

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Radioelektronikas institūts

Lauris CIKOVSKIS

Doktora studiju programmas “Elektronika” doktorants

DATU PĀRRAIDES EFEKTIVITĀTES PALIELINĀŠANA BEZVADU *AD-HOC* TĪKLĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., profesors

I. SLAIDIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2016

Cikovskis. L. Datu pārraides efektivitātes palielināšana bezvadu *ad-hoc* tīklā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. – 35. lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes “RTU P-08” 2016. gada 17. marta lēmumu, protokols Nr. 33.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9934-10-814-3

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 30. jūnijā, plkst. 15:30, Rīgas Tehniskās Universitātes Elektronikas un Telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 2-38. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, *Dr.sc.ing.* Gunārs Lauks
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, *Dr.habil.phys.* Juris Roberts Kalniņš
Ventspils Augstskola

Dr. sc. comp. Artis Mednis
Līgumdarbs

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.

Lauris Cikovskis (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 53 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 190 lappuses. Literatūras sarakstā ir 126 nosaukumi.

Saturs

Vispārīgais darba raksturojums	6
Tēmas aktualitāte	6
Mērķis un uzdevumi	7
Pētījumu metodes	7
Galvenie pētījumu rezultāti	8
Aizstāvamās tēzes	9
Rezultātu praktiskie pielietojumi	9
Rezultātu aprobācija	9
Struktūra	11
Atsevišķu nodaļu izklāsts	12
1. Datu pārraide <i>ad-hoc</i> tīklā.	12
2. <i>Ad-hoc</i> tīkla kopsakarību analīze	14
3. Starpmaršrutu traucējumu novēršana	18
4. Metodes un rīku izstrāde caurlaidspējas noteikšanai	21
5. Vairāku maršrutu pārraides efektivitātes novērtēšana	27
Galvenie darba rezultāti un secinājumi	31
Literatūra	34

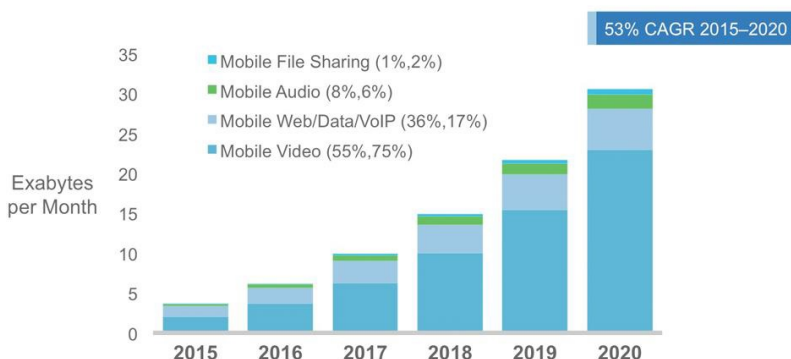
Saīsinājumi un skaidrojumi

AODV	<i>Ad-hoc On-demand Distance Vector</i> . Reaktīvs maršrutēšanas protokols, kas izmanto distances vektora algoritmu.
AODVM	<i>Ad-hoc On-demand Distance Vector Multipath</i> . Uz AODV balstīts vairāku maršrutu pārraides protokols.
CPU	<i>Central Procesor Unit</i> . Centrālais procesors.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> . Nesēja jušanas un sadursmju nepieļaušanas daudzpieēja.
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> . Digitālā signālu apstrāde.
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i> . Proaktīvs maršrutēšanas protokols, kas izmanto avotmaršrutēšanas algoritmu.
HPC	<i>High Performance Computing</i> . Augstas veiktspējas skaitļošana, ko veic izmantojot superdatorus.
LC	<i>Leyared Coding</i> . Slāņain video kodēšana.
MAC	<i>Media Access Control</i> . Vides piekļuves vadība.
MATLAB DCS	<i>Matlab Distributed Computing Server</i> . <i>Matwhorks Matlab</i> modulis, kas paredzēts paralēlai skaitļošanai uz klastera.
MDC	<i>Multiple Description Coding</i> . Kodēšanas metode, ar kuru video plūsmu sadala vairākās vienādas nozīmes video plūsmās.
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> Pārraides sistēma ar vairākiem uztveršanas/pārraides kanāliem.
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i> . Optimizēta posma stāvokļa maršrutēšana – tiek ņemti vērā maršruta posmu kvalitātīvie novērtējumi.
OSI modelis	<i>Open Systems Interconnection model</i> . Atvērto sistēmu starpsavienojuma modelis, kurš konceptuāli sadala tīklu septiņos slāņos.
PCS	<i>Pysical Carrier Sense</i> . CSMA/CA protokola funkcija, kas paredz kanāla “klausīšanos” pirms pārraides.
RTS/CTS	<i>Request To Send/Clear To Send handshake</i> . Sūtījuma pieprasījuma/apstiprinājuma rokasspiediens, kura laikā tiek nosūtīts kadrs ar pieprasījumu sūtīt un tiek saņemts kadrs ar apstiprinājumu.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> . Signāla un “traucējumi plus trokšnis” attiecība.
SM	<i>Spatial Multiplexing</i> . Datu plūsmas multipleksēšana vairākos paralēlos MI-MO apaškanālos.
SMR	<i>Split Multipath Routing</i> . Uz DSR balstīts vairāku maršrutu pārraides protokols.
VMP	<i>Vairāku maršrutu pārraide</i> .
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> . Bezvadu lokālais tīkls.

VISPĀRĪGAIS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pēdējos gados strauji palielinās iekārtu skaits, kas bezvadu tīklos izmanto datu pārraides pakalpojumus. Pieaug pašu iekārtu veikspēja, piemēram, viedtālrunos izmantotā integrētā shēma *Samsung Exynos 7* ietver divus četru kodolu *ARMv8* procesorus. Tas palielina iekārtu funkcionalitāti un ļauj veikt intensīvas datu apstrādes un pārraides uzdevumus, piemēram, straumēt augstas izšķirtspējas video, izmantot mākoņpakalpojumus u.c. Šādām iekārtām ir paredzēts atrasties nepārtrauktā tiešsaistē, kas prasa datu pārraides pieejamību jebkurā vietā un laikā. Tādēļ arī strauji pieaug bezvadu tīklos pārraidīto datu apjoms, kas ir liels izaicinājums šūnu sakaru tīklu operatoriem. 1. attēlā parādītas prognozes par datu apjoma pieaugumu tuvākajos gados [1], no kura lielāko daļu veido video pārraides dati. Video pārraide izvirza visaugstākās prasības tīkla kvalitātei, tādēļ promocijas darbā veiktie pētījumi ir orientēti uz šo aktuālo lietojumu.



1. att. *Cisco Systems Inc.* prognozes par datu apjoma pieaugumu bezvadu tīklos [1].

Šobrīd notiek aktīva pētniecība virzienos, kas var palīdzēt atslogot šūnu sakaru tīklus vai paplašināt pārklājumu vietās, kur tie nesniedzas. Hibrīdos bezvadu tīklu risinājumos lietotāji, kuri atrodas pietiekami tuvu, var pārsūtīt datus tiešā veidā (iekārta–iekārta komunikācija), nesūtot tos caur bāzes staciju. Šādu iespēju ir paredzēts ietvert arī nākamās paaudzes 5G mobilo sakaru tīklos [2]. Bezvadu *ad-hoc* tīkls balstās uz iekārta–iekārta komunikāciju, papildus nodrošinot pārraidi vairākos lēcienos caur relejmezgliem, ja tiešs savienojums nav iespējams, pašorganizēšanos u.c. funkcijas.

Ad-hoc tīkls var būt hibrīdā tīkla slānis, vai arī tas var darboties pilnīgi neatkarīgi, nodrošinot sakarus vietās bez infrastruktūras. Problēmas, ar kurām jāsaskaras IEEE 802.11 standarta *ad-hoc* tīklā, ir ierobežots datu pārraides ātrums un neprognozējamība. Pārraides ātrumu ierobežo radio kanāls, kas ir pakļauts traucējumiem un kura caurlaidspēja samazinās, palielinoties lēcienu skaitam. Neprognozējamību izraisa iekārtu mobilitāte, kas var radīt pakešu zudumus un laika aiztures.

Vairāku maršrutu pārraide var palielināt *ad-hoc* tīkla caurlaidspēju, kā arī samazināt pārrāvumu iespējamību, kas ir svarīgi video datu pārraidei. Lai arī vairāku maršrutu izveide prasa iesaistīt lielāku skaitu tīkla dalībnieku, mobilo iekārtu skaita straujš pieaugums padara to par īstenojamu scenāriju. Ir daudzi pētījumi par vairāku maršrutu atklāšanas efektivitāti; mazāk

analizēta piemērotu maršrutu izvēle video pārraidei, kas ir akcentēta šajā darbā. Pārraidot datus caur vairākiem maršrutiem vienlaicīgi, jārēķinās ar lielāku traucējumu līmeni, jo traucējumi pastāv arī starp maršrutiem (tiem piederošajiem mezgliem), kas samazina vairāku maršrutu pārraides efektivitāti caurlaidspējas palielināšanā.

Lai uzlabotu vairāku maršrutu pārraides efektivitāti, ir jāpielieto paņēmieni traucējumu samazināšanai. Viens no darbā pētītajiem risinājumiem ir viedās antenas, kas ar maināmu antenas vērsumu ļauj būtiski samazināt mezglu savstarpējos traucējumus un, pielietojot MIMO tehnoloģiju, palielināt datu pārraides ātrumu. Ņemot vērā tendenci bezvadu sakaros izmantot arvien augstākas pārraides frekvences, kā arī digitālās signālapstrādes iespēju palielināšanos, šādu antenu izmantošana mobilajās iekārtās tikai pieaugs. Viedās antenas tiek plaši lietotas tradicionālos sakaros starp bāzes staciju (arī WLAN piekļuves punktu [3]) un mobilo klientu, bet nav pietiekami pētītas pielietošanai vairāku maršrutu apstākļos *ad-hoc* tīklā. Papildu ieguvumu viedām antenām var sniegt optimālu maršrutu izvēle.

Lai arī darbā veiktie pētījumi ir vērsti uz IEEE 802.11 standarta *ad-hoc* tīkliem, rezultāti ir attiecināmi arī uz citiem *ad-hoc* tīklu veidiem, kuros izmanto nesēja jušanas daudzpiekļuvi, piemēram, sensoru tīkliem. Traucējumu problēma ir aktuāla arī *WiFi* tīklos, kuru skaits strauji un nekontrolēti palielinās. Jāatzīmē, ka datu pārraides ātruma palielināšana nav orientēta tikai uz izklaides pielietojumiem, kam bieži ir negatīvs iespaids uz cilvēku, bet video pārraides nodrošināšana bezvadu tīklos ir svarīga arī tādās jomās kā glābšanas dienesti, medicīna un izglītība.

Mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir palielināt datu pārraides efektivitāti bezvadu *ad-hoc* tīklā, izmantojot vairāku maršrutu pārraidi un paņēmienus traucējumu samazināšanai.

Mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi **uzdevumi**:

- 1) analizēt datu pārraides ātrumu ierobežojošos faktorus IEEE 802.11 balstītā *ad-hoc* tīklā un pamatot izvēlētos risinājumus tā palielināšanai;
- 2) izstrādāt algoritmu efektīvas video pārraides nodrošināšanai, kas ņem vērā *ad-hoc* tīkla parametrus;
- 3) novērtēt mezglu radīto savstarpējo traucējumu ietekmi uz tīkla caurlaidspēju un rast risinājumus traucējumu samazināšanai;
- 4) analizēt modelēšanas metodes vairāku maršrutu caurlaidspējas noteikšanai, veikt metodes izvēli un pielāgošanu darba mērķu sasniegšanai;
- 5) izstrādāt *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīku MATLAB vidē, par pamatu ņemot (4.) uzdevumā izvēlēto metodi un aditīvu traucējumu modeli;
- 6) veikt datormodelēšanu, lai novērtētu piedāvāto traucējumu samazināšanas paņēmieni efektivitāti;
- 7) izstrādāt rekomendācijas efektīva datu pārraides risinājuma izvēlei *ad-hoc* tīklā.

Pētījumu objekts ir IEEE 802.11 standarta *ad-hoc* tīkls video pārraides pielietojumiem.

Pētījumu priekšmets ir traucējumu degradējošā ietekme uz tīkla caurlaidspēju, pārraidot video plūsmas vienlaicīgi vairākos maršrutos, kā arī risinājumi traucējumu samazināšanai.

Pētījumu metodes

Pētījumi par video pārraidi vairākos maršrutos ir balstīti uz zinātnisko rakstu analīzi par līdzšinējo pieredzi. Papildu analīze ir veikta traucējumu samazināšanas paņēmieni pētīšanā, un ir konstatēti vēl neatrisināti pētniecības uzdevumi.

Starpmaršrutu traucējumu ietekmes novērtēšana ir veikta eksperimentāli. Šim mērķim pro-

mocijas darba autors ir izveidojis bezvadu *ad-hoc* tīkla testgultni, kuru veido seši IEEE 802.11g/n standarta maršrutētāji un specializēta programmatūra *ad-hoc* tīkla izveidei. Eksperimentālo pētījumu iespējas ir ierobežotas, tāpēc papildus pielietota arī tīkla modelēšanas programma *Network Simulator 2 (NS-2)* [4].

Traucējumu samazināšanas paņēmieni efektivitāte ir pētīta ar skaitlisko metožu palīdzību, novērtējot risinājuma ietekmi uz maršrutu kopējo caurlaidspēju. Caurlaidspējas noteikšanai ir izmantota metode, kurai pamatā ir analītisks maksimālās plūsmas uzdevums, kurš tiek atrisināts ar lineāru optimizāciju [5], [6]. Promocijas darbā šī metode ir pilnveidota ar CSMA/CA imitācijas modeli, kurš ietver aditīvus radio traucējumus, un papildu nosacījumiem optimizācijas uzdevumā, lai precīzāk aprakstītu vairāku maršrutu pārraidi. Metode ir īstenota *Mathworks MATLAB* vidē [7] kā tīkla modelēšanas rīks.

Darbā plaši izmantotas matemātiskās statistikas metodes. Lai iegūtu no mezglu izvietojuma neatkarīgus rezultātus, ar Montekarlo modelēšanu ir noteikta statistiski vidējā caurlaidspēja. Modelēšanas ceļā analizēto scenāriju skaitam jābūt pietiekami lielam, lai redzētu statistiski nozīmīgas atšķirības rezultātos. Tam patērētais laiks ir efektīvi samazināts ar paralēlu uzdevumu izpildi uz augstas veiktspējas skaitļošanas (HPC) klastera.

Galvenie pētījumu rezultāti

Vairāku maršrutu pārraide, pielietojot paņēmienus traucējumu samazināšanai, palielina datu pārraides efektivitāti bezvadu *ad-hoc* tīklā.

- Eksperimentāla traucējumu ietekmes novērtēšana *ad-hoc* tīkla testgultē pierāda traucējumu būtisko ietekmi uz datu pārraides ātrumu. Intensīvu traucējumu gadījumā vairāku maršrutu pārraide nepalielina kopējo maršrutu caurlaidspēju.
- Veiktās *ad-hoc* tīkla darbības analīzes rezultātā ir izveidots shematisks *ad-hoc* tīkla kopsakarību modelis, kas uzskatāmi sasaista tīklu ietekmējošos faktorus ar video pārraidei svarīgiem parametriem. Šādā griezumā un ar tik plašu parametru klāstu līdzīgi modeļi nav atrodami.
- Datu pārraides efektivitātes pētījumiem ir izmantota maksimālās plūsmas uzdevuma atrisināšanas metode, kas atšķirībā no citiem darbiem ir lietota kopā ar aditīvu radio traucējumu modeli, īstenojot to kā hibrīdu metodi. Iegūtie rezultāti sniedz precīzāku starpmaršrutu traucējumu ietekmes uz caurlaidspēju novērtējumu, salīdzinot to ar biežāk lietoto uz attālumu balstīto traucējumu modeli.
- Uz hibrīdās metodes un kopsakarību modeļa pamata izstrādāts *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīks *Mathworks MATLAB* vidē, kas ir efektīvi pielietojams daudzu nejaušu scenāriju analīzei. Rīks ietver darbā uzlabotu SMR maršrutēšanas protokolu, kas nodrošina līdz pat divām reizēm lielāku maršrutu komplektu dažādību, salīdzinot ar oriģinālo SMR vai AODVM.
- Datu pārraides efektivitāti var palielināt, izmantojot vairāku maršrutu pārraidi un paņēmienus traucējumu samazināšanai:
 - sadalot datu plūsmu pa vairākiem maršrutiem, datu pārraides ātrums tiek palielināts līdz 50%, ja ievēro kritisko attāluma robežu starp datu avotu un adresātu (darbā 5 lēcieni), kas ietekmē gan optimālu maršrutu skaitu, gan izvēles kritēriju;
 - maksimālu efektivitātes palielinājumu nodrošina optimālu maršrutu izvēle kopā ar viedo antenu pielietošanu. Salīdzinot dažādu viedo antenu veidu, tajā skaitā pirmoreiz MIMO, efektivitāti vairāku maršrutu pārraidē, noskaidrots, ka adaptīvs antenu režģis ar vienu telpisko plūsmu visefektīvāk novērš traucējumus, ļaujot dubultot caurlaidspēju, ja maršrutu skaits ir 3;

- pētījumu rezultāti ir apkopoti praktiskās rekomendācijās optimālu maršrutu izvēlei atkarībā no izmantotā antenas veida un tīkla parametriem.

Aizstāvamās tēzes

Autors promocijas darbā aizstāv:

- 1) paplašināts *ad-hoc* tīkla kopsakarību modelis, kas uzskatāmi parāda būtisku faktoru un parametru savstarpējās ietekmes, nodrošina efektīvu algoritmu un modelēšanas rīku izstrādi;
- 2) hibrīda metode, kas apvieno analītisku maksimālās plūsmas uzdevuma risināšanas metodi ar darbā izstrādātu CSMA/CA protokola imitācijas modeli, kurš ietver aditīvus radio traucējumus, ir efektīvs risinājums vairāku maršrutu caurlaidspējas novērtēšanai;
- 3) datu pārraides ātruma palielināšanai, sadalot datu plūsmu pa vairākiem maršrutiem, eksistē kritiskā attāluma robeža starp datu avotu un adresātu;
- 4) sadalot datu plūsmu pa vairākiem maršrutiem, maksimālu datu pārraides ātruma pieaugumu nodrošina adaptīvs antenu režģis ar vienu telpisko plūsmu, kas izslēdz savstarpējos traucējumus atbilstoši brīvības pakāpju skaitam.

Rezultātu praktiskie pielietojumi

- *Ad-hoc* tīkla parametru kopsakarību modelis parāda loģisko shēmu, pēc kādas analizēt *ad-hoc* tīklu, lai noteiktu datu pārraidei būtiskus tīkla parametrus. Tas ir izmantojams, lai izstrādātu efektīvākus algoritmus un programmatūru šādu uzdevumu veikšanai, kā tas ir parādīts promocijas darbā, izstrādājot tīkla modelēšanas rīku.
- Pilnveidotā analītiskā metode un izveidotais MATLAB modelēšanas rīks ir pielietojami datu pārraides efektivitātes pētījumiem *ad-hoc* tīklā. Programmas kods ir pieejams publiski *GitHub* repozitorijā, kas ļauj ikvienam to pilnveidot. Rīkam izstrādātie algoritmi un MATLAB programmatūras koda fragmenti var tikt pielāgoti izmantošanai maršrutēšanas protokolos vai citos programmatūrā balstītos risinājumos caurlaidspējas novērtēšanai. Rīks ir arī pārbaudīts Rīgas Tehniskās universitātes skaitļošanas klasterī, kas promocijas darba izstrādes laikā ir sagatavots darbam ar MATLAB DCS moduli.
- Izstrādātās praktiskās rekomendācijās datu pārraides efektivitātes palielināšanai *ad-hoc* tīklā ir pielietojamas maršrutēšanas protokolos lēmumu pieņemšanas algoritmos.
- Darba ietvaros izveidotā IEEE 802.11g/n *ad-hoc* tīkla testgultne ir demonstrēta ar elektroniku saistītos studiju priekšmetos un izmantota vairāku maģistra un bakalauru darbu izstrādē.

Rezultātu aprobācija

Konferences. Ar darbu saistītos pētījumus autors ir prezentējis šādās konferencēs:

- 1) Advances in Wireless and Optical Communications RTUWO, Rīga, Latvija, 2015. gada 5.–6.novembrī;
- 2) The 2nd Joint IEEE Lithuania and Latvia Sections Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering AIEEE '14, Viļņa, Lietuva, 2014. gada 28.–29. novembrī;
- 3) RTU 55. Starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija „Elektronika”, Rīga, Latvija, 2014. gada 14.–17. oktobrī;
- 4) 21st Telecommunications Forum TELFOR 2013, Belgrada, Serbija, 2013. gada 26.–28. novembris;
- 5) 20th Telecommunications Forum TELFOR 2012, Belgrada, Serbija, 2012. gada 20.–22.

novembris;

- 6) 1st Baltic HPC and Cloud computing conference, Rīga, Latvija, 2012. gada 10.–11. septembris;
- 7) 2nd International Conference on Digital Information Processing and Communications, Klaipēda, Lietuva, 2012. gada 10.–12. jūlijs;
- 8) RTU 52. Starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija „Elektronika”, Rīga, Latvija, 2011. gada 13.–16. oktobris;
- 9) The 15th International Conference Electronics‘2011, Kauņa, Lietuva, 2011. gada 17.–19. maijs;
- 10) RTU 50. Starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija „Elektronika”, Rīga, Latvija, 2009. gada 15.–16. oktobris;
- 11) ”Balticgrid II” 2nd All-Hands Meeting, Rīga, Latvija 2009. gada 12.–14. maijs.

Zinātniskie izdevumi. Darbā iekļautie rezultāti ir publicēti šādos izdevumos:

- 1) Cikovskis L., Slaidins I. Path Selection Criteria for Multi-path Routing in Wireless Ad-hoc Network.// Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2015), – Rīga, 2015. – pp. 64–67 (**Scopus, IEEE xplore**);
- 2) Cikovskis L. Inter-path Interference Cancellation in Wireless Ad-hoc Networks Using Smart Antennas.// Proceedings of IEEE 2nd Workshop on Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE). – Viļņa:IEEE, 2014. – pp. 1–6 (**IEEE xplore**);
- 3) Cikovskis L. Method for Analyses of Data Transmission Over Multiple Paths in Wireless Ad-hoc Networks.// Proceedings of 21st Telecommunications Forum (TELFOR). – Belgrade: IEEE, 2013. – pp. 133–136 (**Scopus, IEEE xplore**);
- 4) Cikovskis L., Slaidins I., Vdovins S. On Optimal Video Transmission Over Multiple Paths in Wireless Ad-hoc Networks. //Proceedings of 20th Telecommunications Forum (TELFOR). – Belgrade: IEEE, 2013. – pp. 319–322 (**Scopus, IEEE xplore, EBSCO**);
- 5) Cikovskis L., Slaidins I. Analysis of Wireless Ad-hoc Network Parameters for Efficient Multi-path Video Transmission.// Second International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC). – Klaipėda: IEEE, 2012. – pp. 16–21 (**Scopus, IEEE xplore, EBSCO**);
- 6) Cikovskis L., Slaidins I. Impact of Physical Carrier Sense Range on Network Throughput in Wireless Ad-hoc Networks.// Scientific Journal of RTU. 7th series, Telecommunications and Electronics. – Rīga: RTU, 2011. – No. 11. – pp. 16–21 (**EBSCO**);
- 7) Cikovskis L., Vdovins S., Slaidins I. Multipath routing with adaptive carrier sense for video applications in wireless ad-hoc networks.// Elektronika ir Elektrotechnika. Kaunas, 2011. – no.6. – pp. 37–42 (**Scopus**);
- 8) Cikovskis L., Kulins J., Vdovins S., Slaidins I., Zhuga B. Ad-hoc and Wireless Mesh Networks for Mobile Peer-to-peer Collaboration.//Scientific Journal of RTU. Telecommunications and Electronics. – Rīga: RTU, 2009. – No. 9. – pp. 50–57 (**EBSCO**).

Projekti. Darba autors ir līdzdarbojies vairākos projektos, kuros ir izmantoti šī promocijas darba rezultāti vai saņemts atbalsts promocijas darba tapšanai:

- 1) “Inovatīvas signālapstrādes tehnoloģijas viedu un efektīvu elektronisko sistēmu radīšanai”, Valsts pētījumu programmas projekts Nr. 2, 2010.–2014. gads;
- 2) “eInfranet”, Eiropas Komisijas finansēts ERA-Net projekts, 2010.–2013. gads.
- 3) “Jaunas elektronisko sakaru tehnoloģijas”, Valsts pētījumu programmas projekts Nr. 5 Informācijas tehnoloģiju zinātniskā bāze, 2008.–2009. gads.

Struktūra un apjoms

Darbs sastāv no ievaddaļas, 5 galvenajām nodaļām, rezultātu apkopojuma un 6 pielikumiem.

1. nodaļa ir vispārīgs ievads par *ad-hoc* tīkla darbības principiem un problēmām, kas saistītas ar datu pārraidi. Ir veikta literatūras analīze par risinājumiem datu pārraides ātruma palielināšanai, kas pētīti un uzlaboti darba ietvaros.

2. nodaļa ir veltīta video pārraidei vairākos maršrutos un *ad-hoc* tīkla darbības analīzei tās laikā. Pamatojoties uz pastāvošo risinājumu un tīkla parametru savstarpējo saišu analīzi, ir izstrādāts shematisks tīkla parametru kopsakarību modelis. Modelis parāda traucējumu degradējošo ietekmi uz vairāku maršrutu pārraides efektivitāti.

3. nodaļā ir piedāvāti risinājumi traucējumu samazināšanai: piemērota maršrutu komplekta izvēle un viedās antenas. Nodaļa ietver viedo antenu teorētiskos pamatus un analizē pielietojumu *ad-hoc* tīklos. Ir noskaidroti līdz šim neatrisinātie jautājumi, kas ļauj precizēt tālākos pētniecības uzdevumus.

4. nodaļā ir izstrādāta metode un uz tās balstīts programmatūras rīks vairāku maršrutu caurlaidspējas noteikšanai. Ir veikta precizitātes testēšana un meklēti risinājumi ātrākai rezultātu ieguvei.

5. nodaļā ar modelēšanas palīdzību ir novērtēta traucējumu samazināšanas paņēmieni efektivitāte. Tas ļauj noslēgumā dot rekomendācijas piemērota maršrutu komplekta izvēlei atkarībā no izmantotā antenu veida un tīkla apstākļiem.

Kopējais darba apjoms ar pielikumiem ir 182 lappuses, 65 attēli, 10 tabulas un 126 literatūras avoti.

ATSEVIŠĶU NODAĻU IZKLĀSTS

1. Datu pārraide *ad-hoc* tīklā

Bezvadu *ad-hoc* tīkls (tālāk tekstā *ad-hoc* tīkls) ir grupa ar mobilām iekārtām (mezgliem), kuras pašas spēj organizēties un konfigurēties, lai izveidotu tīklu. Atšķirībā no tradicionāliem bezvadu tīkliem, komunikācija starp mezgliem notiek tiešā veidā, bez centrālas vadības. Šis darbs apskata tikai pakešdatu komunikāciju, izmantojot IEEE 802.11g/n bezvadu standarta iekārtas un protokolus, kuri tiek izmantoti arī bezvadu lokālos tīklos (WLAN).

Ad-hoc tīkla funkcionalitāte ir atkarīga no OSI modeļa tīkla slāņa, kurš nodrošina komunikāciju starp mezgliem, ja tie nevar sasniegt viens otru tiešā veidā ierobežota pārraides attāluma dēļ. Datu paketes sūta ar vairākiem lēcieniem caur citiem mezgliem, kuri darbojas kā maršrutētāji (saukti arī par relejmezgliem). Tam ir nepieciešams maršrutēšanas protokols, kura uzdevums ir nodrošināt maršrutu datu pārsūtīšanai. Maršrutēšanas protokolam jāspēj izveidot stabilu maršrutu un ātri reaģēt uz izmaiņām tīklā, kam nav piemēroti vadu tīklos izmantotie protokoli. Divas galvenās maršrutēšanas protokolu klases ir proaktīvie un reaktīvie protokoli. Ar proaktīvu protokolu katrs mezgls uztur maršrutēšanas informāciju, kā sasniegt citus tīkla mezglus neatkarīgi no tā, vai šī informācija tiks izmantota. Reaktīvos protokolos maršrutu veido tikai tad, kad tas ir vajadzīgs.

Klasisks *ad-hoc* tīklu pielietojums ir nodrošināt sakarus specifiska uzdevuma veikšanai vietā bez tīkla infrastruktūras. *Ad-hoc* tīklu var izmantot, lai, piemēram, pārsūtītu failu starp divām iekārtām, nodrošinātu datu apmaiņu starp konferences dalībniekiem, glābēju saziņai katastrofas vietā u.c. Tomēr vispārēja pielietojuma *ad-hoc* tīkls praksē ir grūti īstenojams [8], tādēļ pētniecība ir jāsasašina uz atsevišķiem pragmatiskiem pielietojumiem, tādiem kā hibrīdi tīkli vai specializēti *ad-hoc* tīkli.

Pēdējā laikā aktuāli ir dažādi hibrīdi tīklu risinājumi, kur *ad-hoc* tīklus apvieno ar citiem tīklu veidiem, piemēram, bezvadu režģītīklu vai mobilo sakaru tīklu. Nākamās paaudzes 5G mobilo sakaru tīklos paredzēts ietvert *ad-hoc* funkcionalitāti, lai lietotāji, kuri atrodas tuvu, varētu pārsūtīt datu tiešā veidā [2], nenoslogojot bāzes staciju. Specializētie *ad-hoc* tīkli tiek veidoti ar mērķi nodrošināt konkrētas lietotāju vajadzības, piemēram, automobiļu *ad-hoc* tīkls, kas tiek izmantots automobiļu komunikācijai, bezvadu sensoru tīkls, ko pielieto sensoru datu ievākšanai, kā arī *ad-hoc* tīkls, ko izmanto virtuālai sadarbībai, piemēram, videokonferences nodrošināšanai.

Video pārraide ir viens no grūtāk realizējamiem pakalpojumiem tās augsto prasību dēļ. Video ir raksturīgs liels pārraidāmo datu apjoms (720p “HD” H.264 kompresēts video ir 4 Mb/s) un jutība pret pakešu zudumiem; jānodrošina zema aizture, kam *ad-hoc* tīkls nav piemērots. Vienlaicīgi tas ir aktuāls pielietojums, jo ir vērojama tendence pieaugt video pakalpojumu datu apjomam bezvadu tīklos (1. attēlā). Tas ir izmantots kā testa pielietojums arī promocijas darbā veiktajos pētījumos.

Ad-hoc tīkli tiek balstīti uz IEEE 802.11 bezvadu tīklu standartu, kas primāri ir paredzēts bezvadu lokālie tīkli (WLAN). Tas ir viens no iemesliem, kādēļ protokoli ne visos aspektos ir piemēroti *ad-hoc* tīklam, kurš ir pilnībā decentralizēts, daudzlēcienu un ar dinamisku un neprognozējamu dabu [9], [10]. Tā rezultātā ir grūti nodrošināt pietiekamu un stabilu datu pārraides ātrumu, kas ir svarīgi video pārraidei. Viena no problēmām ir mezglu radītie savstarpējie traucējumi, kas degradē datu pārraides ātrumu. IEEE 802.11 standarts izmanto divas

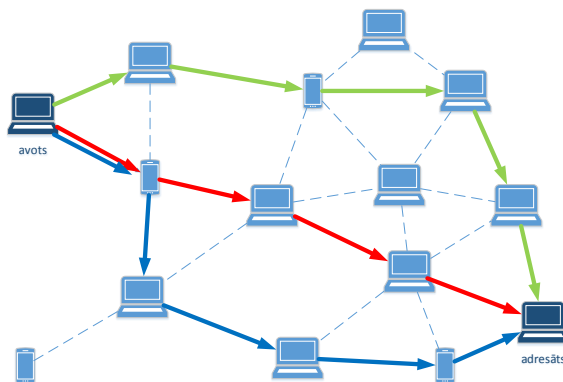
frekvenču joslas 2.4 GHz un 5 GHz apgabalā, kuras dalās noteikta platuma kanālos (20 vai 40 MHz). Visi viena tīkla dalībnieki izmanto kopīgu kanālu, kura sadali starp lietotājiem veic nesēja jušanas un sadursmju nepieļaušanas daudzpieejas (CSMA/CA) vides piekļuves vadības (MAC) protokols.

Lai arī CSMA/CA ir piemērots darbam decentralizētā infrastruktūrā, tam ir vairāki trūkumi. Pirmkārt, tuvumā esošiem mezgliem, kas atrodas viens otra fiziska nesēja jušana (PCS) darbības rādiusā, nav atļauts raidīt vienlaicīgi, liekot gaidīt, kamēr atbrīvojas kanāls. Intensīvas datu pārraides gadījumā tas samazina vidējo pārraides ātrumu vai var radīt pārbļivi. Otrkārt, mezgliem, kuri atrodas ārpus PCS ietekmes, ir ļauts raidīt, bet, tā kā tiek izmantots kopīgs radio kanāls, tas rada radio traucējumus. Radio traucējumi pasliktina uztveršanas apstākļus, samazinot datu pārraides ātrumu, vai pat var radīt kolīziju. Daudzlēcieni pārraidē jāreķinās arī ar lielāku traucējumu ietekmi, jo savstarpēji konkurējoši tīkla savienojumi atrodas tuvu, kā rezultātā datu pārraides ātrums samazinās līdz ar lēcieni skaitu.

Nodaļā ir veikta literatūras analīze par risinājumiem datu pārraides ātruma palielināšanā. Viens no secinājumiem – pieejai ir jābūt “vertikālai”, veicot uzlabojumus vairākos atvērto sistēmu starpsavienojuma modelis (OSI modelis) slāņos vienlaicīgi un izmantojot starpslāņu sadarbību. Jaunu zemāko slāņu standartu izstrāde nav vēlama, jo *ad-hoc* tīkls tiek būvēts uz plaši izplatītām IEEE 802.11 iekārtām. Galvenais ieguldījums jāveic esošo protokolu uzlabošanā un efektīvā pielietošanā. Vairāk ir iespēju pilnveidot OSI modeļa tīkla un lietojuma slāni.

Kā viens no perspektīviem risinājumiem nodaļā ir izcelta vairāku maršrutu pārraide (VMP), jo tā ļauj veikt uzlabojumus ar mazākām izmaiņām IEEE 802.11 standartā. VMP tiek izmantoti vairāki maršruti starp datu avotu un adresātu (1.1. attēlā), kas atkarībā no pielietojuma var sniegt dažādus ieguvumus: bojājumpieciecību, slodzes balansēšanu, kopējās caurlaidspējas palielinājumu. Pēdējo ieguvumu var pielietot, lai uzlabotu video pārraides iespējas [11], [12]. Ir daudzi pētījumi par vairāku maršrutu atklāšanas efektivitāti (piemēram, pārskatā [13]); mazāk analizēta piemērotu maršrutu izvēle, kas ir akcentēts darbā.

Lai arī caur lietojuma slāni tiešā veidā nevar palielināt *ad-hoc* tīkla caurlaidspēju, to var



1.1. att. Datu pārraide vienlaicīgi trīs maršrutos.

ietekmēt, piemēram, preventīvi novēršot tīkla pārbļivi. Apskatot lietojuma slāni kontekstā ar video pārraidi vairākos maršrutos, uzlabojumus var veikt video kodēšanas un pārraides algoritmos. Lai video datus nosūtītu caur vairākiem maršrutiem, var pielietot dažādas video kodēšanas metodes, piemēram, daudzaprakstu kodēšanu (MDC) vai slāņaino kodēšanu (LC) [11], kā arī maršrutēšanas protokolus. Svarīgi ir izvēlēties *ad-hoc* tīklam optimālu parametru kopu-

mu, par ko pietrūkst norāžu. Tāpēc jāizstrādā algoritms, kas efektīvi pielieto esošās metodes, ņemot vērā arī tīkla iespējas. *Ad-hoc* tīkla darbības un parametru analīze video pārraides laikā ir veikta nākmajā nodaļā.

Traucējumu samazināšanai starp tīkla mezgliem efektīvas ir viedās antenas [14], kuras jau tiek izmantotas WLAN tīklos [3]. Līdz šim to pielietojums *ad-hoc* tīklos ir bijis ierobežots, tāpēc tālākajās promocijas darba nodaļās ir veikta papildu izpēte viedo antenu pielietošanai *ad-hoc* tīklā.

2. *Ad-hoc* tīkla kopsakarību analīze

Video pārraidei *ad-hoc* tīklā var izmantot vairāku maršrutu pārraidi (VMP), kas palielina datu pārraides efektivitāti gan balansējot slodzi, gan summējot atsevišķu maršrutu caurlaidspēju. Lai efektīvi izmantotu vairākus maršrutus, jāizvērtē tīkla iespēja nodrošināt video pārraidi un jāizvēlas optimāli video kodēšanas un pārraides parametri, pretējā gadījumā video kvalitāte var tikt pasliktināta. Pamatojoties uz pastāvošo risinājumu un tīkla parametru savstarpējo saišu analīzi, šajā nodaļā ir izstrādāts shematisks tīkla parametru kopsakarību modelis.

Pētījumi ir sākti ar esošo video pārraides risinājumu analīzi, lai noskaidrotu, kāda ir piemērotākā kodēšanas metode un parametri *ad-hoc* tīklam. Analīze rāda, ka līdzšinējā praksē nav vienotas pieejas un optimāli parametri, kas būtu derīgi jebkurai tīkla situācijai. Tomēr ir vairāki pamatprincipi, kas jāievēro, izvēloties kodēšanas metodi, plūsmu skaitu, bitu pārraides ātrumu un maršrutēšanas protokolu:

- kodēšanas metodi (LC vai MDC) izvēlas pēc pakešu zudumu intensitātes un aiztures prasībām;
- ieteicamais plūsmu skaits atkarīgs no izvēlētās kodēšanas metodes un piedāvāto maršrutu skaita: optimāli > 1 plūsmu MDC metodei un 3 plūsmas LC metodei;
- plūsmas bitu pārraides ātrumu nosaka maršruta caurlaidspēja, kuru nedrīkst pārsniegt;
- plūsmas piešķir maršrutiem atkarībā no pakešu zudumu intensitātes un aiztures (svarīgi LC);
- reāllaika video pārraidei izvēlas proaktīvu maršrutēšanu, straumēšanai – reaktīvu.

Lai efektīvi izmantotu VMP iespējas, jāveic tīkla parametru noteikšana katru reizi, kad video dati tiek sagatavoti sūtīšanai, un tad, ievērojot šos pamatprincipus, jāizvēlas kodēšanas parametru kopums.

Veiktās analīzes rezultāti ir izmantoti, izstrādājot konceptuālu algoritmu optimālai video kodēšanai, kas publicēts [15]. Tā darbību var sadalīt vairākos soļos: *a)* nosaka tīkla parametrus; *b)* izvēlas piemērotākos maršrutus; *c)* izvērtē informāciju un pieņem lēmumu; papildus maršrutu parametriem (metrikām) ņem vērā informāciju par lietotāja iekārtas iespējām, video īpašībām, atsauksmes par iepriekšējām pārraidēm, kā arī pamatprincipus; *d)* sagatavo video plūsmas (kodēšana). Algoritma praktiska īstenošana prasa OSI starp-slāņu informācijas apmaiņu un mākslīgā intelekta paņēmieni izmantošanu lēmumu pieņemšanai. Izstrādātais algoritms parāda – lai nodrošinātu efektīvu video pārraidi vairākos maršrutos, jāņem vērā daudzi informācijas avoti, bet īpaši svarīga ir piemērotu maršrutu izvēle, kas atkarīga no tīkla parametriem. Tālāk šajā nodaļā ir risināta problēma noteikt video pārraidei svarīgus tīkla parametrus.

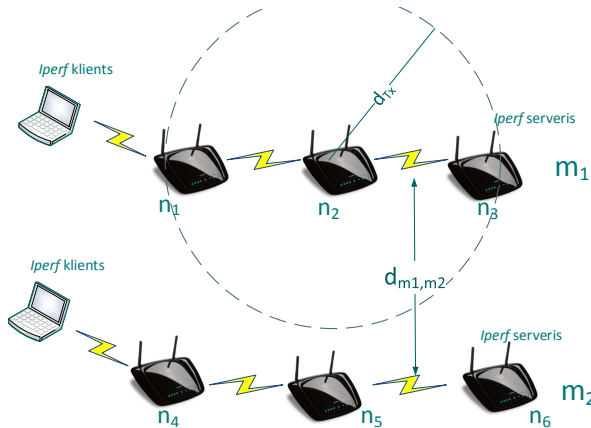
Tīkla iespēju nodrošināt video datu pārraidi parasti raksturo ar parametriem (metrikām): caurlaidspēja, aizture, trīce, pakešu zudumi. Šīs metrikas nevar noteikt pirms reālas video pārraides sākšanas, bet tās var prognozēt netieši caur citiem parametriem. Šajā nodaļā ir analizētas saiknes starp parametriem video pārraides laikā un noteikti galvenie faktori, kas ietekmē tīklu: iekārtu veiktspēja, pārraides tehnoloģijas un protokoli, tīkla topoloģijas parametri, radio kanāla stāvoklis, tīkla kustīgums, citu pielietojumu radītā noslodze. Metrikas nosaka attiecībā pret

izvēlēto maršrutu komplektu, tādēļ tīkla ietekmes faktori darbojas kopā ar maršrutu izvēles algoritmu, kam ir būtiska ietekme uz traucējumiem.

Tā kā maršruti atrodas tuvu un iekārtu izmantotās antenas raída uz visām pusēm, tad traucējumi, ko rada mezgli vienā maršrutā, ietekmē mezglus arī blakus maršrutos (starpmaršrutu traucējumi). Promocijas darba autors ir veicis eksperimentālus pētījumus, lai novērtētu starpmaršrutu traucējumu ietekmi uz caurlaidspēju [16]. Līdzīgi pētījumi ir veikti tikai ar modelēšanas palīdzību. Šim mērķim ir izveidota *ad-hoc* tīkla testgultne ar šādiem aparatūras un programmatūras risinājumiem:

- seši IEEE 802.11b/g/n standarta maršrutētāji *Cisco Linksys WRT160NL*;
- katrs maršrutētājs pieslēgts pie *FSP Nano 360W* nepārtrauktās barošanas avota;
- oriģinālā programmatūra aizvietota ar *OpenWRT* Linux versiju iegultām sistēmām [17];
- proaktīvs maršrutēšanas protokols OLSR [18];
- caurlaidspējas mērīšanai papildus ir instalēts tīkla testēšanas rīks *Iperf* [19].

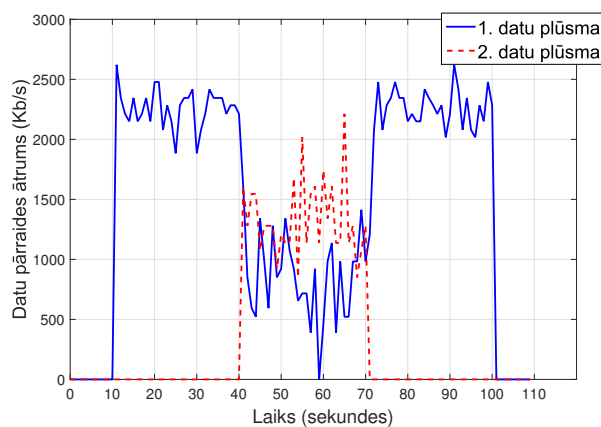
Mērījumi ir veikti āra apstākļos ārpus apdzīvotas vides. Realizēts vienkāršs scenārijs, izvietojot mezglus divos maršrutos m_1 un m_2 un papildus pieslēdzot portatīvos datorus mērījumu veikšanai (2.1. attēls). Izmantoto bezvadu iekārtu darbības rādiuss parasti ir līdz pat 100 metriem, tāpēc, lai eksperimentus varētu veikt mazākā laukumā, ir mainīti raidīšanas parametri, samazinot stabilu pārraides attālumu līdz ≈ 5 metriem. Eksperimenta gaitā ar *Iperf* rīku tiek sūtīti dati abos maršrutos un vienlaicīgi mērīts maksimālais datu pārraides ātrums. Lai praktiski novērotu ātruma izmaiņas, pārraidi pirmajā maršrutā uzsāk vēlāk un pārtrauc ātrāk nekā otrajā, skaidri iezīmējot traucējumu intervālu. Eksperiments ir atkārtots dažādos starpmaršrutu attālumos, tādējādi ievācot datus par atšķirīgām traucējumu intensitātēm. 2.2. attēlā ir parādīti rezultāti.



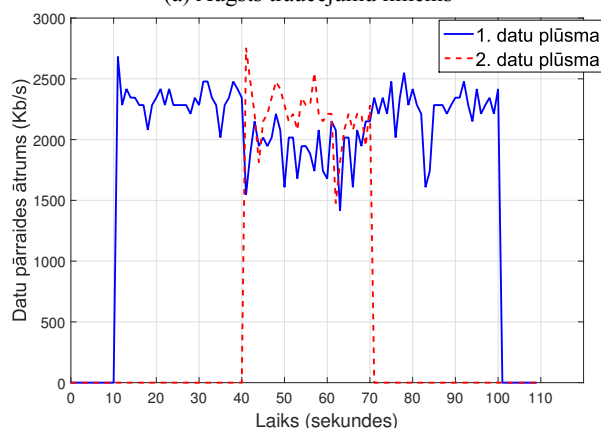
2.1. att. Izveidotā tīkla topoloģija ar diviem maršrutiem

Kad maršruti ir tuvu viens otram ($d_{m_1,m_2} = 7$ m), kas tiek pieņemts par augstu traucējumu līmeni (2.2a. attēls), tad VMP nepalielina kopējo tīkla caurlaidspēju. Abu maršrutu summārais datu plūsmas ātrums saglabājas aptuveni viena maršruta līmenī, kas saskan ar iepriekšējiem pētījumiem. Kad maršruti ir 23 metru attālumā (tiek uzskatīts par zemu traucējumu līmeni), otrai datu plūsmai praktiski nav ietekmes uz pirmo (2.2b. attēlā).

Izveidotās testgultnes galvenais trūkums ir ražotāja uzliktie ierobežojumi pieklūt aparatūras zema līmeņa konfigurācijai un mainīt PCS sliekšni, kas neļauj noteikt PCS ietekmi uz caurlaidspēju. Tas ir veikts citā pētījumā, ar NS-2 modelējot vairāku maršrutu scenāriju ar at-



(a) Augsts traucējumu līmenis



(b) Zems traucējumu līmenis

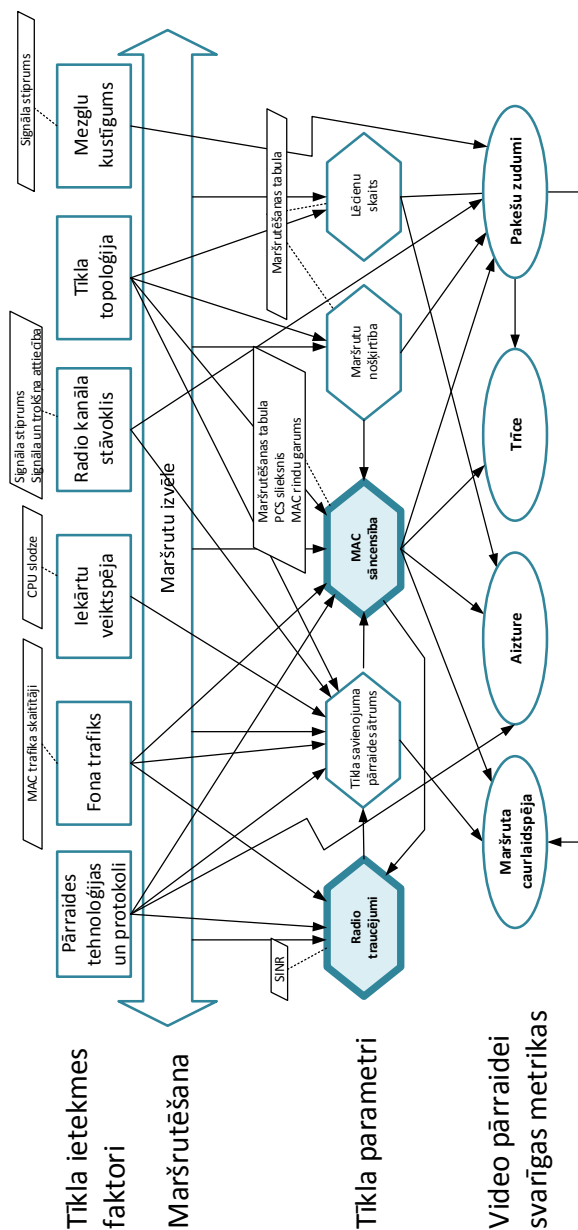
2.2. att. Datu pārraides ātruma izmaiņas laikā katrā no maršrutiem atkarībā no starpmaršrutu traucējumu intensitātes.

šķirīgām PCS sliekšņa vērtībām. Rezultāti rāda, ka atšķirīgos attālumos starp maršrutiem ir novērojams atšķirīgs optimālais PCS sliekšnis (darbības rādiuss). Šī un iepriekšējā pētījuma rezultāti ļauj secināt, ka starpmaršrutu traucējumi ir viens no galvenajiem caurlaidspēju ierobežojošajiem faktoriem. Traucējumu ietekmi nosaka maršrutu nošķirtība, kas atkarīga gan no starpmaršrutu attāluma, gan no PCS darbības rādiusa.

Nodaļā veiktā analīze atklāj kompleksas parametru savstarpējās saites, kas shematiski ir apkopotas *ad-hoc* tīkla kopsakarību modelī (2.3. attēls) [20]. Modeļa galvenā vērtība ir tā, ka tas uzskatāmi sasaista tīklu ietekmējošos faktorus ar video pārraidei svarīgām metrikām, kas šādā griezumā un ar tik plašu parametru klāstu nav pētīts, tāpēc tas ir piedāvāts kā viens no būtiskiem promocijas darba rezultātiem. Balstoties uz padziļinātu traucējumu analīzi, modelī ir likts uzsvars uz diviem parametriem – radio traucējumi un MAC sāncensība –, lai parādītu to ietekmi uz video pārraidi vairākos maršrutos. Šie parametri ietekmē visas video pārraidei svarīgās metrikas un ir savstarpēji saistīti arī ar citiem parametriem.

Modelis ir pielietojams video pārraidei svarīgu metriku noteikšanā, jo parāda loģisko shēmu, pēc kādas jāanalizē tīkls. Savstarpējās saites starp parametriem ļauj redzēt, kuri parametri

jāņem vērā, nosakot kādu no metrikām. Lai kvantitatīvi novērtētu kāda parametra izmaiņas, kādam citam parametram mainoties, ir doti iespējamie mērījumi. Tas ir pielietojams, izstrādājot programmu algoritmus, tāpēc arī izmantots promocijas darbā izveidotajam *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīkam.



2.3. att. Izveidotais tīkla parametru kopsakarību modelis.

3. Starpmaršrutu traucējumu novēršana

Iepriekš veiktā analīze parāda, ka, pārraidot datus vairākos maršrutos vienlaicīgi, ir jāreķinās ar traucējumiem. Traucējumi pastāv ne tikai starp mezgliem maršrutā, kas raksturīgi viena maršruta pārraidei, bet arī starp mezgliem, kas pieder dažādiem maršrutiem un ko sauc par starpmaršrutu traucējumiem. Tie samazina potenciālo VMP ieguvumu līdz pat nullei. Lai palielinātu VMP efektivitāti, nodaļā ir piedāvāti vairāki risinājumi starpmaršrutu traucējumu samazināšanai:

- piemērotu maršrutu izvēle, ņemot vērā traucējumus, ko var saukt par traucējumus ietverošu (*interference-aware*) maršrutēšanu;
- viedo antenu pielietošana, kas, izmantojot antenu vērsumu, var būtiski samazināt mezglu radītos savstarpējos traucējumus un, pielietojot MIMO paņēmienus, var palielināt tīkla savienojuma pārraides ātrumu;
- abu pieeju apvienošana, lai panāktu sinerģisku efektu – maršrutu izvēli veic, ņemot vērā, ka ir pielietotas viedās antenas.

Šajā nodaļā ir veikta teorētiska analīze, lai noskaidrotu līdz šim neatrisinātos jautājumus un precizētu tālākos pētniecības uzdevumus, kuri risināti 5. nodaļā ar modelēšanas palīdzību.

Piemērotu maršrutu izvēle nozīmē izvēlēties konkrētam scenārijam piemērotu maršrutu komplektu gan pēc maršrutu skaita, gan ar mazāku savstarpējo ietekmi. Svarīgi ir noteikt faktorus, kas ietekmē optimālu maršrutu skaitu, tāpēc viens no veicamiem uzdevumiem ir pārbaudīt, kā mainās kopēja maršrutu caurlaidspēja atkarībā no maršrutu skaita, pastāvot traucējumiem.

Vairums VMP protokolu (piemēram, SMR, NDMR) par galveno metriku savstarpējās ietekmes raksturošanai izmanto kopīgo mezglu skaitu. Tas ir pietiekams nosacījums, lai nodrošinātu bojājumpiecieitību, bet, lai uzlabotu slodzes balansēšanas vai caurlaidspējas agregācijas iespējas, jāņem vērā arī maršrutu savstarpējā ietekme traucējumiem dēļ [21], [22]. To parāda arī iepriekš aprakstītais eksperimentālais pētījums (2.2. attēls). Savstarpējo ietekmi visprecīzāk atainotu sasniedzamais datu plūsmas ātrums maršrutos, tomēr šāda metrika nav izdevīga no praktiskās puses, jo, izvēloties maršrutus, vajadzētu pārbaudīt lielu skaitu dažādu maršrutu kombināciju. Tāpēc darbā ir meklēti maršrutu izvēles kritēriji, kuri balstās uz viegli nosakāmām metrikām, tajā pašā laikā ietverot traucējumus.

Maršrutu savstarpējo ietekmi parasti raksturo ar radio kanāla nošķirtību [23], [24] (piemēram, bloķēto mezglu skaits blakus maršrutā) vai telpisko nošķirtību [22], [25]. Darbā detalizētāk ir pētīta telpiskā nošķirtība jeb attālums starp maršrutiem. Sagaidāms, ka maršruti ar vislielāko telpisko nošķirtību uzrādīs viszemāko radio traucējumu līmeni, tomēr nav noskaidrots, vai tie sniegs augstāku caurlaidspēju. Tāpēc ir pārbaudīta starpmaršrutu attāluma ietekme uz kopējo caurlaidspēju un analizēti apstākļi, kādos maksimālu attālumu ir efektīvi izmantot kā maršrutu izvēles kritēriju.

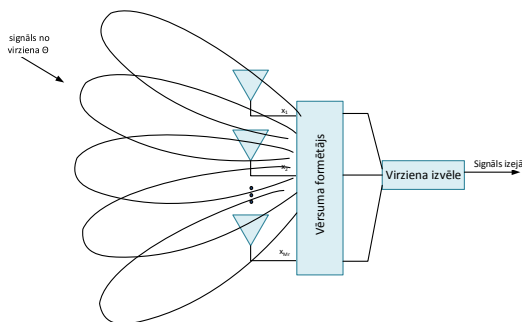
Viedās antenas līdzīgi kā VMP ir orientētas uz radio kanāla telpiskās atkalizmantojamības palielināšanu. Viedā antena ir antenu režģis, kas sastāv no daudziem izstarojošiem elementiem. Tajā ir pielietotas digitālās signāla apstrādes (DSP) metodes, lai apstrādātu signālu katra elementā, uzlabojot pārraides efektivitāti. Viedās antenas ir komplicēts temats, tāpēc nodaļā sniegts plašāks ievads ar teorētisko pamatu un līdzšinējo pielietojumu *ad-hoc* tīklā.

Ad-hoc tīkliem ir piedāvāti vairāki viedo antenu veidi, kurus var iedalīt pēc to pielietojuma: virziendarbība vai MIMO. Darbā veiktajos pētījumos virziendarbībai ir izmantots vadāmās la-

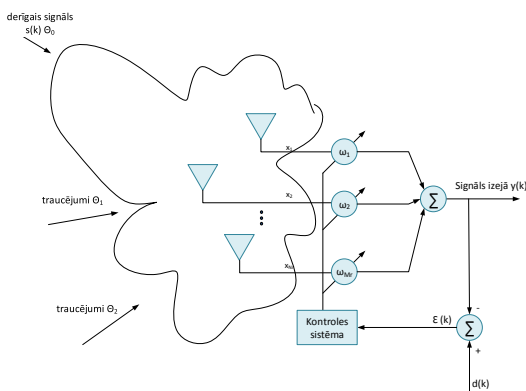
pas antenu režģis (3.1a. attēls) un adaptīvs antenu režģis (3.1b. attēls), kuri ļauj mainīt antenas tālā lauka vērsumu, nodrošinot jaudas pastiprinājumu konkrētā virzienā un vājinājumu citos virzienos. Ir pētīta tikai režģa faktora ietekme uz antenas vērsumu, pieņemot, ka elementi ir izotropi starotāji. Lineāra režģa faktoru apraksta modelis:

$$RF_{\theta} = \sum_{n=1}^N e^{-j \frac{(n-1)d \sin \theta}{c}}, \quad (3.1)$$

kur N – režģa elementu skaits;
 θ – virziens azimuta plaknē;
 d – attālums starp režģa elementiem;
 c – gaismas ātrums.



(a) Pārslēdzamās vāles režģis



(b) Adaptīvs antenu režģis

3.1. att. Izmantotie virziendarbības antenu režģu veidi.

MIMO tehnoloģijā pielieto adaptīvu antenu režģi gan raidītājā, gan uztvērējā un izmanto radio signālu izplatīšanos pa dažādiem pārraides ceļiem. Katrā uztvērēja antenu režģa elementā pienāks un summēsies signāls no katra raidītāja režģa elementa (3.2a. attēls). Matemātiski

MIMO sistēmu apraksta modelis:

$$\vec{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (3.2)$$

kur $\mathbf{H}$ – MIMO kanāla pārvades matrica $\begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \cdots & h_{N_r,N_t} \end{bmatrix}$;

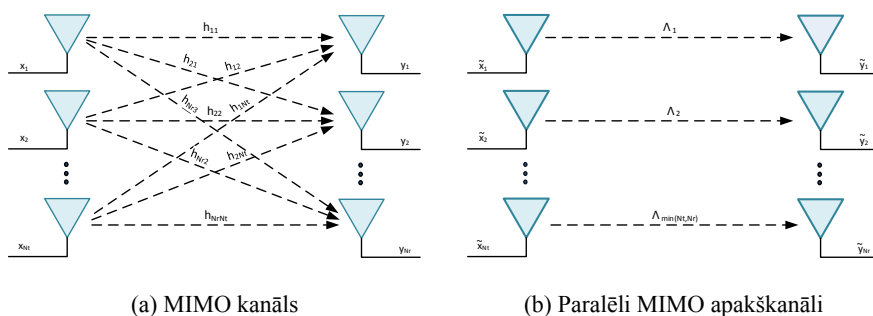
$\mathbf{x}$ – signāla vektors MIMO raidītājā ar garumu N_t ;

$\mathbf{y}$ – signāla vektors MIMO uztvērējā ar garumu N_r ;

$\mathbf{n}$ – troksnis MIMO kanālā.

Uztvērējā ar DSP metodēm (piemēram, īpašvērtību dekompozīciju) ir iespējams nodalīt pa dažādiem ceļiem pienākošus signālus, ja tie nav korelēti. Teorētiski tas ļauj iegūt līdz pat $\min(N_t, N_r)$ neatkarīgus kanālus ar pastiprinājuma koeficientu λ , kas ir matricas $\mathbf{H}$ īpašvērtības (idejiski parādīts 3.2b. attēlā). Šajos kanālos tiek pārraidītas paralēlas datu plūsmas, ko sauc par telpisko multipleksēšanu (SM).

Ad-hoc tīklā MIMO kanāls veidojas ne tikai katra tīkla savienojuma ietvaros, bet starp jebkuriem diviem mezgliem maršrutos. Darbā ir izmantots risinājums, kas MIMO SM apvieno ar vērsuma formēšanu [26], [27], lai papildus datu ātruma palielināšanai izslēgtu traucējumus no nevēlamajiem virzieniem.



3.2. att. MIMO sistēma (N_t un N_r ir attiecīgi raidītāja un uztvērēja režģa elementu skaits).

Esošo risinājumu analīze parāda, ka, lai pielietotu viedās antenas *ad-hoc* tīklā, ir nepieciešami MAC un maršrutēšanas protokolu uzlabojumi. Virziendarbībai šobrīd ir vājš atbalsts no protokolu puses, savukārt IEEE 802.11n ietvertais MIMO ir efektīvs tikai viena lēciena pārraidē [28] (tradicionāls WLAN).

Ir atrodami daudzi pētījumi par virziendarbības efektivitāti, pārraidot datus caur vienu maršrutu (piemēram, [14], [29], [30]), taču tās pielietošana VMP, lai mazinātu traucējumus starp maršrutiem, ir pētīta maz. Ir nepieciešams veikt papildu pētījumus ar dažādiem galvenās lapas platumiem (režģa elementu skaitu) un dažādam maršrutu skaitam komplektā, lai noteiktu optimālos pielietošanas apstākļus. Raidīšanas attāluma palielināšana, ko sniedz antenu režģa jaudas apstiprinājums, viennozīmīgi nenodrošina augstāku caurlaidspēju *ad-hoc* tīklā kopumā, tāpēc lietderīgi veikt papildus pētījumus par virziendarbības pastiprinājuma ietekmi uz VMP. Praktiski nav pētījumu par MIMO pielietošanu VMP.

Vēl viens aktuāls jautājums, kas VMP gadījumā nav pētīts, ir piemērota viedās antenas veida izvēle. Nenodalot konkrēti VMP, izvēli ietekmē, pirmkārt, radio viļņu izkļiedes līmenis

Antenu tehnoloģiju salīdzinājums vairāku maršrutu pārraidei

Raksturojumi	Parastās antenas	Virziendarbības <i>ad-hoc</i> tīkli	MIMO <i>ad-hoc</i> tīkli
Vairāki maršruti starp vienu datu avots/adresāts pāri	Maza varbūtība atrast mezglu nošķirtus un netraucējošus maršrutus	Derīgu maršrutu skaits palielinās. Maršrutu atklāšana un uzturēšana ir apgrūtināta	Derīgu maršrutu skaits palielinās, ja izmanto traucējumu izslēgšanu
Vairāk iesaistīto mezglu	Palielināts traucējumu līmenis. Augstāks kopējais enerģijas patēriņš	Radio traucējumi samazinās; mezglu skaits samazinās, ja izmanto lielāku raidīšanas attālumu, ko nodrošina pastiprinājums	Tīkla savienojumu pārraides ātrums palielinās, samazinot MAC sāncensību; traucējumu izslēgšana samazina radio traucējumus
Maršrutos ir vairāk lēcienu, lai tos telpiski nošķirtu	Palielinās traucējumu līmenis. Lielākas aiztures un augstāka zudumu varbūtība	Maršruti ir īsāki, ja izmanto lielāku raidīšanas attālumu, ko nodrošina pastiprinājums; galvenā lapa rada traucējumus mezgliem maršruta ietvaros	
Maršruti atrodas relatīvi tuvu	Izpaužas starpmaršrutu traucējumi	Ja galvenā lapa ir vērsta sava maršruta kaimiņu virzienā, starpmaršrutu traucējumus var samazināt	
Galapunkti strādā vairākos telpiski tuvos virzienos	Augsts traucējumu līmenis pirmajā/pēdējā lēcienā	Ja galvenās lapas platums ir pietiekami šaurs, traucējumi samazinās	
Intensīva datu plūsma maršrutos	Paaugstināts MAC sacensības līmenis augsta tīkla savienojumu noslogojuma dēļ	MAC sacensība samazinās, jo vērsums uzlabo telpisko atkalizmantojamību	SM palielina pārraides ātrumu, kas ļauj samazināt MAC sāncensību

vidē; otrkārt, tīkla topoloģijas un noslodzes parametri. Jāsecina, ka efektīvākās ir tās viedās antenas, kuras ietver signālu apstrādes metodes adaptīvai vērsuma formēšanai, ļaujot novērst starp-mezglu traucējumus, t.i., adaptīvs virziendarbības antenu režģis un MIMO sistēma ar telpisko multipleksēšanu un vērsuma formēšanu. Balstoties uz nodaļā veikto viedo antenu analīzi un iepriekš doto tīkla kopsakarību modeli, ir teorētiski salīdzinātas viedo antenu priekšrocības salīdzinājumā ar parastām antenām, VMP raksturīgos apstākļos (3.1. tabula) [31].

4. Metodes un rīku izstrāde caurlaidspējas noteikšanai

3. nodaļā ir piedāvāti risinājumi starpmaršrutu traucējumu samazināšanai, kuru spēju uzlabot datu pārraides efektivitāti *ad-hoc* tīklā ir nepieciešams pārbaudīt. Eksperimentāli pētījumi ar reālām iekārtām prasa lielus finansiālus ieguldījumus, tāpēc to plānots veikt ar modelēšanu.

Risinājumu efektivitātes novērtējumam jābūt neatkarīgam no konkrēta scenārija un grūti prognozējamiem parametriem, piemēram, mezglu izvietojuma. Tomēr tam jāparāda interesē-

jošo parametru, piemēram, starpmaršrutu attāluma, režģa elementu skaita u.c., ietekme uz maršrutu caurlaidspēju. Novērtēšanu var veikt, modelējot lielu skaitu nejaušu scenāriju un nosakot vidēji statistisko caurlaidspēju, kā arī tās izmaiņu tendences, mainoties interesējošajiem parametriem. Šādas metodes pielietošanai ir nepieciešami matemātiskie modeļi, kas ietver traucējumu novērsšanas risinājumus, un ātrdarbīga metode, kas, izmantojot šos modeļus, aprēķina maršrutu caurlaidspēju. Uz diskrētu notikumu apstrādi balstīti modelēšanas rīki, tādi kā NS-2 un OPNET, ir plaši pielietoti tīkla protokolu izstrādē [11], [32], bet nav piemēroti šādam uzdevumam. Pie tam šiem rīkiem ir arī ierobežotas fizikālā slāņa modelēšanas iespējas, piemēram, tajos nav ietverti viedo antenu modeļi.

Promocijas darbā ir izmantota analītiska metode, kuras pamatā ir grafu teorijā zināmais maksimālās plūsmas uzdevums. Metode ietver lielu skaitu mainīgo lielumu, kas pieaug līdz ar mezglu skaitu scenārijā, tādēļ uzdevumam tiek meklēts skaitlisks rezultāts, kam pielieto lineāru optimizāciju (4.5.). Līdzīga pieeja ir izmantota arī [5], [6], [33], taču promocijas darbā metode ir pilnveidota:

- pielietots aditīvs radio traucējumu modelis, kas precīzāk imitē PCS mehānismu;
- pielāgota caurlaidspējas noteikšanai maršrutiem ar kopīgiem mezgliem;
- papildināta ar virziendarbības un MIMO *ad-hoc* tīklu modeļiem.

Veiktie uzlabojumi ir aprakstīti arī promocijas darba autora publikācijās [31], [34].

Maršrutu caurlaidspējas noteikšanu ar šo metodi var iedalīt vairākos posmos, kuri ir izklāstīti tālāk:

- 1) meklē vienlaicīgi pieļaujamās pārraides, ko nosaka maršruti un traucējumu modelis;
- 2) aprēķina tīkla savienojumu datu pārraides ātrumu;
- 3) ar lineāru optimizāciju nosaka maksimālu datu plūsmas ātrumu maršrutos.

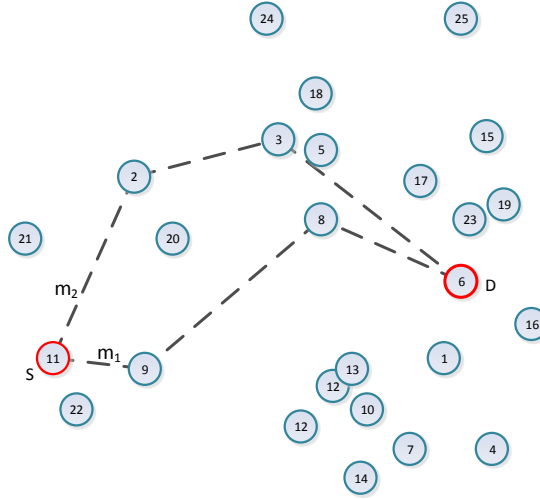
1. Pārraides shēma ir tādu tīkla savienojumu kopa, kuros pieļaujama vienlaicīga datu pārraide. Vienā lika momentā tīklā drīkst būt aktīva tikai viena pārraides shēma. Pārraides shēmas nosaka maršrutēšanas un traucējumu modelis, papildus ievērojot pusdupleksas pārraides nosacījumu. Piemērs scenārijam ar divu maršrutu komplektu parādīts 4.1. attēlā. Maršrutus veido sešu tīkla savienojumu kopa L :

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{11} \rightarrow n_2 \\ n_2 \rightarrow n_3 \\ n_3 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \\ n_9 \rightarrow n_8 \\ n_8 \rightarrow n_6 \end{array} \right\}$$

Pārraides shēmas sastāda no kopas L elementiem. Neņemot vērā traucējumus, tīkla savienojumus var sadalīt šādās pārraides shēmās, kas veidos pilnu neatkarīgu shēmu dažādību (citas pārraides shēmas nav iespējamās):

$$\left\{ \begin{array}{l} n_2 \rightarrow n_3 \\ n_8 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_{11} \rightarrow n_2 \\ n_8 \rightarrow n_6 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_3 \rightarrow n_6 \\ n_9 \rightarrow n_8 \\ n_{11} \rightarrow n_2 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_3 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_2 \rightarrow n_3 \\ n_9 \rightarrow n_8 \end{array} \right\}$$

Ad-hoc tīklu modelēšanas atbilstība reālam tīklam ir atkarīga no izmantotā traucējumu modeļa. Lai precīzāk modelētu starpmaršrutu traucējumus, atšķirībā no citiem darbiem ir izmantots aditīvs traucējumu modelis, kas veic CSMA/CA protokola darbības imitāciju raidītājā. Pārraides shēmas veido visas iespējamās tīkla savienojumu kombinācijas, sastādītas tā, ka summārā traucējumu jauda $P_{\sum I}$, ko jūt katrs no shēmā ietvertajiem raidītājiem, ir zemāka par



4.1. att. Scenārija piemērs ar diviem maršrutiem m_1 un m_2 starp datu avotu n_{11} un adresātu n_6 .

fiziskā nesēja jušanas jaudas sliekšni P_{CST} , papildus ņemot vērā fona troksni P_N :

$$P_{\Sigma I} + P_N < P_{CST}, \quad (4.1)$$

$$P_{CST} > P_N. \quad (4.2)$$

Piemērojot traucējumu modeli 4.1. attēla scenārijam, iespējamo pārraides shēmu skaits paliecināsies, jo atsevišķi savienojumi nevarēs atrasties vienā shēmā.

Visu iespējamo pārraides shēmu atrašana ar nosacījumu (4.1.) ir komplicēts uzdevums. Piemēram, trīs maršrutu scenārijam, kad datu avots un adresāts atrodas 11 lēcienu attālumā, shēmu skaits var sasniegt 12 000. Tam ir izveidots efektīvs imitācijas modelis, un tas ir realizēts kā iteratīvs process, kurā nejauši tiek ņemts tīkla savienojums no kopas L un ievietots shēmā, to atkārtotot līdz nevienam savienojumam ievietot vairs nevar. Tad veido nākamo shēmu, kamēr visas iespējamās shēmas atrastas. Uzdevumu apgrūtina vairāki tālāk uzskaitītie apstākļi.

- Ir nepietiekami pārbaudīt, vai pārraides shēmā iekļaujamais savienojums nekonfliktē ar kādu jau tajā iekļauto savienojumu (konfliktu grafa pieeja [5], [33]). Aditīva modeļa gadījumā, pirms pievienot savienojumu shēmai, jāpārbauda arī summārās traucējumu jaudas izmaiņa starp jau shēmā ietvertajiem savienojumiem, lai nevienā kombinācijā tā nepārsniegtu P_{CST} sliekšni.
- Ir jāveic pārbaude, lai noteiktu, vai jaunizveidotā shēma ir unikāla (nav izveidota iepriekšējos mēģinājumos). Lai samazinātu meklēšanas laiku, ir piedāvāts katrai shēmai iegūt identifikatoru (piemēram, summējot mezglu indeksus) un salīdzināšanu veikt identifikatoru līmenī.
- Kad kopa L ietver lielu skaitu tīkla savienojumu, visu shēmu meklēšana nav lietderīga, tādēļ empīriski ir noteikta robeža $25 \cdot \text{num}(L)$, kad programmas izpildi apturēt.

2. Datu pārraides ātrums. Nākamais solis ir aprēķināt maksimālo datu pārraides ātrumu katram shēmā ietvertajam tīkla savienojumam, pastāvot traucējumiem no pārējiem shēmas savienojumiem. Izmanto signāla un traucējumi plus trokšņa attiecības (SINR) modeli, ar kuru aprēķina derīgā signāla jaudu pret Gausa (fona) trokšņu un traucējumu jaudas summu (4.3.). Teorētisko pārraides ātruma robežu starp diviem mezgliem nosaka Šenona teorēma (4.4.):

$$\gamma = \frac{P_{Rx}}{P_N + P_{\Sigma I}}, \quad (4.3)$$

$$C = B \log_2(1 + \gamma), \quad (4.4)$$

kur P_{Rx} – uztvertā derīgā signāla jauda;
 P_N – fona trokšņa jauda;
 $P_{\Sigma I}$ – summārā traucējošo signālu jauda;
 C – tīkla savienojuma caurlaidspēja;
 B – frekvenču joslas (kanāla) platums.

Kanāla pastiprinājuma koeficientu starp diviem mezgliem aprēķina ar kombinēto pārraides ceļa zudumu (*path loss*) un aizēnojuma (*shadowing*) radio viļņu izplatīšanās modeli [35].

Pēc līdzīgas shēmas var noteikt datu pārraides ātrumu arī pārraidei ar viedajām antenām (virziendarbības un MIMO), bet papildus jāņem vērā arī antenu režģa faktors. Virziendarbībai tas nozīmē meklēt optimālus antenu režģa svara koeficientus. MIMO gadījumā, lai vienkāršotu aprēķinus, izdevīgi ir abstrahēties no fizikālajiem procesiem. MIMO analīzei daudzlēcienā tīklā tiek izmantoti uz brīvības pakāpēm balstīti modeļi (piemēram, [14]), [26], [27]. Brīvības pakāpes jēdziens ir saistīts ar režģa elementu skaitu un kanāla pārvades matricas $\mathbf{H}$ rangu, labākajā gadījumā ļaujot režģim ar N elementiem nodrošināt N telpiskās brīvības pakāpes. Mezglis patērē vienu brīvības pakāpi katrai derīgajai MIMO plūsmai un vienu – traucējošas plūsmas izslēgšanai no kaimiņmezgliem. Traucējumu izslēgšanu veic gan raidītāja, gan uztvērēja pusē.

3. Maršrutu caurlaidspēja. Metode paredz, ka visas pārraides (aktīvie tīkla savienojumi) darbojas laikspraugās. Tīkla savienojumi izmanto vienu radio kanālu, tāpēc kanāla laiks starp savienojumiem, kuri nevar būt aktīvi vienlaicīgi, ir jāsadala. Tas nozīmē sadalīt laiku starp 1. soli atrastajām pārraides shēmām, katrai no tām atvēlot daļu no kopējā laika. To, cik ilgi shēma būs aktīva, var raksturot ar svara koeficientu p , kam spēkā nosacījumi $0 \leq p_i \leq 1$ un $\sum_{i=1}^k p_i = 1$, kur p_i svara (kanāla laika) koeficients pārraides shēmai ar indeksu i . Uzdevums ir atrast tādu laika plānojumu pilnam pārraides shēmu kopumam, kas nodrošinātu maksimālu plūsmas ātrumu starp datu avotu un adresātu, parādot arī maršrutu caurlaidspēju. Ar lineāru optimizāciju tiek risināts maksimālās plūsmas uzdevums (4.5.), kas nosaka maksimizēt no datu avota s izejošās plūsmas, papildus ievērojot nosacījumus (4.6.)–(4.9.). Vairāku maršrutu scenārijam tas nozīmē maksimizēt datu ātrumu katra maršruta pirmajā tīkla savienojumā. Tā kā datu plūsmai maršrutā jābūt pastāvīgai (nosacījums (4.8.)), tad tas automātiski maksimizēs pārraides ātrumu visos maršrutam piederošajos tīkla savienojumos:

$$\max \sum_{l_{si} \in L} C_{si}, \quad (4.5)$$

$$p_1 \mathbf{r}_1 + p_2 \mathbf{r}_2 + \cdots + p_k \mathbf{r}_k \leq \mathbf{c}, \quad (4.6)$$

$$C_{ij} \geq 0 \quad \forall l_{ij} \in L, \quad (4.7)$$

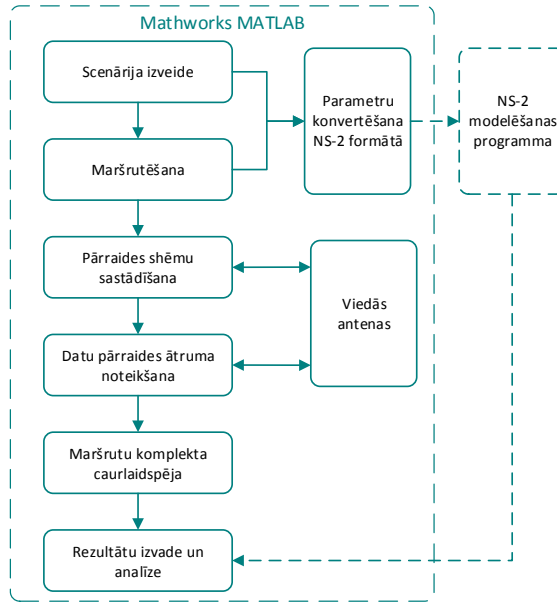
$$C_{si} = C_{ij} \quad \forall l_{ij} \in L, \quad (4.8)$$

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_k \leq 1, \quad (4.9)$$

kur C_{si} – pārraides ātrums plūsmai no datu avota s uz kaimiņmezglu i ;
 C_{ij} – pārraides ātrums kopai L piederošā tīkla savienojumā;
 k – pārraides shēmu skaits;
 $\mathbf{r}_k$ – vektors ar datu pārraides ātrumiem k -tai pārraides shēmai;
 $\mathbf{c}$ – vektors, kura elementi ir katra tīkla savienojuma svērtā caurlaidspējas summa.

Noteiktā caurlaidspēja ir iespējama tikai teorētiski ar idealizētu MAC protokolu, bet tā parāda arī maršrutu potenciālu, ļaujot savstarpēji salīdzināt gan maršrutu komplektus, gan traucējumu novēršanas risinājumus. Labāks teorētiskais rezultāts liecina par labāku rezultātu arī reālam tīklam tuvākos apstākļos. To apstiprina veiktā rezultātu salīdzināšana ar NS-2, novērojot stipru korelāciju, ja PCS apgabala rādiuss ir aptuveni divas reizes lielāks par raidīšanas attālumu. Var secināt, ka *hibrīds modelis, kas balstās uz maksimālās plūsmas uzdevumu un autora izstrādātu imitācijas modeli, kurš ietver aditīvus radio traucējumus, ir efektīvs risinājums vairāku maršrutu efektivitātes novērtēšanai.*

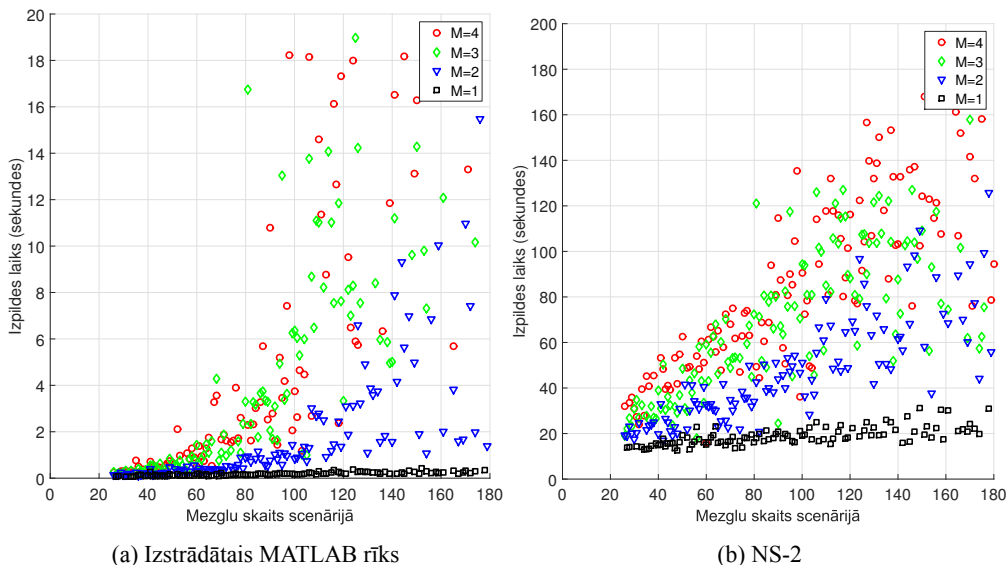
Metode ir īstenota praktiski, *Mathworks* MATLAB vidē programmētā *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīkā [34], [36], ietverot papildus funkcijas nejaušu scenāriju sagatavošanai, maršrutēšanai un viedo antenu modeļiem (4.2. attēls). Programmu kods ir publiski pieejams *GitHub* repozitorijā <https://github.com/cikol/NetMat>. Izstrādātais modelēšanas rīks ir veidots pēc



4.2. att. MATLAB rīka blokshēma.

tīkla kopsakarību modeļa (2.3. attēls), īstenojot tos blokus, kas ietekmē caurlaidspēju.

Katra scenārija modelēšanas laiks ir atkarīgs no mezglu skaita tīklā, maršrutu skaita komplektā, antenas režģa elementu skaita u.c. parametriem. Laiks ir atkarīgs arī no PCS apgabala rādiusa, jo tas ietekmē, pirmkārt, iterāciju skaitu visu pārraides shēmu atrašanai un, otrkārt, palielina mainīgo skaitu optimizācijas uzdevumā. Salīdzinot ar NS-2, izstrādātais modelēšanas rīks ļauj īsākā laikā (vidēji 10 reizes ātrāk) noteikt maršrutu komplekta caurlaidspēju, īpaši, ja iesaistīto mezglu skaits ir lielāks (4.3. attēlā). Var novērot, ka abās modelēšanas vidēs laiks palielinās līdz ar maršrutu skaitu komplektā. Jāņem vērā, ka NS-2 patērētais laiks ir atkarīgs no izmantotās metodikas maksimālā ātruma fiksēšanai. Dotie rezultāti atbilst darbā pielietotajai metodikai, bet nesniedz vērtējumu par NS-2 programmu kopumā.



4.3. att. Caurlaidspējas noteikšanai patērētais laiks atkarībā no mezglu skaita.

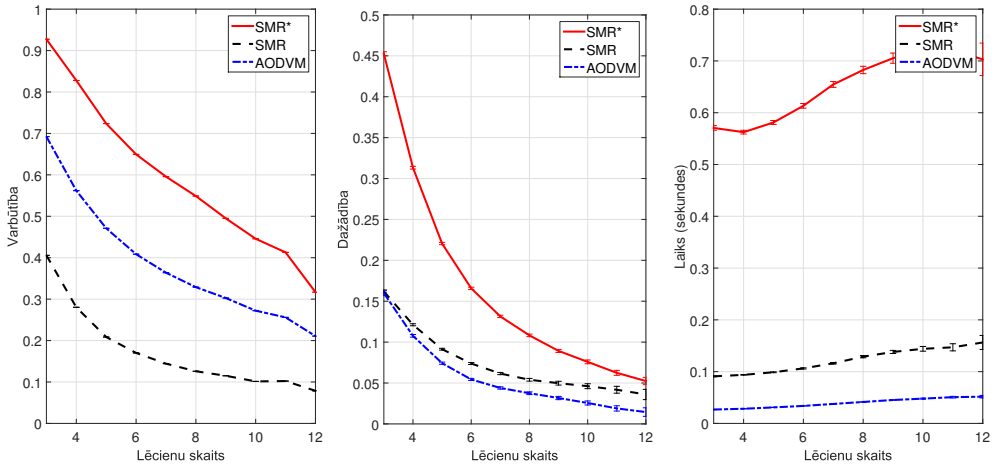
Izstrādāto modelēšanas rīku ir paredzēts pielietot caurlaidspējas noteikšanai lielam skaitam nejaušu scenāriju. Kopējo tam nepieciešamo laiku var efektīvi samazināt, izmantojot paralēlo skaitļošanu. Šādam uzdevumam, kur tiek pielietota Montekarlo modelēšana, kā arī konkrētas ievades parametru kombinācijas katram scenārijam (*parameter sweep* modelēšana), piemērota ir distributīva skaitļošanas vide, kas ļauj daudzu neatkarīgu uzdevumu paralēlu apstrādi. 5. nodaļas pētījumiem ir izmantots Rīgas Tehniskā universitātē pieejamais HPC klasteris ar 20 teraFLOPS veikspēju, kur promocijas darba ietvaros ir instalēts un noskaņots darbam MATLAB DCS modulis. Kopējais laiks, kas būtu jāpatērē uz personālā datora, kura veikspēja ir ekvivalenta viena *Intel Xeon* centrālā procesora (CPU) kodola veikspējai, lai iegūtu 5. nodaļas rezultātus, ir aptuveni 37 000 CPU stundas jeb 1542 dienas.

Nodaļā ir uzlabots SMR maršrutēšanas protokols un tam izstrādāts vienkāršots MATLAB modelis [36], ļaujot nodrošināt lielāku maršrutu komplektu dažādību starp vienu datu avota un adresāta pāri, salīdzinot ar oriģinālo SMR vai AODVM protokolu. 4.4. attēlā ir savstarpēji salīdzināta maršrutu atklāšanas algoritmu efektivitāte. Vērtēšanai izmantotas vairākas metrikas:

- varbūtība izveidot vismaz vienu maršrutu komplektu vienā maršrutu atklāšanas mēģinājumā;

- atrasto maršrutu komplektu relatīvā dažādība, kur vērtē pēc Eiklīda attāluma starp maršrutiem (attāluma aprēķināšanas metode dota [22]); relatīvo dažādību aprēķina $d_{rel} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d}$, kur d_{max} ir starpmaršrutu attālums komplektam ar telpiski visnošķirtākajiem maršrutiem un d_{min} – vismazāk nošķirtajiem maršrutiem, d – tiešais attālums starp datu avotu un adresātu;
- vidējais laiks, kas nepieciešams maršrutu atklāšanai.

Katrs efektivitātes rādītājs ir iegūts, aprēķinot vidējo vērtību daudziem rezultātiem, kas iegūti, modelējot lielu skaitu nejaušu scenāriju ar diviem maršrutiem. Kā arguments uz x ass ir izmantots lēcienu skaits starp datu avotu un adresātu. Lēcienu skaitu nosaka īsākais atrastais maršruts.



(a) Varbūtība izveidot komplektu (b) Maršrutu komplektu dažādība (c) Maršrutēšanas laiks

4.4. att. Maršrutēšanas protokolu efektivitāte.

4.4a. un 4.4b. attēli parāda, ka uzlabots SMR (SMR*) protokols atrod maršrutu komplektu ar augstāku varbūtību, un šie komplekti ir ar lielāku dažādību, salīdzinot ar SMR un AODVM. Dažādība ir būtiska 5. nodaļā, lai pētītu maršrutu komplekta izvēles kritēriju atkarību no tīkla parametriem. Kā negatīvais efekts dažādībai ir lielāks protokola virstēriņš, kas palielina modeļošanai nepieciešamo laiku (4.4c. attēlā). Tomēr vienlaicīgi jāņem arī vērā, ka, pastāvot lielākai varbūtībai izveidot maršrutu komplektu, nepieciešams mazāks maršrutēšanas atkārtojumu skaits. Tā kā SMR* gadījumā varbūtība ir augstāka, tad vidējais laiks maršrutu komplekta izveidei būs tuvāks pārējiem protokoliem.

5. Vairāku maršrutu pārraides efektivitātes novērtēšana

Promocijas darba mērķis ir datu pārraides efektivitātes palielināšana bezvadu *ad-hoc* tīklā, izmantojot vairāku maršrutu pārraidi un paņēmienus traucējumu novēršanai. Iepriekšējās nodaļas var uzskatīt par sagatavošanās posmiem šādu pētījumu veikšanai: veikta situācijas analīze un izstrādāts tīkla parametru kopsakarību modelis, meklēti risinājumi traucējumu novēršanai. Gala rezultātā izstrādāta analītiska metode, kas ietver šos risinājumus, kā arī MATLAB rīks datormodelēšanai.

Šajā nodaļā ar MATLAB rīka palīdzību ir novērtēta traucējumu novēršanas risinājumu efektivitāte. Tas ir veikts, nosakot vidēji statistisko caurlaidspēju lielam skaitam nejaušu sce-

nāriju, kas ietver nejaušu: a) laukuma izmēru; b) mezglu izvietojumu; c) datu avotu un adresātu; d) maršrutu komplekta izvēli. Modelēšanas izmantotie tīkla parametri apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Modelēšanas parametri

Kopējie modelēšanas parametri atbilstoši IEEE 802.11g/n standartam	
Parametrs	Vērtība
Radioviļņu izplatīšanās modelis	Pārāides ceļa zudumu ar $\alpha = 2$ vai $\alpha = 4$
Raidīšanas jauda P_{Tx}	0,1 W
Uztvērēja jutība P_0	3,16e-11 W (75 dBm)
Maksimālais pārāides attālums d_{Tx} atkarībā no zudumu parametra	≈ 547 metri, ja $\alpha = 2$ ≈ 23 metri, ja $\alpha = 4$
Scenārija laukuma malas robežas	no $2d_{Tx}$ līdz $8d_{Tx}$
Troksnis	1,6e-13 W (-101 dBm)
Nesēja frekvence	2,45 GHz
Pārāides kanāla platums	20 MHz
MAC	CSMA/CA ar izslēgtu RTS/CTS
PCS sliekšnis (izteikts kā attālums)	$2d_{Tx}$
Maršrutēšanas protokols	Uzlabots SMR
Maršrutu komplekta nosacījumi	maršruti nekrustojas un ir mezglu nošķirti
Viedo antenu modelēšanā izmantotie parametri	
Parametrs	Vērtība
Radio viļņu izplatīšanās zudumu parametrs	$\alpha = 4$
Režģa elements	Izotropisks starotājs
Režģa elementu skaits	Vienāds visos mezglos 2–32
Attālums starp režģa elementiem	0,06 m

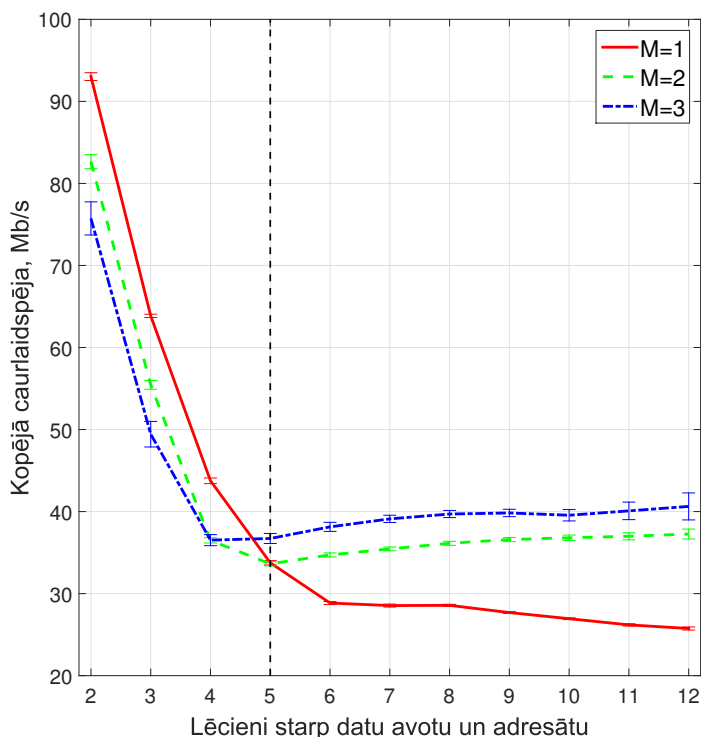
Modelēta optimāla maršrutu izvēle VMP gan maršrutu skaita, gan maršrutu komplekta izvēles kritēriju ziņā (īsākais ceļš, maksimāls attālums starp maršrutiem vai nejauša izvēle). Iegūtie rezultāti (atspoguļoti darba autora publikācijās [31], [34], [36]) apstiprina iepriekšējās nodaļās izdarītos secinājumus par svarīgākajiem faktoriem, kas ietekmē maksimāli iespējamo datu pārāides ātrumu *ad-hoc* tīklā. Datu pārāides ātrums ir atkarīgs galvenokārt no lēcienu skaita maršrutā starp datu avotu un adresātu, kā arī no savstarpējiem traucējumiem datu pārāides procesā. Lēcienu skaits, savukārt ir atkarīgs no tiešā attāluma starp datu avotu un adresātu, maksimālā attāluma savienojuma izveidei starp diviem mezgliem un maršruta izvēles algoritma. Lēcienu skaitu var samazināt, ja izmanto virziendarbības antenas ar pastiprinājumu, jo tas palielina datu pārāides attālumu starp mezgliem. Savstarpējie traucējumi ir atkarīgi gan no attāluma starp maršrutiem VMP, gan no radio viļņu pārāides zudumu parametra α , gan no viedo antenu izmantošanas un to veida.

Ja attālums starp datu avotu un adresātu ir mazs (2-4 lēcieni), tad *ad-hoc* tīklā bez viedajām antenām vislielāko datu pārāides ātrumu var sasniegt ar vienu maršrutu ($M = 1$). Datu

pārtraide, izmantojot VMP, kļūst efektīva lielākā attālumā (5 lēcieni un vairāk), tomēr, ja pārtraides zudumu parametrs tuvojas brīvas telpas apstākļiem $\alpha = 2$, ieguvums ir vērā neņemams. Ja pārtraides zudumi vidē ir lielāki ($\alpha = 4$), palielinot maršrutu skaitu no 1 līdz 3, maksimālais datu pārtraides ātrums palielinās līdz pat 1,5 reizēm. Var secināt, ka piemērotākie apstākļi vairāku maršrutu izmantošanai *ad-hoc* tīklā ir pie lielākiem pārtraides zudumiem un attāluma starp datu avotu un adresātu vairāk par 4 lēcieni.

Pie dotajiem modelēšanas nosacījumiem 4-6 lēcieni ir robeža, kad mainās dažādu faktoru ietekmes raksturs uz datu pārtraides ātrumu, kas ietekmē arī maršrutu izvēles kritērijus. Ir salīdzināti trīs maršrutu komplekta izvēles kritērij: īsākā ceļa mezglu nošķirtu maršrutu komplekts, komplekts ar maksimālu starpmaršrutu attālumu un nejauša izvēle. Katrā scenārijā ($M = 2$ un $M = 3$) starp datu avotu un adresātu atrod vairākus iespējamus maršrutu kompleksus, kuriem piemēro šos kritērijus, lai izvēlētos, iespējams, atšķirīgus kompleksus. Rezultāti rāda, ka īsākā ceļa maršrutu komplekts ļauj nodrošināt līdz 20% augstāku caurlaidspēju, ja pārtraides attālums ir līdz 4 lēcieniem, bet maksimāls starpmaršrutu attālums dod labāku rezultātu, ja attālums ir 5–10 lēcieni, tomēr ieguvums ir mazāks (ja $M = 3$ – pat vērā neņemams). Attālumā, kas lielāks par 10 lēcieniem, nav atšķirības pēc kāda kritērija izvēlēties maršrutu komplektu. Nejauša izvēle nesniedz labāku rezultātu nevienā gadījumā.

Efektivitātes pētījumu rezultāti (bez viedajām antenām) ir apkopoti 5.1. attēlā, parādot caurlaidspējas atkarību no lēcienu skaita, ja maršrutu skaits $M = 1$, $M = 2$ un $M = 3$, ņemot vērā optimālus maršrutu izvēles kritērijus. Var novērot, ka vairāku maršrutu pārtraide ir efektīva tikai, ja attālums starp datu avotu un adresātu ir lielāks par kritisko robežu, neraugoties uz optimālu izvēles kritēriju izmantošanu.



5.1. att. VMP efektivitāte pētījumos bez viedajām antenām.

Maksimālo datu pārraides ātrumu palielina optimāla maršrutu izvēle kopā ar viedo antenu pielietošanu, kas samazinātu savstarpējos traucējumus [31]. Ir salīdzināti šādi viedo antenu veidi un darbības režīmi:

- 1) vadāmās lapas režģis bez jaudas pastiprinājuma (vērsuma amplitūdu normalizē tā, lai maksimālais raidīšanas attālums ir vienāds ar attālumu antenai bez vērsuma);
- 2) vadāmās lapas režģis ar pastiprinājumu, kas palielina kanāla pastiprinājuma koeficientu N^2 reizi;
- 3) adaptīvs antenu režģis pārraidei ar virziendarbību bez pastiprinājuma;
- 4) adaptīvs antenu režģis, kas nodrošina MIMO SM ar vērsuma formēšanu; kopējā raidīšanas jauda starp MIMO apakškanāliem tiek sadalīta vienmērīgi.

Tīkls ir homogēns, kur visi mezgli izmanto vienādus parametrus.

Modelēšanas rezultāti parāda:

- adaptīvs antenu režģis virziendarbības režīmā (viena telpiskā plūsma) nodrošina maksimālu datu pārraides ātruma pieaugumu (vairāk nekā divas reizes), kad maršrutu skaits tiek palielināts no viens līdz trīs;
- MIMO tehnoloģija nodrošina kopumā augstāko tīkla datu pārraides ātrumu, taču tā nedod būtisku ieguvumu VMP gadījumā;
- vadāmās lapas antenu režģis, neizmantojot pastiprinājumu pārraides attāluma palielināšanai, ir efektīvāks VMP (samazina starpmaršrutu traucējumus), salīdzinot ar vadāmās lapas režģi ar pastiprinājumu, kurš ir efektīvs tikai pārraidei caur vienu maršrutu.

Viedo antenu potenciāls traucējumu samazināšanā no citiem mezgliem galvenokārt ir atkarīgs no brīvības pakāpju skaita, ko nosaka antenu režģa elementu skaits. Ja iespējamo traucētāju skaits palielinās, kas notiek, izvēloties vairāk maršrutu, tad arī brīvības pakāpju skaits ir jāpalielina. Adaptīvam antenu režģim jānodrošina vismaz 6 elementi ($N = 6$), lai vairāku maršrutu pārraide dotu vērā ņemamu uzlabojumu. Kad tiek izmantoti vairāki maršruti, efektīvāk ir izmantot brīvības pakāpes traucējumu novēršanai nekā datu pārraides ātruma palielināšanai ar papildu telpiskajām plūsmām. Iegūtie rezultāti ir apkopoti 5.2. attēlā, parādot caurlaidspējas atkarību no maršrutu skaita dažādiem viedo antenu veidiem, ja $N = 8$, kad attālums starp datu avotu adresātu ir 2–5 lēcieni (5.2a. attēls) un 6 lēcieni un vairāk (5.2b. attēls).

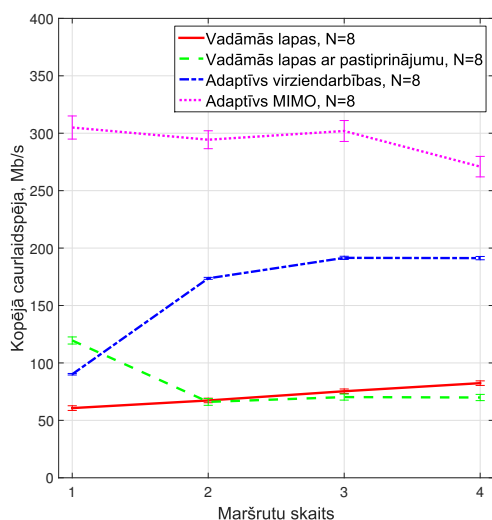
Viedo antenu gadījumā optimāls maršrutu komplekta izvēles kritērijs ir atkarīgs no režģa veida, bet nav novērojama atkarība no attāluma starp datu avotu un adresātu. Pielietojot vadāmās lapas antenu režģi, augstāku caurlaidspēju nodrošina komplekts ar lielāku starpmaršrutu attālumu. Adaptīvam režģim, ja ir pietiekams režģa elementu skaits traucējumu izslēgšanai, visi kritēriji sniedz līdzīgu rezultātu.

Nodaļā veiktie pētījumi rāda, ka optimāla maršrutu izvēle uzlabo datu pārraides efektivitāti. Izvēli veic, ņemot vērā tīklu raksturojošos parametrus, tāpēc kā pētījumu rezultātu apkopojums ir izstrādātas rekomendācijas optimālu maršrutu izvēlei atkarībā no izmantotā antenas veida (parastā vai viedā) un tīkla apstākļiem (α , attālums starp datu avotu/adresātu un viedai antenai N). Parastai antenai ir šādas rekomendācijas:

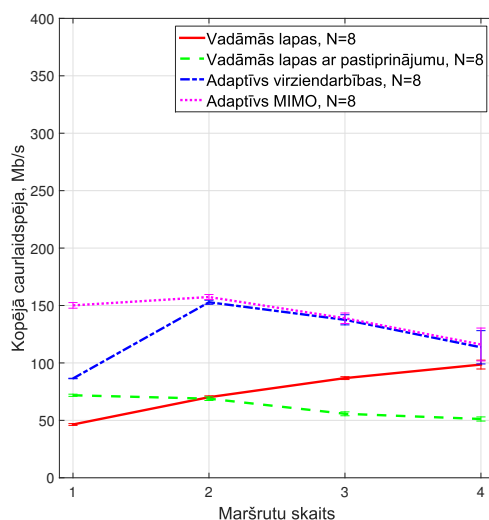
- vidē, kuras īpašības ir tuvas brīvas telpas apstākļiem, pārraidei izvēlas vienu īsākā ceļa maršrutu;
- vidē, kur ir lielāki pārraides zudumi ($\alpha = 4$), ņem vērā attālumu starp datu avotu un adresātu: *a*) ja attālums ir neliels (2–4 lēcieni), izvēlas vienu īsāku ceļa maršrutu; *b*) ja attālums ir 5 lēcieni un vairāk, izvēlas 2–3 maršrutus ar lielāku telpisko nošķirtību (maksimāla attāluma kritērijs).

Viedām antenām jāievēro šādas rekomendācijas:

- vadāmās lapas antenu režģim bez virziendarbības pastiprinājuma jāņem vērā attālums



(a) Attālums ir 2–5 lēcieni



(b) Attālums ir 6 lēcieni un vairāk

5.2. att. Kopējās caurlaidspējas atkarība no maršrutu skaita dažādiem viedo antenu veidiem

starp datu avotu un adresātu: *a)* ja attālums ir neliels (2–4 lēcieni) un ja N ir līdz 6, izvēlas vienu īsākā ceļa maršrutu; ja N ir 8 un vairāk, izvēlas līdz 4 maksimāli nošķirtus maršrutus; *b)* lielākā attālumā (5 lēcieni un vairāk) optimālais skaits ir līdz 3 maršrutiem, ar maksimālu telpisko nošķirtību neatkarīgi no N ;

- vadāmās lapas antenu režģim ar pastiprinājumu optimāls ir viens īsākā ceļa maršruts neatkarīgi no N ;
- adaptīvam virziendarbības antenu režģim, ja N ir līdz 4, optimāls ir viens maršruts, bet, ja N ir lielāks, jāizvēlas līdz 2 maršrutiem; abos gadījumos piemērotākais ir īsākā ceļa kritērijs.
- adaptīvam antenu režģim MIMO režīmā visefektīvākā datu pārraide ir caur vienu īsākā ceļa maršrutu neatkarīgi no N .

Rekomendācijas ir izmantojamas traucējumus ietverošu (*interference-aware*) maršrutēšanas protokolu lēmumu pieņemšanas algoritmos. Nodaļā veiktie pētījumi koncentrējas uz traucējumiem, tādēļ ir analizētas tikai nekustīgas *ad-hoc* tīkla topoloģijas. Tomēr rekomendācijas var piemērot arī kustīgiem scenārijiem, kombinējot nodaļā lietotās traucējumus ietverošās metrikas ar kustīgumu raksturojošām metrikām.

Galvenie darba rezultāti un secinājumi

Promocijas darbā ir pētīta datu pārraides efektivitātes palielināšana IEEE 802.11g/n standarta *ad-hoc* tīklā, izmantojot vairāku maršrutu pārraidi un paņēmienus traucējumu samazināšanai. Datu pārraides efektivitāte tiek palielināta, ko parāda tālāk apkopotie rezultāti un secinājumi.

Video pārraide ir viens no grūtāk realizējamiem pakalpojumiem tās augsto prasību dēļ, un vienlaicīgi pieaug arī tās aktualitāte, tāpēc tā ir izmantots kā testa pielietojums darbā veiktajos pētījumos. Viens no faktoriem, kas ierobežo video datu pārraidi *ad-hoc* tīklā, ir mezglu radītie

savstarpējie traucējumi, kas samazina maksimālo datu pārraides ātrumu. Kā risinājums datu pārraides ātruma palielināšanai ir izvēlēta vairāku maršrutu pārraide, jo tā ļauj veikt uzlabojumus ar mazākām izmaiņām IEEE 802.11 standartā.

Analizējot iespējas pārraidīt video caur vairākiem maršrutiem, ir izstrādāts konceptuāls algoritms, kas balstās uz esošiem video pārraides risinājumiem. Šāda algoritma īstenošanai ir nepieciešama OSI starpslāņu sadarbība, lai iegūtu informāciju no zemākiem tīkla slāņiem par video pārraidei svarīgām maršrutu metrikām (caurlaidspēja, aizture, trīce, pakešu zudumi). Ir noskaidroti faktori, kas ietekmē tīklu un ir jāņem vērā, nosakot metrikas: iekārtu veiktspēja, pārraides tehnoloģijas un protokoli, tīkla topoloģijas parametri, radio kanāla stāvoklis, mezglu kustīgums, tīkla noslodze, kā arī maršrutu izvēle. Veiktā *ad-hoc* tīkla **parametru analīze ir shematiski apkopota tīkla kopsakarību modelī**. Modelis uzskatāmi sasaista tīklu ietekmējošos faktorus ar video pārraidei svarīgām metrikām un parāda loģisko shēmu, pēc kādas jāanalizē tīkls, lai noteiktu šīs metrikas.

Eksperimenti IEEE 802.11 g/n *ad-hoc* tīkla testgultnē un modelēšana pierāda, ka starpmaršrutu traucējumi ir viens no galvenajiem datu pārraides ātrumu ierobežojošiem faktoriem, pārraidot datus vairākos maršrutos. Ja mezgli no diviem maršrutiem rada savstarpējus traucējumus, tad kopējā maršrutu caurlaidspēja nepalielinās. Traucējumu intensitāti ietekmē maršrutu nošķirtība un CSMA/CA fiziskā nesēja jušanas darbības rādiuss.

Lai uzlabotu vairāku maršrutu pārraides efektivitāti, ir jāpielieto paņēmieni traucējumu samazināšanai. Promocijas darbā ir pētīta traucējumus ietveroša maršrutu izvēle un viedo antenu pielietošana. Risinājumu efektivitāte ir novērtēta ar modelēšanas palīdzību, nosakot to ietekmi uz vidēji statistisko caurlaidspēju lielam skaitam nejaušu scenāriju.

Vairāku maršrutu kopējo caurlaidspēju var efektīvi noteikt ar maksimālās plūsmas uzdevuma risināšanas metodi un autora izstrādātu simulācijas modeli, kas ietver adiitīvus radio traucējumus. Simulācijas modelis veic CSMA/CA protokola darbības imitāciju raidītājā. Iegūtiem rezultātiem ir izteikta korelācija ($\geq 0,5$) ar NS-2 tīkla modelēšanas programmu.

Metode vairāku maršrutu caurlaidspējas noteikšanai ir īstenota *MATLAB* vidē kā *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīks. Rīks ietver papildu moduļus nejaušu scenāriju sagatavošanai, maršrutēšanai un viedām antenām:

- uzlabotais maršrutu atklāšanas algoritms SMR maršrutēšanas protokolam, kam izstrādāts arī *MATLAB* modelis, nodrošina līdz pat trim reizēm lielāku maršrutu komplektu dažādību, salīdzinot ar oriģinālo SMR vai AODVM;
- viedo antenu analīzei ir izdevīgi pielietot uz brīvības pakāpēm balstītus modeļus, kas vienkāršo kanāla caurlaidspējas aprēķināšanu daudzslēdņu apstākļos;
- modelēšanas rīks ļauj iegūt rezultātu līdz 10 reizēm ātrāk, salīdzinot ar NS-2, tādēļ tas ir efektīvi pielietojams daudzu scenāriju analīzei; kopējo modelēšanai nepieciešamo laiku samazina paralēlā skaitļošana, kas ir veikta HPC klasterī.

Veicot modelēšanu, noskaidrots, ka traucējumus samazina piemērota maršrutu komplekta izvēle ar optimālu maršrutu skaitu un pēc optimāla izvēles kritērija. Abi izvēles parametri ir atkarīgi no attāluma starp datu avotu un adresātu. **Vairāku maršrutu pārraide ir efektīva, ja attālums starp datu avotu un adresātu pārsniedz noteiktu robežu, kas darbā ir 5 lēcieni,**

un šī robeža ir spēkā neatkarīgi no maršrutu izvēles kritērija. Ar optimāliem maršrutu izvēles kritērijiem, palielinot maršrutu skaitu līdz 3, datu pārraides ātrums palielinās līdz 50%, salīdzinot ar vienu maršrutu. Mazākā attālumā (2–4 lēcieni) vislielāko datu pārraides ātrumu var sasniegt ar vienu maršrutu.

Datu pārraides ātrumu var palielināt, kombinējot optimālu maršrutu izvēli ar viedo antenu pielietošanu. Salīdzinot dažādu viedo antenu veidu spēju samazināt starp-maršrutu traucējumus, noskaidrots, ka virziendarbības antenu režģi darbojas efektīvāk par MIMO, jo nodrošina caurlaidspējas pieaugumu, palielinot maršrutu skaitu. **Adaptīvs antenu režģis ar vienu telpisko plūsmu (virziendarbības režīmā) nodrošina visefektīvāko datu pārraidi, ļaujot dubultot caurlaidspēju, ja tiek nodrošināts pietiekams antenu režģa brīvības pakāpju skaits $N \geq 8$.** Virziendarbības pastiprinājums palielina datu pārraides ātrumu, jo ļauj samazināt lēcien skaitu, tomēr tā pielietošana ir lietderīga tikai pārraidei caur vienu maršrutu.

Lai apkopotu darbā veiktos pētījumus, ir **izstrādātas rekomendācijas optimālu maršrutu izvēlei** atkarībā no izmantotā antenas veida un tīkla parametriem. Tās ir izmantojamas maršrutēšanas protokolu lēmumu pieņemšanas algoritmos.

Literatūra

- [1] Cisco Systems I. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020. Internets. – <http://www.cisco.com/>. 2016 [Citēts: 18.04.2016].
- [2] Bangerter B., Talwar S., Arefi R., and Stewart K. Networks and devices for the 5G era// IEEE Communications Magazine. – 2014. – vol. 52, no. 2, – pp. 90–96.
- [3] Ultra-fast and Reliable Smart Wi-Fi Access Points with Adaptive Antenna Technology. Internets. – <http://www.ruckuswireless.com/products/zoneflex-indoor> [Citēts: 18.04.2016].
- [4] GNU General Public License. The Network Simulator NS-2 (ver. 1.34).
- [5] Jain K., Padhye J., Padmanabhan V., and Qiu L. Impact Of Interference On Multi-hop Wireless Network Performance// Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. – 2003. – pp. 66–80.
- [6] Toupis S. and Goldsmith A. Capacity regions for wireless ad hoc networks// IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2003. – vol. 2, no. 4, – pp. 736–748.
- [7] The MathWorks Inc. Mathworks MATLAB version R2015a. 2015.
- [8] Conti M. and Giordano S. Multihop Ad Hoc Networking: The Reality// IEEE Communications Magazine. – 2007. – vol. 45, no. 4, – pp. 88–95.
- [9] Sobrinho J., de Haan R., and Brazio J. Why RTS-CTS is not your ideal wireless LAN multiple access protocol// IEEE Wireless Communications and Networking Conference. – 2005., vol. 1 – pp. 81–87.
- [10] Xu S. and Saadawi T. Does the IEEE 802.11 MAC protocol work well in multihop wireless ad hoc networks?// IEEE Communications Magazine. – 2001. – vol. 39, no. 6, – pp. 130–137.
- [11] Lindeberg M., Kristiansen S., Plagemann T., and Goebel V. Challenges and techniques for video streaming over mobile ad hoc networks// Multimedia Systems. – 2011. – vol. 17, no. 1, – pp. 51–82.
- [12] Frias V.C., Delgado G.D., and Igartua M.A. Multipath Routing with Layered Coded Video to Provide QoS for Video-Streaming Over Manets// Proceedings of IEEE International Conference on Networks (ICON) – Networking Challenges and Frontiers 1. – 2006. – vol. 1, – pp. 1–6.
- [13] Tarique M., Tepe K.E., Adibi S., and Erfani S. Survey of multipath routing protocols for mobile ad hoc networks// Journal of Network and Computer Applications. – 2009. – vol. 32, no. 6, – pp. 1125 – 1143.
- [14] Sundaresan K., Lakshmanan S., and Sivakumar R. On the Use of Smart Antennas in Multi-Hop Wireless Networks// 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS). – 2006. – pp. 1–10.
- [15] Cikovskis L., Slaidins I., and Vdovins S. On optimal video transmission over multiple paths in wireless Ad-Hoc networks// 20th Telecommunications Forum (TELFOR). – 2012. – pp. 319–322.
- [16] Cikovskis L. and Slaidins I. Impact of Physical Carrier Sense Range on Network Throughput in Wireless Ad-Hoc Networks// Scientific Journal of RTU. 7. series, Telecommunications and Electronics. – 2011. – vol. 11, – pp. 16–21.
- [17] GNU General Public License. OpenWrt. 2011.
- [18] Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T., Laouiti A., Qayyum A., and Viennot L. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks// Proceedings of IEEE International Multi Topic Conference. Technology for the 21st Century. – 2001. – pp. 62–68.
- [19] BSD license. Iperf 2.0.2. 2012.
- [20] Cikovskis L. and Slaidins I. Analysis of wireless ad-hoc network parameters for efficient multipath video transmission// Second International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC). – 2012. – pp. 16–21.

- [21] Mueller S., Tsang R., and Ghosal D. Multipath routing in mobile ad hoc networks: Issues and challenges// *Lecture Notes in Computer Science*. – 2004. – vol. 2965, – pp. 209–234.
- [22] Galvez J.J., Ruiz P.M., and Skarmeta A.F. Multipath routing with spatial separation in wireless multi-hop networks without location information// *Computer Networks*. – 2011. – vol. 55, no. 3, – pp. 583 – 599.
- [23] Pearlman M., Haas Z., Sholander P., and Tabrizi S. On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc networks// *First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC)*. – 2000. – pp. 3–10.
- [24] Kuladinithi K. and Görg C. DYMO Implementation on OPNET-Analysis of Results. Tech. rep. – 2005.
- [25] Alwadiyeh E. and Aburumman A. Interference-aware multipath routing protocols for mobile ad hoc networks// *IEEE 38th Conference on Local Computer Networks Workshops*. – 2013. – pp. 980–986.
- [26] Mundarath J., Ramanathan P., and Veen B.V. Exploiting spatial multiplexing and reuse in multi-antenna wireless ad hoc networks// *Ad Hoc Networks*. – 2009. – vol. 7, no. 2, – pp. 281 – 293.
- [27] Liu J., Shi Y., and Hou Y. A Tractable and Accurate Cross-Layer Model for Multi-Hop MIMO Networks// *Proceedings IEEE INFOCOM*. – 2010. – pp. 1–9.
- [28] Friedrich J., Frohn S., Gubner S., and Lindemann C. Understanding IEEE 802.11n multi-hop communication in wireless networks// *International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*. – 2011. – pp. 321–326.
- [29] Yi S., Pei Y., and Kalyanaraman S. On the Capacity Improvement of Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas// *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing ACM, New York, NY, USA*. – 2003., *MobiHoc '03* – pp. 108–116.
- [30] Ramanathan R., Redi J., Santivanez C., Wiggins D., and Polit S. Ad hoc networking with directional antennas: A complete system solution// *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2005. – vol. 23, no. 3, – pp. 496–506.
- [31] Cikovskis L. Inter-path interference cancelation in wireless ad-hoc networks using smart antennas// *IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*. – 2014. – pp. 1–6.
- [32] Kasch W., Ward J., and Andrusenko J. Wireless network modeling and simulation tools for designers and developers// *IEEE Communications Magazine*. – 2009. – vol. 47, no. 3, – pp. 120 –127.
- [33] Kuladinithi K., An C., Timm-Giel A., and Gorg C. Performance evaluation of radio disjoint multipath routing// *European Transactions on Telecommunications*. – 2009. – vol. 20, no. 7, – pp. 668–678.
- [34] Cikovskis L. Method for Analyses of Data Transmission Over Multiple Paths in Wireless Ad-hoc Networks// *Proceedings of 21st Telecommunications Forum (TELFOR)*. – 2013. – pp. 133–136.
- [35] Goldsmith A. *Wireless Communications*. – Cambridge University Press, New York, NY, USA. 2005.
- [36] Cikovskis L. and Slaidins I. Path Selection Criteria for Multi-path Routing in Wireless Ad-hoc Network// *2015 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO) Riga, Latvia*. – 2015. – pp. 58–61.