E(t_i) + E(t_0)}{2} \quad (3.17)$$

Par katru uz augšu pārraidīto paketi saņemam apstiprinājumu no ACK. Šajā gadījumā apstrādes intensitāte  $\varepsilon_0$  mezglā būs:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{E(t_1)} \quad (3.18)$$

Modelī tiek izmantota vērtība  $N$ , kas nosaka datu pārraides iniciatoru skaitu, kuri sacenšas savā starpā par resursu pārdali 1. un 2. mezglā. Mūsu situācijā tas ir automašīnu skaits PP darbības zonā. Šādā gadījumā, trīs mezglu un divpakāpju modelī Goodput var izpausties, izmantojot formulu (3.27). Šajā formulā parametriem  $\alpha$ ,  $X_1$  un  $X_2$  tiek noteiktas vērtības (3.19).

Piedāvāta modeļa Goodput novērtējuma problēma ir noteikt vērtību  $N$  - automašīnu skaitu AP darbības zonā. Turklāt bezvada tīklā ar standartu 802.11n datu pārraides ātrums ir atkarīgs no attāluma starp PP un automašīnu. Parasti terminālu skaits katrā transporta bezvadu tīklā ir augsts [26, 27, 29, 30]. Joslas platuma vienādojums divrangu tīklam:

$$X_1 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1 P_{10}}; X_2 = aX_1; a = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} P_{12}. \quad (3.19)$$

$\varepsilon_2$  intensitāte:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{t}, \quad (3.20)$$

$$t = \frac{l_p}{V_f}, \quad (3.21)$$

kur  $V_f$  – efektīvs datu pārraides temps LTE ar datu pārraides maksimālo tempu  $V_n$ . Faktiskais ātrums tiek noteikts šādā veidā:

$$V_f = \frac{V_n}{2}. \quad (3.22)$$

Aprēķināšanas sākuma punkts ir normalizācijas funkcija  $G(N)$ , kas ir izvēlēta pēc principa – varbūtību summa ir viens.  $p(n_0, n_1, n_2)$ , kur  $n_i$  vektorā  $\bar{n} = (n_1, n_2, n_3)$  ir pieprasījumu skaits  $i$ -tajā mezglā. Iegūtais vienādojums  $G(N)$  aprēķināšanai izskatās šādi:

$$G(N) = \sum_{\bar{n}} \prod_{i=1}^3 (X_i)^{n_i}, \quad (3.23)$$

$$\bar{n} \in \left\{ (n_1, n_2, n_3) / \sum_{i=1}^3 n_i = N, n_i \geq 0 \forall_i \right\}. \quad (3.24)$$

kur  $N$  – transportlīdzekļu skaits.

Izpētītā divrangu transporta tīkla funkcija izskatās šādi:

$$G(N) = \frac{1}{1-a} \sum_{j=0}^N X_1^j (1-a^{j+1}). \quad (3.25)$$

Divrangu caurlaide  $\eta$  tiek definēta kā apstrādāto pieprasījumu skaits vienā laika vienībā. Pabeigtais uzdevums tiek izlikts caur ievades/izvades apakšsistēmu, un nekavējoties caur to tiek ielādēts jauns uzdevums. Pieprasījumu trūkumu varbūtība  $i$ -tajā mezglā būs:

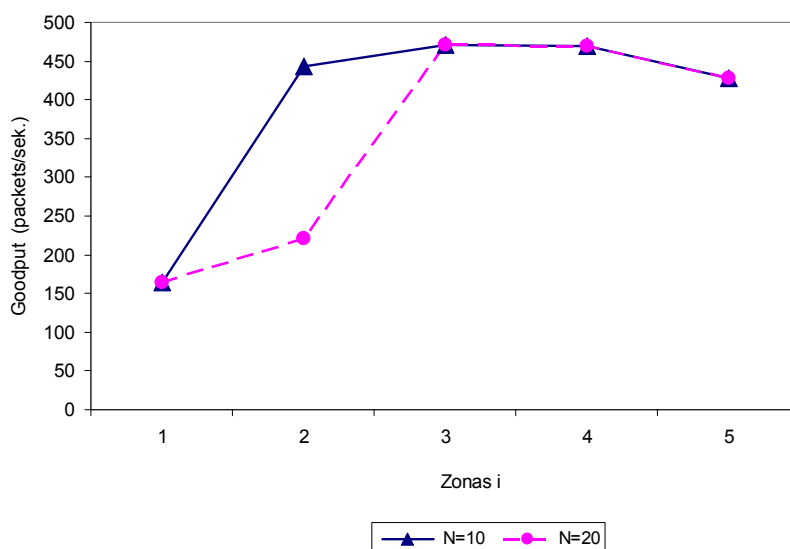
$$p\{n_i = 0\} = \frac{G(N) - X_i G(N-1)}{G(N)} \quad (3.26)$$

Rezultāts ir:

$$\eta = P_{10} \varepsilon_1 (1 - p\{n_i = 0\}) \quad (3.27)$$

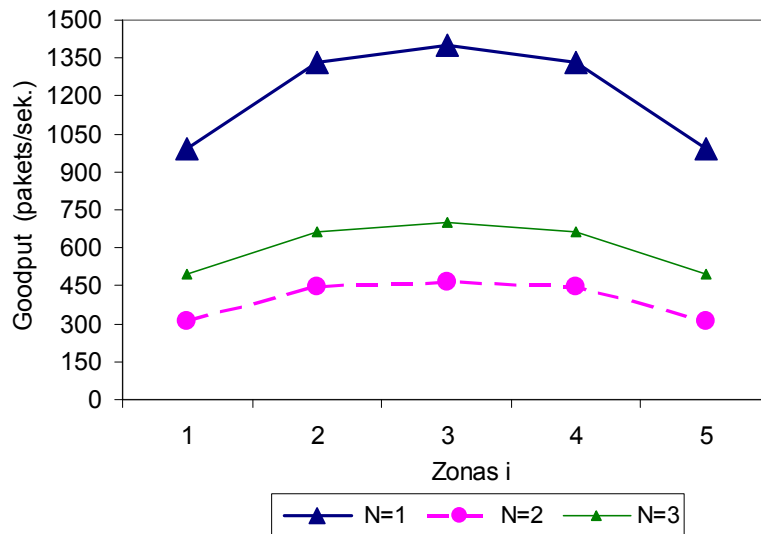
Pēc vienādojuma (3.27) var aprēķināt katra segmenta  $\eta$ . Tīkla darbība ietekmē apstiprinājuma ACK pārraides varbūtību, jo, pieaugot ACK, pieaug arī pakešu skaits vienā laika vienībā.

Ja transportlīdzekļu sadale ir eksponenciāla, sniegums būs ar sekojošām varbūtībām  $P_{10} = 0,999$ ,  $P_{12} = 0,001$  (skatīt 3.7. att.):



3.7. att. Caurlaides spēja divrangu tīkla modelim ar  $P_{10} = 0,999$ ,  $P_{12} = 0,001$  priekš  $802.11n$  un LTE

3.8. att. parāda trīs mezglu slēgtā tīkla caurlaides produktivitāti ar varbūtībām  $P_{10}$  un  $P_{12}$ , pielietojot Erlanga transporta sadalījumu:



3.8. att. Caurlaides spēja divrangū tīkla modelim ar  $P_{10} = 0,999$ ,  $P_{12} = 0,001$  priekš 802.11n un LTE Erlanga sadali

#### Ceturtnā nodaļa

Iepriekšējo pētījumu rezultāti tika turpināti analītiskā modeļa veidošanas virzienā ne tikai mobilo vienību – PP snieguma izvērtēšanā, bet arī tālāk no PP uz tālvadības serveri.

Šajā gadījumā adekvāts modelis var būt slēgts gaidīšanas sistēmu modelis, kas sastāv no diviem posmiem. Sākotnējais mezgls simulē mobilo vienību terminālus; tam ir tiešs savienojums ar PP modeļiem, izmantojot kontrolieri un maršrutētāju, kas savieno PP ar tālvadības serveri, kurš simulē tīkla modeļa trešo mezglu.

Lai noteiktu modeļa parametrus, tādus kā apstrādes intensitāte mezglos un pārejas varbūtība, ir nepieciešams novērtēt prototipa fizikālos parametrus. Lai izveidotu šādu prototipu, tika izmantots Cisco aprīkojums. 4.1. tabulā parādīts mūsu eksperimenta tīkla iestatījums:

4.1. tabula

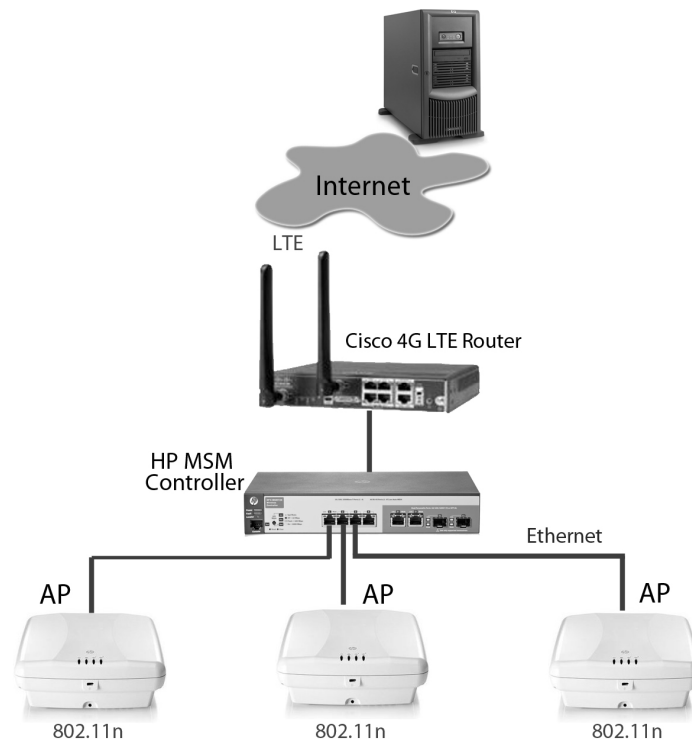
Tīkla konfigurācija

Nosaukums	Parametri
Protokols	IEEE 802.11n
Kanāla frekvence	20 MHz
Frekvence	2,4 GHz
Raidītāja jauda	17 mW
MIMO pārraides iestatījumi	Auto
OFDM aizsardzības intervāls	0,8 $\mu$ s

Šis prototips ir kā "izmēģinājuma stends" pētījumam par caurlaides atkarību no transportlīdzekļa ātruma, kamēr efektīvā datu pārraides tempa mērījumi sedz, ne tikai pirmo sistēmas "mobilās vienības – PP" diapazonu, bet arī datu pārraides kanālus no PP uz lietotāja tālvadības serveri.

Ir redzams, ka caurlaides spēja būs lielā mērā atkarīga no datu pārraides tempa no AP uz serveri, t. i., no datu pārraides īpašībām. Tādam pētījumam tika izmantots CISCO C819 M2M maršrutētājs ar diviem izejas kanāliem. Viens kanāls nodrošina datu pārraidi GPRS

režīmā. Otrs kanāls, kuram raksturīgs augsts datu pārraides temps, izmanto LTE režīmu – nākamās paaudzes mobilo sakaru režīmu. Shēma "izmēģinājuma stends" ir parādīta zemāk (skatīt 4.1. att.):



4.1. att. Divrangu tīkla modelis

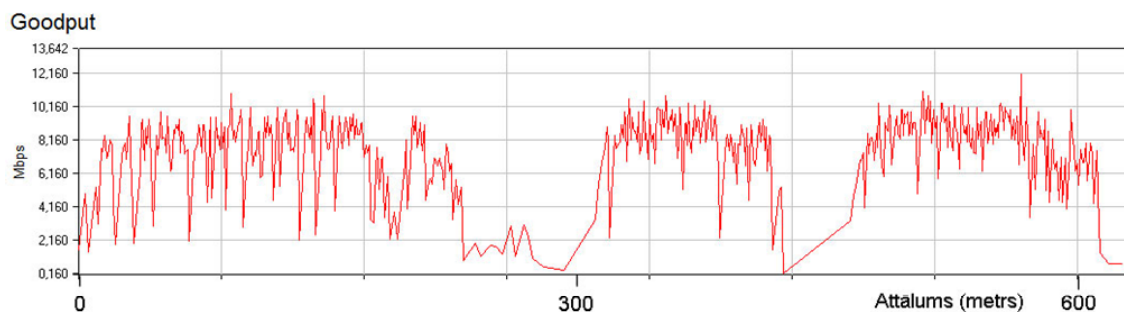
Pirmais pētījums parādīja, ka datu pārraides ātrums var krasi atšķirties no datiem, kas iegūti iepriekš un sedz sistēmas "mobilā vienība – PP" pirmo diapazonu. To var izskaidrot ar kavējuma faktu otrajā diapazonā starp tīklu un serveri. Kā bija sagaidāms, caurlaides lielākā vērtība ir pārnesei uz LTE kanālu.

Praktiski tika noteikts, ka pārraides temps ir atkarīgs no transportlīdzekļa ātruma. Pie zemiem ātrumiem divrangu tīkla caurlaide ir pietiekami augsta, kamēr ātruma paaugstināšana izraisa ievērojamu caurlaides samazinājumu. Šajā situācijā daudzi sīkumi ir atkarīgi no datu pārraides tempa pielāgošanas metodes bezvadu tīklā.

Šī eksperimenta galvenais uzdevums ir noteikt datu pārraides ātrumu saskaņā ar attālumu līdz bāzes stacijai, kā arī vajadzētu atrisināt otru uzdevumu, kurā interneta ātrumam vajadzētu būt fiksētam saskaņā ar  $N$  kustīgiem objektiem, kuri ir izvietoti bāzes stacijas bezvadu tīkla pārklājuma zonā.

Lai veiktu šādu pētījumu, būtu jāizmanto IxChariot programma. Datne tiek sūtīta caur FTP protokolu caur bāzes stacijām no datora uz tālvadības serveri, kas pārvietojas kopā ar bāzes staciju. FTP protokols tiek lietots, lai pārraidītu lielus datu apjomus. Eksperimenta laikā programmā tiks izmērīts faktiskais caurlaides ātrums caur FTP protokolu, lai noteiktu datu pārraides ātrumu pie noteikta transportlīdzekļa ātruma.

Pastāv matemātiskās formulas, lai aprēķinātu paketes pārraides daudzumu sekundē, kā arī iespējams iegūt līknes, kas parāda kustībā esoša objekta optimālo ātrumu, lai saņemtu vairāk paketes. Eksperiments tika veikts izmantojot piekļuves punktu katrā virzienā ar 100 metru lielu attālumu no kontroliera saskaņā ar principu, ka mēs izmantojam 3 piekļuves punktus, un klients kustās ar ātrumu 20 km/st. Vajadzētu pieminēt, ka šiem eksperimentiem nav pilnvarotu kontrolieru. Goodput caurlaidība un izmantotais laiks norāda eksperimentālo mērījumu laiku (skatīt 4.2. att.).



4.2. att. Divrangu caurlaide ar 4G un 802.11n pie ātruma 20 km/st.

Izpētot 4.2. att., ir redzams, ka saglabātais ātrums ir nedaudz mazāks, nekā gaidāms, taču tas atspoguļo reālo interneta ātrumu uz serveri.

### Piektā nodaļa

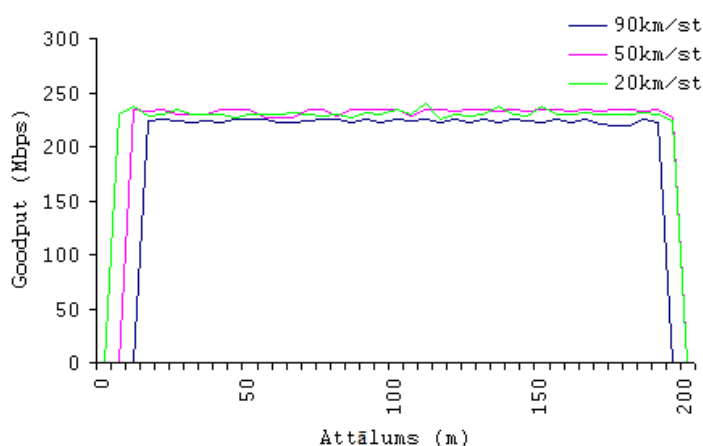
Tīkla simulators ir programmatūra vai aparatūra, kas prognozē tīkla darbību bez faktiskā tīkla klātbūtnes.

Precīzākus datus par tīkla veiktspēju var iegūt, veicot mērījumus reālajā vidē. Bezvadu tīklu veiktspējas vērtējums reālā ceļa vidē ir sarežģīta procedūra un prasa daudz resursu, nepieciešamo aprīkojumu, bezvadu LAN, transportlīdzekļus un to autovadītāju skaitu, kā arī bezvadu uztvērējus. Tīkla veiktspēju var novērtēt, izmantojot dažādus modelēšanas rīkus, kas izstrādāti virtuālajā vidē savlaicīgi sagatavotu scenāriju modelēšanai. Neskatoties uz to, ka modelēšanas līdzekļi ir pietiekami, tiem ir virkne ierobežojumu, kas tiks analizēti šajā sadaļā.

Lai pārbaudītu eksperimentālos un analītiskos rezultātus, kuri aprakstīti iepriekšējās sadaļās, šajā sadaļā tiks lietots Estinet 8.0 modelēšanas rīks, kas dod iespēju vienlaikus modelēt ceļa satiksmi un bezvadu tīklu darbību.

Pirms modelēšanas Estinet 8.0 vidē, tika rūpīgi analizēti citi modelēšanas rīki. Visi šie rīki tiek izmantoti akadēmiskajā vidē. Vairumam modelēšanas rīku nepieciešamas īpašas zināšanas un pieredze, lai būtu iespēja vadīt un kontrolēt modelēšanu.

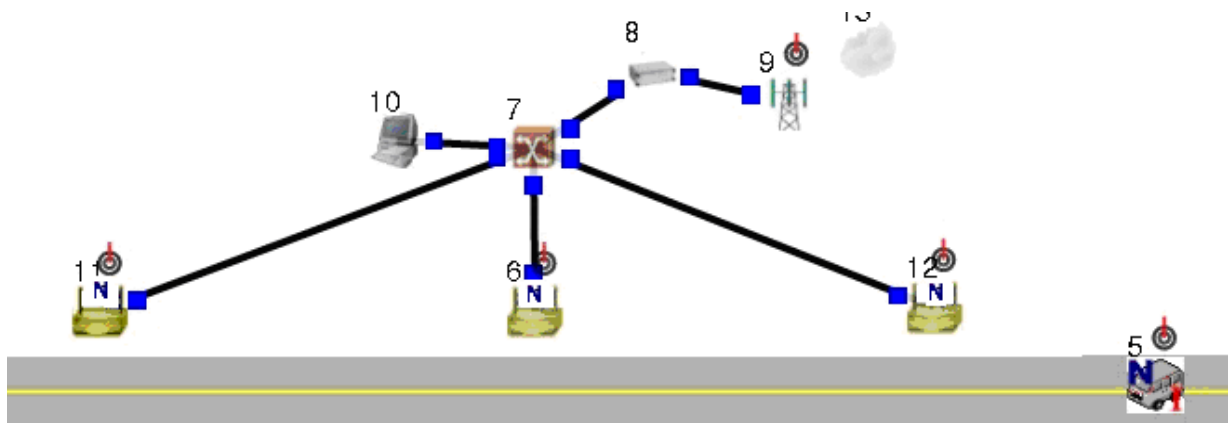
5.1. att. parādīts imitējošais grafiks bezvadu tīkla veiktspējai protokolam 802.11n ar kustīgiem mobilajiem termināliem pie ātruma 20 līdz 90 km/st.



5.1. att. Simulēšanas rezultāti ar trīs PP priekš 802.11n

Aplikācijas līmenī caurlaides spēja ir mazāka nekā datu pārraides maksimālais ātrums. No 5.2. att. redzams, ka ar modelēšanas palīdzību nav iespējas modelēt datu pārraides ātruma adaptācijas metožu iedarbību bezvadu tīklā. Imitācijas modelī nav redzams datu pārraides

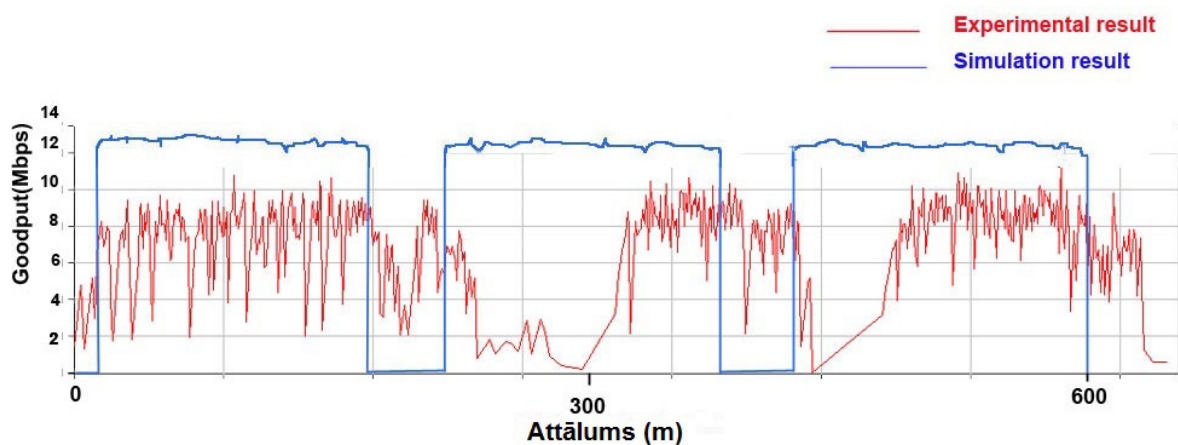
ātruma samazinājums pie atvienošanas no PP, kā tas bija noteikts izmēģinājuma stenda eksperimentālajos mērījumos.



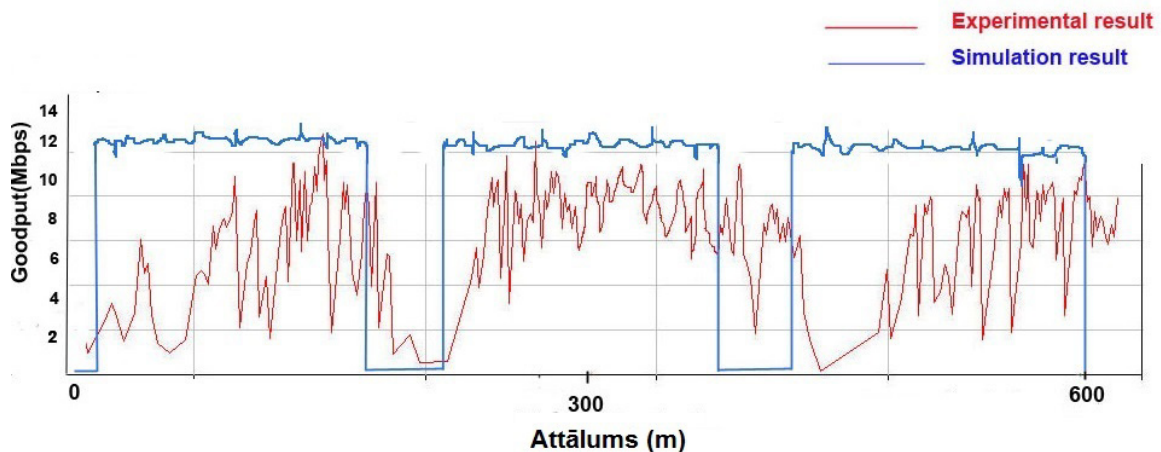
5.2. att. Divrangu tīkla modelis

5.1. att. parādīts divrangu imitācijas modelis bezvadu tīklā ar trīs AP un bāzes staciju. Modelī tiek izmantots dažāds skaits mobilo klientu (10 un 20 automašīnu), kas pārvietojas PP virzienā ar ātrumu 20–90 km/st. Ar šo modeli tiek iegūts šāds tīkla veiktspējas grafiks [74, 76, 77].

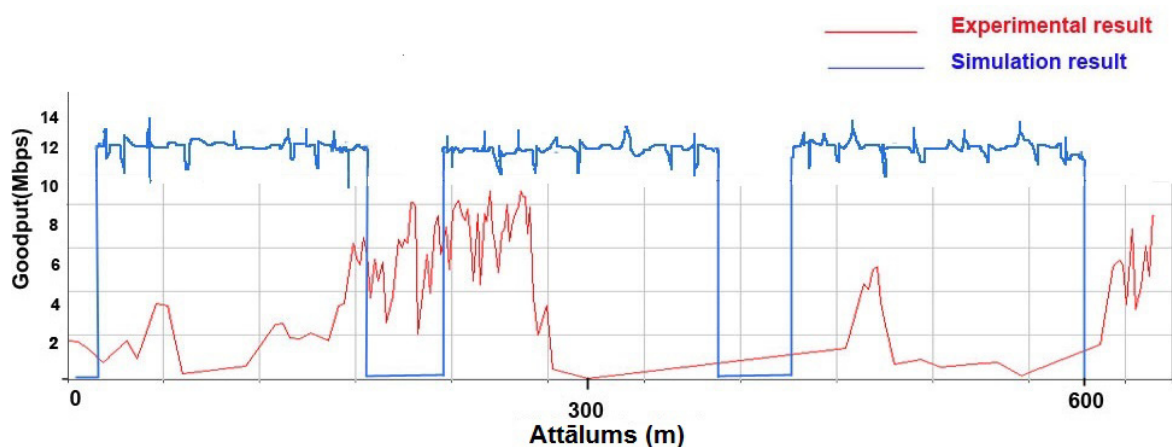
No modelēšanas rezultātiem var secināt, ka jebkuras ātruma izmaiņas ietekmē datu pārraides ātrumu un ietekmē kopējo bezvada tīkla veiktspēju. Situācijās, kad tīkla klienti pāriet no viena PP uz citu PP, notiek straujš datu pārraides samazinājums. Tāpat 5.3. att. redzams, ka pie dažādiem mobilo klientu kustības ātrumiem (20–90 km/st.), notiek strauja datu pārraides samazināšanās. Tas saistīts ar to, ka pie pārejas uz jaunu PP, notiek klienta tīkla autentifikācija. No praktiskajiem mērījumiem, kuri bija atspoguļoti sadaļā, redzams, ka Goodput samazinājums ir atkarīgs no mobilā klienta kustības ātruma, pie zemiem mobilā klienta kustības ātrumiem saikne ar PP netiek pārtraukta.



5.3. att. Goodput salīdzinājums ar eksperimentālajiem un simulācijas rezultātiem pie 20 km/st.



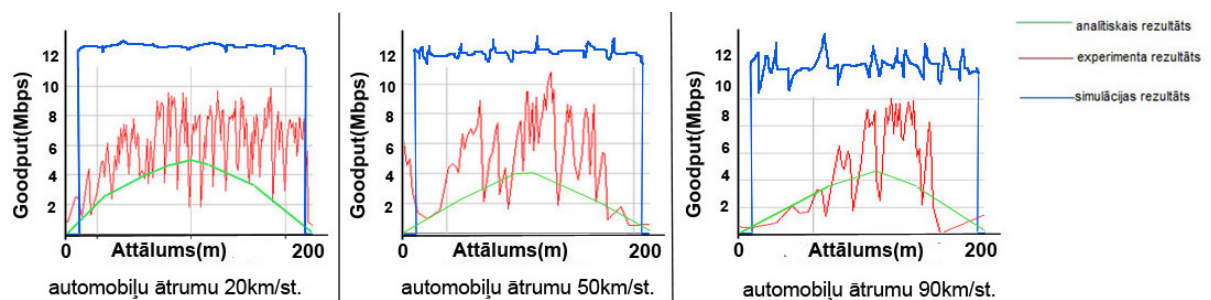
5.4. att. Goodput salīdzinājums ar eksperimentālajiem un simulācijas rezultātiem pie 50 km/st.



5.5. att. Goodput salīdzinājums ar eksperimentālajiem un simulācijas rezultātiem pie 90 km/st.

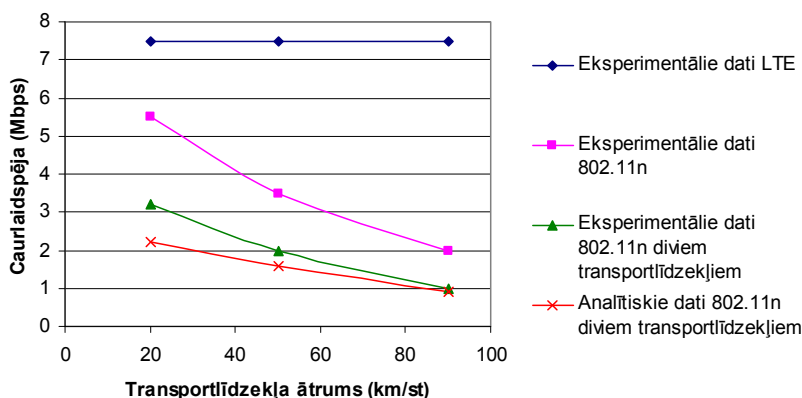
Salīdzinot Goodput, kas iegūts no izmēģinājuma stenda, ar modelēšanas rezultātiem, redzams, ka izmērītā vidējā caurlaides spēja (Goodput) ir zemāka par 20–50 % no bezvadu tīkla imitācijas modeļa, un Goodput modelēšana ir pastāvīga pie visiem kustības ātrumiem, atšķirībā no izmēģinājuma stenda. Šīs atšķirības var skaidrot ar to, ka izvēlētais modelēšanas instruments neļauj uzstādīt bezvadu tīkla savienošanās ātruma adaptācijas algoritmu.

No mērījuma rezultātiem redzams, ka Goodput pārslēgšanās ātrums ir vidēji 1 Mbit/s, un pie pārslēgšanās no viena PP uz citu lietotāju, simulācijas savienojums ar serveri netiek saglabāts. 5.6. att. parāda simulēšanas un eksperimenta rezultātus ar analītiski iegūtiem rezultātiem pie divu transportlīdzekļu ātruma stāvokļa.



5.6. att. Goodput salīdzinājums ar eksperimentālajiem, simulācijas un analītiskajiem rezultātiem pie 20–90 km/st.

5.7. att. parāda eksperimentālo un analītisko rezultātu salīdzinājumu. Rezultāti rāda, ka analītiskie rezultāti ir par 10 % mazāk praktiski



5.7. att. Caurlaidspēja atkarībā no pārvietošanās ātruma

Tādējādi, šis analītiskais modelis caurlaidspējas noteikšanai, ir patiess. Tīkla caurlaidspēja ir atkarīga no klienta (transportlīdzekļa) kustības ātruma. Salīdzinot simulācijas un eksperimentālos rezultātus ar analītiskā ceļā iegūtiem rezultātiem, ir skaidrs, ka analītiskais divrangu modelis ir īsts. Sekojoši, šo modeli var izmantot, lai noteiktu transporta divrangu tīkla darbību.

## PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Veicot eksperimentālo daļu, rezultātā tika noteiktas sekojošas likumsakarības:

- veiktspējas atkarība no divrangu tīkla standartiem LTE un 802.11n,
- veiktspējas atkarība no divrangu tīkla standartiem GPRS un 802.11n,
- divrangu tīkla darbības atkarība no mobilo klientu pārvietošanas ātruma,
- divrangu tīkla darbības atkarība no mobilo klientu skaita.

Pamatojoties uz šo analīzi, tika izstrādāti matemātiskie modeļi divrangu bezvadu tīklu veiktspējas novērtēšanai. Šie modeļi izmanto satiksmes plūsmas un datu pārraides sistēmas divrangu bezvadu tīkla īpašības.

Darbā tiek atspoguļoti eksperimentālie dati par informācijas pārraides ātrumu bezvadu tīklā, kas savienots ar attālināto serveri. Pamatā ir kustīgo objektu mijiedarbība ar 802.11n standarta WiFi tīkla piekļuves punktu un turpmākā datu plūsmas pārraide mobilā tīkla GPRS un LTE kanālos.

Šajā darbā tika izstrādāti sekojoši modeļi, kurus var pielietot tīkla veiktspējas novērtēšanai dažādam transportlīdzekļu skaitam:

- cikliski noslēgtais modelis ar eksponenciālo transporta sadalījumu;
- cikliski nenaslēgtais modelis ar Erlanga transporta sadalījumu;
- divrangu transporta tīkla modelis ar eksponenciālo un Erlanga transporta sadalījumu.

Šajā darbā tiek analizēti gan modeļu eksperimentālie rezultāti, gan to simulācijas rezultāti, pielietojot Estinet. Rezultāti liecina par to, ka analītiskie modeļi ir korekti. No tā izriet, ka šos piemērus var izmantot tīklu veiktspējas novērtēšanai.

Pamatojoties uz esošajiem datiem, var secināt, ka bāzes stacijas veiktspēja ir atkarīga gan no kustības trafika parametriem, gan arī no datu pārraides sistēmas īpašībām.

Šajā darbā modelis tika izstrādāts ar mērķi noteikt faktisko datu pārraides ātrumu atkarībā no kustīgo objektu skaita parametra  $N$ , kuri atrodas bezvadu tīkla bāzes stacijas darbības zonā. Pamatojoties uz paveikto darbu, var secināt, ka reālais datu pārraides ātrums būs atkarīgs no kustīgo objektu skaita, kuri veic savienojumu ar bāzes staciju, un to attāluma līdz stacijai.

Darbā tika izstrādāta divrangu transporta tīkla sistēmas struktūra, kas izmanto standartus 802.11n un LTE. Tās efektivitātes un salīdzinoši zemās cenas dēļ šī struktūra spēj apmierināt potenciālos mobilo sakaru klientus.

## TRANSPORTA TĪKLA ANALĪTISKO UN SIMULĀCIJAS MODEĻU PIELIETOŠANAS REKOMENDĀCIJAS

1. Datu pārraides vienranga tīkla analīze šosejā ar 1 klientu – automašīna var izmantot dotā darba eksperimentālo mērījumu rezultātus. Ja satiksmes plūsma uz šosejas sastāv no divām vai vairākām automašīnām, lai novērtētu dotā tīkla datu pārraides caurlaidības plūsmu, nepieciešams izmantot Erlanga sadalījuma modeli un tīkla ciklisko modeli.
2. Vienranga datu pārraides tīkla analīzei maģistrālē, kur automašīnas stāv rindā un uzsāk savu kustību no nulles ātruma, jāizmanto cikliskā tīkla modeli.
3. Eksperimentālie rezultāti liecina, ka transportlīdzekļu sadalījums ceļa garumā pēc kustības uzsākšanas ir nenostabilizētais process. Līdz ar to, lai veiktu precīzāku transportlīdzekļu skaita novērtējumu bāzes stacijas darbības zonā, ir rekomendēts izmantot modeli ar difūzijas aproksimāciju.
4. Tomēr ir novērojams, ka difūzijas aproksimācijas modeļa rezultāti ir pietiekami tuvi cikliskā modeļa rezultātiem, kurš apraksta nostabilizēto un stacionāro procesu.
5. No tā izriet, ka transportlīdzekļu skaita noteikšanai bāzes stacijas darbības zonā var izmantot vienkāršāku modeli, kas būtiski saīsina aprēķina laiku.
6. Lai novērtētu divrangu tīkla veiktspēju (klients – piekļuves punkts – mobilā klienta attālinātais serveris) ar atbilstošu modeli, šajā gadījumā var izmantot divrangu rindošanas sistēmas tīkla slēgto modeli, kas sastāv no trīs mezgliem.
7. Darbā ir redzams, ka tīkla darbības veiktspēju būtiski ietekmē modeļa varbūtības:  $P_{10}$  un  $P_{12}$ , t. i., varbūtības, kas saskaņā ar protokolu TCP uzdod apstiprinājuma logu. Ja šīs varbūtības ir sadalītas apmērām šādi:  $P_{10} = 0,999$  un  $P_{12} = 0,001$ , bet augšējā līmenī tiek izmantots LTE kanāls, tad var apgalvot, ka tīkla trešā mezgla ietekme ir minimāla un veiktspējas aprēķināšanai var izmantot vienranga ciklisko tīkla modeli. Ja varbūtības ir  $P_{10} = 0,99$  un  $P_{12} = 0,01$  vai mazākas, tad jāizmanto divrangu tīkla modelis.

## BIBLIOGRĀFIJA (norādītas visas atsauces, kuras izmantotas pamatdarbā)

- [1] Иносэ Х., Хамади Т. Управление дорожным движением. М. Транспорт 1983 г. стр. 248.
- [2] Garber N. J., Hoel L. A. Traffic & Highway Engineering, Cengage Learning. 2009. 1230 p.
- [3] S. Krauss, "Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics," Ph. D. Thesis, University of Cologne, Cologne, Germany. 1997.
- [4] "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments", <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5514473>, IEEE, 15. July, 2010.
- [5] IEEE 802.11, The Working Group for WLAN Standards, <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>, April, 2006.
- [6] "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput", <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=530729>, IEEE, 29. October, 2009.
- [7] Kumaravel K. Comparative Study of 3G and 4G in Mobile Technology. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 5, No 3, September 2011 ISSN (Online): 1694-0814
- [8] Kumar A., Renu S. Comparison of 3G Wireless Networks and 4G. International Journal of Electronics and Communication Engineering. ISSN 0974-2166 Volume 6, Number 1 (2013), pp. 1–8
- [9] Kleinrock L., Gail R, Queueing Systems: Problems and Solutions, John Wiley & Sons (1996), 227.
- [10] Gross D., Shortle J., Thompson J., Harris C., Fundamentals of Queueing Theory, IEEE Press. Willy, (2008). 500.
- [11] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, Derivation, properties, and simulation of a gas-kinetic-based, non-local traffic model", Physical Review E 59 (1999), 239–253.
- [12] Lagershausen S. Performance Analysis of Closed Queueing Networks, Springer. 2013. pp. 5–26.
- [13] B. S. Kerner, Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control, Publisher: Springer (2009), 265.
- [14] Haverkort, B. R.: Performance of Computer Communication Systems, A Model-Based Approach. John Wiley & Sons Ltd (1999), 495.
- [15] В. М. Вишнеvский, Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М. Техносфера. 2003. стр. 506.
- [16] Ipatovs, Aleksandrs. Experimental and Analytical Goodput Evaluation of Drive-thru Internet Systems : promocijas darbs / A.Ipatovs ; zinātniskais vadītājs E.Pētersons ; Rīgas Tehniskā universitāte. ELEKTRONIKAS UN TELEKOMUNIKĀCIJU FAKULTĀTE. Transporta elektronikas un telemātikas katedra. Rīga : [RTU], 2012. 127 lp.
- [17] D. Gross, J. Shortle, J. Thompson, C. Harris. Fundamentals of Queuing Theory. Willy. 2008, 500 p.
- [18] H. Kobayashi "Application of the Diffusion Approximation to Queueing Netowrks II: Nonequilibrium Distributions and Applications to Computer Modeling", Journal of ACM, v. 21, N3, 1974, p. 459–469.
- [19] Jerjomins, Romans. Research of Wireless Local Area Network in Non-stationary Mode : promocijas darbs / R.Jerjomins ; zinātniskais vadītājs E.Pētersons; Rīgas Tehniskā universitāte. ELEKTRONIKAS UN TELEKOMUNIKĀCIJU FAKULTĀTE. Transporta elektronikas un telemātikas katedra. Rīga: [RTU], 2012. 153 lp.

- [20] R. Jerjomins and E. Petersons. Client-server model non-stationary behaviour research at near self-similar query stream influence under the condition of overloaded terminal system. *Electronics And Electrical Engineering*, 71(7): 35–38, 2006.
- [21] P. Ulanovs and E. Petersons. Modeling methods of self-similar traffic for network performance evaluation. In *Scientific Proceedings of RTU. Series*, volume 7, pages 43–49, 2002.
- [22] Wee Lum Tan, OnChing Yue, "Analytical Models and Performance Evaluation of Drive-thru Internet Systems", *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, VOL. 29, NO. 1, JANUARY 2011, pp. 207–222.
- [23] Ipatovs A., Petersons E. Performance Evaluation of WLAN depending on Number of Workstations and Protocols // *Electronics and Electrical Engineering.– Kaunas: Technologija*, 2006.– No. 8(72).– P. 15–18.
- [24] Bogdanovs N., Jansons J., Ipatovs A. Parameter Estimation for Model of Vehicular Network // *52<sup>nd</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvija, Riga, 13.–14. oktobris, 2011.– 1.–26. lpp.*
- [25] Ipatovs A., Pētersons E., Bogdanovs N. Evaluation of the Rate of the Data Transfer between Vehicles and Base Stations in Wireless Networks // *Автоматика и вычислительная техника.– 2. (2012) pp 31–41.*
- [26] J. Ott, D. Kutscher, Drive-thru Internet: IEEE 802.11b for Automobile Users, *IEEE Infocom*, Hong Kong, 2004.
- [27] R. Gass, J. Scott, C. Diot, Measurements of In-Motion 802.11 Networking, *WMCSA '06. Proceedings*, (2006), 69–74
- [28] S. M. Ross, *Stochastic Processes*, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, 1996.
- [29] W. Tan, W. Lau, O. Yue, and T. Hui. Analytical Models and Performance Evaluation of Drive-thru Internet Systems. *IEEE Journal on selected areas in Communications*. Vol. 29, 2011, pp. 207–222.
- [30] A. Ipatovs and E. Petersons. Performance Evaluation of WLAN depending on Number of Workstations and Protocols. *Electronics And Electrical Engineering*, 76(8): 72–76, 2006.
- [31] A. Ipatovs, E. Petersons, and J. Jansons. Model for Wireless Base Station Goodput Evaluation in Vehicular Communication Systems. *Electronics And Electrical Engineering*, 111(5): 19–22, 2011.
- [32] W. Tan, W. Lau and O. Yue "Modeling resource sharing for a road-side access point supporting drive-thru internet", *Proc. ACM VANET*, pp. 33–42 2009.
- [33] J. P. Singh, N. Bambos, B. Srinivassan and D. Clawin, Wireless LAN performance under varied stress conditions in vehicular traffic scenarios, *proceedings of Vehicular Technology Conference*, (2002), Vol. 2, 24–28.
- [34] A. Matsumoto, K. Yoshimura, S. Aust, T. Ito, Y. Kondo, Performance evaluation of IEEE 802.11n devices for vehicular networks, *LCN 2009, The 34<sup>th</sup> Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN 2009, 20–23 October 2009, Zurich, Switzerland, Proceedings (2009)*, 669–670.
- [35] M. Rubinstein, F. Ben Abdesslem, S. Rodrigues Cavalcanti, M. Elias Mitre Campista, R. Alves dos Santos, L. Costa, M. Dias de Amorim, O. Duarte, Measuring the capacity of in-car to in-car vehicular networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47., Iss. 11 (2009), 128–136.
- [36] K. K. Leung, W. A. Massey, and W. Whitt, "Traffic models for wireless communication networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 1353–1364, 1994.
- [37] Luan, T. H., Xinhua Ling, Xuemin Shen. MAC in Motion: Impact of Mobility on the MAC of Drive-Thru Internet. *Mobile Computing*, *IEEE Transactions on* Volume: 11, Issue: 2, 2012, pp. 305–319

- [38] D. Hadaller, S. Keshav, and T. Brecht, "Mv-max: Improving wireless infrastructure access for multi-vehicular communication," in Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Challenged Networks, 2006.
- [39] Jing Zhu, Sumit Roy. "MAC for Dedicated Short Range Communications in Intelligent Transport System." IEEE Communication Magazine, December 2003, p. 60–67.
- [40] Marc Emmelmann, Bernd Bochow, C. Christopher Kellum: Vehicular Networking Automotive Applications and Beyond. A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2010, pp. 227–255.
- [41] M. Jerbi and S. M. Senouci. Characterizing multi-hop communication in vehicular networks. In IEEE WCNC 2008, pages 3309–3313, 2008.
- [42] L. Xie and P. R. Kumar, "A network information theory for wireless communications: Scaling laws and optimal operation," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 50, no. 5, pp. 748–767, May 2004.
- [43] Akyildiz I. F., Gutierrez-Estevez D. M., Reyes E. C. The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced, Physical Communication. Volume 3, Issue 4, December 2010, pp. 217–244.
- [44] Performance evaluation of IEEE 802.11n devices for vehicular networks. Yoshimura K., Aust S., Ito T., Kondo Y. Zurich : 3<sup>rd</sup> IEEE LCN Workshop on User MObility and VEhicular Networks (ON-MOVE 2009), 2009. ISBN: 978-1-4244-4488-5.
- [45] D. Hadaller et al., "Vehicular opportunistic communication under the microscope," in Proc. ACM Mobisys, 2007. pp. 206–209
- [46] Yanyan Zhuang, Jianping Pan, Viswanathan, V., Lin Cai. On the Uplink MAC Performance of a Drive-Thru Internet. Vehicular Technology, IEEE Transactions on Volume: 61, Issue: 4, 2012, pp. 1925–1935, ISSN: 0018-9545
- [47] Jorg Ott and Dirk Kutscher, "Drive-thru Internet: IEEE 802.11b for „Automobile“ Users," in Proceedings of the IEEE Infocom 2004 Conference, Hong Kong, March 2004.
- [48] V. Bychkovsky , B. Hull , A. Miu , H. Balakrishnan and S. Madden "A measurement study of vehicular Internet access using in situ Wi-Fi networks", Proc. ACM MobiCom, 2006, pp. 50–61.
- [49] Z. Zheng, P. Sinha, and S. Kumar, "Alpha coverage: bounding the interconnection gap for vehicular internet access," in Proc. IEEE INFOCOM Mini-Conference, 2009.
- [50] P. Shankar, T. Nadeem, J. Rosca, and L. Iftode, "Cars: Context-aware rate selection for vehicular networks," in Proc. IEEE ICNP, 2008. pp. 1–12
- [51] Jansons J., Doriņš T, Analyzing IEEE 802.11n Standard: Outdoor Performance, The Second International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC2012): Proceedings, Lithuania, Klaipeda (2012), 26–30.
- [52] K. K. Leung, W. A. Massey, and W. Whitt, "Traffic models for wireless communication networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 12, pp. 1353–1364, 1994.
- [53] M. Wellens, B. Westphal, P. Mähönen, Performance Evaluation of IEEE 802.11-based WLANs in Vehicular Scenarios, Proc. VTC Spring, (2007), 1167–1171.
- [54] M. Fiore, J. Härri, F. Filali, C. Bonnet, Understanding Vehicular Mobility for Network Simulation, Proc. of the 1<sup>st</sup> IEEE Workshop on Mobile Vehicular Networks (MoVeNet'07).– Pisa, Italy, 2007.
- [55] M. Rubinstein, F. Ben Abdesslem, S. Rodrigues Cavalcanti, M. Elias Mitre Campista, R. Alves dos Santos, L. Costa, M. Dias de Amorim, O. Duarte, Measuring the capacity of in-car to in-car vehicular networks, IEEE Communications Magazine, Vol. 47., Iss. 11 (2009), 128–136.
- [56] Antonis G. Gotsis, Athanasios S. Lioumpas, Angeliki Alexiou, "Analytical modelling and performance evaluation of realistic time-controlled M2M scheduling over LTE cellular networks", John Wiley & Sons, VOL. 24, Issue 4, June 2013, pp. 378–388.

- [57] M. Greiner, M. Jobman, L. Lipsky. "The Importance of Power-tail Distributions for Modeling Queueing Systems", *Operation Research: Telecommunication Area*. March – April 1999, p. 1–26.
- [58] I. A. Ismail, G. S. Mokaddis, S. A. Metwally and Mariam K. Metry, Optimal Treatment of Queueing Model for Highway, *Journal of Computations & Modelling*, vol. 1, no. 1, 2011, pp 61–71, ISSN: 1792–7625
- [59] P. Deshpande, A. Kashyap, C. Sung, and S. R. Das, "Predictive methods for improved vehicular wifi access," in *Proc. ACM Mobisys*, 2009.
- [60] Proakis J. G., *Digital communications*, 3<sup>rd</sup> edition, McGrawHill, 1995. – 928 p.
- [61] 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.
- [62] Marc Emmelmann, Bernd Bochow, C. Christopher Kellum: *Vehicular Networking Automotive Applications and Beyond*. A John Wiley and Sons, Ltd, Publication, 2010, pp. 227–255.
- [63] L. X. Cai , X. Shen , L. Cai , J. Mark and Y. Xiao "Voice capacity analysis of WLAN with un-balanced traffic", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 3, pp.752–761. 2006.
- [64] *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.
- [65] R. Jain and J. M. Smith, "Modeling vehicular traffic flow using m/g/c/c state dependent queueing models," *Transportation Science*, vol. 31, pp. 324–336, 1997.
- [66] *Fundamentals of Queueing Theory*. D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Hurris. JohnWiley & Sons. 2008.
- [67] *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.
- [68] *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.
- [69] *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.
- [70] Zhu, C., Wang, O. W. W., Aweya, J., Oullette, M., & Montuno, D. Y. (2002). A comparison of active queue management algorithms using the OPNET Modeler. *IEEE Communications Magazine*, 40(6), 158–167. doi:10.1109/MCOM.2002.1007422
- [71] Gupta I. PKaur P. Comparative Throughput of WiFi & Ethernet LANs using OPNET MODELER. *International Journal of Computer Applications (0975–8887) Volume 8 – No. 6, October 2010*.
- [72] Chow, J. Development of channel models for simulation of wireless systems in OPNET. *Transactions of the Society for Computer Simulation International*, 16(3), 1999, p. 86–92.
- [73] Zhu, C., Wang, O. W. W., Aweya, J., Oullette, M., & Montuno, D. Y. (2002). A comparison of active queue management algorithms using the OPNET Modeler. *IEEE Communications Magazine*, 40(6), 158–167. doi:10.1109/MCOM.2002.1007422.
- [74] Jansons, Jānis. *Autotransporta mobilā bezvadu tīkla eksperimentālais un analītiskais pētījums*. Promocijas darbs. Rīga: [RTU], 2013. 146 lpp.
- [75] *Vehicular Mobility Simulation for VANETs*. Fiore M., Harri J. , Filali F., Bonnet C. Norfolk : IEEE Xplore, 2007. ISBN: 0-7695-2814-7.
- [76] *A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless network*. Holland G., Vaidya N., Bahl P. Rome : ACM MOBICOM, 2001.

- [77] Daniel Krajzewicz, Georg Hertkorn, C. Roessel, and Peter Wagner. SUMO (Simulation of Urban MObility) – An Open-Source Trac Simulation. Proceedings of the 4<sup>th</sup> Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002), pp. 183–187, 2002.
- [78] Jerome Haerri, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Mobility models for vehicular and hoc networks: a survey and taxonomy. Accepted for IEEE Communications Surveys and Tutorials (epublication), 2008.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] L. Tong, Q. Zhao, and G. Mergen, “Multipacket reception in random access wireless networks: From signal processing to optimal medium access control,” IEEE Communications Magazine, pp. 108–112, November 2001.
- [83] J. Hillebrand, C. Prehofer, R. Bless, and M. Zitterbart. Quality-of-service signaling for next-generation ip-based mobile networks. Communications Magazine, IEEE, 42(6): 72–79, june 2004.
- [84] H. Hartenstein and K. Laberteaux. VANET: vehicular applications and inter-networking technologies. Intelligent Transport Systems. Wiley, 2010.
- [85] S. Y. Wang and Y. M. Huang, “NCTUns Distributed Network Emulator,” Internet Journal, Vol. 4, Num. 2, pp. 61–94, Nova Science Publisher (ISSN 1937-3805), 2012
- [86] S. Y. Wang and C. L. Chou, “NCTUns Tool for Wireless Vehicular Communication Network Researches,” Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, No. 7, pp. 1211–1226, August 2009.
- [87] H. T. Kung and S. Y. Wang, “TCP Trunking for Bandwidth Management of Aggregate Traffic,” International Journal of Computer Systems Sciences and Engineering, Vol. 25 No. 1, pp. 35–45, 2010.