

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 darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
I. SLAIĐIŅŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2016

Cikovskis. L. Datu pārraides efektivitātes palielināšana bezvadu *ad-hoc* tīklā. Promocijas darbs.
– Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. – 190 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”.

ANOTĀCIJA

Prognozes rāda, ka tuvākajos gados bezvadu tīklos paredzams straujš datu apjoma pieaugums, no kuriem lielāko daļu sastādīs video dati. Aktuāli ir pētniecības virzieni, kuri palīdzēs atslogot mobilo sakaru tīklus, kā arī paplašināt pārklājumu vietās, kur tas nesniedzas. Nākamās paaudzes 5G mobilie sakari ietvers risinājumus, kas ļaus lietotājiem apmainīties ar datiem tiešā veidā bez bāzes stacijas. Viens no tiem ir IEEE 802.11 balstīts bezvadu *ad-hoc* tīkls. Tomēr šāds tīkls ir neprognozējams un ar ierobežotu datu pārraides ātrumu, kas apgrūtina video pārraidi.

Promocijas darba mērķis ir uzlabot datu pārraides efektivitāti bezvadu *ad-hoc* tīklā, izmantojot vairāku maršrutu pārraidi. Datu plūsmu var sadalīt vairākos maršrutos, kas ļauj palielināt kopējo datu pārraides ātrumu. Šāda pieeja rada vairākas pētniecības problēmas. Pirmkārt, lai pārraidītu video datus vairākos maršrutos, ir nepieciešams izstrādāt efektīvus video kodēšanas un pārraides algoritmus. Otrkārt, sūtot datus vienlaicīgi vairākos maršrutos parādās traucējumi starp maršrutiem, kas samazina iespējamo datu pārraides ātruma pieaugumu.

Ir veikta visaptveroša *ad-hoc* tīkla parametru analīze, lai saprastu tīkla darbību vairāku maršrutu pārraides laikā. Rezultāti ir apkopoti jaunā *ad-hoc* tīkla modelī, kas reprezentē tīkla parametru savstarpējas saites. Traucējumu degradējošā ietekme ir novērtēta gan eksperimentāli *ad-hoc* tīkla testgultnē, gan ar modelēšanas palīdzību.

Lai uzlabotu vairāku maršrutu pārraides efektivitāti, ir pētīti paņēmieni traucējumu samazināšanai. Tādi ir gudra maršrutu izvēle, kas ļauj samazināt to savstarpējo ietekmi, un viedās antenas, kas novērš traucējumus starp mezgliem un palielina datu pārraides ātrumu. Efektivitāte ir novērtēta ar modelēšanas palīdzību, kam ir pilnveidota maksimālās plūsmas uzdevuma metode caurlaidspējas noteikšanai un izstrādāts tīkla modelēšanas rīks MATLAB vidē. Lai samazinātu modelēšanas laiku, ir pielietota paralēlā skaitļošana uz HPC klastera. Rezultāti parāda, ka, izmantojot vairāku maršrutu pārraidi un paņēmieniem traucējumu samazināšanai, var palielināt datu pārraides efektivitāti bezvadu *ad-hoc* tīklā. Balstoties uz pētījumu rezultātiem, ir izstrādātas rekomendācijas piemērota maršrutu komplekta izvēlei, kas ir izmantojamas lēmumu pieņemšanai maršrutēšanas protokolos.

Promocijas darba rezultāti ir atspoguļoti 8 zinātniskajos rakstos, par tiem ir ziņots 11 zinātniskajās konferencēs un tie izmantoti 2 pētniecības projektos. Darbam ir 5 galvenās nodaļas, rezultātu kopsavilkums, literatūras avotu saraksts un 6 pielikumi. Kopējais darba apjoms ar pielikumiem ir 190 lappuses, 65 attēli, 10 tabulas un 126 literatūras avoti.

ABSTRACT

Rapid mobile data traffic growth is foreseen next few years, the biggest part of which will be video data. It is challenge for researchers to find solutions how to offload traffic from mobile cellular networks as well as expand the broadband network coverage. Next generation 5G mobile networks will use solutions enabling direct data exchange between users without involvement of base station. One of such would be IEEE 802.11 based wireless ad-hoc network. However, such network is not suitable enough for video transmission as it is unpredictable and has limited capacity.

The main aim of the research presented in this thesis is to increase data transmission efficiency in wireless ad-hoc network by using multi-path transmission. Data flow can be split over several paths increasing in such way aggregated data rate. Such approach causes several research problems. First, for multi-path video transmission development of appropriate video coding and transmission techniques are required. Secondly, multi-path routing suffers from interference between paths degrading capacity.

Ad-hoc network parameters have been comprehensively analysed for network behaviour understanding during multi-path video transmission. It resulted in a new model presenting complex dependences and interconnections between ad-hoc network parameters. Interference influence on data rate has been studied both experimentally in ad-hoc network testbed and by simulation.

To improve multi-path transmission efficiency the techniques to reduce interference have been investigated. The wise path selection to reduce path coupling and smart antennas are found as appropriate solutions to cancel interference and increase data rate. This research work is based mainly on computer simulation using improved analytical capacity estimation method and elaborated MATLAB network simulation tool. Parallel computing in HPC cluster has been used to decrease simulation time. Results show that multi-path transmission combined with interference decreasing techniques improves data transmission efficiency in wireless ad-hoc network. The research resulted in recommendations on how to select suitable paths that can be used for decision making in routing protocols.

The results of this doctoral research have been published in 8 research papers, presented at 11 international scientific conferences and used in 2 research projects. The thesis consists of introduction, 5 main chapters, conclusion, list of bibliography and 6 appendices. It has totally 190 pages, 65 figures, 10 tables un 126 references.

PATEICĪBA

Izsaku pateicību promocijas darba vadītājam profesoram Ilmāram Slaidiņam par ieguldījumu darba tapšanā, palīdzot gan ar padomiem, gan iesaistot projektos un nodrošinot piemērotus darba apstākļus.

Paldies par sniegto atbalstu kolēģiem no Elektronikas un Telekomunikāciju fakultātes, īpaši profesoriem Ernestam Pētersonam, Guntaram Balodim un Pēterim Misānam.

Darba tapšana nav bijis viegls laiks maniem vistuvākajiem cilvēkiem – sievai un dēlam –, tāpēc liels paldies viņiem par pacietību, sapratni un uzmundrinājuma vārdiem grūtākajos brīžos.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”, tāpēc izsaku pateicību Eiropas Sociālajam fondam un RTU doktorantu studiju daļai par iespēju saņemt šo atbalstu.

Saturs

Saīsinājumi un skaidrojumi	9
Matemātiskie simboli	13
Vispārīgs darba pārskats	14
Mērķis un uzdevumi	15
Pētījumu metodes	16
Galvenie rezultāti	17
Aizstāvamās tēzes	18
Rezultātu praktiskie pielietojumi	18
Rezultātu aprobācija	19
Struktūra	20
Terminoloģija	21
1. Datu pārraide <i>ad-hoc</i> tīklā	23
1.1. <i>Ad-hoc</i> tīklu darbības principi	23
1.2. Maršrutēšana <i>ad-hoc</i> tīklā	26
1.3. <i>Ad-hoc</i> tīklu pielietojumi	31
1.3.1. Bezvadu režģtīkli	32
1.3.2. Specializēti <i>ad-hoc</i> tīkli	33
1.3.3. Video pārraide <i>ad-hoc</i> tīklā	36
1.4. Datu pārraides ātruma ierobežojumi <i>ad-hoc</i> tīklā	39
1.4.1. Radio kanāls starp mezgliem	39
1.4.2. Radio kanāla resursu sadale starp lietotājiem	41
1.4.3. Traucējumi starp tīkla mezgliem	42
1.5. Risinājumi caurlaidspējas palielināšanai	46
1.5.1. Zemāko slāņu tehnoloģijas	46
1.5.2. Maršrutēšana tīkla slānī	50
1.5.3. Lietojuma slānis	52
1.5.4. Starpslāņu sadarbība OSI modelī	55
1.6. Secinājumi	57
2. <i>Ad-hoc</i> tīkla kopsakarību analīze	59
2.1. Tīklam “draudzīgas” video pārraides nodrošināšana	59
2.1.1. Tīklu raksturojošas metrikas	59

2.1.2.	Video pārraides parametru izvēle	60
2.1.3.	Optimāls kodēšanas algoritms	63
2.2.	<i>Ad-hoc</i> tīkla faktoru un parametru analīze	65
2.2.1.	Tīklu ietekmējoši faktori	66
2.2.2.	Maršrutu izvēles ietekme uz tīklu	69
2.3.	Traucējumu ietekmes praktiska novērtēšana	73
2.3.1.	<i>Ad-hoc</i> tīkla testgultne	73
2.3.2.	Mērījumi <i>ad-hoc</i> tīkla testgultnē	75
2.3.3.	Traucējumu modeļošana NS-2	77
2.4.	Tīkla kopsakarību modelis	79
2.5.	Secinājumi	80
3.	Starpmaršrutu traucējumu samazināšana	82
3.1.	Piemērotu maršrutu izvēle	82
3.2.	Viedo antenu pielietošana	85
3.2.1.	Virziendarbības <i>ad-hoc</i> tīkli	85
3.2.2.	MIMO <i>ad-hoc</i> tīkli	95
3.2.3.	Starpmaršrutu traucējumu samazināšanas iespēju analīze . . .	100
3.3.	Secinājumi	103
4.	Metodes un rīku izstrāde caurlaidspējas noteikšanai	104
4.1.	Modeļošanas metožu analīze	104
4.2.	Maršrutu caurlaidspējas noteikšana ar lineāru optimizāciju	107
4.2.1.	Metodes pamatelementi	108
4.2.2.	Pārraides shēmu sastādīšana	110
4.2.3.	Datu pārraides ātruma noteikšana	113
4.2.4.	Maršrutu caurlaidspējas noteikšana	120
4.2.5.	Metodes ierobežojumi	122
4.3.	MATLAB rīks <i>ad-hoc</i> tīkla modeļošana	123
4.3.1.	Vispārīga modeļošanas rīka uzbūve	124
4.3.2.	Scenārija izveide	126
4.3.3.	Maršrutēšana	128
4.3.4.	Pārraides shēmu sastādīšana	132
4.3.5.	Datu pārraides ātruma noteikšana	134
4.3.6.	Maršrutu caurlaidspējas noteikšana	136
4.4.	Metodes un izstrādātā rīka novērtēšana	137
4.4.1.	Rezultātu ticamība	137
4.4.2.	Virziendarbības vērsuma formēšanas modeļu salīdzināšana . . .	139
4.4.3.	Maršrutēšanas algoritmu efektivitātes novērtēšana	141

4.4.4. Ātrdarbības novērtēšana	142
4.5. Superdatora izmantošana	145
4.6. Secinājumi	147
5. Vairāku maršrutu pārraides efektivitātes novērtēšana	149
5.1. Novērtēšanas metodika	149
5.2. Modelēšanas rezultāti un analīze	150
5.3. Rekomendācijas caurlaidspējas palielināšanai	163
5.4. Secinājumi	165
Darba rezultāti un secinājumi	168
Literatūra	170
Pielikumi	180

Saīsinājumi un skaidrojumi

ACK	<i>Acknowledgment</i> . Ziņojums, kurš tiek nosūtīts, lai apliecinātu korektu datu saņemšanu.
AoA	<i>Angle of Arrival</i> . Leņķis, kurš parāda pienākošā signāla virzienu telpā.
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.
AP	<i>Access Point</i> . Bezvadu interneta piekļuves punkts.
BER	<i>Bit Error Ratio</i> . Bitu kļūdu koeficients.
BF	<i>Beamforming</i> . Antenas vērsuma formēšana.
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i> . Binārā fāzes modulācija.
BTL	<i>Background Traffic Load</i> . Slodze, ko uz tīklu rada trafiks, kas nav pētāmā datu plūsma.
CBR	<i>Constant Bit Rate</i> . Pastāvīgs bitu pārraides ātrums.
CCK	<i>Complementary Code Keying</i> . Komplementārā.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> . Koddales daudzpiekļuve.
CPU	<i>Central Procesor Unit</i> . Centrālais procesors.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> . Nesēja jušanas un sadursmju nepieļaušanas daudzpiekļuve.
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection</i> . Nesēja jušanas un sadursmju atklāšanas daudzpiekļuve.
CTS	<i>Clear To Send</i> . Kadrs, kurš tiek atbildēts uz RTS kadru, atļaujot uzsākt datu kadra pārraidi.
D2D	<i>Device-to-Device</i> . Tieša komunikācija starp divām iekārtām.
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> . Distributīvs kanāla piekļuves mehānisms, kas tiek izmantots IEEE 802.11 balstītos tīklos.
DIFS	<i>DCF InterFrame Space</i> . DCF darbībā ietverts laika intervāls, kuru mezglam "jāklausa" kanālu, pirms to var uzskatīt par brīvu.
DSDV	<i>Destination Sequenced Distance Vector</i> . Proaktīvs maršrutēšanas protokols, kas izmanto distances vektora algoritmu.
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> . Digitālā signālu apstrāde.
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i> . Proaktīvs maršrutēšanas protokols, kas izmanto avotmaršrutēšanas algoritmu.

DSSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i> . Tiešās secības spektra paplašināšana.
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> . Frekvenčdales daudzpiekļuve.
FEC	<i>Forward Error Correction</i> . Kļūdu labošana, ko veic datu avotā, pievienojot redundanci sūtāmajiem datiem.
FHSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i> . Frekvences lēkāšana.
FLOPS	<i>Floating Point Operations per Second</i> . Superdatoru veiktspējas mērvienība, kas raksturo operāciju skaitu sekundē.
H.264/AVC	<i>H.264/Advanced Video Coding</i> . Video kompresijas formāts.
HPC	<i>High Performance Computing</i> . Augstas veiktspējas skaitļošana, ko veic izmantojot superdatorus.
ISI	<i>InterSymbol Interference</i> . Starpsimbolu traucējumi.
ISM josla	<i>Industrial, Scientific and Medical radio band</i> . Radiofrekvenču josla 2.4 GHz diapazonā, kuras lietošanai nav nepieciešamas licence.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> .
LC	<i>Leyared Coding</i> . Slāņain video kodēšana.
LMS	<i>Least mean squares</i> . Minimālo vidējo kvadrātu metode.
MAC	<i>Media Access Control</i> . Vides piekļuves vadība.
MANET	<i>Mobile Ad-hoc Netwrok</i> . Mobilais <i>ad-hoc</i> tīkls.
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> Pārraidē sistēma ar vairākiem uztveršanas/pārraidē kanāliem.
MIMO SM+BF	MIMO SM kombinēšana ar BF, lai papildus datu ātruma palielināšanai veiktu traucējumu izslēgšanu.
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i> . Starptautiskās standartizēšanas organizācijas ekspertu grupa, kas izstrādājusi kustīgu attēlu saspiešanas standartu MPEG.
MPI	<i>Message Passing Interface</i> . Programmatūras saskarne informācijas apmaiņai starp paralēlu uzdevumu daļām.
MPR	<i>Multipoint Relays</i> . Atlasīta mezglu kopa OLSR protokolā, kas nodrošina savienojumu ar visiem divu lēcienu attāluma esošiem kaimiņiem.
MU-MIMO	<i>Multi user Multiple-Input and Multiple-Output</i> . Pārraidē metode, kurā katra MIMO apakšplūsma tiek veidota ar citu lietotāju.
OBIC	<i>Order Based Interference Cancelation</i> . Uz secību balstīta traucējumu izslēgšanas shēma.

OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> . Ortogonālā frekvenču dales blīvēšana.
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.
P2P	<i>Peer-to-Peer</i> . Tieša komunikācija starp diviem datoriem, savstarpēji ļaujot piekļuvi datiem, bez centrāla servera iesaistes.
PCS	<i>Physical Carrier Sense</i> . CSMA/CA protokola funkcija, kas paredz kanāla “klausīšanos” pirms pārraides.
PHY	<i>Physical layer</i> . OSI modeļa fizikālais slānis.
PSNR	<i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i> . Maksimāla signāla un trokšņu attiecība ir raksturojums, ko izmanto video kvalitātes novērtēšanai pēc dekompresijas.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> . Amplitūdas kvadratūrmodulēšana.
QoE	<i>Quality of Experience</i> . Pakalpojuma kvalitātes novērtējums pēc lietotāja subjektīvas izjūtas.
QoS	<i>Quality of Service</i> . Pakalpojuma kvalitāte.
RREP	<i>Route Reply</i> . Maršruta atbildes ziņojums tiek izmantots, lai apstiprinātu izveidotu maršrutu.
RREQ	<i>Route Request</i> . Maršruta pieprasījuma ziņojums tiek izsūtīts, ja mezglam nav saglabāts ieraksts ar maršrutu uz adresātu.
RTS	<i>Request To Send</i> . Kadrs, kurš pieprasa rezervēt radio kanālu.
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.
RTU	<i>Rīgas Tehniskā universitāte</i> .
SDMR	<i>Spatially Disjoint Multipath Routing</i> . Maršrutēšanas protokols, kurš izvēlas telpiski nodalītus maršrutus.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> . Signāla un “traucējumi plus troksnis” attiecība.
SISO	<i>Single-Input and Single-Output</i> . Pārraides sistēma ar vienu uztveršanas/pārraides kanālu.
SM	<i>Spatial Multiplexing</i> . Datu plūsmas multipleksēšana vairākos paralēlos MIMO apaškanālos.
SMR	<i>Split Multipath Routing</i> . Uz DSR balstīts vairāku maršrutu pārraides protokols.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> . Signāla un trokšņu attiecība.

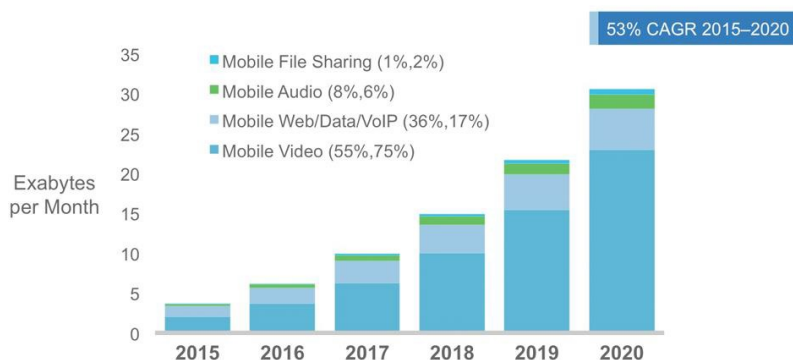
SVC	<i>Scalable Video Coding</i> . Mērogojama video kodēšana.
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i> . Īpašvērtību dekompozīcija ir matricu manipulācija, ar kuru MIMO kanāla matrica var tikt sadalīta neatkarīgos SISO apakškanālos.
TC	<i>Topology Control</i> . OLSR protokolā izmantots ziņojumu veids, informācijas izplatīšanai par tīkla topoloģiju.
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> . Pārraidē vadības protokols.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> . Laikdales daudzpiekļuve.
U-NII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i> . Radiofrekvenču josla 5 GHz diapazonā, kuras lietošanai nav nepieciešama licence. Joslu izmanto IEEE 802.11 n/ac standarta iekārtas.
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> . Lietotāju datagrammas protokols.
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure communication</i> . Sakaru tīkls starp automobiļiem un infrastruktūru.
V2V	<i>Vehicle to Vehicle communication</i> . Sakaru tīkls starp automobiļiem.
VANET	<i>Vehicular Ad-hoc NETwork</i> . Automobiļu <i>ad-hoc</i> tīkls.
VCS	<i>Virtual Carrier Sense</i> . Virtuāla nesēja jušana CSMA/CA protokolā, par kanāla stāvokli uzzinot no saņemtiem kontroles kadriem.
VMP	<i>Vairāku maršrutu pārraide</i> .
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> . Bezvadu lokālais tīkls.
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> . Bezvadu sensoru tīkls.
ZF	<i>Zerro-forcing</i> . Telpiskās singālapstrādes metode, ar kuru daudzlieto-tāju sistēmā var nullēt traucējumus no nevēlamiem telpas virzieniem.

MATEMĀTISKIE SIMBOLI

P_{Tx}	raidītāja jauda
P_{Rx}	uztvertā derīgā signāla jauda
P_0	uztvērēja jutība
P_{CST}	fiziskā nesēja jušanas sliekšnis
$P_{\sum I}$	summārā traucējošo signālu jauda
P_N	fona trokšņa jauda
γ	SNR vai SINR atkarībā no konteksta
γ_0	SINR sliekšnis
G	jaudas pastiprinājuma koeficients
α	pārraidē zudumu parametrs radioviļņu izplatīšanās modeli
C	caurlaidspēja
B	frekvenču joslas (kanāla) platums
d_{Tx}	maksimālais pārraidē attālums
d_I	traucējumu apgabala rādiuss
d_{PCS}	nosacītais fiziskā nesēja jušanas attālums
d_{ij}	attālums starp diviem mezgliem ar indeksiem i un j
a	scenārija laukuma (kvadrāta) malas garums
n	mezglu skaits
n_i	mezgls ar indeksu i
M	maršrutu skaits
m_i	maršruts ar indeksu i
n_h	lēcienu skaits
l_{ij}	tīkla savienojums starp mezgliem ar indeksiem i un j (lietots arī $n_i \rightarrow n_j$)
d_{sd}	attālums starp datu avotu un adresātu (Eiklīda)
d_h	attālums starp datu avotu un adresātu (lēcieņi)
s	antenu režģī pienākošais derīgais signāls (diskrēta laika)
i	antenu režģī pienākošais traucējošais signāls (diskrēta laika)
y	signāls uztvērēja izejā (diskrēta laika)
N	antenu režģa elementu skaits
θ	telpas virziens azimuta plaknē
RF_θ	antenu režģa faktors (koeficients) virzienā θ
ω	vektors ar antenu režģa elementu svara koeficientiem
$\mathbf{H}$	MIMO kanāla pārvades matrica
$\mathbf{V}$	MIMO priekšapstrādes matrica
$\mathbf{U}$	MIMO pēcapstrādes matrica
$\mathbf{\Lambda}$	diagonāla matrica ar $\mathbf{H}$ īpašvērtībām
R_H	matricas $\mathbf{H}$ rangs
z_k	MIMO plūsmu skaits
S_i	pārraidē shēma (tīkla savienojumu kopa) ar indeksu i .
p_i	kanāla laika koeficients pārraidē shēmai ar indeksu i
L	kopa ar tīkla savienojumiem, kuri veido maršrutus

VISPĀRĪGS DARBA PĀRSKATS

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 reļmezgļiem, 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, jā-rēķinās 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 jūšanas 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 promocijas 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 liels, lai redzētu statistiski nozīmīgas atšķirības rezultātos. Tam patērētais laiks ir efektīvi samazināts ar paralēlu uzdevumu izpildi uz augstas veiktspējas skaitļošanas (HPC) klastera.

Galvenie 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 modeļēšanas 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 modeļēšanas 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 modeļēšanas rīku.
- Pilnveidotā analītiskā metode un izveidotais MATLAB modeļēšanas 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 bakaluru 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 xlore**);
- 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 xlore**);
- 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 xlore**);
- 4) Cikovskis L., Slaidins I., Vdovins S. On Optimal Video Transmission Over Multiple Paths in Wireless Ad-hoc Networks. //Proceedings of 20th Telecommunica-

tions Forum (TELFOR). – Belgrade: IEEE, 2013. – pp. 319–322 (**Scopus, IEEE xplora, 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). – Klaipeda: IEEE, 2012. – pp. 16–21 (**Scopus, IEEE xplora, 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. – Riga: 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. – Riga: 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

Darbs sastāv no ievaddaļas, 5 galvenajām nodaļām, rezultātu apkopojuma un 6 pielikumiem. Kopējais darba apjoms ar pielikumiem ir 190 lappuses, 65 attēli, 10 tabulas un 126 literatūras avoti. Galvenās nodaļas ir šādas:

- 1) Datu pārraide *ad-hoc* tīklā
- 2) *Ad-hoc* tīkla kopsakarību analīze
- 3) Starpmaršrutu traucējumu samazināšana
- 4) Metodes un rīku izstrāde caurlaidspējas noteikšanai
- 5) Vairāku maršrutu pārraides efektivitātes novērtēšana

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

Promocijas darbā veiktie pētījumi ir sadalāmi trīs galvenajos posmos:

- teorētiska un eksperimentāla *ad-hoc* tīkla parametru kopsakarību analīze (2. nodaļa);
- metodes pilnveidošana vairāku maršrutu caurlaidspējas noteikšanai (4. nodaļa);
- starp-maršrutu traucējumu samazināšanas pētīšana (3. nodaļā teorētiska analīze un 5. nodaļā ar modeļēšanu).

Terminoloģija

Vairums tekstā atrodamo saīsinājumu ir izmantoti angļu valodā. To atšifrējums un skaidrojums latviešu valodā ir atrodams saīsinājumu un skaidrojumu sarakstā.

Svarīgākie darbā izmantotie termini, kuru tulkojums vai nozīme var radīt neskaidrības:

mezgls (*node*) – *ad-hoc* tīklam pievienota mobila iekārta, kas ar bezvadu savienojumu var komunicēt ar citiem tīkla dalībniekiem;

tīkla savienojums (*link*) ir lietots kā sinonīms vārdam "posms", lai apzīmētu loģisku ķēdi starp diviem mezgliem, kas ļauj tiem apmainīties ar datiem neatkarīgi no šīs ķēdes fizikālās realizācijas;

datu avots (*source node*) – mezgls, kuram ir jānosūta dati citam mezgla tīklā un kurš iniciē maršrutu atklāšanu;

adresāts (*destination node*) – mezgls, kuram dati ir paredzēti;

datu sūtītājs/saņēmējs (arī raidītājs/uztvērējs) – mezgli, kuri konkrētā brīdī veic datu apmaiņu;

relejmezgls – mezgls (maršrutētājs) starp datu avotu adresātu, kurš veic datu pār-

sūtīšanas funkciju;

lēciens (*hop*) – viens tīkla savienojums maršrutā starp datu avotu un adresātu;

kaimiņmezgls (*neighbour node*) – mezgls, kuru var sasniegt tiešā veidā ar vienu lēcianu;

caurlaidspēja – maksimāls datu pārraides ātrums;

virstēriņš (*overhead*) – visi dati, kurus pārraida papildus lietotāja datiem;

pārblīve (*congestion*) – pārmērīgi intensīva ziņojumu plūsma, kas aizkavē ziņojumu pārsūtīšanu tīklā;

telpiskā atkalizmantojamība (*spatial reuse*) – radio kanāla izmantojuma efektivitāte, kas parāda iespēju vienlaicīgi vienā frekvencē būt aktīviem vairākiem tīkla savienojumiem, izmantojot to nošķirtību telpā, t.i. attālumu starp tiem vai elektromagnētiskā starojuma vērsumu.

vairāku maršrutu pārraide (*multi-path transmission*) – vairāku paralēlu maršrutu izmantošana starp datu avotu un adresātu;

maršrutu komplekts (*path set*) – no atrastajiem maršrutiem atlasīta maršrutu kopa, kuru izmanto datu pārsūtīšanai.

pārraides shēma – jēdziens tiek izmantots modelēšanas metodē, lai apzīmētu tādu tīkla savienojuma kopu, kuros pieļaujama vienlaicīga pārraide.

pārraides shēmu kopums – visas iespējamās pārraides shēmas, kuras ietver tīkla savienojumus dažādās kombinācijās.

1. DATU PĀRRAIDE *AD-HOC* TĪKLĀ

Bezvadu *ad-hoc* tīkls (tālāk tekstā *ad-hoc* tīkls) ir grupa ar mobilām iekārtām (mezgliem), kuras spēj pašorganizēties, lai izveidotu tīklu. Komunikācija starp mezgliem notiek tiešā veidā bez centrālas vadības. Šis darbs attiecas tikai uz pakešdatu komunikāciju, izmantojot IEEE 802.11g/n bezvadu standarta iekārtas.

Ad-hoc tīklus veido ar mērķi nodrošināt sakarus specifiska uzdevuma veikšanai vietā bez esošas tīkla infrastruktūras. Jēdziens “ad-hoc” tulkojumā no latīņu valodas nozīmē “priekš šī”, ar to domājot kaut ko, kas tiek radīts speciāli un ar nolūku. Šādu tīklu var izmantot lai, piemēram, pārsūtītu failu starp divām iekārtām, nodrošinātu datu apmaiņu starp konferences dalībniekiem, glābēju saziņai katastrofas vietā u.c.

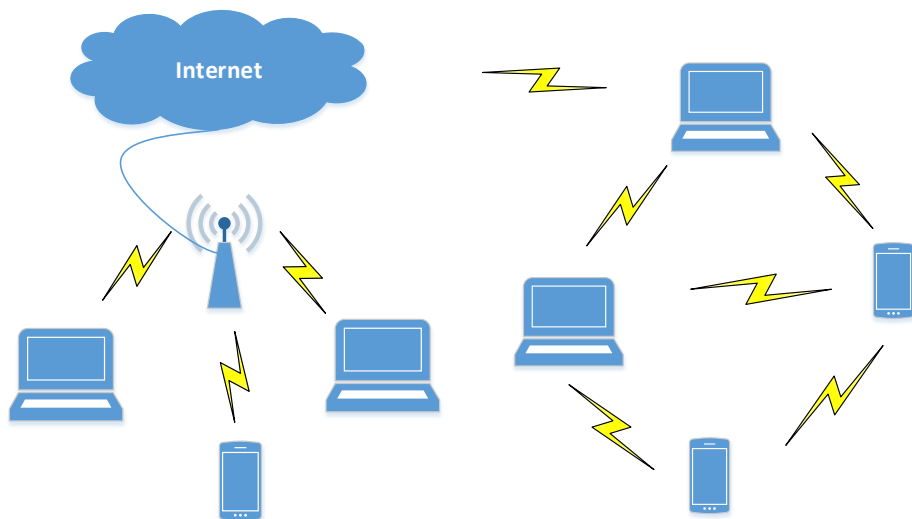
Šī nodaļa sniedz vispārēju ievadu *ad-hoc* tīklu tehnoloģijā, problēmās un risinājumos, kas ir pētīti darba ietvaros.

1.1. *Ad-hoc* tīklu darbības principi

Tradicionāli daudzlietotāju sistēmās dalībnieki tiek organizēti šūnās ar centralizētu vadību. Bāzes stacija veic koordinēšanu un nodrošina lietotājiem piekļuvi tīklam, kā arī veic resursu (frekvenču, laika u.c.) sadali starp lietotājiem. Šādi darbojas mobilo sakaru 2G, 3G, 4G (LTE), kā arī *WiMax*. Arī bezvadu lokālie tīkli (WLAN) daļēji atbilst šim modelim, jo šūnas centrā ir bezvadu piekļuves punkts, kurš nodrošina savienojumu ar internetu un caur kuru notiek komunikācija tīkla dalībnieku starpā (1.1a. attēlā). Šādus tīklus var saukt arī par **infrastruktūras tīkliem**.

Ad-hoc tīkla pamatā ir iekārta-iekārta (D2D vai P2P) komunikācija, kad iekārtas veic datu apmaiņu tiešā veidā (1.1b. attēlā). Parasti *ad-hoc* tīkls sastāv no daudzām bezvadu iekārtām, kas savstarpēji sazinās tiešā veidā vai ar vairākiem lēcieniem. Atšķirībā no infrastruktūras tipa tīkliem, tam nav centrālas vadības un visi tīkla dalībnieki ir vienlīdzīgi (decentralizēti). Šādam tīklam ir jāspēj pašorganizēties, kas ietver automatisku programmatūras konfigurēšanu ar minimālu lietotāja līdzdalību. *Ad-hoc* tīklu var savienot ar citiem tīkliem (tai skaitā ar internetu) caur vārteju (*gateway*). Šādu funkciju var veikt, piemēram, iekārta, kura aprīkota ar modemu pieslēgumam pie mobilo sakaru tīkla.

Komunikācija starp divām vai vairākām iekārtām ir sarežģīts process, tāpēc tā konceptuāli jāsadala vairākos slāņos. Tam tiek plaši izmantots atvērto sistēmu starpsavienojuma modelis (OSI modelis), kurš datu pārraides tīklam nosaka slāņveida arhitektūru. OSI modeļa slāņi parādīti 1.2. attēlā. Detalizētāk OSI modelis apskatīts 1.5.4. apakšnodaļā. Arī *ad-hoc* tīklu var raksturot pēc šādas hierarhiskas struktūras.



(a) Infrastruktūras tipa bezvadu tīkls

(b) *Ad-hoc* tīkls

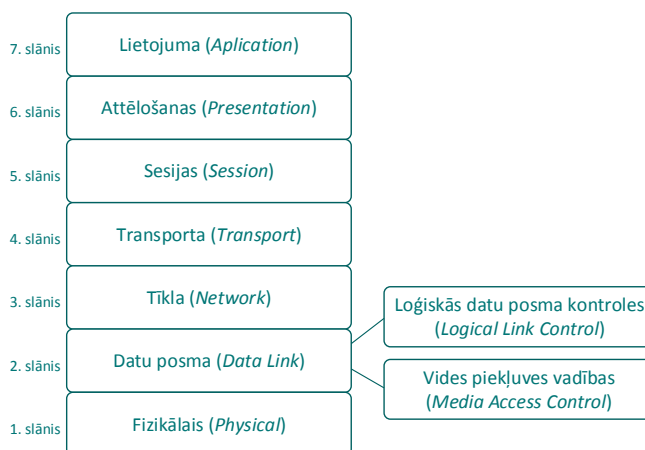
1.1. att. Atšķirība starp centralizētu un decentralizētu tīklu.

Komunikāciju starp divām *ad-hoc* tīkla iekārtām radio kanālā nodrošina fizikālā slāņa (PHY) tehnoloģijas. Daudzu iekārtu piekļuvi radio kanālam regulē vides piekļuves vadības (MAC) apakšslānis. *Ad-hoc* tīkla funkcionalitāti, kas ietver daudzlēcieni paraidi, nodrošina tīkla slānis. Tā kā *ad-hoc* tīkls ir orientēts uz konkrētu pielietojumu (ši darba ietvaros – video pārraide), tā darbība ir cieši saistīta ar lietojuma slāni.

Komunikācijai starp *ad-hoc* tīkla mezgliem var izmantot dažādas pārraides tehnoloģijas, tomēr visbiežāk tiek lietoti IEEE 802.11 standarta [8] protokoli, kuri tiek izmantoti arī WLAN. IEEE 802.11 plašāk pazīstams ar apzīmēju *WiFi*, kas ir “*Wi-Fi Alliance*” sertifikācija iekārtām, kuras atbilst noteiktām prasībām un ir savstarpēji savietojamas. Atsevišķos *ad-hoc* tīklu veidos izmanto arī citus IEEE 802.x saimes protokolus, piemēram, sensoru tīklos izmanto IEEE 802.15.4, kas ir energoefektīvāks. Kopš pirmā IEEE 802.11 standarta apstiprināšanas 1997. gadā, ir notikusi ļoti strauja PHY tehnoloģiju attīstība, šobrīd sasniedzot datu ātrumu virs 1 Gb/s. Galvenokārt tas saistīts ar uzlabojumiem, ko nodrošina MIMO un OFDM signālu pārraides tehnoloģijas, kā arī augsta līmeņa nesēja modulācijas (256-QAM). Salīdzinājumam 1.1. tabulā ir parādīta IEEE 802.11 standarta un tā papildinājumu attīstība.

Svarīga IEEE 802.11 standarta sastāvdaļa ir MAC protokols, kas ļauj iekārtām darboties decentralizētā infrastruktūrā. Tiek izmantots nesēja jušanas un sadursmju nepieļaušanas daudzpieejas (CSMA/CA) mehānisms, kurš nodrošina radio kanāla sadali bez centrālās vadības (detalizētāk 1.4. apakšnodaļā).

IEEE 802.11 standarts definē pārraides mehānismus tikai OSI fizikālajam slānim



1.2. att. OSI modelis.

un datu posma slāņa MAC apakšslānim. *Ad-hoc* tīklu darbība balstās uz tīkla slāni, kurš ļauj iekārtām pašorganizēties tīklā un nosūtīt datus ar daudziem lēcieniem. Tieši tīkla slāņa funkcionalitāte nošķir *ad-hoc* tīklu no infrastruktūras tipa bezvadu tīkliem, padarot to par jaunu tīkla veidu.

Daudzu lēcienu pārraide ļauj pārsūtīt datus caur relejmezgliem, ja datu avots nevar sasniegt adresātu tiešā veidā dēļ ierobežota pārraides attāluma. Tam ir nepieciešams maršrutēšanas protokols, kura uzdevums ir nodrošināt maršrutu datu paketes nogādāšanai līdz galamērķim. *Ad-hoc* tīkls ir mobils ar mainīgu topoloģiju, kur iekārtas var neprognozējami parādīties un pazust. Pārraidei tiek izmantots radio kanāls, līdz ar to tas ir pakļauts traucējumiem, kas ierobežo datu pārraides ātrumu un var radīt pakešu zudumus (detalizētāk 1.4. apakšnodaļā). Maršrutēšanas protokolam ir jāspēj atrast un izveidot stabilu maršrutu, ātri reaģēt uz izmaiņām tīklā. Šādam uzdevumam neder vadu tīklos izmantotie maršrutēšanas protokoli. Detalizētāk *ad-hoc* tīkliem paredzētie protokoli ir analizēti 1.2. apakšnodaļā.

Apskatot daudzlēcienu tīklus plašāk, ir jāmin vēl viens *ad-hoc* tīkliem līdzīgs tīklu veids – bezvadu režģtīkls (*wireless mesh network*). Daļēji *ad-hoc* tīklu funkcionalitāte pārklājas ar bezvadu režģu tīkliem, jo abi, pirmkārt, ir daudz-lēcienu un, otrkārt, decentralizēti D2D tīkli. Tomēr režģtīkls parasti ir vairāk statisks un determinēts, līdz ar to tas mazāk atbilst *ad-hoc* būtībai (detalizētāk par režģtīkliem 1.3.1. apakšnodaļā).

Mobilitāte ir viens no *ad-hoc* tīklu raksturlielumiem. Var iedalīt vairākus daudzlēcienu tīklu veidus pēc to mobilitātes, virzoties no mazāk mobila uz vairāk mobilu:

- statisks daudzlēcienu tīkls jeb režģtīkls;
- mobilais *ad-hoc* tīkls (MANET), kuru veido lēni kustīgi objekti (parasti cilvēki ar mobilām iekārtām) un kura dalībnieki var neprognozējami parādīties un pazust;

IEEE 802.11 fizikālā slāņa tehnoloģiju salīdzinājums

Standarts	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Datu pārraides ātrums	2 Mb/s	54 Mb/s	11 Mb/s	54 Mb/s	150 Mb/s	1300+ Mb/s
Frekvenču apgabals	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4/5 GHz	5 GHz
Kanāla platums	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20/40 MHz	20/40/80/160 MHz
Pārraides tehnoloģijas	FHSS, DSSS	OFDM	DSSS, CCK	OFDM	MIMO, OFDM	MU-MIMO, OFDM
Paralēlas telepiskās datu plūsmas	1	1	1	1	4	8
Nesēja modulācija	DBPSK, DQPSK, GFSK	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	DBPSK, DQPSK	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM

- autotransporta *ad-hoc* tīkls (VANET);
- lidojošu objektu *ad-hoc* tīkls jeb FANET (piemēram, bezpilotu lidaparāti).

Lai praktiski izveidotu *ad-hoc* tīklu, iekārtas programmatūrai (aparātūras līmeņa) ir jāatbalsta *ad-hoc* darbības režīms. *Ad-hoc* režīms ir ietverts populārākajās operētājsistēmās (*MS Windows 7* un *8*, *Linux*), ļaujot izveidot tiešu savienojumu, piemēram, starp diviem portatīvajiem datoriem. Lai nodrošinātu daudzlēcienu pārraidi, ir nepieciešams *ad-hoc* maršrutēšanas protokols. Tas ir pieejams specializētu tīkla iekārtu aparātprogrammatūrā, piemēram, *Mikrotik* vai *Open-WRT*, ļaujot tās izmantot kā režģtīkla relejus, kā arī ir protokoli, kas ir paredzēti mobilajām iekārtām, piemēram, OLSR.

1.2. Maršrutēšana *ad-hoc* tīklā

Maršrutēšana ir fundamentāla *ad-hoc* tīkla sastāvdaļa. Maršrutēšanas protokola uzdevums ir nodrošināt maršrutu datu pārsūtīšanai, ja datu avots nevar sasniegt adresātu tiešā veidā; t.i., kad tie nav kaimiņi. Datu paketes sūta vairākos lēcienos caur citiem mezgliem, kuri darbojas kā maršrutētāji (saukti arī par relejmezgliem).

Vadu tīklos, kur iekārtas ir stacionāras, izmanto divu veidu maršrutēšanas algoritmus – distances vektora, piemēram, *Routing Information Protocol* (RIP) un posma stāvokļa, piemēram, *Open Shortest Path First* (OSPF) [9] protokolā. Abi algoritmi balstīti uz periodisku ziņojumu izsūtīšanu no katra tīkla mezgla, radot virstēriņu, kā arī to konverģence uz stabilu maršrutu ir lēna. *Ad-hoc* tīklā šie algoritmi nav efektīvi, jo šādam tīklam raksturīga:

- neparedzama vide, jo tīkls var tikt veidots jebkurā vietā un apstākļos;
- pārraide radio kanālā, kas samazina pārraides drošumu un var izraisīt kļūdas;
- ierobežoti mezglu resursi (atmiņa, veikspēja, barošanas enerģija);
- dinamiska topoloģija – mezgli kustās nekontrolētā veidā, kas izraisa biežus maršrutu pārrāvumus.

Ad-hoc tīkliem tiek izmantoti pielāgoti vadu tīklu maršrutēšanas algoritmi, kā arī pilnīgi jauni maršrutēšanas principi, kā, piemēram, maršrutēšana pēc pieprasījuma (reaktīva).

Maršrutēšanas protokoli, kuri apskatīti promocijas darbā, ir uniraides, t.i. paredzēti maršrutēšanai starp vienu noteiktu datu avotu un adresātu. Kā vienkāršākā alternatīva ir datu nogādāšana līdz galamērķim ar plūdināšanu. Datu avots sūta paketi saviem kaimiņiem, kas savukārt to pārsūta tālāk savējiem, kamēr tā sasniedz visus savienotos tīkla mezglus. Vairumā gadījumu šis paņēmiens ir neefektīvs, jo datu kopijas rada lielu virstēriņu [10]. Tomēr tā ir vienīgā alternatīva pie ļoti straujām tīkla topoloģijas izmaiņām.

Plūdināšanas paņēmiens tiek izmantots maršrutēšanas ziņojumu izplatīšanai uniraides protokolos, ietverot to maršrutu atklāšanas fāzē. *Ad-hoc* tīklu pētniecībā aktuāli ir temati par plūdināšanas efektivitātes palielināšanu – samazināt datu kopiju skaitu, tajā pašā laikā nodrošinot, ka visi mezgli ziņojumu saņem. Darbā [10] ir apkopoti galvenie virzieni:

- paketes pārsūta tālāk tikai ar noteiktu varbūtību;
- pārsūtīšanu ļauj veikt tikai nelielam skaitam mezglu;
- pārsūta tikai tās paketes, kas sniedz jaunu, precīzāku maršrutēšanas informāciju.

Divas galvenās uniraides maršrutēšanas protokolu klases ir proaktīvie un reaktīvie protokoli. Proaktīvi protokoli ir attīstījušies no vadu tīklu protokoliem, līdz ar to katrs mezgls uztur maršrutēšanas informāciju, kā sasniegt katru citu tīkla mezglu, neatkarīgi no tā, vai šī informācija tiks izmantota. Reaktīvos protokolos maršrutu veido tikai tad, kad tas ir nepieciešams. Divi klasiski proaktīvu protokolu piemēri ir DSDV un OLSR. Pirmais balstīts uz distances vektora algoritmu, savukārt otrais – uz posma stāvokļa algoritmu. Pie reaktīvajiem jāmin DSR un AODV [9], [11], no kuriem pirmais izmanto avotmaršrutēšanas algoritmu, savukārt otrais – distances vektora algoritmu. Kā atsevišķas klases ir izdalīti arī hibrīdi protokoli, kuri apvieno abu iepriekšējo klašu priekšrocības, un uz atrašanās vietu balstīti protokoli, kuri izmanto mezglu koordinā-

tes efektīvākai maršrutēšanai.

Veicot pārskatu par pētījumiem, kas salīdzina proaktīvo un reaktīvo protokolu efektivitāti *ad-hoc* tīkliem, [10] atzīst, ka nav izteikta pārsvara, tomēr reaktīvā pieeja parasti nodrošina tādu pašu vai labāku sniegumu. Darbā [9] ir uzsvērts, ka proaktīvs protokols ir mazāk praktisks lieliem, stipri kustīgiem scenārijiem, jo, lai nodrošinātu precīzu maršrutēšanas informāciju, ir jāpārsūta liels skaits maršrutēšanas ziņojumu. Šo ziņojumu radītais virstēriņš pieaug ar kārtu $O(n^2)$, kur n ir mezglu skaits [12]. Savukārt reaktīvi protokoli var būt mazāk efektīvi pie maza trafika tīklā [10], ņemot vērā laiku, kas nepieciešams maršrutā atklāšanai pēc pieprasījuma. Liela trafika gadījumā maršruta atklāšanas laiks ir samērojams ar datu sūtīšanas laiku, jo paketes aizkavējas rindās. Labāko rezultātu var sniegt proaktīvās un reaktīvās pieejas apvienošana, ko nodrošina hibrīdie protokoli [10].

Maršrutēšanas protokola darbību var sadalīt divās fāzēs:

- maršruta atklāšana, kad tiek meklēti maršruti starp datu avotu un adresātu;
- maršruta uzturēšana, kura paredz procedūru maršruta atjaunošanai pārrāvuma gadījumā.

Maršruta atklāšanas fāze ietver arī maršruta izvēli, ja protokols nodrošina vairākus iespējamus maršrutus. Parasti maršruta izvēle tiek balstīta uz lēcienu skaitu, priekšroku dodot īsākiem maršrutiem, kas nodrošina mazāku aizturi. Citi protokoli ņem vērā pakešu zudumu varbūtību (piemēram, OLSR) un posmu noslodzi, jo tā raksturo potenciālo caurlaidspēju. Īsākā maršruta izvēle ne vienmēr būs efektīva, jo tīklā, kur vienlaicīgi aktīvi būs vairāki īsākā ceļa maršruti starp dažādiem datu avota un adresāta pāriem, tendence stiprāk noslogoties būs tiem posmiem, kuri atrodas tīkla topoloģijas vidū [11].

Promocijas darbā ir pētīta vairāku maršrutu pārraide, līdz ar to svarīgi saprast tos viena maršruta algoritmus, kuri tai tiek izmantoti. Praktiski visi esošie vairāku maršrutu protokoli ir uzlaboti reaktīvie viena maršruta protokoli: DSR vai AODV [9], [11]. Izņēmums ir proaktīvs OLSR protokols, kurš vairākiem maršrutiem ir realizēts kā hibrīds protokols [13]. Tālāk ir sniegts pārskats par trīs plaši lietotu viena maršruta protokolu – DSR [14], AODV [15] un OLSR [16] – darbību, kas attiecīgi ietver avot-maršrutēšanas, distances vektora un posma stāvokļa maršrutēšanas algoritmus.

DSR protokols izmanto avotmaršrutēšanas algoritmu, kad datu avots zina visu maršrutu (lēcienu pa lēcienam) līdz adresātam. To pievieno katras sūtāmās paketes iesākumā un ļauj relejmezgliem to nogādāt līdz adresātam. Lai atklātu maršrutu, datu avots plūdinā tīkla maršruta pieprasījuma (RREQ) ziņojumu. Kā reaktīvā protokolā, maršruts tiek veidots tikai pēc pieprasījuma, ja datu avotu buferatmiņā nav maršruta uz galamērķi.

Cits mezgls, saņemot RREQ ziņojumu, veic vienu no tālāk dotajām darbībām.

- a) Ja ziņojums ar tādu pašu identifikatoru un datu avotu ir starp nesēn saņemtiem, to atmet. Tas ļauj izvairīties no aizkavētām ziņojuma kopijām, kas pienāk pa citu maršrutu.
- b) Ja mezgla adrese jau ir pievienota maršruta ierakstam ziņojumā, to atmet. Tas ļauj novērst cilpas.
- c) Ja mezgls ir ziņojuma adresāts, tad tas nosūtīta maršruta atbildes (RREP) ziņojumu datu avotam ar pilnu maršrutu RREQ. RREP ietverto maršrutu izmanto šī ziņojuma maršrutēšanai.
- d) Ja mezgls nav adresāts, bet tā atmiņā ir maršruts uz norādīto galamērķi, tas var to pievienot maršruta ierakstam un nosūtīt RREP ar pilnu maršrutu. Tas ļauj samazināt plūdināšanas virstēriņu.
- e) Citādi mezgls pievieno savu adresi maršruta ierakstam ziņojumā un pārsūta to tālāk saviem kaimiņiem.

Relejmezgli, pārsūtot RREQ ziņojumu, tajā ietverto maršruta ierakstu saglabā atmiņā potenciālam nākotnes pielietojumam.

Lai nosūtītu RREP ziņojumu maršruta atklāšanas inicializētajām, galamērķis var izmantot reversu maršrutu no saņemtā RREQ ieraksta vai citu maršrutu no iepriekš atklāto maršrutu atmiņas.

Atšķirībā no proaktīviem protokoliem, kur maršruta pārrāvumus atspoguļo periodiskie ziņojumi, reaktīvos protokolos ir jāpielieto papildus procedūras. Parasti pārrāvumu nosaka ar MAC slāņa mehānismiem, piemēram apliecinājuma ziņojuma (ACK) nesaņemšana vai izsmelts sūtīšanas mēģinājumu skaits. Mezgls, kurš nevar tālāk pārsūtīt datu paketi, nosūta maršruta kļūdas (RERR) ziņojumu sākotnējam paketes datu avotam, norādot ietekmēto mezglu adreses. Mezgli, kas saņem RERR paketi, izdzēs bojāto maršrutu no savas atmiņas.

AODV protokols balstās uz tradicionālām maršrutēšanas tabulām, kuras uztur atsevišķi katrā mezglā. Maršrutēšanas tabula satur ierakstus – distances vektorus –, kuri raksturo attālumu (lēcienu skaitu) un virzienu (nākamo lēcieni) uz galamērķi un ļauj pārsūtīt paketi pareizajam kaimiņmezglam. Uz katru galamērķi tiek uzturēts tikai viens ieraksts. Galvenā AODV atšķirība no proaktīva distances vektoru algoritma pielietojuma (piemēram, DSDV protokolā), ir tā, ka mezgli meklē maršrutu tikai pēc vajadzības (ja maršrutēšanas tabulā nav ieraksta), kā arī saglabā tikai tos tabulas ierakstus, kuri ir vajadzīgi maršruta nodrošināšanai no datu avota uz adresātu.

AODV protokolā maršruta atklāšanu veic, plūdinot tīklā RREQ ziņojumu. Ja avota mezglam nav maršruta uz adresātu, tas saviem kaimiņiem nosūta RREQ paketi. Kaimiņi, saņemot RREQ ziņojumu, veic vienu no tālāk dotajām darbībām.

- a) Ja ziņojums ir saņemts jau iepriekš, to atmet. Tam var sekot pēc unikāla identifikatora katrai ģenerētajai RREQ paketei.

- b) Ja mezgla maršrutēšanas tabulā ir ieraksts ar virzienu uz galamērķi, nosūta RREP virzienā uz datu avotu.
- c) Citā gadījumā mezgls pārsūta paketi saviem kaimiņiem un maršrutēšanas tabulā ieraksta distances vektoru uz avota mezglu, lai nodrošinātu reverso maršrutu.

Plūdinot RREQ ziņojumu uz dažādiem galamērķiem, visos mezglos, kas to apstrādājuši, automātiski uzstādās reversā maršruta ieraksts uz ziņojuma avotu. Šie ieraksti ir jāuztur vismaz tik ilgi, kamēr avota mezgls saņem RREP ziņojumu. Katram tabulas ierakstam tiek izmantots taimauts, pēc kura ieraksts tiek izdzēsts.

Lai izvairītos no cīlpām, kā arī, lai varētu sekot ierakstu svaigumam, ir izmantots adresāta secības skaitlis. Lielāks secības skaitlis raksturo svaigāku maršrutu. RREQ ziņojumam nonākot mezglā, kuram ir maršruts uz adresātu (tas var būt arī pats adresāts), vispirms tiek salīdzināts maršrutēšanas tabulā ierakstītais adresāta secības skaitlis ar RREQ ziņojumā ierakstīto. Ja RREQ ziņojumā tas ir lielāks, mezgls nedrīkst izmantot savu maršruta ierakstu, lai atbildētu uz RREQ ziņojumu. Mezglam šis ziņojums jāpārsūta tālāk saviem kaimiņiem un jāatjaunina savs ieraksts. Ja mezglam ir saglabāts svaigāks ieraksts, kā arī RREQ ziņojums nav ticis apstrādāts iepriekš, mezgls pārraida RREP ziņojumu caur uniraides maršrutu avota mezglam. RREP ceļojot uz datu avota mezglu, visi mezgli šajā maršrutā uzstāda tiešo maršrutu uz mezglu, kurš RREP ir nosūtījis, kā arī atjaunina taimautu maršrutu ierakstiem uz avotu un adresātu. Tiklīdz avota mezgls saņem RREP ziņojumu, tas var uzsākt datu pārraidi.

Maršrutu uzturēšana notiek, pirmkārt, sekojot līdz maršrutēšanas tabulu ierakstu svaigumam. Ja, mezgliem kustoties, notiek maršruta pārrāvums, mezgls, kurš nevar pārsūtīt datus tālāk, ģenerē RREP paketi, kas satur jaunu adresāta secības skaitli (lielāku), kā arī lēcienu skaitu ∞ . Šo ziņojumu nosūtīta visiem tiem kaimiņiem, kuri ir iesaistīti bojātajā maršrutā, tie savukārt pārsūta saviem kaimiņiem, līdz visi datu avoti ir brīdināti. Ja maršruts vēl joprojām ir nepieciešams, datu avots var iniciēt jaunu maršruta atklāšanu.

OLSR ir speciāli *ad-hoc* tīklam optimizēts vadu tīklos izmantots posma stāvokļa protokols. Posma stāvokļa maršrutēšana nosaka, ka mezgls izplata informāciju par saviem savienojumiem (posmiem) ar kaimiņiem. Kaimiņi šo informāciju plūdina tālāk, tādējādi citi mezgli var iegūt pilnu tīkla topoloģisko karti un izrēķināt izdevīgāko maršrutu. Lai samazinātu maršrutēšanas ziņojumu plūdināšanas virstēriņu, OLSR ir izmantoti divi uzlabojumi: a) pirmkārt, kontroles ziņojumus ir ļauts pārsūtīt tikai izvēlētiem mezgliem, kurus sauc par daudzpunktu relejiem (MPR); b) otrkārt, ir samazināts kontroles ziņojumu izmērs, jo kaimiņiem tiek paziņots tikai par daļu no posmiem, kuri MPR ir izvēlējušies.

Katrs mezgls izvēlas MPR mezglu kopu, kurai ir atļauts pārsūtīt tālāk maršrutēšanas ziņojumus. Visi citi mezgli ziņojumu apstrādā, bet nepārsūta tālāk. MPR izvēlas

tā, lai aptvertu visus mezglus, kuri ir divu lēcienu attālumā. Jo mazāks būs MPR skaits, jo optimālāks ir maršrutēšanas protokols. MPR atlase var būt heuristiska, izmantojot zemāk doto algoritmu [10].

- 1) Mezgls vispirms MPR kopā ietver tos kaimiņus, kuri ir vienīgie, lai sasniegtu kādu divu-lēcienu kaimiņu.
- 2) Mezgls iekļauj kopā to kaimiņu, kurš nosedz lielāko skaitu mezglu, kurus nerasniedz šī brīža MPR kopa.
- 3) Pēdējo soli atkārto, līdz visi divu lēcienu kaimiņi ir sasniedzami.

Lai noskaidrotu divu lēcienu apkārtni un varētu atlasīt MPR, ir izmantoti periodiski "Hello" ziņojumi, kas satur informāciju par kaimiņiem un posma stāvokli ar tiem. Šie ziņojumi tiek nosūtīti visiem viena lēciena kaimiņiem, kas tālāk tos nepārsūta. Tas sniedz pietiekami daudz informācijas par kaimiņiem divu lēcienu attālumā. Izvēlētie MPR tiek paziņoti ar "Hello" ziņojumu palīdzību, iekļaujot posma stāvokli ar marķējumu "MPR". Katrs mezgls var sastādīt tabulu ar mezgliem, kuri to ir izvēlējušies kā savu MPR (MPR selektori).

Nākamā maršrutēšanas fāze ir topoloģijas informācijas plūdināšana tīklā. Katrs tīkla mezgls periodiski izplata topoloģijas kontroles (TC) ziņojumu, norādot tajā posma stāvokli ar katru savu MPR selektoru. Ja kādam mezglam nav neviena MPR selektors, tas var TC ziņojumu nesūtīt. No šiem ziņojumiem katrs mezgls var izveidot savu topoloģijas karti un aprēķināt maršrutēšanas tabulu dažādiem adresātiem.

Lai izvairītos no nederīgiem maršrutiem topoloģijas izmaiņas gadījumā, pirmkārt, mainoties MPR selektoru kopai, TC ziņojums var tikt izsūtīts pirms plānotā laika, otrkārt, katram topoloģijas ierakstam mezglos ir noteikts taimauts.

1.3. *Ad-hoc* tīklu pielietojumi

Ad-hoc tīklu vēsture sniedzas atpakaļ līdz 20. gs. septiņdesmitajiem gadiem, kad, saskatot pakešu tīklu potenciālu, ASV Aizsardzības departaments aizsāka DARPA Pakešu radio projektu [10]. Sākotnējie *ad-hoc* tīklu pielietojumi bija paredzēti armijas un speciālo dienestu vajadzībām, jo pievilcīga bija iespēja nodrošināt sakarus vietās, kur nav esošas infrastruktūras. Arī šobrīd šis virziens ir aktuāls, pētot tādus pielietojumus kā attālināta bezapkalpes transportlīdzekļu vadība, komunikācija starp komandām militāru misiju vai ārkārtas situāciju laikā u.c.

Tikai pēdējā desmitgadē, kad bezvadu tehnoloģijas ir radījušas apstākļus visaptverošai un nepārtrauktai savienojamībai pat atrodoties kustībā, ir aktualizējušies uz plašāku sabiedrību orientēti pielietojumi. Tomēr vairums ideju pagaidām ir palikušas pētniecības laboratoriju un projektu līmenī. Tieši MANET ir piesaistījis lielāko pētnieku interesi (tālākajās nodaļās tiek lietots tikai *ad-hoc* tīkla jēdziens, ar to saprotot

arī MANET).

Darbā [17] veiktā analīze apkopo cēloņus, kādēļ “tīrs” vispārēja pielietojuma MANET praksē sevi nav attaisnojis. Ir secināts, ka tas var piedāvāt daudz interesantu pētniecības problēmu, tomēr šādam tīklam ir grūti izstrādāt efektīvus protokolus, kā arī nav skaidra ekonomiskā pamatojuma un pievienotā vērtība lietotājiem. Pie šiem cēloņiem var pievienot vel vienu – drošības aspekts. Iekārtām darbojoties kā relejmezgliem, palielinās sensitīvas informācijas pārtveršanas risks. Ja WLAN šo risku samazina datu kriptēšana un infrastruktūras atrašanās vieta īpašnieka pārvaldībā, tad *ad-hoc* tīkliem šī problēma nav pietiekami risināta. Tas sašaurina pielietojumu uz lietotāju grupām, starp kuru dalībniekiem pastāv uzticība. Minēto iemeslu dēļ MANET ideju var uzskatīt par utopisku, kas praksē ir grūti īstenojama. Darbā [17] ir aizstāvēti atsevišķi pragmatiski *ad-hoc* tīklu pielietojumi, kuri uzskaitīti zemāk.

- Hibrīdi tīkli, kur *ad-hoc* tīklus apvieno ar citām tīkla tehnoloģijām, piemēram, režģtīkliem (detalizētāk 1.3.1. apakšnodaļā).
- Atsevišķi specializēti pielietojumi (detalizētāk 1.3.2. apakšnodaļā).
- Oportunistiski tīkli visaptveroša (*parvasive*) pārklājuma nodrošināšanai. *Ad-hoc* tīkls ir izmantots, lai iespēju robežās paplašinātu infrastruktūras tīklu vietās, kur nesniedzas WLAN. Tā kā abi pirmie var ietvert oportunistiskus tīklus kā savu sastāvdaļu, tie atsevišķi netiek apskatīti.

Ad-hoc tīklu pielietojumus var iedalīt gan pēc uzbūves, gan specializācijas. Tālāk ir apskatīti bezvadu režģtīkli, kurus kombinējot ar *ad-hoc* tīkliem, var nodrošināt specifiskus pielietojumus. 1.3.2. ir apskatīti daži populārākie specializētu *ad-hoc* tīklu veidi. Apakšnodaļas beigās ir analizēts *ad-hoc* tīklu pielietojums video pārraides nodrošināšanai.

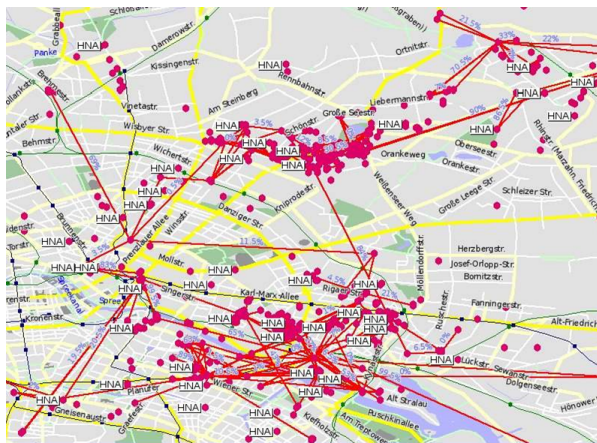
1.3.1. Bezvadu režģtīkli

Bezvadu režģtīkls darbojas pēc līdzīgiem principiem kā *ad-hoc* tīkls (tas ir decentralizēts, daudzlēcienus, pašorganizējošs un paškonfigurējošs), tomēr būtiskākā atšķirība ir izteikti mazkustīgu vai stacionāru iekārtu izmantošana (piemēram, bezvadu maršrutētāji). Tas ļauj vienkāršāk realizēt datu pārraidi, jo tīklam ir noteikta topoloģija, iekārtas parasti ir pieslēgtas elektrotīklam, līdz ar to nav ierobežota patērētāja jauda un ir nodrošināta lielāka stabilitāte.

Režģtīkls var veidot bezvadu tīkla statisko mugurkaulu, nodrošināt arī izeju uz internetu, savukārt lietotāji slēdzas pie režģtīkla mezgliem ar mobilām iekārtām. Šāda hierarhiska struktūra ir alternatīva tradicionāliem WLAN tīkliem, kurā katru piekļuves punktu (AP) ar vadu pievieno pie centrālā komutatora. Tas ļauj samazināt infrastruktūras izveides izmaksas.

Režģtīklu var izmantot, lai nodrošinātu interneta pārklājumu pilsētā, samazinot

pieslēgumu skaitu ar vadiem. Šāda tīkla strādājošs piemērs ir *Freifunk* kopienas tīkls Berlīnē (1.3. attēlā) [18]. *Freifunk* ir nekomerciāla iniciatīva, kuras ietvaros izstrādā speciālu programmatūru. Lietotāji brīvprātīgi iesaistās kopienā, ļaujot savas bezvadu iekārtas izmantot kā relejmezglus, caur kuriem citi dalībnieki var pārsūtīt datus.



1.3. att. Freifunk bezvadu režģtīkla topoloģija Berlīnē [18].

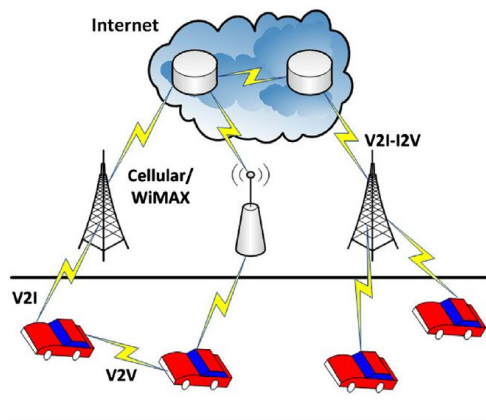
Ja režģtīklu apvieno ar citām *ad-hoc* tīklu tehnoloģijām, piemēram, MANET, vai arī tajā pielieto dažādas bezvadu tīklu tehnoloģijas, piemēram, 4G ar IEEE 802.11 vai IEEE 802.15, var runāt par hibrīdu režģtīklu. Šāds režģtīkls satur vairākus līmeņus: vārtejas mezgli, statistiski bezvadu maršrutētāji un oportūnistiski *ad-hoc* klienti. Šāda hierarhiska struktūra padara to vieglāk organizējamu un savietojamu ar esošām infras-truktūrām. Arī nākamās paaudzes 5G mobilo sakaru tīklos paredzēts ietvert *ad-hoc* funkcionalitāti, lai lietotāji, kuri atrodas tuvu, varētu pārsūtīt datus tiešā veidā [2], nenoslogojot bāzes staciju.

1.3.2. Specializēti *ad-hoc* tīkli

Specializētie *ad-hoc* tīkli pilda konkrētas funkcijas un tiek veidoti ar mērķi nodrošināt konkrētas lietotāju vajadzības. Pēc uzbūves tas var būt gan režģtīkls, gan mobils *ad-hoc* tīkls. Specializēti tīkli ir, piemēram, VANET, kas tiek izmantots automobiļu komunikācijai, bezvadu sensoru tīkls (WSN), ko pielieto sensoru datu ievākšanai, kā arī *ad-hoc* tīkls virtuālai sadarbībai.

VANET ir viens no *ad-hoc* tīklu pielietojumiem, kura mērķis ir palielināt automobiļa vadītāja/pasažieru komfortu, nodrošinot piekļuvi tīmekļa servisiem, un uzlabot drošību uz ceļiem [19], piemēram, apmainoties ar informāciju ar citiem automobiļiem par ceļā esošu šķērslī (1.4. attēls). VANET ir raksturīga augsta mezglu mobilitāte, kas

atšķirībā no MANET vides ir prognozējama. VANET mezglos ir mazāk ierobežotas barošanas un datu apstrādes iespējas, salīdzinot ar MANET.



1.4. att. VANET [19].

VANET arhitektūru var apskatīt vairākos līmeņos:

- komunikācija automobiļa iekšpusē starp kontroles bloku un dažādām iekārtām un sensoriem; tam var izmantot gan vadu, gan bezvadu savienojumu;
- *ad-hoc* tīkls, kas ietver automobīlis-automobīlis komunikāciju (V2V) vai starp automobiļiem un ceļmalā izvietotām fiksētām iekārtām, nodrošinot automobīlis-infrastruktūra komunikāciju (V2I);
- infrastruktūras līmenis – iekārtas ceļmalā var savienot ar citiem tīkliem un internetu.

Lai nodrošinātu komunikāciju, tiek izmantotas dažādas datu pārraides tehnoloģijas. Priekš V2I var izmantot šūnu sakaru mobilo tīklus vai WiMAX tehnoloģiju. Savukārt priekš V2V vai komunikācijas ar ceļmalā izvietotām iekārtām izmanto WAVE tehnoloģiju [20], kas balstās uz IEEE 802.11p standartu. Protokols atbalsta lielu kustības ātrumu, kā arī, darbojoties WAVE režīmā, nodrošina tūlītēju savienojumu ar citiem automobiļiem. Pētījumi rāda [21], ka mazāk svarīgiem pielietojumiem kā, piemēram, piekļuve internetam, V2I var būtēt uz IEEE 802.11g/n standarta protokoliem, kas nodrošina pieņemamu datu pārraides ātrumu, ja auto kustības ātrums ir līdz 100 km/h.

Kritiski svarīgs ir efektīvs maršrutēšanas protokols, kas augstas mobilitātes apstākļos nodrošina zemu pakešu zudumus un aizturi (īpaši ārkārtas situācijās). Darbā [22] ir secināts, ka uz atrašanās vietu balstīti maršrutēšanas protokoli ir piemērotāki VANET, salīdzinot ar tiem, kas balstīti uz topoloģiju, piemēram, DSR un AODV. Automobiļi ir aprīkoti ar navigācijas sistēmām, kas ļauj noteikt precīzu atrašanās vietu un maršrutēšanā var izmantot ielu kartes, prognozējot automobiļu kustību.

Sensoru tīklu veido liels skaits izmēros mazu iekārtu, kas veic datu ievākšanu, apstrādi un nosūtīšanu uz savākšanas iekārtu. Pielietojumu loks ir plašs, sākot no vides monitoringa lauksaimniecības vajadzībām, beidzot ar cilvēka fizioloģisko datu ievākšanu veselības aprūpē. Galvenās atšķirības no tradicionāliem *ad-hoc* tīkliem [23]:

- lielāks mezglu skaits un blīvums ar biežām tīkla topoloģijas izmaiņām;
- augsts bojājumu risks;
- komunikācijai pārsvarā izmanto apraidi, pretēji *ad-hoc* tīklam raksturīgai uni-raidei;
- ierobežotas barošanas, atmiņas un datu apstrādes iespējas.

Viena no svarīgākajām prasībām šādam tīklam ir zems enerģijas patēriņš, ko ļauj samazināt tālāk uzskaitītie risinājumi.

- Daudzu lēcienu pārraide ļauj izmantot mazāku raidītāja jaudu, salīdzinot ar tiešu savienojuma veidošanu lielā attālumā.
- Energoefektīvi datu pārraides protokoli. IEEE 802.15.4 standarts nodrošina pārraidi ar zemāku jaudu, energoefektīvu CSMA/CA MAC metodi un mehānismus enerģijas taupīšanai neaktīvos periodos [24].
- Samazināts pārraidāmo datu apjoms, veicot atsevišķus datu apstrādes uzdevumus sensora mezglā. Darbā [25], pētot sensoru tīklus vizuālās informācijas savākšanai, secināts, ka datu apstrāde mezglos prasa vairāk enerģijas nekā lielāka apjoma neapstrādātas informācijas pārraide.

WSN raksturīgās īpašības un prasības pēc zema energopatēriņa apgrūtina arī maršrutēšanu. Šādos tīklos, kā viens no efektīviem maršrutēšanas paņēmieniem, ir piedāvāta hierarhiska maršrutēšana [26]. Mezglus grupē klasteros, kuros ir viens galvenais mezgls ar lielākiem datu apstrādes resursiem. Galvenais mezgls saņem datus no citiem klastera mezgliem, veic agregāciju, apstrādi un pārsūta tos tālāk citam klasterim vai savākšanas mezglam. Šādai pieejai ir līdzība ar MPR mezglu izmantošanu OLSR protokolā.

Virtuāla grupas sadarbība *ad-hoc* tīklā. Iepriekš ir minēta sadarbība starp speciālo dienestu grupām. Šobrīd ļoti aktuāla ir sadarbība virtuālās vidēs un sociālos tīklos, kam par tehnisko bāzi var kalpot *ad-hoc* tīkls. Šāds pielietojums, piemēram, ļauj sadarboties grupai cilvēku, kas strādā kopīgā projektā. Līdzīgi kā *Freifunk* kopienai (1.3.1. apakšnodaļā), tas atvieglo tehnisko risinājumu izstrādi, jo tiek lietota viena programmatūra un, pastāvot uzticībai starp dalībniekiem, datu drošības līmenis var būt zemāks.

Grupu sadarbību var īstenot hibrīdos režģtīklos, kur iespējami vairāki scenāriji [27]. Mazā projekta grupā P2P saziņa var notikt pēc Kaveman modeļa [28], kur dalībnieki sazinās *ad-hoc* tīklā tiešā veidā. Gadījumos, kad tiešu savienojumu nevar nodrošināt, iespējami vairāki lēcieni. Lielākām kopienām un sadarbībai starp projektu grupām

efektīvāka var būt topoloģija ar centrālu mezglu (zvaigznes), caur kuru veic komunikāciju (failu, video u.c. datu pārsūtīšana) gan starp grupas dalībniekiem, gan ar citas lokālas kopienas centrālo mezglu vai internetu (hierarhisks režģtīkls).

Kā viens no sadarbības instrumentiem virtuālā vidē tiek izmantota video pārraide, kas izpaužas kā video konferences vai zvani vienas grupas dalībnieku ietvaros vai starp grupām. Video konference no video zvaniem parasti atšķiras ar augstākām kvalitātes prasībām un vairāk iesaistīto dalībnieku. Iespējamie sadarbības scenāriji:

- eksperimenta filmēšana un video pārraide no laboratorijas uz auditoriju;
- video komunikācija starp pētnieku grupām ēkas vai ēku kompleksa ietvaros;
- video translēšana no konferences zāles uz citām telpām;
- video novērošana, pārraidot video datus no IP kamerām uz centrāli ar lēcieniem;
- ārkārtas situācijā ar kameru aprīkots robots veic bīstamu uzdevumu, ļaujot vadību un novērošanu no kontrolpunkta u.c.

Citos gadījumos video var straumēt no servera, piemēram, no *YouTube* tīmekļa servisa.

1.3.3. Video pārraide *ad-hoc* tīklā

Tuvākajos gados prognozē eksponenciālu video datu apjoma pieaugumu mobilaajos sakaru tīklos (iepriekš 1. attēlā), līdz ar to video pārraides iespēju uzlabošana šādiem tīkliem ir aktuāls pētniecības temats. Tas ir izmantots kā testa pielietojums darbā veiktajos pētījumos. Video pārraide uzliek augstas prasības tīklam, jo ir liels pārraidāmo datu apjoms, jutība pret pakešu zudumiem un stingras prasības pret aizturi. Video konferences un zvani, salīdzinot ar saglabāta video straumēšanu, vēl vairāk palielina prasības, jo tiek veikti reāllaikā. Lai definētu prasības, ir ieviests pakalpojuma kvalitātes (QoS) jēdziens. Biežāk izmantotie pakalpojuma kvalitātes prasību parametri priekš video pārraides [29]: caurlaidspēja, kurai jāapmierina video plūsmas bitu ātrums, aizture un tās trīce, kas jānodrošina, lai video varētu skatīties bez pārrāvumiem. Video skatītājam svarīga ir subjektīvā izjūta par video attēla kvalitāti, ko mēdz raksturot ar QoE jēdzienu.

Galvenās problēmas, ar kurām jāsaskaras, pārraidot video *ad-hoc* tīklā [29].

- Radio kanālā raksturīgi gadījuma rakstura pakešu zudumi, kurus izraisa ar radioviļņu izplatīšanos saistīti efekti. Bojāto pakešu atkārtota sūtīšana ne vienmēr ir pieļaujama aiztures prasību dēļ. Kanāla caurlaidspēju padara mainīgu gan kustīgi objekti ceļā, gan pašu mezglu kustīgums, tādēļ nevar garantēt stabilu datu pārraides ātrumu uz ilgāku periodu.
- Daudzu lēcienu pārraidē aizture pieaug lineāri līdz ar lēcienu skaitu, kā arī palielinās pakešu zudumu varbūtība. Savstarpējie traucējumi starp mezgliem maršrutā samazina tīkla caurlaidspēju (detalizētāk 1.4. apakšnodaļā).
- Mezglu kustīgums izraisa maršrutu pārrāvumus. Kamēr pārrāvums tiek atklāts

un maršrutēšanas protokols izveido jaunu maršrutu, rodas pakešu zudumi, kas pilnībā aptur video straumi skatītāja pusē.

- Mezglu aparātūras iespējas apstrādāt video datus ir ierobežotas.

QoS garantijas lielā mērā atkarīgas no maršrutēšanas protokola. Protokoli, tādi kā DSR un AODV, meklē tikai īsākos maršrutus, neņemot vērā citus parametrus. Darbos [29], [30] ir uzsvērts, ka arī radio kanāla kvalitāte (pakešu zudumi) un caurlaidspēja būtu jāņem vērā. Reaktīva maršrutēšana, lai arī samazina virstēriņu, var radīt pārrāvumu uz jauna maršruta atklāšanas laiku, kas var būt ilgāks nekā pieļauj aiztures prasības. Darbā [30] veiktajā pētījumā ir novērots, ka AODV protokols maršrutu atkāšanu veic vienas sekundes laikā, kas ir nepieņemami reāllaika video plūsmām.

Augstas kvalitātes video signāla (720p “HD”, izšķirtspēja 1280×720 , 0,92 megapikseli, H.264 kompresija) straumēšanai jānodrošina kanāla caurlaidspēja 4 Mb/s [31]. Lielāka video bitu pārraides ātruma izmantošana nekā pieļauj tīkla caurlaidspēja var radīt pārbļivi, kā rezultātā palielināsies aizture, pakešu zudumi un notiks strauja attēla kvalitātes pasliktināšanās [32]. Pirmkārt, ir svarīgi novērtēt *ad-hoc* tīkla iespējas nodrošināt video pārraidi un izvēlēties atbilstošu izšķirtspēju. Otrkārt, maksimāli jāsamazina video plūsmas bitu pārraides ātrums, saglabājot pieņemamu kvalitāti, kas ir atkarīgs no kompresijas algoritma efektivitātes.

Tiek pielietoti dažādi MPEG un *International Telecommunication Union* (ITU) standartizēti kompresijas algoritmi, kuru salīdzinājums dots 1.2. tabulā [33]. Kompresijā tiek izmantota redundance video signālā kadra ietvaros un starp kadriem, izmetot informāciju, kura atkārtojas un kuru cilvēka acs neuztver. Parasti ir jāatrod kompromiss starp bitu pārraides ātrumu un video kvalitāti.

1.2. tabula

Attēlu un video kompresijas standarti [33]

Standarts	Pielietojums	Tipiskais datu ātrums
JPEG	Nekustīga attēla kompresijai	mainīgs
H.261	Video telefonija un telekonferences caur ISDN līniju	$p \times 64$ Kb/s
MPEG-1	Video digitālajam datu nesējam (CD-ROM), nodrošinot VHS kvalitāti	1.5 Mb/s
MPEG-2	Digitālā televīzija	2-20 Mb/s
H.263	Video telefonija publiskā komutējamā telefonu tīklā (PSTN)	33.6 Kb/s – ...
MPEG-4	Video ar uzlabotu iepriekšējo standartu funkcionalitāti	mainīgs
H.264/MPEG-4 Part 10 (AVC)	Video ar uzlabotu kompresiju	10-ti līdz 100-ti kb/s

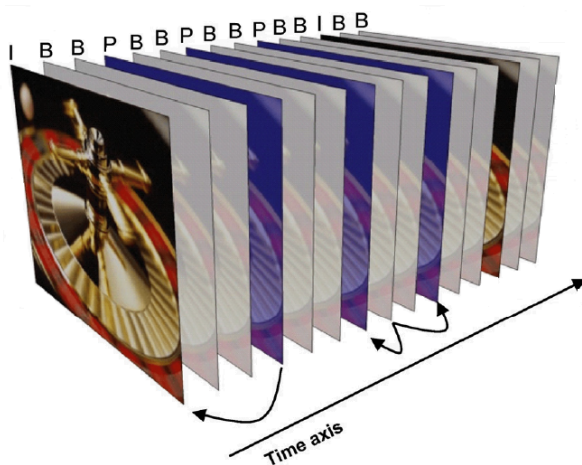
Šobrīd plaši tiek lietots H.264/MPEG-4 AVC kompresijas algoritms, kurš nodrošina līdz pat 50% augstāku kompresijas pakāpi pie līdzīga kvalitātes līmeņa, salīdzinot

ar priekšgājējiem [29], [34]. Tomēr tas ir krietni sarežģītāks un prasa vairāk aparatūras resursu, ko ir problemātiski nodrošināt mobilajās iekārtās.

Moderns kompresijas algoritms ietver kustības kompensācijas metodi, kas izmanto sekojošu kadru redundanci [35]. Tā kā sekojoši kadri ir līdzīgi, kompresijas nolūkos var pārraidīt informāciju tikai par to atšķirībām. Nākamo kadru dekodēri paredz, balstoties uz references kadru un informāciju par kustību. Tiek izmantoti trīs kadru tipi – I, P, B –, kas atšķiras ar to, cik lielā mērā tie atkarīgi no citiem kadriem.

- I kadri (*intra*) ir bāzes kadri, kuri kompresēti vismazāk un satur visu galveno informāciju par attēlu. Tie nav paredzami no citiem kadriem.
- P kadri (*predicted*) satur informāciju tikai par atšķirībām, līdz ar to samazina datu apjomu. Tos var paredzēt no agrāka I kadra vai P kadra.
- B kadri (*bidirectional*) – divu virzienu P kadra versija, kas satur referenci par sekojošo un iepriekšējo kadru. Uz B kadriem nedrīkst atsaukties citi P vai B kadri, jo tos interpolē no iepriekšējā un sekojošā kadra.

H.264 kadru secības piemērs dots 1.5. attēlā.



1.5. att. H.264 kadru secības piemērs [35].

Šāds kompresijas algoritms ir jutīgs pret bezvadu tīklos raksturīgajiem pakešu zudumiem, jo pazaudēts kadrs izraisīs kļūdu ne tikai konkrētajā plūsmas vietā, bet kļūdas izplatīšanos turpmākajos kadros. Video kadra pārsūtīšanu var neļaut aiztures prasības, tādēļ kā vienkāršākā metode tiek izmantota periodisku I kadru ievietošana [30]. Konkrēta kadru tipa izmantošana ietekmē video kvalitāti un kompresijas pakāpi: I kadri uzlabo kvalitāti, savukārt B kadri nodrošina visaugstāko kompresijas pakāpi. Praksē labu rezultātu sniedz šāda secība: IBBPBBPBBPBBIBBP [35].

1.4. Datu pārraides ātruma ierobežojumi *ad-hoc* tīklā

Ad-hoc tīkli tiek balstīti uz IEEE 802.11 bezvadu tīklu standartu, kas primāri ir paredzēts WLAN, tāpēc tas ne visos aspektos ir piemērots *ad-hoc* tīklam, kurš ir pilnībā decentralizēts, daudzlēcienu un ar dinamisku un neprognozējamu dabu. Tādēļ ir grūti nodrošināt pietiekamu un stabilu datu pārraides ātrumu.

Reālais sasniedzamais datu pārraides ātrums IEEE 802.11 bāzētos tīklos ir krietni zemāks par standarta noteikto teorētisko. Piemēram, IEEE 802.11g paredz datu ātrumu 54 Mb/s, bet praksē, divām iekārtām vienlaicīgi saņemot datus no trešās iekārtas, datu ātrums būs ne vairāk kā 8 Mb/s un samazināsies ar katru nākamo iekārtu [36]. Pirmkārt, to var skaidrot ar protokolu virstēriņu, bet, otrkārt, teorētiskais ātrums neietver traucējumus. Tieši traucējumi ir viens no galvenajiem datu pārraides ātrumu samazinošiem faktoriem *ad-hoc* tīklam, kas ierobežo arī video pārraidi. Šī apakšnodaļa analizē galvenos traucējumu cēloņus un to saikni ar tīkla caurlaidspēju.

1.4.1. Radio kanāls starp mezgliem

Radio kanāls ir vide, kurā notiek informācijas pārraide starp bezvadu mezgliem. Tā kā signāls tiek pārraidīts ar radioviļņiem, kanāls ir pakļauts gan ar radioviļņu izplatīšanos saistītiem nelabvēlīgiem efektiem, gan traucējumiem.

Ar radio signālu izplatīšanos saistīti efekti:

- signāla vājinājums, izplatoties telpā;
- vairākceļu radio signāla izplatīšanās rezultātā radušies pāmīrumi (fēdings);
- kanāla parametru mainīgums, ko izraisa kustīgi objekti ceļā (*fast fading*).

Bezvadu pārraidē ir izteikta signāla rimšana, tam izplatoties telpā starp raidītāju un uztvērēju. Vājinājums palielinās līdz ar attālumu d starp abiem mezgliem (kārtā vismaz $\frac{1}{d^2}$), kas ietekmē gan maksimālo datu pārraides attālumu, gan ātrumu. Signāls var izplatīties ar atstarojumiem, īpaši blīvas apbūves vidē. Tas izraisa to, ka signāla komponentes pienāks uztvērējā dažādos laikos un var radīt starpsimbolu traucējumus (ISI). Vienlaicīgi pienākošajām komponentēm summējoties, signāla līmenis var gan palielināties, gan samazināties atkarībā no fāžu atšķirības. Platjoslas signālam tas izpaudīsies kā frekvenčatkarīgi pāmīrumi, ar papildu vājinājumu noteiktās frekvencēs. Visi šie efekti kopā ietekmē derīgā signāla līmeni uztvērējā.

Datu pārraides ātrums ir atkarīgs no signāla un traucējumi plus trokšņa attiecības (SINR), jo tā nosaka maksimālo pārraides ātrumu, ar kādu raidītājs drīkst sūtīt datus, lai nepārsniegtu bitu kļūdu intensitātes (BER) prasības uztvērējā. SINR ietekmē gan derīgā signāla līmenis, gan traucējumi. Traucējumi ir otrs radio kanālu ietekmējošais

faktors un šajā apakšnodaļā ir analizēts detalizēti. Traucējumi ne tikai samazina pārraidis ātrumu, bet ir arī viens no galvenajiem kļūdu rašanās un informācijas zudumu iemesliem. Radio kanālā jāsaskaras ar šādiem traucējumu veidiem:

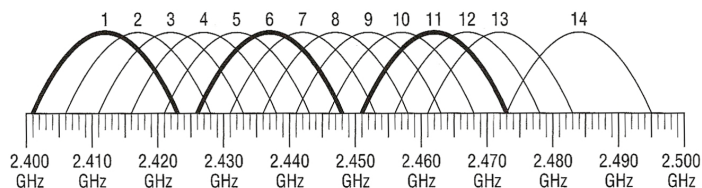
- fona troksnis uztvērēja ieejā (baltais troksnis);
- citi tīkla dalībnieki (kaimiņmezgli);
- citas iekārtas izmantotajā frekvenču joslā (mikroviļņu krāsnis, *bluetooth*).

Kā noteicošie *ad-hoc* tīkliem promocijas darbā ir izcelti traucējumi starp tīkla dalībniekiem (tālāk starpmezglu traucējumi).

Lai saprastu starpmezglu traucējumu rašanās iemeslus, vispirms jāapskata pieejamie radio kanāla frekvenču resursi. ITU organizācija, kuras viens no uzdevumiem ir pārraudzīt radio frekvenču spektru, ir noteikusi frekvenču spektra joslas, kurās nav vajadzīga licence. IEEE 802.11 standarta iekārtas izmanto divas no šīm joslām [37]:

- ISM josla 2,4 GHz frekvencē;
- U-NII josla 5 GHz frekvencē.

Standartam atvēlētās joslas tālāk tiek dalītas noteikta platuma kanālos. ISM frekvenču joslai piešķirtie frekvenču spektra resursi ir relatīvi nelieli (salīdzinot ar licencēto spektru), tādēļ kanāli savstarpēji pārklājas. Pieejami trīs 22 MHz plati neatkarīgi kanāli (parādīti 1.6. attēlā). Savukārt U-NII frekvenču joslā neatkarīgu kanālu skaits ir lielāks – 23×20 MHz. Izmantojot platāku kanālu (40 MHz, 80 MHz un 160 MHz), ko ļauj standarta *n* un *ac* papildinājumi, neatkarīgo kanālu skaits samazināsies.



1.6. att. Neatkarīgi kanāli 2,4 GHz ISM frekvenču joslā [37].

Infrastruktūras tipa WLAN tīklā katrs AP var izvēlēties kanālu, kuru kopīgi lietoš tā klienti. Pareizi konfigurētā tīklā tuvumā esošu AP klientiem piešķirtie kanāli vai nu daļēji pārklāsies, vai būs pilnīgi neatkarīgi, un abu AP klienti viens otru netraucēs. Palielinoties bezvadu iekārtu skaitam, strauji aug arī infrastruktūra tīkla nodrošināšanai, tāpēc parādās traucējumi starp WLAN tīkliem. Apdzīvotās vietās (īpaši lielpilsētās) bezvadu AP ir izvietoti blīvi un praktiski nav brīvu kanālu. Rezultātā traucējumi ir ne tikai viena lokāla tīkla dalībnieku ietvaros, bet arī starp dažādu tīklu dalībniekiem. Tas noved pie plašāka mēroga problēmas – vides elektromagnētiskā piesārņojuma.

Uz doto brīdi *ad-hoc* tīkla risinājumos, neraugoties uz intensīvo dažādu kognitīvo sistēmu attīstību (plašāk skat. 1.5.1. nodaļā), visi viena **tīkla dalībnieki izmanto kopīgu kanālu**. Tas ir galvenais cēlonis traucējumiem, tāpēc svarīga ir efektīva radio

kanāla resursu sadale starp lietotājiem.

1.4.2. Radio kanāla resursu sadale starp lietotājiem

Daudzlietotāju sistēmās, lai regulētu kanāla resursu sadali starp lietotājiem, tiek lietoti MAC protokoli. Pie esošā iekārtu blīvuma un datu apjoma, raidot vienā kanālā bez MAC protokola, savstarpējie traucējumi padarītu pārraidi neiespējamu. IEEE 802.11 balstītos tīklos kanāla piekļuve tiek veikta ar distributīvo koordinēšanas funkciju (DCF) protokolu, kas izmanto CSMA/CA kā pamatmehānismu un atkāpšanās taimeris pēc aizņemta kanāla stāvokļa. CSMA/CA pieder nejaušas piekļuves MAC protokolu klasei, vēsturiski attīstījies no vadu tīklos izmantotajiem ALOHA un CSMA/CD protokoliem, papildināts ar kolīziju novēršanas mehānismiem specifiski bezvadu tīklu vajadzībām IEEE 802.11 standarta ietvaros [8]. CSMA/CA mehānisms nosaka, ka mezgls novērtē kanāla stāvokli (vai cits mezgls neraida), pirms uzsākt pārraidi. To nodrošina divas funkcijas: fiziska nesēja jušana (PCS) un virtuāla nesēja jušana (VCS).

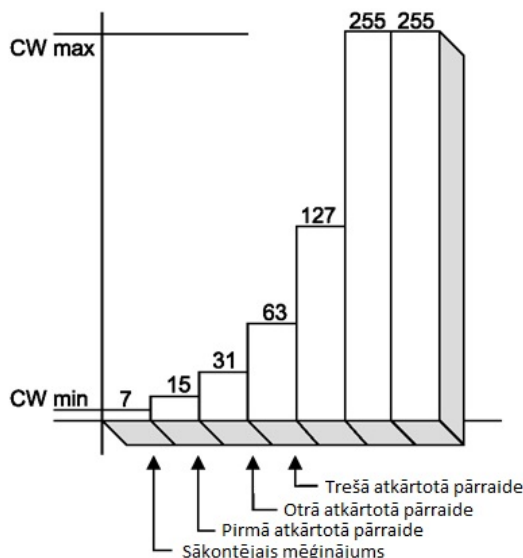
PCS ietver kanāla “klausīšanos” pirms pārraides, ko nodrošina PHY slāņa funkcionalitāte. Pirms MAC katra pārraides mezgls klausās kanālu noteiktu laiku – DCF starpkadru intervāla (DIFS) garumu. Pārraidi var uzsākt, ja justā signāla jauda ir zem noteikta līmeņa (PCS sliekšņa). Ja jauda ir virs sliekšņa, mezgls pārraidi atliek. Tas liek mezgliem, kuri atrodas pietiekami tuvu viens otram, savstarpēji sacensties par piekļuvi kanālam.

Visaugstākais kolīziju risks pastāv brīdī, kad pēc notikušas pārraides kanāls atbrīvojas. Lai nerastos situācija, kad vairāki mezgli, kuri gaidījuši kanāla atbrīvošanos, sāktu raidīt vienlaicīgi, tiek izmantots atkāpšanās taimeris (*backoff*). Atbrīvojoties kanālam, pēc DIFS intervāla nogaidīšanas mezgls izvēlas nejaušu vērtību sāncensības loga intervālā no $[0, CW]$, kas nosaka laiku, cik ilgi jāgaida līdz varēs atkārtoti veikt PCS. Laiku aprēķina:

$$t = \text{random}(0, CW) \cdot \text{laiksprauga}. \quad (1.1)$$

CW atrodas robežās $CW_{min} < CW < CW_{max}$. Sākotnēji CW tiek piešķirta vērtība CW_{min} , kas tiek eksponenciāli palielināta pēc katra neveiksmīga katra sūtīšanas mēģinājuma (t.i., kolīzijas), līdz tā sasniedz CW_{max} (1.7. attēlā). Šajā gadījumā kolīzija notiek, ja vairāki mezgli ir izvēlējušies vienādu atkāpšanās taimera laiku. Ja pēc atkāpšanās laika beigām kanāls ir brīvs, mezgls uzsāk pārraidi.

VCS tiek nodrošināts MAC slānī, veicot kanāla rezervāciju ar speciālu kontroles kadru palīdzību jeb RTS/CTS rokasspiedienu. Mezgls, kurš ir piekļuvis kanālam ar PCS procedūru, vispirms adresātam nosūta sūtīšanas pieprasījuma (RTS) kadru. Ja adresāts ir gatavs datu katra saņemšanai, tas atbild ar sūtīšanas gatavības (CTS)



1.7. att. Sāncensības loga eksponenciāls pieaugums [8].

kadru. Pēc CTS saņemšanas datu avots nosūta datu kadru, uz kuru adresāts savukārt atbild ar ACK kadru. RTS un CTS kadrus ir ietverts lauks ar prognozēto laiku visu kadru apmaiņai (ACK+CTS+Dati+ACK). Citi mezgli, kuri dzird šos kadrus, uzzina par kanāla rezervāciju, tās ilgumu un uz šo laiku nemēģina piekļūt kanālam.

Iemesli, kādēļ *ad-hoc* tīklos netiek izmantoti plaši pazīstami bezkonfliktu daudzpiekļuves protokoli, tādi kā frekvenčdales daudzpiekļuve (FDMA), laikdales daudzpiekļuve (TDMA), koda dales daudzpiekļuve (CDMA), apkopoti [38], [39]. FDMA tiek izmantots, lai nodalītu lietotājus katru savā frekvencē. Tas ir neefektīvs *ad-hoc* tīkliem, jo trūkst centrālā koordinējošā aģenta, kurš piešķir frekvenci. TDMA ieviešana ir komplicēta, jo, mezglu skaitam mainoties, jāpielāgo arī laikspraugu un kadru garums. Turklāt ir grūti efektīvi izmantot katru laikspraugu, ja pakešu izmēri ir mainīgi. CDMA ir grūti ieviest, jo mezgli ir kustīgi un jāuztur koda informācija. Tieši CSMA/CA spēja darboties decentralizētā infrastruktūrā padara to par piemērotāko *ad-hoc* tīkliem.

1.4.3. Traucējumi starp tīkla mezgliem

Lai arī CSMA/CA nodrošina vienlīdzīgu resursu sadali decentralizētā infrastruktūrā, tam ir arī vairāki trūkumi, kas nelabvēlīgi ietekmē tīkla caurlaidspēju.

Kanāla piekļuves ietekme. Tā kā tuvumā esoši raidītāji savstarpēji konkurē, raidīšanas laiks kanālā ir jāsadala. Tas samazina vidējo datu pārraides ātrumu, salī-

dzinot ar situāciju, kad raidītu tikai viens. Šis efekts promocijas darbā ir saukts par **MAC sāncensību**, kuru var uzskatīt par vienu no traucējumu veidiem. Sāncensību palielina pārsūtāmo datu apjoma palielināšanās, jo mezgli piekļūst kanālam biežāk. Sasniedzot stāvokli, kad izsūtāmo kadru skaits ir lielāks nekā to ļauj tīkla caurlaidspēja, veidojas tīkla pārbļīve. Kadri, gaidot brīvu kanālu, tiek aizturēti raidītāja buferī, veidojot rindu. Pārsniedzot rindas pieļaujamo garumu, vecākie kadri tiek dzēsti, radot zudumus. Pārbļīves apstākļos palielinās aizture un tās variācija (trīce), jo kadri pavada rindā neprognozējamu laiku.

Pārraidē ātrums ietekmē laiku, cik ilgi kanāls būs aizņemts. Zems datu ātrums kādā pārraidē liek ilgāk citiem gaidīt brīvu kanālu, kā rezultātā samazinās vidējais datu pārraidē ātrums tīklā. Ar šo problēmu ir saistīts efekts, kas zināms kā veikspējas anomālija [40]. Lai to novērstu, modernākajās iekārtās tiek izmantots risinājums “*airtime fairness*”, kas ātrākiem tīkla savienojumiem nodrošina biežāku piekļuvi kanālam.

Radio traucējumi. CSMA/CA nodrošina kanāla telpisku atkalizmantojamību (no ang. *spatial reuse*). Tas nozīmē, ka raidītāji, kuru PCS viens otru neietekmē (jūt brīvu kanālu), drīkst raidīt vienlaicīgi. Tas rada traucējumus citiem uztvērējiem, jo bez derīgā signāla tiek uztverti arī traucējošie. Šāds traucējumu veids, kura iemesls ir vienlaicīga pārraidē kanāla izmantošana, promocijas darbā ir saukts par **radio traucējumiem**.

Datu kadra veiksmīgai saņemšanai uztvērējā ir jāizpildās šādiem nosacījumiem:

- derīgam signālam P_{Rx} jābūt lielākam par uztvērēja jutību P_0 ;
- SINR attiecībai jābūt virs sliekšņa γ_0 , kuru nosaka izvēlētais pārraidē ātrums.

Radio traucējumus pēc intensitātes var iedalīt divos līmeņos:

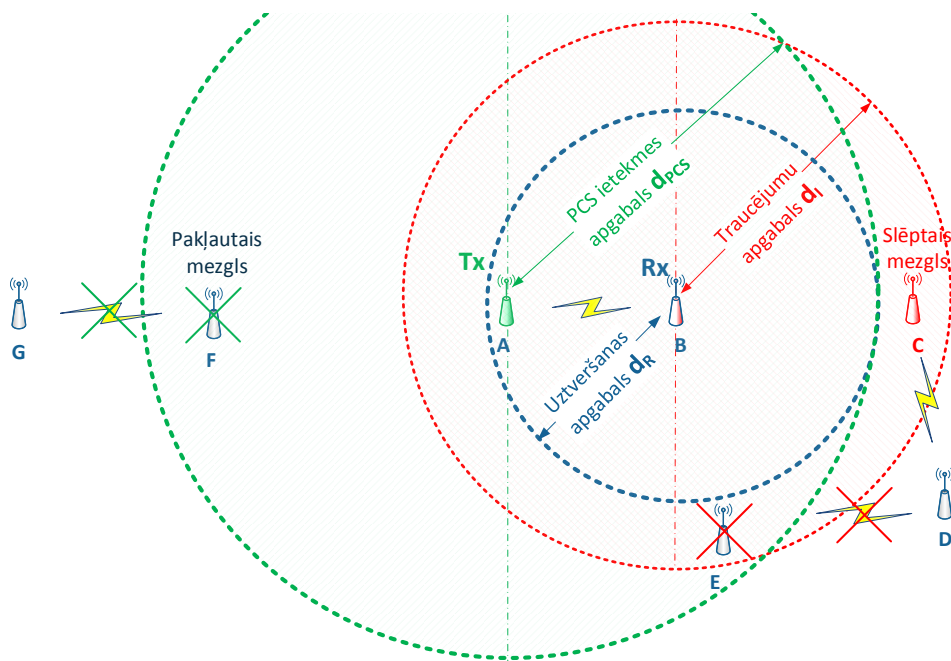
- tādi traucējumi, kas tikai pasliktina uztveršanas apstākļus uztvērējā un samazina pieļaujamo datu pārraidē ātrumu ($SINR > \gamma_0$);
- stipri traucējumi, kas neļauj uztvert signālu un izraisa kolīziju ($SINR < \gamma_0$).

Radio traucējumi samazina SINR attiecību, līdz ar to arī pieļaujamo pārraidē ātrumu. Ja SINR samazinās zem γ_0 , notiekoša pārraide tiek izjaukta (notiek kolīzija), jo nav iespējams nošķirt derīgo signālu no trokšņa. Kolīzijas ietekmi uz tīkla parametriem nosaka izmantotais transporta protokols. Pielietojot pārraidē vadības protokolu (TCP), katra pazaudētā pakete samazina pārraidē ātrumu, savukārt ar lietotāju datagrammas protokolu (UDP) tā izraisīs pakešu zudumus. PCS primāri nodrošina, lai SINR nesamazinātos zem γ_0 un nenotiktu kolīzijas, bet tas ietekmē arī tīkla caurlaidspēju.

Sliekšņu vērtības uzskatāmībai var attēlot ar to ietvertajiem telpas apgabaliem. 1.8. attēlā parādīts, kā tās ietekmē datu pārraidē tīklā attiecībā pret mezgliem A un B , kuri konkrētajā brīdī ir datu sūtītājs un saņēmējs. Attālumam starp raidītāju un uztvērēju jābūt mazākam par d_R , kuru nosaka uztvērēja jutība P_0 . Attālumam, kādā

cits mezgls var radīt kolīziju mezglā B , raksturo ar traucējumu apgabalu d_I . Attālums, kādā notiek kanāla jušana mezglā A , ir apzīmēts ar d_{PCS} un to nosaka PCS sliekšņa vērtība. Mezgli, kas atrodas šajā apgabalā (F , E), tiks bloķēti (pieņemot, ka visiem mezgliem PCS sliekšnis ir vienāds). Mezgli D un G drīkst raidīt, bet tas samazinās SINR uztvērējā.

Jāņem vērā, ka traucējumi var pienākt no vairākiem avotiem un summēties uztvērējā. Šādā situācijā traucējošie mezgli var būt arī ārpus attēlā parādītā traucējumu apgabala d_I . Aditīvus traucējumus nevar attēlot grafiski, tāpēc ilustrācijas parasti ataino viena mezgla radīto traucējumu apgabalu. Līdzīgi ir ar PCS darbības apgabalu – tas raksturo attālumu viena traucējumu avota jušanai. Tālāk darbā aprēķini ir veikti, ņemot vērā kumulatīvo jaudu, bet, lai PCS sliekšņa būtību padarītu uztveramāku, daudzviet tas ir izteikts ar ietvertā apgabala rādīsi.



1.8. att. Sliekšņu vērtību grafisks attēlojums.

Kompromiss starp MAC un radio traucējumiem. Lai arī PCS apgabala palielināšana liekas loģisks solis traucējumu un to izraisīto kolīziju samazināšanai, tomēr tam ir kopumā nelabvēlīga ietekme uz tīklu. PCS novērš traucējumus, bet tajā pašā laikā tas var liegt potenciāli veiksmīgas pārraides. Tas notiek situācijā, kad PCS apgabals ir liels (sliekšnis mazs) un atsevišķi mezgli tiek bloķēti pat tad, ja to radītie traucējumi nav vērā ņemami. Šis efekts ir pazīstams kā pakļautā mezgla problēma [41]. Ja mezgls F mēģinās sūtīt datus mezglam G , pārraide tiks atlikta aizņemot kanāla dēļ,

jo notiek pārraide starp A un B , neraugoties uz to, ka F ir pietiekami lielā attālumā no B un neradītu vērā ņemamus traucējumus. No otras puses, PCS apgabals nedrīkst būt pārāk mazs, jo tad palielināsies kolīziju daudzums slēpto mezglu dēļ [41]. 1.8. attēlā dotajā piemērā – C “nedzirdēs”, ka notiek pārraide no A uz B , jo C ir ārpus A PCS darbības apgabala. Mezgls C uzsāks pārraidi D , izraisot kolīziju, jo uztvērējā B pārklāsies signāli no abām pārraidēm.

IEEE 802.11 standartā, lai risinātu slēptā mezgla problēmu, ir paredzēts RTS/CTS rokasspiediens, samazinot šādu mezglu skaitu. Raidītāji, kuri ir ārpus viens no otra PCS apgabala par potenciālu konfliktu var uzzināt no RTS un CTS kadriem. Tā kā CTS izsūta adresāts, tad šis kadrs palielina rādiusu, kādā citi mezgli var uzzināt par kanāla stāvokli. Tomēr vairāki darbi [42], [43] norāda, ka šis mehānisms ir piemērots WLAN tīklam, kur mezgli, atrodoties ap AP, dzird viens otra pārraidi, bet *ad-hoc* tīklā, kur parādās vairāki lēcieni, vēl joprojām saglabājas slēptie mezgli. Turklāt parādās papildu pakļautie mezgli [42], kā rezultātā datu ātrums var būt pat zemāks nekā bez RTS/CTS rokasspiediena. Ņemot vērā šos apsvērumus, promocijas darba ietveros veiktajos pētījumos **RTS/CTS rokasspiediens nav izmantots**.

Lai palielinātu tīkla caurlaidspēju, ir jāizvēlas optimāls PCS sliekšnis, kas nodrošinātu kompromisu starp pakļautajiem un slēptajiem mezgliem, kas vienlaicīgi ir arī kompromiss starp MAC konkurenci un radio traucējumiem. Optimāla sliekšņa problēma detalizētāk apskatīta 1.5.1. apakšnodaļā.

Traucējumi daudzlēcieni pārraidē. Daudzlēcieni pārraidē jāreķinās ar lielāku traucējumu ietekmi, jo savstarpēji konkurējoši tīkla savienojumi atrodas tuvu. Jo vairāk lēcieni ir maršrutā, jo potenciāli vairāk ir traucējumu un zemāks datu pārraides ātrums. Tam ir ietekme uz maršruta kopējo caurlaidspēju, jo katrs atsevišķs savienojums ietekmē visa maršruta kvalitāti – gan caurlaidspēju, gan drošumu. Pētījumi rāda, ka datu pārraides ātrums samazinās līdz ar lēcieni skaitu [27].

Raidīšanas attāluma palielināšana var samazināt lēcieni skaitu, tomēr vienlaicīgi arī palielina traucējumu līmeni kaimiņu mezgliem. Tā kā datu pārraides ātrums samazinās līdz ar raidīšanas attālumu, maršruta izvēles fāzē ir jāizvērtē, vai lielāku ieguvumu sniedz īsāks maršruts ar zemas caurlaidspējas posmiem vai garāks ar lielāku caurlaidspēju atsevišķos posmos, bet arī ar lielāku savstarpējo traucējumu līmeni. Lai palielinātu attālumu un vienlaicīgi samazinātu traucējumus, tiek pielietotas virzien-
darbības antenas (1.5.1. apakšnodaļā).

1.5. Risinājumi caurlaidspējas palielināšanai

Iepriekšējā apakšnodaļā ir izklāstītas galvenās problēmas, kas saistītas ar *ad-hoc* tīklu tehnoloģiju. Šajā apakšnodaļā ir apskatīti aktuālie risinājumi šo problēmu novēršanai un augstākas *ad-hoc* tīklu caurlaidspējas nodrošināšanai. Ir sniegts ieskats arī tajos risinājumos, kuri pētīti un uzlaboti promocijas darbā. Apskatot risinājumus, ir ievērota OSI modeļa struktūra, tomēr daudzi no tiem aptver vairākus slāņus, tādēļ nodaļas noslēgumā sniegts ieskats OSI modeļa nepilnībās un iespējamajos uzlabojumos ar starpslāņu sadarbību.

1.5.1. Zemāko slāņu tehnoloģijas

Fizikālais slānis ietver pārraides vidi – radio kanālu –, pārraides mehānismus un signālu apstrādes tehnoloģijas. Fizikālā slāņa tehnoloģijas lielā mērā nosaka sasniegamo pārraides ātrumu starp divām iekārtām. MAC slānis regulē piekļuvi pārraides kanālam, un no tā darbības ir atkarīgi arī traucējumi.

Pēdējais IEEE 802.11 standarta papildinājums *ac* ietver vairākus uzlabojumus (skat. 1.1. tabulu), kas ļauj sasniegt teorētisko fizikālā slāņa datu pārraides ātrumu līdz 6,933 Gb/s [44]. Tomēr pieaugošais datu apjoms izraisa atsevišķu spektra apgabalu pārslogošanu. Kā iepriekš noskaidrots, tas ir viens no galvenajiem traucējumu rašanās iemesliem IEEE 802.11 atvēlētajās joslās (ISM un U-NII). Tas liek domāt, kā pēc iespējas efektīvāk izmantot atvēlētās joslas vai kā izmantot citus frekvenču apgabalus, kur josla ir brīvāka vai plašāka.

Kognitīvais radio savā vispārējā gadījumā paredz jebkuru sistēmas parametru pielāgošanu, lai palielinātu tīkla veikspēju (saukts par “Mitola” radio). Haikin piedāvā kognitīvā radio definīciju [45]: *Kognitīvais radio ir inteliģenta bezvadu sakaru sistēma, kas, darbojoties reālā laikā, izzina apkārtējo vidi, mācās no tās un pielāgo savus parametrus (piemēram, pārraides jauda, nesēja frekvence un modulācija), lai nodrošinātu:*

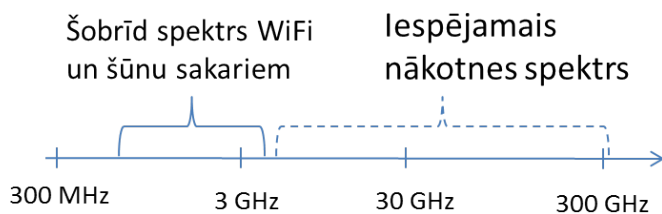
- *drošu pārraidi jebkurā laikā un vietā;*
- *efektīvu radio spektra izmantošanu.*

Vairums pētījumu kognitīvā radio jomā koncentrējas uz frekvenču spektra efektīvāku izmantošanu, paredzot dinamisku frekvenču joslu pārslēgšanu. Atsevišķi licenzētie spektra apgabali ir nepietiekami noslogoti vai citās teritorijās netiek izmantoti, piemēram, TV apraidei pārejot uz digitālo standartu, ir atbrīvojušās vairākas frekvenču joslas. Spektra izmantojuma efektivitāti var ievērojami uzlabot, ja sekundārajam lietotājam ļauj izmantot joslas (sauktus par “caurumiem”), kuras konkrētā vietā un laikā

neizmanto primārais lietotājs. Pieļaujama arī darbība paralēli ar primāro lietotāja, ja sekundārā lietotāja radītais traucējumu līmenis nepārsniedz noteiktu sliekšni.

Kognitīvā radio īstenošanu apgrūtina, pirmkārt, neieinteresētība no frekvenču joslu turētāju puses. Otrkārt, lai izveidotu kognitīvā radio *ad-hoc* tīklu, ir jāsaskaras ar daudziem tehniskiem sarežģījumiem [46]. Dažādās frekvenču joslās ir atšķirīgas radio viļņu izplatīšanās īpašības, kas ietekmē raidīšanas attālumu un datu pārraides ātrumu. Šo parametru mainīgums *ad-hoc* tīklā apgrūtina kaimiņmezglu atklāšanu un maršrutēšanu. Lai nosūtītu maršrutēšanas ziņojumu kaimiņmezgliem, ir jābūt pieejamai informācijai par to darbības frekvenču joslu. Josla ir svarīga arī maršrutu izvēles lēmumos; neņemot to vērā, maršruts būs neoptimāls, piemēram, ar vairāk lēcieniem vai zemu pārraides ātrumu kādā no savienojumiem. Pārsūtot datus jau izveidotā maršrutā, nedrīkst rasties maršruta pārrāvums, piemēram, raidīšanas attāluma izmaiņu dēļ, kaimiņmezglam pārslēdzoties uz citu joslu. Vienkāršākajā gadījumā var izmantot IEEE 802.11 standartā paredzētos blakus kanālus, kas pēc savām radio viļņu izplatīšanās īpašībām ir līdzīgi (daudzkanālu *ad-hoc* tīkls). Tomēr apdzīvotās vietās visi kanāli ir intensīvi noslogoti WLAN vajadzībām, tāpēc šāda pieeja nedos lielu ieguvumu. Lai uzlabotu koordināciju, var izmantot vienu vai vairākus iepriekš definētus vadības kanālus, kas prasa papildu raiduztvērējus.

Spektra resursu paplašināšana. Lai palielinātu datu pārraides ātrumu, var izmantot plašāku frekvenču joslu. IEEE 802.11ac standarta iekārtās ļauj apvienot vairākus 40 MHz kanālus, sasniedzot kopā pat līdz 160 MHz platu kanālu [44]. Tomēr šādi iegūstamo maksimālo joslas platumu ierobežo IEEE 802.11 kopējais atvēlētais apgabals, kā arī tas palielinātu traucējumus citām iekārtām. Bezvadu sakaros šobrīd intensīvi tiek izmantots frekvenču spektrs līdz 6 GHz. Lielu perspektīvu paver augstāku frekvenču izmantošana līdz pat 300 GHz (1.9. attālā).



1.9. att. Bezvadu sakaros izmantojamie spektra resursi.

IEEE 802.11ad standarts paredz izmantot 60 GHz frekvenču apgabalu, kurā pieejama 7 GHz plata josla. Teorētiski var tikt sasniegts līdz pat 6,8 Gb/s datu pārraides ātrums uz kanālu un līdz 27,2 Gb/s, apvienojot 4 kanālus [44]. Kā galvenais trūkums pārraidei tik augstās frekvencēs ir lieli radio viļņu izplatīšanās zudumi, grūtības ra-

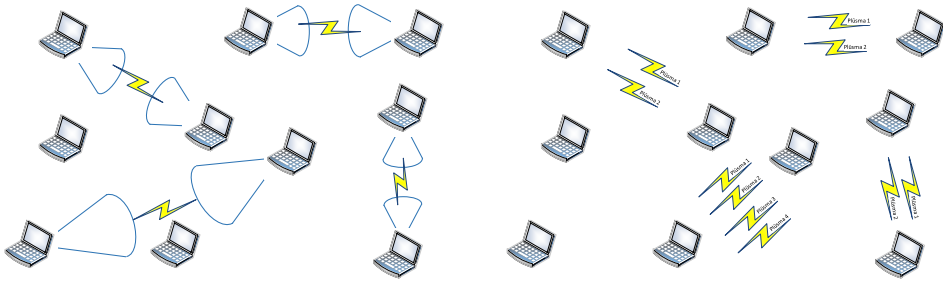
dio signālam iziet caur sienu un zudumi no pārraides ceļā esošiem objektiem, tādēļ tā darbība ir iespējama tikai telpas ietvaros, raidītājam un uztvērējam atrodoties tiešā redzamībā. Papildus paredzēts izmantot vērsuma formēšanu ar viedo antenu palīdzību, lai fokusētu antenas enerģiju vajadzīgajā virzienā, tādējādi palielinot raidīšanas attālumu un efektivitāti.

Atsevišķiem pielietojumiem ir nepieciešams vēl lielāks datu pārraides ātrums – 100 Gb/s un vairāk. Šādu pārraides ātrumu var nodrošināt 300 GHz frekvenču apgabalā, kur ITU regulas pieļauj 55 GHz platas joslas izmantošanu. Ņemot vērā lielo vājinājumu šajā frekvencē, ir plānoti neliela attāluma pielietojumi, piemēram, lejupielādes kioski, datora perifērijas pieslēgšana un komunikācija starp mikroshēmām (*chip-to-chip*). Šādu bezvadu funkciju nodrošināšanai būs nepieciešamība pēc papildu protokolu adaptācijas slāņiem, lai atbalstītu specifiskus datu, displeju un datora kopņu standartus, piemēram, *HDMI*, *PCI Express* un *Infiniband* HPC klastera mezglu starpsavienojumiem. Aktuāla problēma būs raidītāja/uztvērēja patērētās jaudas samazināšana [47].

Viedās antenas. Viedās antenas iespējams pielietot jau esošo *ad-hoc* tīklu tehnoloģiju ietvaros. Viedā antena var būt kognitīvā radio sastāvdaļa, kas palīdz uzlabot pārraides efektivitāti. Balstoties uz informāciju par apkārtējo vidi un tīklu, tiek pielāgoti antenas parametri (jauda, virzienu diagramma, telpisko plūsmu skaits u.c.) maksimāla SINR nodrošināšanai, kā arī datu pārraides ātruma palielināšanai.

Iekārta bez virziendarbības raida uz visām pusēm (*omni-directionally*), izmantojot telpu nelietderīgi, jo tā traucē citām paralēlām pārraidēm. Adaptīvi pielāgojot antenas diagrammu, ko ļauj daudzelementu antenu režģi, var palielināt raidīšanas attālumu vēlamajā virzienā un mazināt traucējumus nevēlamajos virzienos, kas ir īpaši aktuāli *ad-hoc* tīkliem (1.10a. attēls). Realizējot MIMO pārraidi ar vairākām telpiski paralēlām datu plūsmām (1.10b. attēls), var palielināt spektrālo efektivitāti, jo lielāks datu pārraides ātrums tiek sasniegts, nepaplašinot joslu. Ja šobrīd MIMO un MU-MIMO balstās uz radio viļņu izplatīšanos pa daudziem atstarotajiem ceļiem, tad nākotnē, izmantojot augstākas frekvences, efektīvāk būs izmantot tiešās redzamības MIMO, kad tiek formēti vairāki paralēli stari tiešā redzamībā [47].

Viedo antenu atbalsts ir ietverts IEEE 802.11 standarta *n* papildinājumā, nodrošinot MIMO pārraidi, kā arī izstrādē esošajā *ad*, kurš ietvers virziendarbību. Tomēr praksē IEEE 802.11 standarta mobilo iekārtu, kas aprīkotas ar viedām antenām, izplatība ir bijusi ierobežota, galvenokārt sakarā ar grūtībām izvietot daudzus antenu režģa elementus. Efektīvai antenu režģa darbībai attālumam starp elementiem jābūt vismaz pusviļņa garumā, tāpēc ar šādām antenām tehniski sarežģīti aprīkot mobilās plaukstas izmēra iekārtas, īpaši 2,4 GHz frekvencē. Grūtības virziendarbības īstenošanai *ad-hoc* tīklā rada nepietiekams atbalsts MAC un tīkla slānī [48], jo līdzīgi kā kognitīvā radio gadījumā ir jāveic kaimiņmezglu atklāšana un jānodrošina kanāla piekļuve tikai



(a) Virziendarbības *ad-hoc* tīkls

(b) MIMO *ad-hoc* tīkls

1.10. att. *Ad-hoc* tīkli ar viedo antenu tehnoloģijām.

virziendarbības apstākļos. Atsevišķi ražotāji (piemēram, *Ruckus Wireless* [3]) piedāvā WLAN AP iekārtās ar virziendarbību, kas paredzētas tieši traucējumu samazināšanai starp iekārtām. Pagaidām nav risinājumu virziendarbības nodrošināšanai lietotāja pusē.

Līdzīgi kā ar kognitīvo radio, šī tēma ir plaši pētīta akadēmiskajā vidē, bet tai nav reālu pielietojumu. Šobrīd viedo antenu pielietošana kļūst arvien iespējamāka, pateicoties pēdējā laika tehniskajiem sasniegumiem:

- vien augstāku radiofrekvenču apgabalu izmantošanai (piemēram, IEEE 802.11ad 60 GHz frekvencē nesēja viļņa garums ir tikai 5 mm)
- antenu tehnoloģijas attīstībai, piemēram, fraktālu antenu izmantošana ļauj veidot kompaktākus režģus [49].

Viedo antenu pielietojums *ad-hoc* tīklos detalizētāk analizēts 3.2. nodaļā.

Adaptīvs nesēja jušanas mehānisms. Arī MAC slānī ir iespējami uzlabojumi, kā, piemēram, adaptīvs CSMA/CA mehānisms. 1.4. apakšnodaļā ir uzsvērta problēma atrast kompromisu starp slēptajiem mezgliem, kas rada kolīzijas, un pakļautajiem mezgliem, kas tiek bloķēti nepamatoti. Lai samazinātu nepamatoti bloķētu mezglu skaitu un attiecīgi palielinātu maršruta caurlaidspēju, darbos [50], [51] ir piedāvāti adaptīvi PCS mehānismi, kas nodrošina optimālu PCS sliekšni.

PCS nodrošina, lai troksnis uztvērēja ieejā nepārsniegtu noteiktu līmeni un SINR vērtība būtu pietiekama (virs sliekšņa) derīgā signāla izdalīšanai. Darbā [50] ir analītiski noteikts, ka optimālais PCS sliekšnis P_{CST} ir saistīts ar SINR sliekšni γ_0 pēc sakarības

$$P_{CST} \leq \frac{1}{\gamma_0}. \quad (1.2)$$

Autori piedāvā adaptīvu PCS shēmu, kura balstās uz traucējumu līmeņa monitoringu

katrā mezglā un PCS pieskaņošanu visā tīklā, nodrošinot, ka SINR ir virs sliekšņa γ_0 . Tas tiek panākts ar informācijas apmaiņu starp mezgliem. Datu paketē tiek ietvertas norādes par nepieciešamajām PCS sliekšņa izmaiņām, norādot savu optimālo vērtību un virzienu kādā citiem mezgliem tas jāpielāgo (jāpalielina vai jāsamazina). Algoritms nosaka, ka visi tīkla mezgli saskaņo vienādu sliekšņa vērtību, kas ir nosacījums vienlīdzīgai kanāla resursu sadalei. Veicot datormodelēšanu, tiek pierādīta optimālā PCS sliekšņa saistība ar modulācijas shēmu un tai attiecīgo γ_0 vērtību. Dažādām γ_0 vērtībām novērojams atšķirīgs P_{CST} optimums, pie kuriem caurlaidspēja ir visaugstākā.

Darbā [51] piedāvātais K-APCS algoritms meklē optimālu PCS sliekšni, par kritēriju ņemot caurlaidspēju un datu kadru zudumus. Šī informācija tiek ievākta caur IEEE 802.11k standartā pieejamiem radio resursu mērījumiem.

1.5.2. Maršrutēšana tīkla slānī

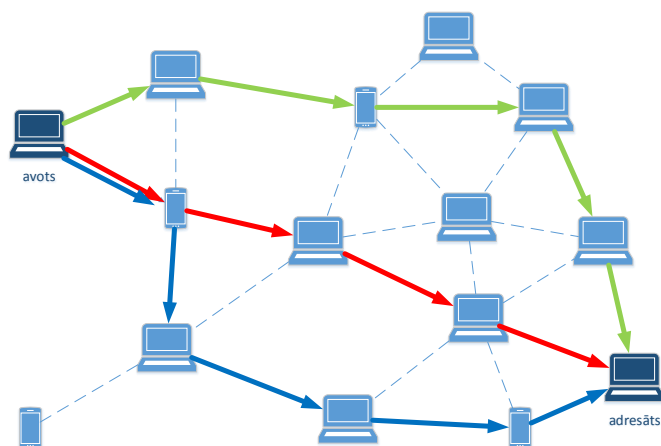
Primārā tīkla slāņa funkcija *ad-hoc* tīklā ir nodrošināt kaimiņu atklāšanu un maršrutēšanu. Viens no perspektīviem maršrutēšanas uzlabojumiem *ad-hoc* tīkla caurlaidspējas palielināšanai ir vairāku maršrutu pārraide (VMP). To var panākt ar mazāk izmaiņām IEEE 802.11 standartā, salīdzinot ar iepriekš apskatītajiem risinājumiem.

Iepriekš apskatītie *ad-hoc* tīklu maršrutēšanas protokoli, kā DSR un AODV, ir paredzēti, lai atrastu vienu maršrutu starp datu avotu un adresātu, parasti ar mazāko lēcienu skaitu. VMP tiek izmantoti vairāki maršruti starp datu avotu un adresātu, kas atkarībā no pielietojuma var sniegt dažādus ieguvumus [9]:

- bojājumpieciecību – sūtot maršrutos redundantas datu plūsmas, pārrāvums vienā no maršrutiem ļauj saņemt datus caur citu maršrutu; vairāki maršruti var tikt izmantoti arī kā rezerve primārajam maršrutam, lai, notiekot pārrāvumam, varētu veikt ātru pārslēgšanos uz citu maršrutu, nesākot jaunu maršruta atklāšanu;
- slodzes balansēšanu – sadalot datu paketes pa vairākiem maršrutiem, var tikt novērsta pārbļīve kādā no savienojumiem;
- caurlaidspējas agregāciju – izmantojot vairākus maršrutus vienlaicīgi, summārā caurlaidspēja var tikt palielināta.

Pēdējais punkts ir svarīgs šī darba ietvaros, jo, kā noskaidrots iepriekšējā, 1.4. nodaļā, viena maršruta caurlaidspēja ir ierobežota, tādēļ video datu sūtīšanai *ad-hoc* tīklā var izmantot vairākus maršrutus [52], [53], [54]. Tas tiek realizēts, video datu paketes sadalot starp maršrutiem un katrā no tiem sūtot citu plūsmu. Scenārija piemērs ar trīs paralēlām datu plūsmām starp datu avotu un adresātu parādīts 1.11. attēlā.

Vairāku maršrutu pārraides vēsture sniedzas līdz pat komutēto ķēžu telefona tīkliem, kuros tika izmantota alternatīvā maršrutēšana, lai novērstu zvanu bloķēšanu [55]. Komutatori papildus primārajam viena lēciena maršrutam uzturēja rezerves divu lēcienu maršrutus. Primāram maršrutam kļūstot nepieejamam (pārrāvuma vai pārslodzes



1.11. att. Vairāku maršrutu pārraide.

dēļ), zvans tika pārslēgts uz alternatīvu maršrutu. Pakešdatu pārraides tīklos tādos kā internets, VMP var novērst sablīvējumus, novirzot trafiku uz mazāk noslogotiem tīkla savienojumiem. Tomēr tas sevi nav attaisnojis, jo nepieciešami papildu resursi maršrutēšanas informācijas uzglabāšanai tīkla iekārtās. Viens no secinājumiem bija, ka vairāki maršruti ir piemērotāki uz savienojumu orientētos tīklos, piemēram, telefonu tīklos, tāpēc internetā maršrutēšana parasti balstās uz vienu maršrutu. Līdz ar multimediju pielietojumu attīstību radās nepieciešamība uzlabot QoS un piedāvāt QoS garantijas, kas vairāku maršrutu pārraidi atkal padarīja aktuālu pakešu orientētiem tīkliem, tajā skaitā arī *ad-hoc*.

Vairums VMP protokolu balstās uz reaktīviem viena maršruta protokoliem DSR un AODV [9], [11] (apskatīti 1.2. apakšnodaļā), kuri ir pielāgoti vairāku maršrutu atklāšanai. Maršrutu atklāšanas mehānismi oriģinālajos protokolos nevar nodrošināt pilnīgi nošķirtus (bez kopīgiem mezgliem) maršrutus, kas ir svarīgi, lai uzlabotu bojājum-piecietību un palielinātu caurlaidspēju. Pirmkārt, abi protokoli pieļauj, ka relejmezgli atbild uz RREQ ziņojumiem no saviem saglabātajiem maršrutu ierakstiem. Tas samazina iespēju RREQ ziņojumam nesasniegt adresātu, kas nav efektīvi VMP gadījumā, jo samazinās atklāto maršrutu skaits, kā arī tie ir mazāk nošķirti. Otrkārt, oriģinālie protokoli ignorē RREQ ziņojumu kopijas, kas potenciāli var norādīt uz citu iespējamo maršrutu, tādēļ VMP kopijas tiek izmantotas.

Klasiski reaktīvo protokolu DSR un AODV uzlabojumi vairākiem maršrutiem attiecīgi ir SMR [56] un AODVM [12]. Pirmais izmanto avotmaršrutēšanas algoritmu, bet otrs – reaktīvu distances vektora algoritmu. Reaktīvo protokolu izvēli par labu proaktīvajiem var pamatot ar sarežģītāku maršrutu atklāšanu nekā viena maršruta gadījumā, kas padara neefektīvu vairāku maršrutu uzturēšanu starp katriem diviem

tīkla mezgliem. Pēdējos gados parādījušies arī uz proaktīvā OLSR protokola balstīti vairāku maršrutu protokoli, piemēram, hibrīds vairāku maršrutu OLSR (MP-OLSR) [13]. To var skaidrot, pirmkārt, ar priekšrocībām, ko sniedz hibrīda maršrutēšana; otrkārt, ar paša OLSR protokola popularitāti, kas ieviests dažādās tīkla aparatūras platformās.

Izstrādājot VMP protokolus, jāaskaras ar vairākām fundamentālam problēmām [9], [11], kas uzskaitītas tālāk.

- 1) Vairāku maršrutu atklāšana. Nepieciešamība atklāt vairākus mezglu nošķirtus maršrutus padara protokolu algoritmus sarežģītākus. RREQ kopiju pārsūtīšana palielina to radīto virstēriņu. Jārēķinās arī ar lielākiem atmiņas resursiem maršrutēšanas informācijas uzglabāšanai mezglos.
- 2) Maršrutu izvēle. Protokolam atrodot daudzus maršrutus, ir jāizvēlas komplekts, kuru izmantot datu pārsūtīšanai. Šī problēma analizēta darba nākamajās nodaļās (2. un 5. nodaļa), īpaši akcentējot traucējumus, ko maršruti var savstarpēji radīt.
- 3) Slodzes sadalīšana pa maršrutiem. Atkarībā no VMP pielietojuma – datu drošība vai caurlaidspējas palielināšana – var pielietot atšķirīgu stratēģiju trafika sadalīšanai pa maršrutiem. Promocijas darbā vairāki maršruti ir izmantoti tikai caurlaidspējas palielināšanai, līdz ar to pēc maršruta komplekta izvēles katrā maršrutā tiek sūtīta cita datu plūsma. Trafika sadalīšanu var balstīt uz pakešu prioritāti, kā to dara video plūsmu gadījumā, lai svarīgākām paketēm piešķirtu drošāko maršrutu. Alternatīvi var veikt vienmērīgu pakešu multipleksēšanu (*round-robin*). Viena no problēmām ir pakešu secības izjaukšana, kas ir jārisina transporta un augstākiem tīkla slāņiem.

Vairums darbu (piemēram, [9], [11], [12], [13], [56]) risina vairāku maršrutu atklāšanas problēmas, cenšoties samazināt virstēriņu un palielināt maršrutu atklāšanas efektivitāti. Promocijas darbā akcentēta traucējumus paredzoša maršrutu izvēle, ņemot vērā video pārraidi kā plānotot pielietojumu. Analizēti ir tikai tie protokoli, kuri vairākus maršrutus izmanto paralēlai datu sūtīšanai, nevis kā rezerves maršrutus primārai datu plūsmai.

1.5.3. Lietojuma slānis

Lietojuma slānis ir lietotājam tuvākais, caur kuru lietojuma programmatūra tiek sasaistīta ar datu pārraides tīklu. Lai arī caur lietojuma slāni tiešā veidā nevar palielināt *ad-hoc* tīkla caurlaidspēju, to var ietekmēt, piemēram, preventīvi novēršot tīkla pārbīvi. Apskatot lietojuma slāni kontekstā ar video pārraidi vairākos maršrutos, uzlabojumus var veikt video kodēšanas un pārraides algoritmos. Darbā [29] ir izcelti divi *ad-hoc* tīkliem aktuāli virzieni: traucējumnoturīga kļūdu labošana un daudzplūsmu kodēšana.

Īslaicīgu maršruta pārrāvumu dēļ radušās kļūdas un gadījuma kļūdas var novērst ar turpvrēsto kļūdu labošanu (FEC). Video datiem tiek pievienota redundance, ļaujot dekoderam izlabot kļūdas bez nepieciešamības pārsūtīt bojātos kadrus. Tas ir īpaši svarīgi pielietojumiem, kuros jānodrošina minimāls aiztures laiks.

Daudzplūsmu video kodēšana ļauj video plūsmu sadalīt apakšplūsmās (tālāk tekstā – plūsmās) tā, ka katra plūsma dod pienesumu kopējai video kvalitātei. Dekoderam nav nepieciešamas visas plūsmas, lai atkodētu video pieņemamā kvalitātē. *Ad-hoc* tīklā tas var dot vairākus ieguvumus.

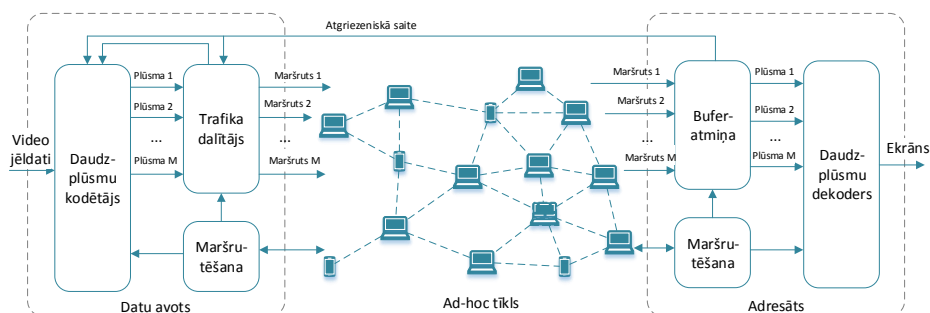
Pirmkārt, tīkla pārblīves vai nepietiekamas centrālā procesora (CPU) veikspējas gadījumā mezgli var selektīvi atmest kadrus no kādas plūsmas. H.264/AVC protokola paplašinājums – mērogojama video kodēšana (SVC) – bieži ir minēts kontekstā ar *ad-hoc* tīkliem, jo ļauj jau vienreiz kodētu saturu pēc tam pielāgot ne tikai mainīgiem tīkla apstākļiem, bet arī daudzveidīgām klientu iekārtām. Tas nozīmē, ka papildus video kvalitātes mērogošanai tas nodrošina iespēju skatītāja pusē samazināt bildes izmēru (telpas izšķirtspēju) un kadru ātrumu (laika izšķirtspēju). Kā trūkums mērogošanai ir sarežģītāka dekodēšana un līdz pat 10% lielāks pārraidāmo datu apjoms, salīdzinot ar H.264/AVC [57]. Turklāt lielāks skaits datu pakešu SVC plūsmā prasa biežāku kanāla piekļuvi, kas palielina MAC sāncensību [58].

Otrkārt, kombinējot daudzplūsmu kodēšanu ar vairāku maršrutu pārraidi, var samazināt video pārrāvuma iespējamību, jo, izmantojot mezglu nošķirtos maršrutos, pārrāvums vienā maršrutā ļauj turpināt saņemt plūsmas citos maršrutos. Papildus ieguvums, ko nodrošina plūsmu sadalīšana vairākos paralēlos maršrutos, ir video bitu pārraides ātruma palielināšanās [32], [29], [59], [54], [60]. Pieaug tīkla kopējā caurlaidspēja, summējoties atsevišķu maršrutu caurlaidspējai, un, sadalot slodzi, samazinās pārblīves iespēja.

Vispārīga vairāku maršrutu video pārraides shēma dota 1.12. attēlā [54]. Datu avota pusē daudzplūsmu video kodētājs veic jēldatu kodēšanu M plūsmās. Plūsmas kodē tā, lai zudumi vienā plūsmā nelabvēlīgi neietekmētu citu plūsmu atkodēšanu. Trafika dalītājā plūsmas piešķir izvēlētajam maršrutu komplektam, kuru veido M maršruti. Maršrutus nodrošina maršrutēšanas protokols. Kad plūsmas nonāk adresātā, tās vispirms iziet caur buferatmiņu kadru sākotnējās secības atjaunošanai un pēc tam tiek dekodētas. Lai informētu par tīkla parametru izmaiņām, ir izmantota atgriezeniskā saite.

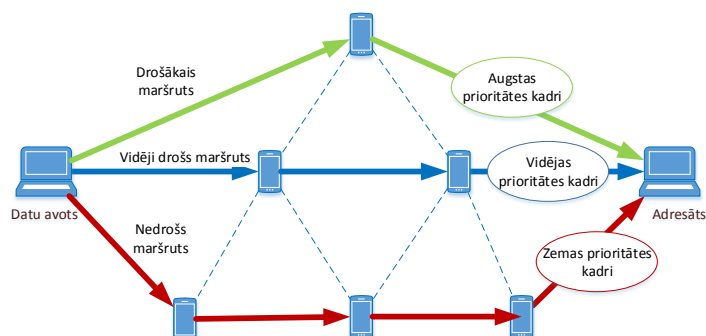
Daudzplūsmu video kodēšanai pārraides vairākos maršrutos izmanto divas metodes: slāņaino kodēšanu (LC) un daudzpraktstu kodēšanu (MDC) [11], [54]. Atkarībā no maršrutu skaita un to parametriem izvēlas vienu vai otru.

LC metode nosaka, ka video kadrus kodē bāzes slānī (piemēram, I tipa kadri) un vairākos uzlabojumu slāņos (P un B kadri). Tikai bāzes slāņa saņemšana vien jau



1.12. att. Vispārīga daudzplūsmu video pārraides arhitektūra [54].

nodrošina pieņemamu video kvalitāti, kamēr papildu slāņi var to uzlabot. Bez bāzes slāņa saņemšanas uzlabojumu slāņus dekodēt nevar, tādēļ bāzes slānis jāsaņem caur drošāko maršrutu, lai izvairītos no pakešu zudumiem. Lai informētu datu avotu par bāzes slāņa kadra pazaudēšanu, izmanto atkārtotas sūtīšanas pieprasījumus. Lai izvairītos no papildu zudumiem, šādam pieprasījumam izvēlas citu maršrutu – ne to pašu, kur bāzes slāņa paketes ir pazaudētas [54]. LC pielietojšanas scenārijs VMP ar trim slāņiem ir parādīts 1.13. attēlā, kur plūsmas ir sadalītas maršrutos atkarībā no pakešu zudumu varbūtības tajos. LC ir ietverts SVC kodēšanas standartā, kas ir apskatīts iepriekš.



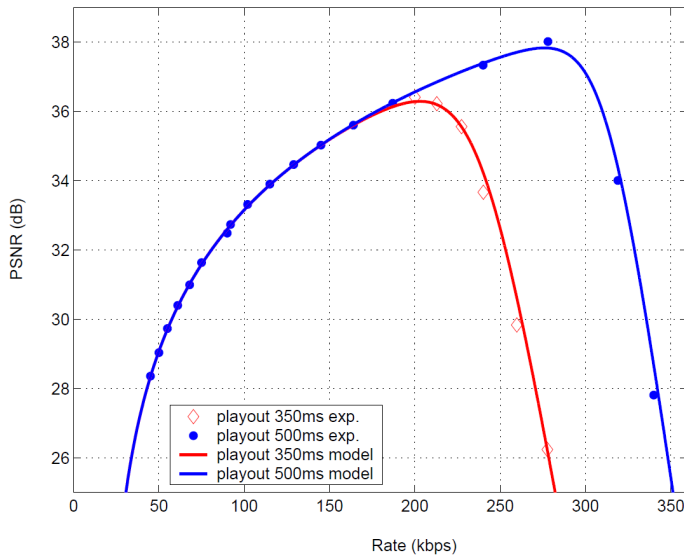
1.13. att. Video pārraide caur vairākiem maršrutiem ar LC metodi [59].

MDC metodē lieto vairākas vienādi svarīgas plūsmas. Katra atsevišķa saņemtā plūsma nodrošina pamatkvalitāti, bet katra papildus saņemtā to uzlabo. Tā kā pakešu zudumi kādā no maršrutiem (plūsmām) neietekmē citas plūsmas, nav nepieciešams atkārtoti sūtīt kadrus vai paketes.

Kodēšanas metodei jādarbojas saskaņoti ar maršrutēšanas protokolu. Darbā [61] piedāvāts adaptīvs vairāku maršrutu, multimēdijiem pielāgots, DSR protokols (a-MMDSR), kas atbalsta ar LC metodi kodētu daudzplūsmu video. Pirms video plūsmu

sadalīšanas pa maršrutiem katrā atrastajā maršrutā izsūta pārbaudes paketi, lai noteiktu maršruta parametrus un novērtētu tā kvalitāti. Pēc video uzsākšanas šis process tiek periodiski atkārtots, lai sekotu tīkla parametru izmaiņām. Periods tiek adaptīvi mainīts atkarībā no kļūdu varbūtības maršrutos.

Daudzplūsmu video pārraide var būt efektīvs paņēmieni datu pārraides ātruma palielināšanai *ad-hoc* tīklā, tomēr uzlabojumi tiek sasniegti, pastāvot noteiktiem tīkla apstākļiem un video kodēšanas parametriem. Pietrūkst norāžu par piemērotāko risinājumu *ad-hoc* tīklam kopumā. Izvēloties nepiemērotus kodēšanas parametrus, var notikt tīkla pārblīve [32]. Kā redzams 1.14. attēlā, palielinot video plūsmas bitu pārraides ātrumu, sākotnēji video kvalitāte uzlabojas, bet, pārsniedzot noteiktu robežu, tā strauji pasliktinās.



1.14. att. PSNR atkarība no bitu pārraides ātruma, straumējot *Foreman* testa video sešos maršrutos, ar diviem buferatmiņas izmēriem (350 ms vai 500 ms) [32].

Lai veiksmīgi integrētu daudzplūsmu kodēšanu ar vairāku maršrutu pārraidi, lietojuma slānī jābūt pieejamai informācijai par tīkla slāņa iespējām, tādēļ tālāk ir apskatīti OSI modeļa ierobežojumi un starpslāņu sadarbības iespējas.

1.5.4. Starpslāņu sadarbība OSI modelī

OSI modeli ir izstrādājusi Starptautiskā standartizēšanas organizācija [62], un tas ir kalpojis par paraugu standartu un protokolu izstrādātajiem jau kopš 20. gs. 70. gadiem. Modelis sagrupē pārraides funkcijas un protokolus loģiskos slāņos, ļaujot informācijas apmaiņu ar blakus slāņiem caur noteiktām standartizētām saskarnēm. Slānis

tiek veidots tur, kur vajadzīgas abstrakcijas, robežu izvēloties tā, lai būtu nepieciešama minimāla informācijas apmaiņa ar citu slāni. Šāda modulāra struktūra ļauj izstrādāt un uzlabot atsevišķu slāņu protokolus, neietekmējot citu slāņu funkcionalitāti. Tas ļauj datu pārraides tīklu tehnoloģiju izstrādē piedalīties daudzām neatkarīgām pētnieku grupām, neuztraucoties par savietojamību starp slāņiem, kamēr vien ir saglabātas saskarnes ar blakus slāņiem. OSI modeļa slāņi parādīti 1.2. attēlā, 1.1. apakšnodaļā.

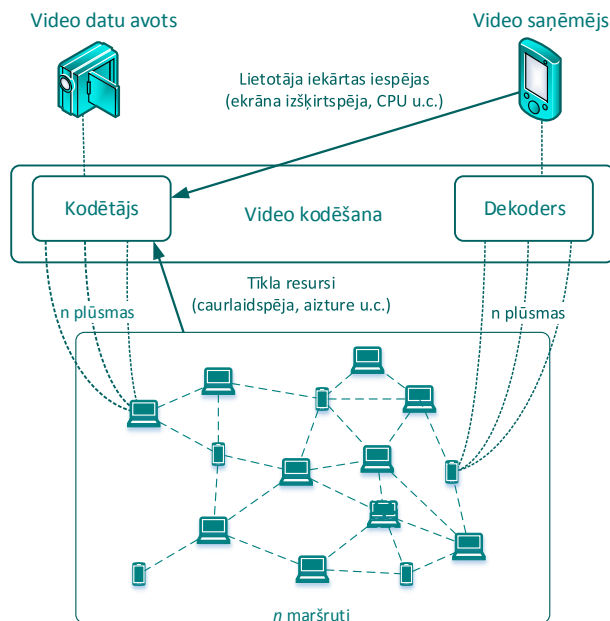
Sadalījums slāņos pēc OSI modeļa ar mijiedarbi tikai starp blakus slāņiem nav piemērots *ad-hoc* tīkliem, kuri ir dinamiski, ar mainīgu savienojumu pārraides ātrumu un stabilitāti. Šādam tīklam nepieciešama tradicionālā modeļa pilnveidošana. Starpslāņu sadarbība dod iespēju apmainīties ar informāciju un pielāgot parametrus starp slāņiem visa modeļa ietvaros, tādējādi uzlabojot kopējo tīkla sniegumu. Slāņu saskarņu pieejamība ļauj starpslāņu parametru optimizāciju, atrodot optimālu parametru kopumu visa modeļa ietvaros. Starpslāņu sadarbība ir svarīga iepriekšējās apakšnodaļās analizēto risinājumu īstenošanai, jo tie skar vairākus OSI slāņus, piemēram:

- lai izmantotu viedās antenas, jānodrošina sadarbība starp PHY un tīkla slāni, lai pagrieztu antenu režģa vērsumu pret vajadzīgo kaimiņmezglu;
- lai īstenotu kognitīvo radio, fizikālajā slānī jānodrošina spektra caurumu atklāšana un automātiska iekārtu pārskatīšana; MAC slānim jākoordinē dinamiska piekļuve spektram; tīkla slānī, ņemot vērā informāciju no PHY un MAC, jāveic maršrutēšana, ņemot vērā frekvenču joslas [46];
- lai novērstu video pārraides izraisītu tīkla pārbīvi, lietojuma slānī var veikt adaptīvu video datu kodēšanu, pielāgojot plūsmas bitu pārraides ātrumu, izšķirtspēju u.c. parametrus tīkla iespējām un lietotāja iekārtas prasībām (1.15. attēlā) [29];
- lai samazinātu PCS radītus konfliktus starp mezgliem, MAC slānis var izmantot maršrutēšanas informāciju optimālai kanāla laika sadalei starp mezgliem [63].

Starpslāņu sadarbību var īstenot evolucionāri vai revolucionāri [64]. Evolucionāra pieeja koncentrējas uz saderības saglabāšanu, līdz ar to papildinot esošo modeli ar dažām starpslāņu saitēm. Revolucionāra pieeja pilnībā nojauc esošo modeli, veidojot konceptuāli jaunas pieejas tīkla daļām un to mijiedarbei, un koncentrējas vairāk uz veikspēju nekā uz saderību. Darbā [65] definēti vispārīgi principi evolucionārai pieejai, kuri jāņem vērā, izstrādājot starpslāņu arhitektūru:

- jāsaglabā modulāra struktūra, ļaujot slāņu protokolus izstrādāt neatkarīgi;
- vajadzīga abstrahēšanās no specifiskas uzbūves, padarot to pielietojamu dažādām tehnoloģijām;
- jāizmanto pēc iespējas mazāk parametru, jo optimizācija var kļūt par skaitļojami sarežģītu uzdevumu. Jāizvairās no informācijas dublēšanās.

Darbā [63] piedāvāts starpslāņu sadarbības risinājums *MobileMan*, kurā atrasts vidusceļš. Ir saglabāta slāņu arhitektūra, papildus ieviešot vertikālu tīkla stāvokļa slāni, caur kuru slāņu protokoli var apmainīties ar informāciju (1.16. attēlā). Šāda arhitektū-



1.15. att. Adaptīva video kodēšana [29].

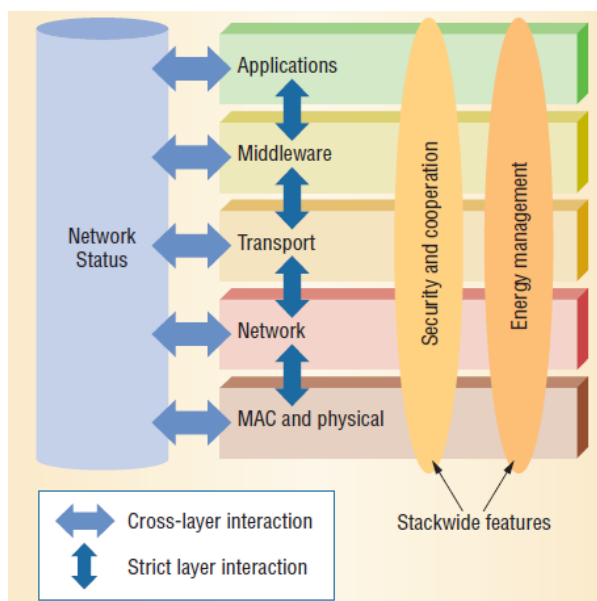
ra ļauj izstrādāt protokolus, paļaujoties uz informācijas pieejamību caur tīkla stāvokļa slāni. Piekļuve slānim ir standartizēta, līdz ar to var izmantot arī vecākus protokolus, kaut arī tas var ietekmēt kopējo sniegumu.

1.6. Secinājumi

Klasisks *ad-hoc* tīklu pielietojums ir nodrošināt sakarus vietā bez tīkla infrastruktūras, piemēram, lai pārsūtītu failu starp divām iekārtām, lai nodrošinātu datu apmaiņu starp konferences dalībniekiem, glābēju saziņai katastrofas vietā u.c. Tomēr vispārēja pielietojuma *ad-hoc* tīkls praksē ir grūti īstenojams, tādēļ pētniecība jāsasašina atsevišķos specializētos virzienos, kāds ir arī sadarbība ar video palīdzību. Video pārraide ir viens no grūtāk realizējamiem pakalpojumiem tā augsto prasību dēļ, taču vienlaicīgi tas ir arī ļoti aktuāls, jo video pakalpojumu datu apjomam bezvadu tīklos ir vērojama tendence pieaugt. Tas ir izmantots kā testa pielietojums darbā veiktajos pētījumos.

Viena no problēmām, kas ierobežo datu pārraidi *ad-hoc* tīklā, ir mezglu radītie savstarpējie traucējumi, kas degradē datu pārraides ātrumu. Var nodalīt divus galvenos traucējumu veidus, kas rodas sakarā ar CSMA/CA protokola nepiemērotību *ad-hoc* tīklam: MAC sāncensības izraisīta mezglu bloķēšana un radio traucējumi.

Analizējot risinājumus datu pārraides ātruma palielināšanai, var secināt, ka pieejai



1.16. att. *MobileMan* starpslāņu arhitektūra [63].

jābūt “vertikālai”, veicot uzlabojumus vairākos OSI slāņos vienlaicīgi un izmantojot starp-slāņu sadarbību. Jaunu zemāko slāņu standartu izstrāde nav vēlama, jo *ad-hoc* tīkls tiek būvēts uz plaši izplatītām IEEE 802.11 standarta iekārtām. Galvenais ieguldījums jāveic esošo protokolu uzlabošanā un efektīvā pielietošanā. Vairāk iespēju ir pilnveidot OSI modeļa tīkla un lietojuma slāni.

Kā risinājums datu pārraides ātruma palielināšanai promocijas darbā ir **pētīta datu pārraide vairākos maršrutos**. Ir daudzi pētījumi par vairāku maršrutu atklāšanas efektivitāti, taču mazāk analizēta piemērotu maršrutu izvēle, kas ir akcentēts šajā darbā.

Lai video datus nosūtītu caur vairākiem maršrutiem, var pielietot dažādas video kodēšanas metodes, maršrutēšanas protokolus un pārraides stratēģijas. Tāpēc ir jāizstrādā algoritms, kas efektīvi pielietotu esošos risinājumus, ņemot vērā arī tīkla iespējas. **Tas prasa *ad-hoc* tīkla darbības un parametru analīzi** video pārraides laikā, kas ir veikta nākamajā nodaļā.

Traucējumu samazināšanai starp tīkla mezgliem efektīvas ir viedās antenas, kuras jau tiek izmantotas WLAN tīklos. Līdz šim to pielietojums *ad-hoc* tīklos ir bijis ierobežots, tāpēc promocijas darbā **veikta papildu izpēte viedo antenu pielietošanai *ad-hoc* tīklā vairāku maršrutu pārraides apstākļos**.

2. AD-HOC TĪKLA KOPSAKARĪBU ANALĪZE

Video pārraidei *ad-hoc* tīklā var izmantot VMP, kas palielina tīkla caurlaidspēju. Lai efektīvi izmantotu vairākus maršrutus, jāizvērtē tīkla iespēja nodrošināt video pārraidi un izvēlēties optimālus video kodēšanas un pārraides parametrus.

Šajā nodaļā analizēti esošie video pārraides risinājumi un izstrādāts konceptuāls algoritms, pēc kāda būtu jāveic video kodēšana un pārraide *ad-hoc* tīklā. Optimāla kodēšana balstās uz informāciju par tīklu, tādēļ ir pētīti tīklu raksturojoši parametri un to savstarpējās saites. Nodaļas beigās analīze ir apkopota tīkla parametru kopsakarību modelī, kas pielietojams video svarīgu tīkla parametru noteikšanai.

2.1. Tīklam “draudzīgas” video pārraides nodrošināšana

Var nodalīt divas atšķirīgas video pārraides stratēģijas: video prasības ievērojoša un video kodēšanu ietekmējoša [29]. Pirmajā gadījumā izvēlas maršrutus, kuri ir vispiemērotākie iepriekš kodēta video QoS prasībām. Var būt gadījumi, kad prasības ir augstākas par tīkla iespējām, piemēram, bitu pārraides ātrums pārsniedz tīkla caurlaidspēju un notiek pārblīve. Izmantojot otro stratēģiju, video tiek kodēts atbilstoši tīkla iespējām, iegūstot informāciju par tīklu caur atgriezenisko saiti.

Abas stratēģijas apvienojot, var formulēt optimizācijas uzdevumu, kur, no vienas puses, jānodrošina maksimāli laba video kvalitāte, izvēloties vispiemērotākos maršrutus, bet, no otras puses, jāievēro arī tīkla iespējas, pieskaņojot kodēšanas parametrus. Šādu pārraidi var saukt par tīklam “draudzīgu”. Līdzīga pieeja ir izmantota [60], kur starpslāņu algoritms, ņemot vērā tīkla savienojumu caurlaidspēju un stabilitāti, ar optimizācijas palīdzību izvēlas maršrutu komplektu ar potenciāli viszemākajiem video kropļojumiem. Katram maršrutam tiek noteikts arī pieļaujamais datu plūsmas ātrums. Tomēr parametru klāsts, kurus var ietekmēt gan no kodēšanas, gan maršrutēšanas puses, ir krietni plašāks, par ko ir veikta analīze šajā apakšnodaļā. Balstoties uz esošajiem risinājumiem, ir izstrādāts algoritms efektīvai video pārraidei *ad-hoc* tīklā, kas darbojas pēc tīklam draudzīgas stratēģijas.

2.1.1. Tīklu raksturojošas metrikas

Tīkla iespēju nodrošināt video datu pārraidi parasti raksturo ar parametriem (metrikām): caurlaidspēja, aizture, trīce, pakešu zudumi. Metrikas parāda izvēlēto maršru-

tu kvalitāti.

Caurlaidspēja nosaka maksimālo pieļaujamo video plūsmas bitu pārraides ātrumu. Novērtējot caurlaidspējas metriku, jāparedz arī iespējamie traucējumi starp mezgliem (traucējumu ietekme ir analizēta 3. nodaļā).

Aizture raksturo laika intervālu no paketes izveides līdz tās veiksmīgai saņemšanai. Aiztures prasības var atšķirties atkarībā no tā, vai izmanto vienu vai vairākus maršrutus. Vienvirziena video straumēšanas gadījumā (piemēram, video pēc pieprasījuma) caur vienu maršrutu šis parametrs kvalitāti neietekmēs, ja vien tā variācija būs zema. Ja video kadri (sekojošas paketes) tiek sūti caur vairākiem maršrutiem, katrā ar citu aizturi, tad kadru secība var izjukt. Lai secību atjaunotu, aiztures atšķirība starp maršrutiem nedrīkst pārsniegt buferatmiņas izmēru. Ja buferatmiņa nevar kompensēt aizturi, kadri tiek pazaudēti, izraisot video kvalitātes pasliktināšanos. Reāllaika pielietojumos, īpaši videokonferences gadījumā, prasības pret aizturi ir augstākas.

Trīce raksturo aiztures variāciju secīgām paketēm. Ja trīce pārsniedz buferatmiņas izmēru, atsevišķas paketes tiek pazaudētas. *Ad-hoc* tīklā trīce palielinās, ja tīklu pārslogo ar augstāku datu pārraides ātrumu nekā to pieļauj caurlaidspēja. Paketes uzkrājas rindās relejmezglu tīkla interfeisos, kur tās pavada dažādu laiku līdz pārsūtīšanai tālāk. Trīci var ietekmēt tīkla apstākļu izmaiņas, piemēram, maršruta pārrāvuma gadījumā paketes var tikt aizturētas līdz jauna maršruta izveidei. Ja video pārraides parametri ir optimizēti atbilstoši tīkla veiktspējai, trīce būs vērā neņemama.

Pakešu zudumi var izraisīt video attēla kvalitātes pasliktināšanos vai pat pārraides pārrāvumu. Ja pakete pazūd un noteiktā laikā netiek nosūtīta atkārtoti, tā tiek ignorēta. Pakešu zudumi raksturo maršruta drošumu, un pēc to intensitātes var izvēlēties piemērotu maršrutu svarīgākai video plūsmai (piemēram, I kadru sūtīšanai).

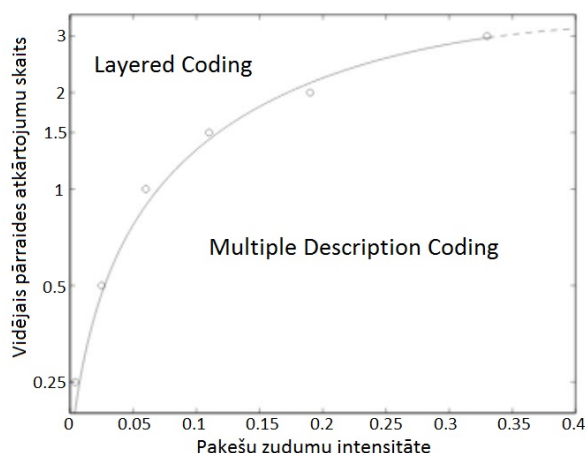
2.1.2. Video pārraides parametru izvēle

Lai veiktu daudzplūsmu video pārraidi *ad-hoc* tīklā, var izvēlēties vienu vai otru kodēšanas metodi (LC vai MDC), kā arī citus pārraides parametrus: plūsmu skaitu, bitu pārraides ātrumu, maršrutēšanas protokolu u.c. Šajā apakšnodaļā, balstoties uz esošajiem risinājumiem un to pielietošanas praksi, ir meklēti *ad-hoc* tīklam piemērotākie pārraides parametri.

Kodēšanas metode. Primārais uzdevums ir izvēlēties piemērotu kodēšanas metodi. MDC un LC metožu efektivitāte parasti tiek salīdzināta ar tādiem tīkla parametriem kā aizture un maršrutu drošums [29], [54], [66]. Efektivitāte ir salīdzināta divu maršrutu gadījumam, ja ir atšķirīga pakešu zudumu intensitāte [66], novērtējot objektīvo video kvalitāti ar mērījumu maksimāla signāla un trokšņa attiecība (PSNR). Rezultāti rāda, ka bez atkārtotas pazaudēto video kadru sūtīšanas LC sniedz sliktāku

rezultātu gan zemas, gan augstas zudumu intensitātes gadījumā. Izmantojot atkārtotu sūtīšanu, zemai zudumu intensitātei LC sniegums ir līdzīgs MDC, bet augstai – labāks. Papildus LC uzrāda labāku rezultātu, kad viens maršruts ir drošāks par otru. Tomēr autori arī norāda, ka eksperimentos nav ņemtas vērā aiztures prasības, līdz ar to rezultāti nav attiecināmi uz reāllaika pielietojumiem.

Ja prasības pret aizturi nepieļauj atkārtotu pazaudēto kadru sūtīšanu, MDC ir labāks augstas zudumu intensitātes gadījumā [29]. Attiecīgi tas ir piemērotāks arī uz aizturi jutīgai straumēšanai nedrošā (ar kadru zudumiem) tīklā. Tas ir apstiprināts, noskaidrojot parametru apgabalus, koros katra no metodēm (MDC un LC ar atkārtotu sūtīšanu) nodrošina augstāku MPEG video kvalitāti [67]. Par parametriem izmantoti pakešu zudumu intensitāte un pieļaujamo sūtīšanas atkārtojumu skaits, kas atspoguļo aiztures prasības. Rezultāti ir parādīti 2.1. attēlā, no kura var secināt – ja nav prasības pret zemu aizturi, tad LC ir labāka izvēle nekā MDC.



2.1. att. Darba apgabali LC un MDC metodēm [67].

Plūsmu skaits. Optimālais video plūsmu skaits galvenokārt ir atkarīgs no tīkla raksturlielumiem, kā, piemēram, topoloģija un maršrutēšanas protokols, tomēr arī kodēšanas metode to ietekmē. MDC metodei efektivitāte uzlabojas, palielinot plūsmu skaitu līdz divi, bet tālāka plūsmu skaita palielināšana nesniedz ievērojamu uzlabojumu [68]. Ar modelēšanas palīdzību noskaidrots, ka LC metodei optimālais plūsmu skaits tīklā ar 100 mezgliem ir 3, atsevišķi nodalot I/P/B kadrus [59]. Maršrutu izvēlē ir ņemts vērā maršrutu drošums un tos veidojošo mezglu kustīgums. Ja maršrutu skaits ir 4 vai 5, tad pakešu zudumi un trīce ievērojami palielinās, jo maršrutos parādās lielākas aiztures. Ir ieteikts regulēt kadru rindu prioritātes, paredzot augstāku prioritāti I kadriem [59].

Bitu pārraides ātrums. Ja video plūsmas bitu pārraides ātrums pārsniedz noteiktu sliekšni, video kvalitāte strauji degradējas tīkla pārblīves dēļ [27]. Eksistē optimāls video plūsmas ātrums, kad var sasniegt augstāko PSNR un vienlaicīgi izvairīties no pārblīves [32]. Papildus tam pārāk augsta bitu pārraides ātruma gadījumā, reļmezglu CPU veikspēja var būt par zemu, lai apstrādātu pārsūtāmos datus [69], [70] (plašāk 2.2. apakšnodaļā). Pieļaujamā bitu pārraides ātruma noteikšanai ir nepieciešama atgriezeniskā saite no tīkla par tā caurlaidspēju.

Maršrutēšanas protokols nodrošina maršrutus video plūsmām. Jānodala divi tā uzdevumi: atklāt maršrutus un izvēlēties maršrutu komplektu.

Maršrutēšanas efektivitāti lielā mērā nosaka protokola tips – proaktīvs, reaktīvs vai hibrīda. Nav vienotas nostājas, kurš no tiem ir piemērotāks video pārraidei vairākos maršrutos. Reaktīvie protokoli ir aizstāvēti kā piemērotāki vairāku maršrutu pārraidei kopumā [9], [11], tomēr video pārraidei izmanto arī proaktīvus protokolus [60], [30], piemēram, posma stāvokļa maršrutēšanas algoritmu. Proaktīvs protokols nodrošina ātrāku maršrutu atjaunošanu pēc pārrāvuma, kas ir svarīgi reāllaika video pārraidei. Vēl viena proaktīvu protokolu priekšrocība ir pilnīgāka informācija par tīkla topoloģiju un metrikām, ļaujot izvēlēties labākus maršrutus. Reaktīvu protokolu izmantošana ir pamatota ar zemāku trafika virstēriņu kontroles ziņojumiem, kas ir ne mazāk svarīgi, ņemot vērā video datu lielo slodzi uz tīklu.

QoS maršrutēšanā [29] maršrutus izvēlas, ņemot vērā video kvalitātes prasības. Šāda pieeja atšķiras no tradicionāli lietotās īsākā ceļa maršrutēšanas. Derīgu maršrutu skaits ir atkarīgs no maršruta izvēles algoritma vieduma. Jo vairāk video datiem svarīgas metrikas tiek ņemtas vērā, jo piemērotāki izvēlētie maršruti būs video pārraidei, tomēr visu efektīvo maršrutēšanas metriku iekļaušana vienā protokolā var radīt augstu virstēriņu kontroles ziņojumu liela skaita dēļ [11]. QoS maršrutēšanā dažādās kombinācijās tiek izmantotas šādas metrikas: caurlaidspēja, aizture, kustīgums, traucējumi, drošums attiecībā uz pakešu zudumiem un drošums attiecībā uz maršrutu nošķirtību u.c.

Analīze rāda, ka līdzšinējā praksē nav vienotas pieejas optimālu kodēšanas parametru izvēlei, kas derīgi jebkuram *ad-hoc* tīklam. Tomēr ir vairāki pamatprincipi, kas jāievēro, izvēloties kodēšanas metodi, plūsmu skaitu, bitu pārraides ātrumu un maršrutēšanas protokolu:

- kodēšanas metodes (LC vai MDC) izvēlē jāņem vērā pakešu zudumu intensitāte un aiztures prasības (skatīt 2.1. attēlā);
- ieteicamais plūsmu skaits jāizvēlas atkarībā no izvēlētas kodēšanas metodes un piedāvāto maršrutu skaita: optimāli > 1 plūsmu MDC 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 tajos (svarīgs tieši LC metodei);
- reāllaika video pielietojumiem jāizvēlas proaktīvs maršrutēšanas protokols, strau-
mēšanai efektīvāks ir reaktīvs protokols.

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

2.1.3. Optimāls kodēšanas algoritms

Veiktās analīzes rezultāti ir izmantoti, izstrādājot konceptuālu algoritmu optimā-
las video pārraides nodrošināšanai *ad-hoc* tīklā. Sākotnējā algoritma koncepcija un
iepriekš aprakstītie pamatprincipi ir atspoguļoti promocijas darba autora publikācijā
[71]. Par pamatu algoritmam ir 1.15. attēlā parādītā shēma [29], papildinot to ar infor-
mācijas avotiem lēmumu pieņemšanai un nodalot maršruta izvēles posmu. Algoritms
ietver šādus posmus.

- 1) Tīkla parametru noteikšana. Video pārraidi tīklā raksturo ar parametru kopumu:
caurlaidspēja, aizture, trīce un pakešu zudumi. Tie ir svarīgi gan maršrutu izvē-
lei, gan tīklam “draudzīgu” plūsmu sagatavošanai. Parametru noteikšana prasa
detalizētāku tīkla analīzi, kas ir veikta 2.2. apakšnodaļā.
- 2) Maršruta izvēle. Maršrutēšanas protokols piedāvā vienu vai vairākus maršrutu
komplektus ar noteiktiem parametriem. Piemērotu maršrutu atlase ir atkarīga
no izvēles algoritma. Gudrs algoritms balstīs savu izvēli ne tikai uz tīkla apstāk-
ļiem pirms pārraides, bet arī uz potenciālām metriku izmaiņām, kad pārraide
tiks sākota. Maršrutu izvēle jābalsta, no vienas puses, uz informāciju par tīkla
apstākļiem, bet, no otras puses, arī uz video pārraides prasībām. Maršrutu iz-
vēle lielā mērā ietekmēs video svarīgus tīkla parametrus, jo tos nosaka attiecībā
pret izvēlēto maršrutu.
- 3) Informācijas izvērtēšana un lēmumu pieņemšana. Lēmumu par optimāliem ko-
dēšanas parametriem pieņem, balstoties uz vairākiem avotiem:
 - informāciju, kas iegūta no maršrutēšanas protokola par tīkla iespējām;
 - datubāzi, kas ietver iepriekš dotos pamatprincipus (2.1. apakšnodaļā) un
uzkrātās zināšanas par iepriekšējiem lēmumiem un to pareizību. Paredzot
datubāzes apmācības procesu, balstoties uz lietotāja atsauksmēm, var no-
vērst nepareizus lēmumus nākotnē;
 - klienta iekārtas var uzlikt vairākus ierobežojumus video plūsmai, kā, pie-
mēram, noteiktas kodēšanas metodes atbalsts, maksimālais plūsmas bitu

pārraidis ātrums vai ekrāna izšķirtspēja, kas kodētāja pusē ir jāņem vērā;

- video jēldatu īpašības (piemēram, izšķirtspēja un video sižeta raksturs) var ietekmēt tādu kodēšanas parametru izvēli kā kompresijas pakāpe, kadru ātrums, izšķirtspēja; pareiza šo parametru izvēle uzlabo saņemtā video kvalitāti un novērš tīkla un iekārtu pārslogošanu ar nepamatoti lielu datu pārraidis ātrumu.

Lēmumu pieņemšanai ir izmantojamas mākslīgā intelekta metodes, piemēram, miglainā (*fuzzy*) loģika [72]. Piemērotāko parametru kopumu var meklēt optimizācijas procesā ar evolūcijas algoritmiem [60]. Tomēr galvenais novērtējums būs saņemtā video kvalitāte klienta iekārtā. Video kvalitāti parasti vērtē ar objektīviem rādītājiem, piemēram, PSNR, vai subjektīviem, kā QoE, prasot video skatītāja viedokli.

- 4) Video plūsmu pielāgošana. Tiek pielāgoti kodēšanas parametri – metode, plūsmu skaits, plūsmas ātrums – optimālas pārraidis nodrošināšanai.

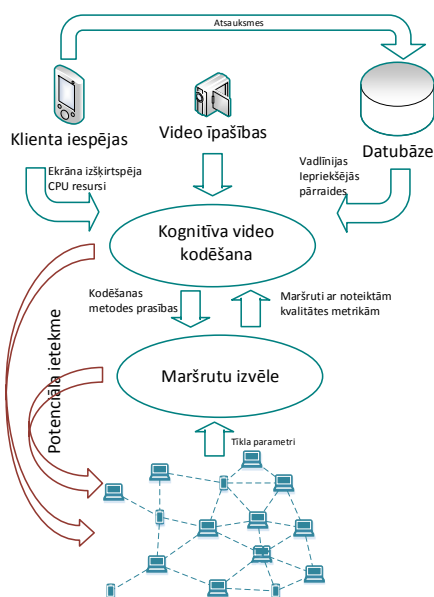
2.2. attēlā parādīta algoritma shēma, kur redzama mijiedarbe starp ietvertajiem blokiem (2.2a. attēlā). Starp blokiem parādās vairākas saites:

- informatīvā saite no kāda bloka sniedz informāciju par tā iespējām (parametriem);
- ietekmes saite (sarkanā krāsā) no kāda bloka parāda potenciālu ietekmi uz citu bloku, kā rezultātā mainās tā parametri;
- atgriezeniskā saite – datubāzē saglabā informāciju par pārraidis kvalitāti no klienta puses.

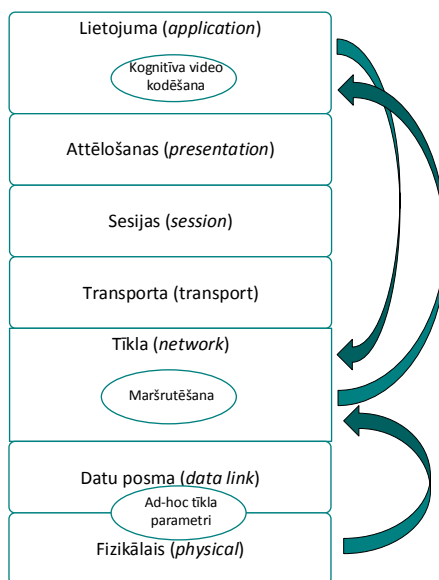
Optimālai pārraidei ir jāsasniedz balanss shēmā starp maksimālu video kvalitāti un tīklam “draudzīgu” pārraidi. Lai šādus apstākļus nodrošinātu, jābūt iespējai adaptīvi pieskaņot kodēšanu un lēmumus attiecībā uz maršrutu izvēli. Lai arī kodēšanas parametrus izvēlas, balstoties uz noteiktām maršrutu metrikām, *ad-hoc* tīkla nestabilitāte un grūti prognozējama traucējumu ietekme var radīt izmaiņas tīkla parametros.

Kodēšanas algoritma praktiska īstenošana prasa OSI starpslāņu informācijas apmaiņu gan katrā tīkla mezglā, gan arī starp tīkla mezgliem. 2.2b. attēlā dota algoritma iespējamā starpslāņu arhitektūra, kas ir veidota pēc evolucionāras pieejas, saglabājot OSI slāņu nodalījumu, bet arī ietverot papildu starpslāņu saites. Arhitektūra ietver visu kognitīvo *ad-hoc* tīklu, nevis katru atsevišķu mezglu. Kognitīvs video kodēšanas mehānisms ir ieviests pielietojuma slānī un starpslāņu informāciju ievāc no zemākiem slāņiem: fizikālā, datu posma un tīkla.

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. Izvēles rezultātā video kodētājam tiek piedāvāti maršruti ar noteiktiem parametriem, ko izmanto optimālu video plūsmu sagatavošanai.



(a) Bloki un to mijiedarbe



(b) Starpslāņu saites

2.2. att. Optimāla kodēšanas algoritma shēma.

2.2. Ad-hoc tīkla faktoru un parametru analīze

Lai novērstu iespējamu video kvalitātes degradāciju, datu plūsma jāpielāgo tīkla apstākļiem, izvēloties pareizo kodēšanas metodi, plūsmu skaitu, ātrumu un citus parametrus. Vienlaicīgi jāmeklē arī piemēroti pārraides maršruti. Tas prasa zināšanas par tīklu raksturojošiem parametriem, kas ir sarežģīti un savstarpēji saistīti.

Video pārraides kvalitāte tīklā ir atkarīga jau no iepriekš apskatītiem (2.1.1. apakšnodaļā) parametriem: caurlaidspējas, pakešu zudumiem, aiztures un tās trīces. Efektīvai video pārraidei jāizvēlas maršruti, kas piedāvā optimālu šo parametru vērtību kopumu. Parametri, kuru vērtības ir izmantotas par kritērijiem maršrutu izvēlē, promocijas darbā ir saukti par **metrikām**. Noteikt video svarīgās metrikas pirms reālas video pārraides sākšanas (piemēram, ar zondēšanas palīdzību) ir sarežģīts uzdevums, tādēļ jāmeklē paņēmieni, kā netiešā veidā prognozēt metrikas caur citiem tīkla parametriem.

Var pieņemt, ka tīkla parametrus (tajā skaitā video svarīgās metrikas) nosaka ārēji apstākļi (tālāk saukti par tīklu ietekmējošiem faktoriem), kurus savukārt var raksturot ar saviem parametriem. Galvenie faktori ir:

- iekārtu veiktspēja (CPU, atmiņa u.c.);

- pārraides tehnoloģijas un protokoli (bezvadu pārraides standarts, daudzpiekļuves paņēmieni, maršrutešanas protokols u.c.);
- radio kanāla stāvoklis (fedings, laika apstākļi, ārēji traucētāji u.c.);
- tīkla topoloģijas parametri (mezglu skaits, blīvums, savstarpējs savienojums u.c.);
- tīkla dinamika (mezglu kustīgums);
- citu pielietojumu radītā noslodze.

Kopā šie faktori nosaka tīkla potenciālu, kurš jāizmanto visefektīvākajā veidā. Tie attiecas gan uz viena maršruta pārraidi, gan VMP.

Video dati tīklā tiek pārraidīti caur vairākiem iepriekš izvēlētiem maršrutiem, tādēļ video pārraidei svarīgās metrikas nosaka attiecībā pret izvēlēto maršrutu komplektu. No tā izriet, ka metrikas nosaka tīkla ietekmes faktori kopā ar maršrutu izvēles algoritmu. Piemēram, maršrutu izvēle ietekmē tīklu traucējumu starp maršrutiem dēļ.

Šajā apakšnodaļā ir veikta analīze par tīklā notiekošiem procesiem VMP laikā un atklātas dažādu parametru savstarpējās saiknes. Par mērķi izvirzot tīkla parametru (metriku) novērtēšanu, vispirms analizēti tos ietekmējošie faktori, atsevišķi apskatot maršrutu izvēli un tās ietekmētos parametrus.

2.2.1. Tīklu ietekmējoši faktori

Ad-hoc tīkla veiktspēju nosaka dažādi faktori: iekārtu veiktspēja, pārraides tehnoloģijas un protokoli, tīkla topoloģijas parametri, radio kanāla stāvoklis, tīkla kustīgums, citu pielietojumu radītā noslodze u.c. Šajā apakšnodaļā ir analizēti tīkla parametri, kurus tie ietekmē, un sniegti ieteikumi parametru kvantitatīvai novērtēšanai.

Iekārtu veiktspēja. *Ad-hoc* tīkls parasti tiek veidots no mobilām iekārtām ar ierobežotiem enerģijas un datu apstrādes resursiem. Ir jāņem vērā, vai iekārtu veiktspēja būs pietiekama, lai pārsūtītu video datus. Kā eksperimentāli novērots [69], tranzīta trafiks patērē ievērojamu daļu CPU resursa. Eksperiments ir veikts ar dažādiem iekārtu tīkla interfeisiem, CPU arhitektūrām, draiveriem un operētājsistēmām. Ir secināts, ka dažādi video formāti rada atšķirīgu slodzi, jo pārsūtāmo pakešu skaits atšķiras. Līdzīgs efekts ir novērots eksperimentālā pētījumā Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē [70], kā tīkla mezglus izmantojot *Raspberry Pi* minidatorus. Konkrētie modeļi ir aprīkoti ar *ARMv6k* 700 MHz mobilo iekārtu procesoriem [73]. Intensīvas slodzes gadījumā releja mezgli patērē pat 50% CPU resursa. CPU veiktspēju raksturojošu parametru var noteikt, izmantojot informāciju par takts frekvenci un vidējo slodzi, kura var tikt savākta no mezgliem attiecīgajos maršrutos.

Slodzes balansēšana, pārsūtot video vairākās paralēlās plūsmās ar zemāku ātrumu, var palīdzēt risināt veiktspējas problēmu.

Pārrades tehnoloģijas un protokoli. IEEE 802.11 standarts nosaka izmantotos signālu pārrades un kanāla piekļuves paņēmienus [8]. No tā ir iespējams prognozēt maksimālo datu pārrades ātrumu, pārrades attālumu, kas ietekmēs savienojamību, aizturi un citus ar tehnoloģiju saistītus parametrus (skat. 1.1. tabulu). Kā daudzpiekļuves paņemiens tiek izmantots CSMA/CA, kam ir liela ietekme uz MAC sāncensību un radio traucējumiem (detalizētāk analizēts 1.4. apakšnodaļā). Jāņem vērā arī protokolu ienestie zudumi, piemēram, pakešu virstēriņš, pakešu preambulas tiek pārraidītas ar zemāku ātrumu (BPSK modulāciju), drošības mehānismi (intervāli, ACK, rokasspieciens u.c.).

Maršrutēšanas protokols ietekmē potenciālos pakešu zudumus maršruta pārrāvuma gadījumā. Laiks, kurā video plūsma atjaunojas, ir atkarīgs no maršrutēšanas protokola veida (reaktīvs vai proaktīvs). Proaktīvs protokols atklāj pārrāvumu, ja nesaņem regulāru kontroles ziņojumu; savukārt reaktīvs – ja saņem kļūdas ziņojumu no mezgla, kurš ir mēģinājis pārsūtīt datus caur bojāto savienojumu. Reaktīvā protokolā nepieciešams papildu laiks jauna maršruta atklāšanai, kas palielina pakešu zudumu varbūtību.

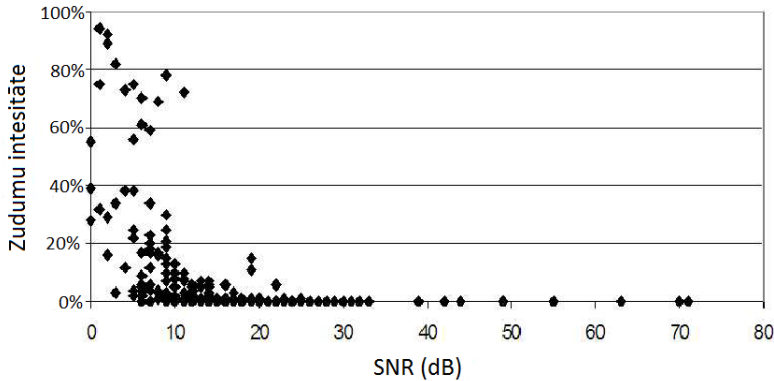
Radio kanāla stāvoklis. Radio kanāla stāvoklis ietekmē reāli pieļaujamo datu pārrades ātrumu un pakešu zudumus. Radio kanāls starp diviem mezgliem (tīkla savienojums) ietekmē visa maršruta caurlaidspēju un drošumu.

Radio kanāla stāvokli matemātiski raksturo ar SINR, kas tiek aprēķināts kā derīgā signāla jauda pret Gausa (fona) trokšņu un traucējumu jaudu summu [6] (modelis dots 4.2.3. apakšnodaļā). Pieļaujamais datu pārrades ātrums ir atkarīgs no SINR un uztvērēja BER prasībām. Lai saņemtie dati būtu atkodējami, BER nedrīkst pārsniegt noteiktu līmeni. Raidītājs un uztvērējs vienojas par tādu datu pārrades ātrumu, kas pie dotā SINR līmeņa uztvērējā spēs apmierināt BER prasības. Praktiski to veic, izvēloties augstāka vai zemāka līmeņa nesēja modulāciju. Lielāku pārrades ātrumu var sasniegt ar “sarežģītāku” signāla modulāciju, bet tāda pielietošana uzliek augstākas prasības arī uztveršanas apstākļiem. Kā piemērs 2.1. tabulā ir parādītas NS-2 modeļēšanas programmā izmantotās IEEE 802.11 fiziskā modeļa SINR vērtības, kuras ir noteiktas empīriski no 2,4 GHz *WiFi* uztvērēja BER līknēm [4].

Pakešu zudumi kvantitatīvi raksturo tīkla savienojuma drošumu. Darbā [30] ir eksperimentāli noteikta sakarība starp radio kanāla raksturojumiem (SINR) un uztvertā signāla stipruma mērītāju – RSSI) un pakešu zudumu intensitāti. Secināts, ka starp šiem parametriem ir grūti atrast tiešu sakarību. Var novērot atšķirību starp labu un sliktu radio kanālu, bet grūti prognozēt precīzu pakešu zudumu intensitāti. Zudumi strauji palielinās, kad abi parametri samazinās zem noteiktas robežas, attiecīgi $\text{SINR} < 10 \text{ dB}$ un $\text{RSSI} < -82 \text{ dB}$. 2.3. attēlā parādīta zudumu intensitātes atkarība no signāla un trokšņa attiecības (SNR).

Datu pārraides ātruma saistība ar SINR

SINR	Modulācija	Datu pārraides ātrums (20 MHz kanāls)
2,5	BPSK	6 Mb/s
5	QPSK	12 Mb/s
15,8	16-QAM	24 Mb/s
100	64-QAM	54 Mb/s



2.3. att. Pakešu zudumu intensitātes atkarība no SNR [30].

Pakešu zudumi var ietekmēt arī caurlaidspēju, jo nepieciešams atkārtoti pārsūtīt paketes.

Tīkla topoloģijas parametri. Ar tīkla topoloģiju parasti tiek raksturots mezglu savstarpējais savienojums. Promocijas darbā šis jēdziens ietver arī tādus parametrus kā mezglu skaits, blīvums un attālums starp datu avotu un adresātu. Mezglu skaits un blīvums ietekmē tīkla savienojamību, jo varbūtība atrast piemērotu maršrutu komplektu starp datu avotu un adresātu palielinās līdz ar mezglu skaitu un to blīvumu, bet samazinās, palielinoties attālumam starp datu avotu un adresātu [12]. Attālumi starp mezgliem (pie dotā blīvuma) ietekmēs radio kanāla parametrus, kuri apskatīti iepriekš, ietekmējot pārraides ātrumu.

Tīkla dinamika. Dinamiskā tīklā radio kanāla stāvoklis un savienojumi starp mezgliem būs laikā mainīgi. Tas var izraisīt caurlaidspējas nestabilitāti gadījuma kļūdu dēļ, ietekmējot video kvalitāti, vai secīgus pakešu zudumus savienojuma pārrāvuma gadījumā, kad plūsma pilnībā apstājas. Maršruti ar lielāku mezglu kustīgumu ir pakļauti biežākām savienojumu izmaiņām, tādēļ tiem būs zemāks drošuma metrikas novērtējums.

Maršruta kustīgumu var raksturot ar to veidojošo mezglu kustīgumu. Katra mezgla kustīgumu novērtē ar relatīvo signāla stipruma izmaiņu attiecībā pret kaimiņmezgliem [74]. Piemēram, ja mezgls n_1 veiksmīgi saņem divas datu paketes no kaimiņa n_2 , tad relatīvo kustīgumu attiecībā pret to aprēķina:

$$M_{n_1}^{rel}(n_2) = 10 \log_{10} \frac{P_{Rx}^{new}}{P_{Rx}^{old}}, \quad (2.1)$$

kur P_{Rx}^{new} – uztvertā signāla jauda otrās (jaunākās) paketes saņemšanas laikā;
 P_{Rx}^{old} – uztvertā signāla jauda pirmās paketes laikā.

Negatīva $M_{n_1}^{rel}$ vērtība nozīmē, ka mezgli attālinās, bet pozitīva – tuvinās. Kopējais kustīgums mezglā n_1 ir matemātiskā cerība relatīvajiem kustīgumu kvadrātiem attiecībā pret visiem kaimiņiem:

$$M_{n_1} = E [(M_{n_1}^{rel})]. \quad (2.2)$$

Maršruta kustīgumu aprēķina, summējot visu to veidojošo mezglu kustīguma M vērtības. Vidējo iegūst, summu dalot ar lēcienu skaitu maršrutā.

Fona noslodze. Bez pārraidāmās video plūsmas tīklā var būt arī citi dati, piemēram, hiperteksta pārsūtīšanas protokola (HTTP) vai failu pārsūtīšanas protokola (FTP) trafiks, vai konkurējošas video plūsmas. Fona trafiks rada ne tikai slodzi uz to nesošajiem mezgliem, bet paaugstina arī traucējumu līmeni tīklā. Tādēļ tas ir vērā ņemams parametrs, lai precīzi novērtētu maršruta caurlaidspēju.

Fona radīto noslodzi raksturo ar fona trafika slodzes (BTL) parametru [75]. To nosaka, katrā tīkla mezglā mērot caurejošo MAC kadru daudzumu un apjomu. Tas ietver gan kadrus, kuriem konkrētais mezgls ir avots vai adresāts, gan arī kadrus, kuri tiek pārsūtīti caur šo mezglu. Tā kā trafiks ir laikā mainīgs, tad BTL nolasēs ievāc par laika periodu un aprēķina vidējo vērtību; jaunākām nolasēm tiek piemērots lielāks svara koeficients. Veicot modelēšanu, novēro, ka caurlaidspējas samazināšanās ir saistīta ar visnoslogotāko mezglu maršrutā, tādēļ BTL maršrutam m var noteikt:

$$BTL^m = \max(BTL_1^m, BTL_2^m, \dots, BTL_i^m) \quad i = 1 \dots n, \quad (2.3)$$

kur n ir mezglu skaits maršrutā.

2.2.2. Maršrutu izvēles ietekme uz tīklu

Iepriekš apskatītos parametrus var attiecināt uz jebkuru pārraidi ad-hoc tīklā, ņemot vērā kādu konkrētu maršrutēšanas stratēģiju. Vairāku maršrutu realizēšana tīklā rada specifiskus apstākļus, kas ietekmē vairākus tīkla parametrus: lēcienu skaits,

maršrutu nošķirtība un traucējumi.

Lēcienu skaits Lēcienu skaits ir atkarīgs no tīkla topoloģijas parametriem, tādiem kā attālums starp datu avotu un adresātu, un raidīšanas attāluma. Tomēr to ietekmē arī maršrutēšanas protokols, jo tajā var izmantot dažādus kritērijus maršrutu izvēlei. Lēcienu skaits ietekmē divus tīkla parametrus: aizturi un drošumu.

Vairums viena maršruta protokolu izvēlas maršrutu, vadoties pēc lēcienu skaita un dodot priekšroku īsākiem. Tas ir pamatoti, jo aizture ir atkarīga no lēcienu skaita gandrīz lineāri. Aizturi palielina galvenokārt datu kadru apstrādes laiks relejmezglos. VMP ir raksturīgi garāki maršruti, jo nepieciešams tos nošķirt, tāpēc palielināsies arī aizture.

Aptuvenu vidējo aizturi D katrai paketei var aprēķināt pēc formulas (2.4.), balstoties uz relejmezglu ienestajām aizturēm un pārraides aizturi radio kanālā [76]. Radioviļņu izplatīšanās aizture ir pieņemta kā nebūtiska.

$$D = \frac{Ln_{ret}}{v}n_h + D_I, \quad (2.4)$$

kur L – paketes izmērs (biti);
 v – datu pārraides ātrums (biti/s);
 n_{RET} – atkārtotu sūtīšanas mēģinājumu skaits paketei;
 n_h – lēcienu skaits;
 D_I – apstrādes un CSMA/CA radītā aizture relejmezglos (6 ms [76]).

Lēcienu skaits ir saistīts ar maršruta drošumu. Tā kā radio kanāls ir pakļauts pakešu zudumiem, tad zudumu varbūtība katrā tīkla savienojumā ietekmē kopējo zudumu varbūtību maršrutā. Pieaugot lēcienu skaitam, palielinās zudumu varbūtība maršrutā. Varbūtību P veiksmīgai paketes nogādāšanai līdz galamērķim var aprēķināt:

$$P = (1 - P_{loss})^{n_h - 1}, \quad (2.5)$$

kur P_{loss} – stabila pakešu zudumu varbūtība tīkla savienojumā;
 n_h – lēcienu skaits.

Maršruta drošums tiek ņemts vērā OLSR maršrutēšanas protokolā [16]. To nosaka, savācot statistiku par pazaudētajiem maršrutēšanas ziņojumiem. Zudumus fiksē, ja nav saņemts kāds no “Hello” ziņojumiem, kurus izsūta ar noteiktu laika intervālu (parasti reizi 2 sekundēs). *Link Quality* (LQ) ir tīkla savienojuma kvalitātes mērījums virzienā no kaimiņmezgla uz mezglu, kurš mēra, savukārt *Neighbour Link Quality* (NLQ) ir kvalitāte virzienā no mērītāja uz kaimiņmezglu. LQ un NLQ izsaka kā saņemto pakešu skaitu pret izsūtīto pakešu skaitu. Pēc formulas (2.6.) tiek aprēķināts prognozētais sūtīšanas mēģinājumu skaits vienai paketei *Expected Transmission Count* (ETX) starp

diviem mezgliem. Daudzlēcienu gadījumā kopējo maršruta ETX aprēķina pēc (2.7.):

$$ETX = \frac{1}{NLQ \times LQ}, \quad (2.6)$$

$$ETX = ETX_1 + ETX_2 + \dots + ETX_i \quad i = 1 \dots n. \quad (2.7)$$

Maršrutu nošķirtība. Atkarībā no tīkla topoloģijas un maršrutu izvēles algoritma ir iespējami kopīgi mezgli vai tīkla savienojumi starp vairākiem maršrutiem. Šāds maršrutu komplekts būs mazāk drošs, salīdzinot ar mezglu nošķirtu, jo maršruta pārrāvums kopīgajā tīkla savienojumā apturēs datu plūsmu visos saistītajos maršrutos. Jo vairāk maršruti būs nošķirti, jo mazāka varbūtība vienlaicīgiem pakešu zudumiem tajos (nekorelēti zudumi). Kopīgi mezgli starp maršrutiem samazina caurlaidspēju, jo šādos mezglos summējas datu plūsmas no vairākiem maršrutiem. Šādu situāciju var uzskatīt par mezgla traucējumiem pašam sev, jo viena caur to ejošā datu plūsma bloķē otru datu plūsmu.

Maršrutu nošķirtību raksturojošus parametrus var iegūt no maršrutēšanas informācijas, analizējot atrastos maršrutus datu avota vai adresāta mezglā. Divu maršrutu nošķirtību raksturo ar attiecību $\frac{n_s}{n_h}$ [77], kur n_s ir kopīgu mezglu skaits un n_h ir īsākā maršruta mezglu skaits. To aprēķina starp katriem diviem maršrutiem.

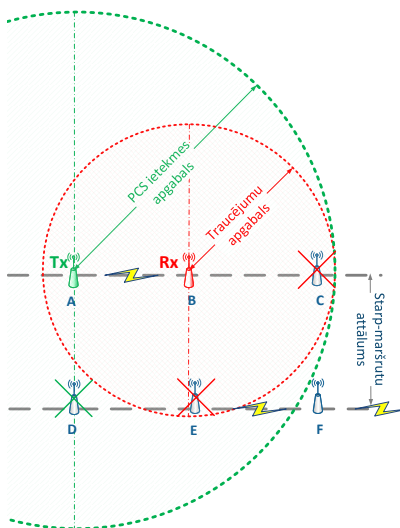
Starpmaršrutu traucējumi. Ievada daļā (1.4. nodaļā) ir nodalīti divu veidu traucējumi: tie, ko rada MAC sāncensība, un signālu fizikālie traucējumi radio kanālā jeb radio traucējumi. Traucējumi var ievērojami samazināt maršruta caurlaidspēju, jo, pirmkārt, kanāla laiks ir sadalīts starp konkurējošām pārraidēm, un, otrkārt, vienlaicīgas pārraides samazina datu pārraides ātrumu radio traucējumu dēļ. Abi traucējumu veidi ir cieši saistīti, jo, palielinot PCS ietekmes apgabalu, MAC sāncensība palielināsies vairāk bloķētu mezglu dēļ, bet radio traucējumi samazināsies.

Tā kā maršruti atrodas tuvu un iekārtu izmantotās antenas raida uz visām pusēm, tad traucējumi, ko rada mezgli vienā maršrutā, ietekmē mezglus ne tikai tajā pašā maršrutā (iekšmaršruta traucējumi), bet arī blakus maršrutos (starpmaršrutu traucējumi). Vairākos darbos [38], [78], [75], [79], [80], [81], [82], [83] starpmaršrutu traucējumu ietekme ir īpaši izcelta kā atsevišķs traucējumu veids, ko sauc arī par maršrutu sapārotību (*coupling*). Ar modelēšanu veikti pētījumi [38], [82], [83] parāda, ka divi traucējoši maršruti kopējo caurlaidspēju nepalielina. Darbā [38], modelējot NS-2, ir salīdzināta viena un vairāku maršrutu izmantošanas efektivitāte. Secināts, ka divi stipri traucējoši maršruti paaugstina caurlaidspēju tikai par 12%, salīdzinot ar vienu maršrutu, bet maz traucējoši maršruti to paaugstina par 65%. 2.3. apakšnodaļā ir veikta traucējumu ietekmes eksperimentāla novērtēšana.

Vairāku maršrutu apstākļos MAC sāncensība parādās, kad mezgli, pārraidot datus

vienā maršrutā, bloķē datu pārraidi citā maršruta, tiem atrodoties vienam otra PCS ietekmes apgabalā (skat. 2.4. attēlu). Lai novērstu kolīziju rašanos, raidītāja PCS apgabals parasti ir izvēlēts tāds, lai ietvertu vismaz uztvērēja traucējumu apgabalu. Gadījumā, kad maršruti ir tik tuvu, ka traucējumu apgabals ietver mezglus no blakus maršruta, tad MAC sāncensība palielinās. 2.4. attēlā parādīts piemērs ar datu plūsmām divos maršrutos, kur konkrētajā brīdī notiek datu pārsūtīšana no mezgla *A* uz mezglu *B*. Mezgla *A* pārraide bloķē mezglu *C* savā maršrutā, kā arī mezglus *D* un *E* blakus maršrutā. Mezgls *D* ir pakļautais mezgls, jo teorētiski nerada kolīzijas apstākļus mezglam *B*.

Tie mezgli blakus maršrutā, kuri ir ārpus PCS ietekmes apgabala, netiek bloķēti (piemērā mezgls *F*). Raidot paralēli ar *A*, tie palielina radio traucējumu līmeni mezglam *B*, kas rezultātā samazina datu pārraides ātrumu starp *A* un *B*. Te vēlreiz jāuzsver optimāla PCS sliekšņa nozīme, kas vairāku maršrutu gadījumā var atšķirties no viena maršruta scenārijiem. Nepareizi izvēlēts PCS sliekšnis, tā vietā, lai novērstu traucējumus, var nevajadzīgi pakļaut mezglus blakus maršrutā, tādējādi samazinot pārraides ātrumu vairāk, nekā to samazinātu potenciālie radio traucējumi no tāliem mezgliem. Literatūrā nav atrodami pētījumi par optimāla PCS sliekšņa (ietekmes apgabala) saikni ar starpmaršrutu attālumu, tādēļ 2.3. apakšnodaļā tas ir novērtēts, izmantojot NS-2 tīkla modelēšanas programmu.



2.4. att. PCS un traucējumu apgabala ietekme uz VMP.

Lai arī fizikālā un MAC slānī starpmaršrutu traucējumu cēloņi ir līdzīgi kā viena maršruta gadījumā, pastāv iespēja traucējumus ietekmēt tīkla slānī caur maršrutēšanu. 2.4. attēlā arī redzams, ja maršruti atrastos tālāk, tad traucējumi samazinātos.

Vairākos maršrutos, no vienas puses, ir iesaistīts lielāks mezglu skaits, kas palielina traucējumu līmeni, tomēr, no otras puses, palielinās radio kanāla telpiskā atkalizmantojamība, jo tiek nodrošināta vienlaicīga pārraide vairāk tīkla savienojumos. Tas, kurš efekts – traucējumi vai kanāla atkalizmantojamība – gūs pārsvaru, kas rezultējas datu pārraides ātrumā, ir atkarīgs no maršrutu savstarpējās ietekmes. Tādēļ vēl viens traucējumu cēlonis ir neoptimāla maršrutu izvēle.

Apkopjot analīzi, ir doti parametri, kas ļauj prognozēt traucējumu līmeni:

- radio traucējumu intensitāte no kaimiņmezgliem (pie esošas slodzes);
- PCS sliekšnis, kurš ļauj novērtēt mezglu bloķēšanas attālumu un attiecīgi bloķēto mezglu skaitu;
- MAC kadru rindu garumi (pie esošas slodzes), jo aizturēti kadri var liecināt par pārbļīvi un attiecīgi augstu traucējumu līmeni;
- attālums starp maršrutiem, kurus iegūst no mezglu novietojuma koordinātēm vai maršrutēšanas informācijas.

Nepārbļīvētā tīklā MAC sāncensības ietekme uz aizturi un trīci ir nenozīmīga. Bez video plūsmas MAC sāncensības līmenis atainos tikai fona slodzi, tāpēc svarīgi ir prognozēt tās līmeni, kad datu pārraides intensitāte tiks palielināta. MAC sāncensības līmenim pārsniedzot kādu sliekšni, piemēram, augsta video bitu pārraides ātruma dēļ, degradējošs iespaids būs ne tikai uz caurlaidspēju, bet arī uz aizturi un trīci, jo notiks tīkla pārbļīve.

2.3. Traucējumu ietekmes praktiska novērtēšana

Šajā apakšnodaļā ir aprakstīti veiktie pētījumi starpmaršrutu traucējumu ietekmes novērtēšanai, kurus promocijas darba autors ir publicējis [84], [85]. Vispirms eksperimentāli ir noteikta starpmaršrutu traucējumu ietekme uz tīkla caurlaidspēju. Mērījumi ir veikti ad-hoc tīkla testgultnē, kuras izveide aprakstīta nākamajā apakšnodaļā. Otrā pētījumā ir veikta PCS ietekmes novērtēšana, kam izmantota NS-2 tīkla modelēšanas programma, jo testgultnē izmantotās iekārtas nedod iespēju mainīt PCS apgabala rādīšus CSMA/CA protokolā.

2.3.1. *Ad-hoc* tīkla testgultne

Traucējumu novērtēšanai ir izveidots ad-hoc tīkla testgultne. Sākotnēji izvirzītās prasības, kuras tai būtu jānodrošina:

- IEEE 802.11b/g/n standarta atbalsts;
- autonoma bezvadu iekārtu barošana ārpus telpu mērījumiem;
- iespēja samazināt darbības rādīšus, lai imitētu tīklu ierobežotā platībā;

- programmatūras atbalsts ad-hoc tīkla izveidei (tajā skaitā maršrutēšanai).

Balstoties uz izvirzītajiem kritērijiem un WING/WORLD rīka [86] aprakstu, ir izvēlēti tālāk uzskaitītie aparātūras un programmatūras risinājumi.

- Bezvadu iekārtas. Seši *Cisco Linksys WRT160NL* bezvadu maršrutētāji ar *Atheros AR9102* bāzētiem bezvadu tīkla interfeisiem (2.5a. attēlā) un divām nomaiņām ārējām antenām. Maršrutētājam ir pietiekama sistēmas atmiņa (32 MB RAM un 8 MB *flash*), lai nomainītu ražotāja programmatūru uz specializētu platformu.
- Barošana. Lai būtu iespējami mērījumi ārpus telpām, papildus ir izmantoti *FSP Nano 360W* nepārtrauktās barošanas avoti (2.5b. attēlā). Izvēli pamato to nelielais svars (2.9 kg), *Schuko* pieslēguma ligzdas un baterijas resurss (vairāk nekā 4 stundas ar plānoto slodzi).



(a) *Cisco Linksys* bezvadu maršrutētājs (b) *FSP Nano 360W* nepārtrauktās barošanas avots

2.5. att. Eksperimentālā pētījumā izmantotā aparātūra.

- Programmatūra. Oriģinālā maršrutētāju operētājsistēma ir aizvietota ar *OpenWRT Linux* distributīvu iegultajām sistēmām [87]. Tas sniedz lielāku kontroli pār iekārtu, ļaujot modificēt raidīšanas un tīkla parametrus. Konfigurācija iespējama gan caur grafisko saskarni, gan komandrindu. Priekšrocība salīdzinājumā ar līdzīgām operētājsistēmām ir atvērtā koda programmatūras papildinājumu pieejamība, kas ļauj paplašināt funkcionalitāti.
- Maršrutēšana. *Open-WRT* programmatūras repozitorijs ļauj instalēt proaktīvo maršrutēšanas protokolu OLSR [16]. Tiek nodrošināta ērta grafiskā saskarne protokola konfigurācijai un darbības monitoringam.
- Caurlaidspējas mērīšana. Papildus ir instalēta tīkla caurlaidspējas mērīšanas programma *Iperf* [88].

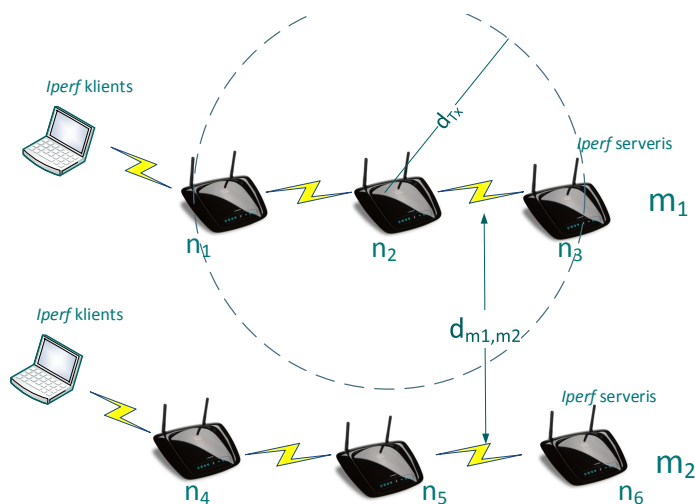
Mērījumi ir veikti āra apstākļos ārpus apdzīvotas vides, tālu no citiem mākslīgiem traucējuma avotiem izmantotajā frekvenču joslā (2,4 GHz). Lai ierobežotu eksperimenta laukumu, ir samazināts maršrutētāju darbības rādiuss. Plaša patēriņa IEEE 802.11g/n iekārtām tas parasti ir lielāks par 100 m, tāpēc veikti šādi soļi:

- raidītāju jauda iestatīta 1 mW, kas ir zemākais iespējamais līmenis *Open-WRT*;
- izmantota viena antena pārraidei un uztveršanai;
- iekārtas novietotas uz zemes (antenu augstums $\approx 15\text{--}20$ cm).

Šādā veidā stabilu komunikācijas attālumu izdodas samazināt līdz aptuveni 5 metriem. Papildu ietekmi uz raidīšanas/uztveršanas attālumu var atstāt virsma (zeme), kas nav ideāli gluda, kā arī iekārtu orientācija telpā.

2.3.2. Mērījumi ad-hoc tīkla testgultnē

Ir veikts eksperimentāls pētījums, lai novērtētu starpmaršrutu traucējumu ietekmi uz caurlaidspēju. Realizēts vienkāršs scenārijs, izvietojot mezglus divās paralēlās rindās (maršrutos m_1 un m_2) un papildus pieslēdzot portatīvos datorus mērījumu veikšanai (2.6. attēls). Mezgli izvietoti tā, lai varētu sūtīt un saņemt datus tikai no kaimiņiem savā maršrutā, ko panāk ar attālumu starp maršrutiem d_{m_1, m_2} , lielāku par raidīšanas attālumu d_{Tx} , kas ir aptuveni 5 metri.



2.6. att. Izveidotā tīkla topoloģija ar diviem maršrutiem.

Eksperimenta gaitā tiek sūtīti dati abos maršrutos un mērīts maksimālais datu pārraides ātrums, kas raksturo tīkla caurlaidspēju. To veic ar *Iperf* rīku, veidojot klienta–servera sesijas starp portatīvo datoru un tālāko mezglu katrā maršrutā. Lai praktiski novērotu datu pārraides ātruma izmaiņas, pārraidi pirmajā maršrutā uzsāk vēlāk un pārtrauc ātrāk nekā otrajā, skaidri iezīmējot traucējumu intervālu. Datu pārraidei transporta slānī ir izmantots standarta TCP protokols, kas atvieglo caurlaidspējas mērīšanu, jo automātiski samazina pārraides ātrumu pakešu zudumu gadījumā. Citi eksperimenta parametri ir apkopoti 2.2. tabulā. Eksperiments ir atkārtots dažādos

Eksperimenta parametri

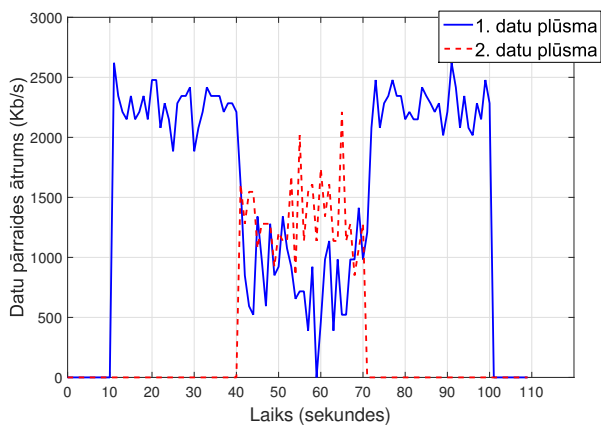
Parametrs	Vērtība
Bezvadu pārraides standarts	IEEE 802.11g
Raidītāja jauda	1 mW
Mezglu attālums maršrutā	5 m
Starpmaršrutu attālums	7 m un 23 m
Maksimālais raidīšanas attālums	5–10 m
Transporta protokols	TCP
TCP kadra izmērs	1 KB
Pirmās <i>Iperf</i> sesijas periods	10.–100. sekunde
Otrās <i>Iperf</i> sesijas periods	40.–70. sekunde

starpmaršrutu attālumos, tādējādi ievācot datus gan pastāvot augstai (maršruti ir 7 metru attālumā), gan zemai (maršruti ir 23 metru attālumā) traucējumu intensitātei. Rezultāti parādīti 2.7. attēlā.

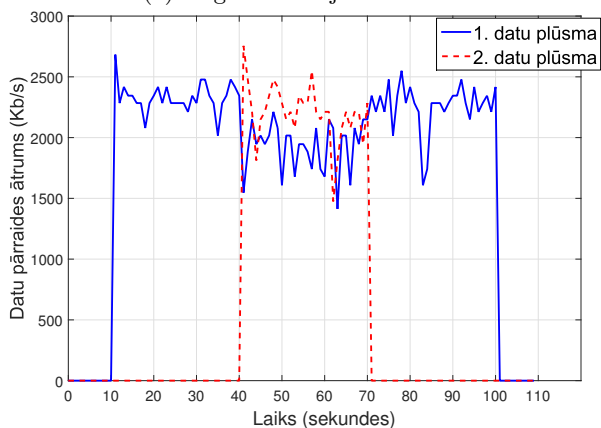
Augsta traucējumu līmeņa gadījumā (2.7a. attēlā) kopējā caurlaidspēja tīklam nav izmainījusies, pievienojot otro maršrutu. Datu pārraides ātruma summa abos maršrutos ir aptuveni 2500 Kb/s. Neraugoties uz mezglu izvietojuma simetriju, caurlaidspēja pirmajā maršrutā ir ietekmēta (krītas) vairāk nekā otrajā. Tas liecina, ka otrajam maršrutam ir lielāka ietekme uz pirmo nekā pirmajam uz otro. To var skaidrot ar neideāliem eksperimenta apstākļiem, piemēram, antenu virzienu, nelīdzenu pamatu u.c. Pastāvot zemai traucējumu intensitātei (2.7b. attēlā), otrai datu plūsmai praktiski nav ietekmes uz pirmo, tāpēc ir iespējams panākt gandrīz dubultu summāro datu pārraides ātrumu.

Rezultāti ir līdzīgi modelēšanas ceļā iegūtajiem [38], apstiprinot, ka starpmaršrutu traucējumiem ir ievērojama ietekme uz VMP efektivitāti. Ja mezgli no diviem maršrutiem savstarpēji traucē, vairāku maršrutu pārraide nepalielina kopējo caurlaidspēju. Lai efektivitāti uzlabotu, attālumam starp maršrutiem jābūt pietiekamam, lai noturētu pēc iespējas mazāku starpmaršrutu traucējumu līmeni.

Izveidotās testgultnes galvenais trūkums ir ražotāja uzlikti ierobežojumi piekļūt aparatūras zema līmeņa konfigurācijai un mainīt PCS sliekšni. Tas neļauj ietekmēt traucējumu līmeni caur MAC protokolu, tāpēc tas veikts citā eksperimentā, modelējot vairāku maršrutu scenāriju ar atšķirīgām PCS sliekšņa vērtībām.



(a) Augsts traucējumu līmenis



(b) Zems traucējumu līmenis

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

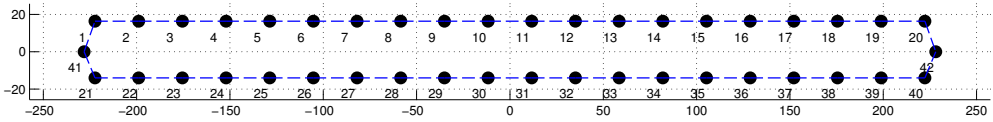
2.3.3. Traucējumu modelēšana NS-2

Ir izmantota līdzīga metodika [50], kur noteikts optimāls PCS sliekšnis atkarībā no SINR sliekšņa γ_0 vienam maršrutam. Tas ir veikts atsevišķi dažādām γ_0 vērtībām (kas atbilst atšķirīgām modulācijas shēmām), pakāpeniski palielinot PCS ietekmes apgabala rādiusu un novērojot caurlaidspējas izmaiņas. Lai pārliecinātos par optimāla PCS sliekšņa vērtības esamību vairāku maršrutu scenārijam, tālākā pētījumā kā parametrs ir izmantots nevis γ_0 , bet starpmaršrutu attālums.

Lai novērtētu PCS sliekšņa ietekmi uz divu maršrutu pārraidi, ar NS-2 modelēšanas programmas palīdzību modelēts 2.8. attēlā dotais scenārijs. Apzināti izvēlēts liels lēcienu skaits, lai mazinātu PCS sliekšņa atkarību no lēcienu skaita un gala mezgliem.

NS-2 modelēšanas parametri

Parametrs	Vērtība
Radioviļņu izplatīšanās modelis	ceļa zudumu $\alpha = 4$
Bezvadu pārraides standarts	IEEE 802.11g
Nesējfrekvence un kanāla platums	2,45 GHz un 20 MHz
Uztvērēja jutība P_0	3,16e-11 W (75 dBm)
Troksnis P_n	1,6e-13 W (-101 dBm)
Raidītāja jauda un attālums d_{Tx}	0,1 W (20 dBm) ≈ 23 m
Kopējais mezglu skaits	42
Attālums starp mezgliem maršrutā	23 m
Attālums starp maršrutiem	30 m un 42 m
Datu transporta protokols	UDP
Trafika veids	CBR
Paketes izmērs	512 baiti
PCS izmaiņas solis	1 m
Atkārtojumu skaits katrā PCS solī	10

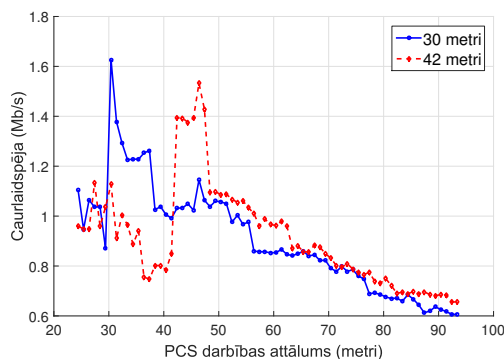


2.8. att. Modelētā tīkla topoloģija ar diviem maršrutiem.

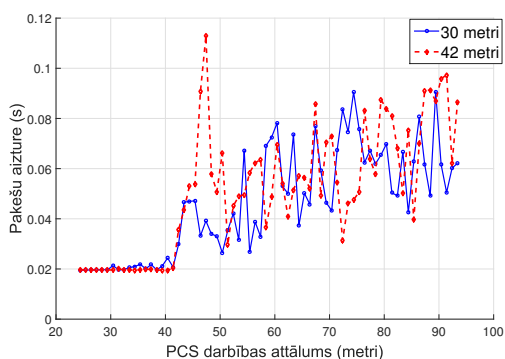
Līdzīgi kā eksperimentā ar reālām iekārtām, modeļošana ir veikta divos dažādos starpmaršrutu attālumos (lielāki par d_{Tx}). Caurlaidspēju nosaka, mērot maksimāli pieļaujamo vienmērīga bitu pārraides ātruma (CBR) trafiku, kad pakešu zudumi $< 1\%$. Papildus noteikta vidējā pakešu aizture starp galapunktiem. Rezultāti doti 2.9. attēlā.

2.9a. attēlā redzama cieša saikne starp maršrutu attālumu un optimālu PCS sliekšni (izteiktu kā apgabala rādiusu), uzrādot maksimumu, kad PCS attālums ir tuvs starpmaršrutu attālumam. Pakāpenisku caurlaidspējas samazināšanos, palielinot PCS apgabalu, izraisa pakļauto mezglu skaita pieaugums un attiecīgi radio kanāla telpiskās atkalizmantojamības samazinājums. 2.9b. attēls parāda aiztures saistību ar MAC sāncensību. Brīdī, kad PCS sāk ietekmēt mezglus no blakus maršrutiem, aizture un trīce strauji palielinās.

Rezultāti ļauj secināt, PCS sliekšnis var ietekmēt starpmaršrutu traucējumu intensitāti, jo atšķirīgos attālumos starp maršrutiem novērojams atšķirīgs optimālais PCS.



(a) Kopējā caurlaidspēja



(b) Pakešu aizture starp galapunktiem.

2.9. att. PCS darbības rādiusa ietekme divos atšķirīgos starpmaršrutu attālumos.

2.4. Tīkla kopsakarību modelis

Veiktā analīze rāda, ka datu pārraides efektivitāti nosaka daudzi savstarpēji saistīti parametri un faktori. Tas padara kopējo tīkla apstākļu novērtēšanu ļoti sarežģītu. Sistematizējot veiktās analīzes rezultātu, ir izveidots tīkla parametru kopsakarību modelis, kuru promocijas darba autors ir publicējis [71].

Tīkla kopsakarību modelis sagrupē ietekmes faktorus un parametrus vairākos līmeņos un vizualizē saiknes starp tiem (2.10. attēlā). Saikne starp atsevišķiem modeļa elementiem ir attēlota ar bultu, norādot ietekmes virzienu. Elementiem ir izmantoti vairāku veidu apzīmējumi: taisnstūris apzīmē ietekmes faktoru; sešstūris – tīkla parametru; ovāls – video pārraidei svarīgu metriku (caurlaidspēju, aizturi, trīci un pakešu zudumus); paralelograms – mērījumus parametra noteikšanai. Maršrutu izvēle ir identificēta kā svarīgs faktors, kurš kopā ar pārējiem ietekmē tīklu – radio traucējumus, MAC konkurenci, maršrutu nošķirtību, lēcienu skaitu u.c. –, tādēļ tas attēlots ar horizontālu bloku cauri visam modelim.

Balstoties uz padziļinātu traucējumu analīzi 1.4., 2.2. un 2.3. apakšnodaļā, kopsakarību modelī ir likts uzsvars uz diviem parametriem – radio traucējumi un MAC sāncensība –, lai parādītu to noteicošo lomu uz video pārraidi vairākos maršrutos. Modelī redzams, ka šie parametri ietekmē visas video pārraidei svarīgās metrikas un ir savstarpēji saistīti arī ar citiem parametriem.

Modelis ir zīmīgs ar to, ka tas uzskatāmi sasaista tīklu ietekmējošos faktorus ar video pārraidei svarīgām metriķām. Modelis ir pielietojams video pārraidei svarīgu metriķu noteikšanai, jo parāda loģisko shēmu, pēc kādas jāanalizē tīkls. Savstarpējās saites starp parametriem ļauj redzēt, kuri parametri jāņem vērā, nosakot kādu no metriķām. Lai kvantitatīvi novērtētu kāda parametra izmaiņas, kādam citam parametram mainoties, ir doti iespējamie mērījumi. Tas ir pielietojams, izstrādājot programmu al-

goritmus, tāpēc arī izmantots promocijas darbā izveidotajam *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīkam (4.3. nodaļā).

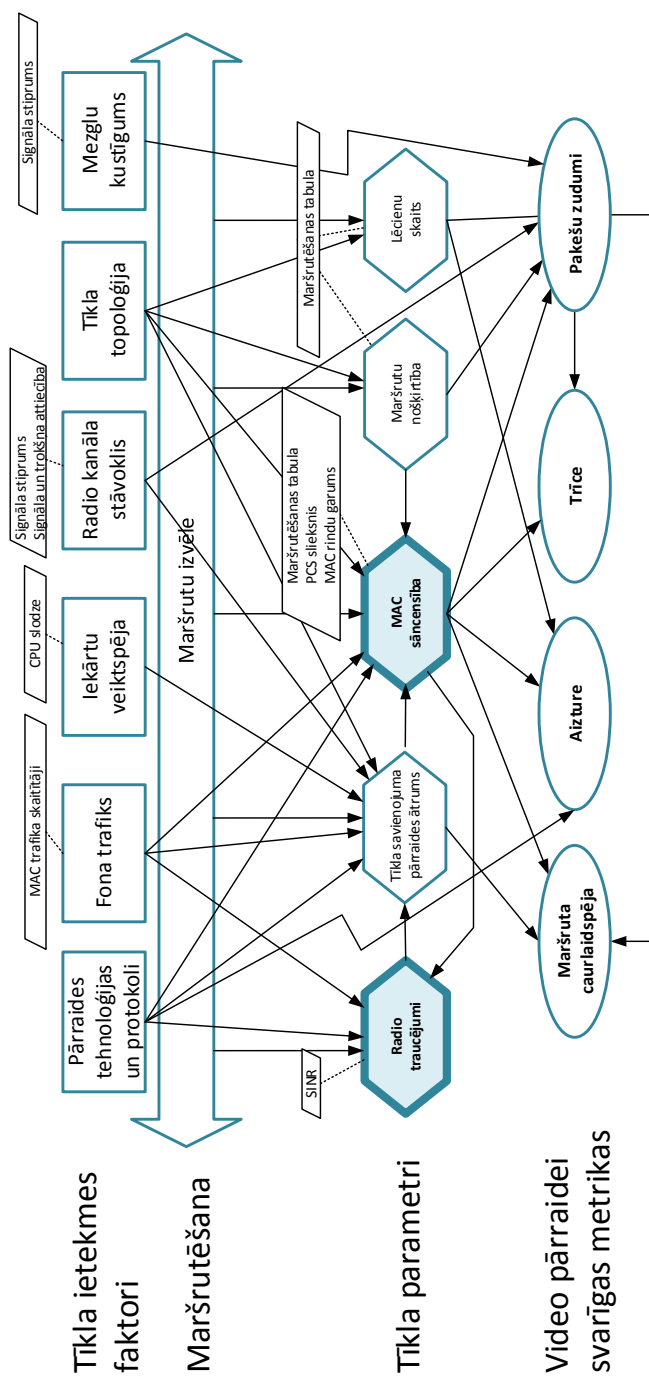
2.5. Secinājumi

Šajā nodaļā ir izstrādāts konceptuāls algoritms, pēc kāda jāveic video pārraide *ad-hoc* tīklā. Tas darbojas pēc tīklam “draudzīgas” pārraides stratēģijas, ar to saprotot video plūsmu pielāgošanu tīkla iespējām, vienlaicīgi nodrošinot kvalitāti lietotāja pusē. Šāda pieeja ir alternatīva video kodēšanai un pārraidei bez situācijas izvērtēšanas. Izstrādātais algoritms parāda – lai nodrošinātu efektīvu video pārraidi vairākos maršrutos, ir jāņem vērā daudzi informācijas avoti: tīkla parametri (maršrutu kvalitāte), lietotāja iekārtas iespējas, video īpašības, atsauksmes par iepriekšējām pārraidēm. Algoritma praktiska realizācija prasa OSI starpslāņu informācijas apmaiņu, tajā skaitā video pārraidei svarīgu maršruta parametru iegūšanu no zemākiem tīkla slāņiem.

Lai noteiktu video pārraidei svarīgus maršruta parametrus (caurlaidspēja, aizture, trīce, pakešu zudumi), jāņem vērā faktori, kas tos ietekmē: iekārtu veiktspēja, pārraides tehnoloģijas un protokoli, tīkla topoloģijas parametri, radio kanāla stāvoklis, tīkla kustīgums, citu pielietojumu radītā noslodze, kā arī maršrutu izvēle. Maršrutu izvēle ietekmē traucējumus, kas tiek nodalīti kā starpmaršrutu traucējumi un ir atkarīgi no maršrutu savstarpējās ietekmes.

Eksperiments ar reālām iekārtām un modelēšana parāda, ka starpmaršrutu traucējumi ir viens no galvenajiem caurlaidspēju ierobežojošiem faktoriem. Ja mezgli no diviem maršrutiem savstarpēji traucē, vairāku maršrutu pārraide nepalielina kopējo tīkla caurlaidspēju. Tā saglabājas aptuveni viena maršruta līmenī. Traucējumu ietekmi nosaka maršrutu nošķirtība, kas atkarīga gan no starpmaršrutu attāluma, gan no PCS apgabala rādiusa.

Nodaļā veiktā analīze atklāj kompleksas savstarpējas saites starp ietekmes faktoriem un tīkla parametriem. **Saites ir apkopotas shematiskā tīkla parametru kopsakarību modelī, kas uzskatāmi sasaista tīklu ietekmējošos faktorus ar video pārraidei svarīgām metrikām,** kas šādā griezumā un ar tik plašu parametru klāstu nav pētīts. Modelī ir uzsvērti traucējumu ietekme uz tīkla parametriem, kuru samazināšana ir svarīga vairāku maršrutu pārraides uzlabošanai.



2.10. att. Tīkla parametru kopsakarību modelis.

3. STARPMARŠRUTU TRAUCĒJUMU SAMAZINĀŠANA

Pārraidot datus vairākos maršrutos vienlaicīgi, jāreķinās ar traucējumiem, kas samazina potenciālo VMP ieguvumu. Traucējumi ir ne tikai starp mezgliem maršrutā, kas raksturīgi viena maršruta pārraidei, bet arī starp mezgliem, kas pieder dažādiem maršrutiem, un tos sauc par starpmaršrutu traucējumiem. Lai palielinātu VMP efektivitāti, jārod risinājums starpmaršrutu traucējumu samazināšanai, tāpēc nodaļā ir piedāvātas vairākas pieejas.

- Iepriekš veiktā traucējumu cēloņu analīze un eksperimentālie pētījumi parāda “gudras” maršrutu izvēles svarīgumu. Tādēļ, lai samazinātu traucējumu un arī PCS ietekmi pārraides laikā, ir piedāvāts traucējumus paredzēt, izvēloties maršrutus. Šādu maršrutu izvēli var saukt par traucējumus ietverošu (*interference-aware*).
- Traucējumus izraisa fizikālā un MAC slāņa mehānismu nepilnības, tādēļ jāveic to uzlabojumi. Mezglu radītos savstarpējos traucējumus var būtiski samazināt, izmantojot viedās antenas ar maināmu antenas vērsumu. Viedo antenu MIMO tehnoloģija, palielinot tīkla savienojuma pārraides ātrumu, netiešā veidā ļauj samazināt MAC sāncensību, kas ir vēl viens traucējumu iemesls. Pastāv iespēja izmantot vairākus radio kanālus (kognitīvais radio), bet tas promocijas darbā netiek apskatīts.
- Abas pieejas var kombinēt, panākot sinerģisku efektu – maršrutu izvēli veic, ņemot vērā apstākli, ka ir pielietotas viedās antenas.

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

3.1. Piemērotu maršrutu izvēle

Maršrutu izvēles algoritma uzdevums ir no atrastajiem maršrutiem izvēlēties komplektu datu pārsūtīšanai. Lai samazinātu traucējumu degradējošo ietekmi uz caurlaidspēju, jāizvēlas konkrētam scenārijam piemērots maršrutu komplekts gan pēc maršrutu skaita, gan ar mazāku savstarpējo ietekmi.

Optimāls maršrutu skaits. Analizējot video kodēšanas parametrus 2.1. apakšnodaļā, ir meklēts optimāls maršrutu skaits video plūsmu sūtīšanai no lietojuma slāņa perspektīvas. Teorētiski datu pārraides ātrums palielinās, summējoties atsevišķu mar-

šrutu caurlaidspējai; pakešu zudumi samazinās eksponenciāli līdz ar nošķirto maršrutu skaitu, savukārt aiztures trīce samazinās kā $\frac{1}{\sqrt{M}}$, kur M – nošķirtu maršrutu skaits [68]. Šādi apsvērumi neņem vērā traucējumus. Reālam tīklam tuvākos apstākļos optimālais maršrutu skaits ir saistīts ar a) relejmezglu pieejamību, lai izveidotu mezglu nošķirtus maršrutus; b) maršrutu nošķirtības pakāpi. Palielinoties attālumam starp datu avotu un adresātu, varbūtība atrast vairākus nošķirtus maršrutus starp nejauši izvēlētiem datu avota un adresāta pāriem strauji samazinās [12].

Literatūrā nav atrodami pētījumi par optimālu maršrutu skaitu *ad-hoc* tīkliem un apstākļiem, no kā tas atkarīgs, ņemot vērā starpmaršrutu traucējumus. 5. nodaļā ar modeļēšanas palīdzību pārbaudīts, **kā mainās kopējā maršrutu caurlaidspēja atkarībā no maršrutu skaita, pastāvot traucējumiem.**

Maršrutu savstarpējā ietekme. Vairums VMP protokolu kā primāro kritēriju savstarpējās ietekmes samazināšanai nosaka, ka datu pārraidei izvēlētie maršruti nedrīkst saturēt kopīgus mezglus (tālāk tekstā – mezglu nošķirti) vai arī kopīgo mezglu skaitam jābūt pēc iespējas mazākam. Vienam maršrutam paredzētie protokoli, kā DSR un AODV, arī var atklāt vairākus maršrutus, tomēr to skaits ir neliels un visbiežāk tie nav mezglu nošķirti. Tādēļ VMP paredzētie protokoli jau atklāšanas fāzē ietver mehānismus, kas samazina maršrutu pārklāšanos [56] vai arī pilnībā to novērš [12]. Daudzos VMP paredzētos protokolos, piemēram, SMR [56] vai *Node-Disjoint Multipath Routing* (NDMR) protokols [89], mezglu nošķirtība ir vienīgā metrika savstarpējās ietekmes raksturošanai, un maršrutu izvēles kritērijs ir maksimāla maršrutu nošķirtība.

Mezglu nošķirtība ir pietiekams nosacījums, lai nodrošinātu bojājumpieciecietību, bet, lai uzlabotu slodzes balansēšanas vai caurlaidspējas agregācijas iespējas, ir jāņem vērā arī maršrutu savstarpējā ietekme traucējumu dēļ [9], [79]. To parāda arī veiktie eksperimentālie mērījumi 2.3.2. apakšnodaļā – lai palielinātu kopējo caurlaidspēju, maršruti jābūt ne tikai mezglu nošķirti, bet arī savstarpēji netraucējošiem radio kanālā. Līdz ar to, izstrādājot maršrutēšanas protokolus caurlaidspējas palielināšanai, obligāti jāņem vērā traucējumu faktors. Teorētiski pēc analīzes 2.2. apakšnodaļā, lai nodrošinātu, ka mezgli no viena maršruta netraucē mezglus citā maršrutā, attālumam starp katriem diviem mezgliem, kas pieder dažādiem maršrutiem, jābūt lielākam par attālumu, kādā radio traucējumi var radīt vērā ņemamu iespaidu uz SINR. Tā kā traucējumi var summēties, šis attālums var būt krietni lielāks. Ņemot vērā, ka reālā tīklā ir ierobežotas iespējas maršrutus attālināt, tiek meklēts vidusceļš, noturot traucējumus līmenī, kas minimāli ietekmē caurlaidspēju.

Maršrutu savstarpējā ietekme traucējumiem dēļ ir viens no visgrūtāk kvantitatīvi raksturojamiem parametriem. Ja mērķis ir samazināt traucējumu degradējošo ietekmi uz caurlaidspēju, visprecīzāk to atainotu sasniedzamais datu plūsmas ātrums maršru-

tos. Tomēr šāda metrika ne vienmēr ir izdevīga no praktiskā viedokļa, jo, izvēloties maršrutus, prasītu mērījumus lielam skaitam dažādu maršrutu kombināciju vai arī komplicētus analītiskus aprēķinus, kā, piemēram, darbos [78], [90]. Tādēļ kā alternatīva tiek izmantotas arī citas metrikas, kas netieši ļauj novērtēt potenciālo maršrutu caurlaidspēju, un maršrutus izvēlas pēc kritērijiem, kas ļauj caurlaidspēju maksimizēt. Literatūrā piedāvātās metrikas var iedalīt pēc tā, kā tās raksturo maršrutu savstarpējo ietekmi:

- radio kanāla nošķirtību, izmantojot traucējumu līmeni raksturojošus parametrus;
- telpisko nošķirtību, kas saistīta ar attālumu starp maršrutiem.

Par metriku var izmantot potenciālo traucējumu līmeni [55], [91]. Divu maršrutu (m_1 un m_2) sapārotību nosaka kā vidējo mezglu skaitu, kas nevar saņemt datus maršrutā m_2 , kad raida viens mezgls maršrutā m_1 [55], kas būtībā ir MAC sāncensības līmenis. Tomēr sapārotība ir grūti nomērāma praktiski [79], kā arī tā neņem vērā radio traucējumus starp maršrutiem, bet tikai MAC protokola bloķētos mezglus. Traucējumus var raksturot ar pakešu pārraides intensitāti blakus maršrutā [91], bet tas prasa jau esošu trafiku tīklā.

Liela daļa metriku ir tieši vai netieši saistītas ar attāluma noteikšanu starp maršrutiem [79], [82], [92]. Par metriku izmanto korelācijas faktoru [92], kurš ir definēts kā tīkla savienojumu skaits, kas savieno divus maršrutus. Ja korelācijas faktors ir 0, maršrutus uzskata par netraucējošiem. Šī metrika nosaka, ka traucējumu apgabals ir tikai viena lēciena attālumā, kas vāji ataino reālo situāciju. Protokols *Efficient Disjoint Multipath Routing* (EDMR) [82] maršrutu atklāšanai izmanto līdzīgu algoritmu ar SMR. Būtiskākais uzlabojums ir traucējumus paredzoša maršrutu izvēle, kuru veic adresāts, analizējot atklātos maršrutus. Katru maršrutu salīdzinot ar citiem atrastajiem, var noteikt a) kopīgus mezglus; b) tīkla savienojumus, kas savieno maršrutus; c) mezglus, kas maršrutiem nepieder, bet ir kopīgs kaimiņš vairākiem maršrutiem. Šādi var iegūt informāciju par maršrutu nošķirtību līdz pat divu lēcienu attālumam un izvēlēties tāds maršrutu pārus, kuriem ir zemākais traucējumu līmenis. Nošķirtības pakāpe šai metodei arī ir ierobežota, jo līdz divu lēcienu attālumam praktiski darbojas fiziskā nesēja jušana. Tas ļauj samazināt bloķēto mezglu skaitu blakus maršrutā, tomēr attālums ir nepietiekams, lai ietvertu radio traucējumus.

Maksimāli telpiski nošķirtus maršrutus var atrast ar metodi [79] un uz tās balstītu SDMR protokolu. To ļauj pilna tīkla topoloģiskā informācija, kuru iegūst līdzīgi kā OLSR ar posma stāvokļa maršrutu atkalšanas algoritmu. Nošķirtību mēra ar Diskjarta metodi, nosakot attālumu (lēcienos) starp maršrutiem. Attālumu raksturo mazākais lēcienu skaits starp mezgliem, kuri katrs pieder citam maršrutam un atrodas līdzīgā attālumā no maršrutu galapunktiem. Sagaidāms, ka maršruti ar vislielāko telpisko nošķirtību uzrādīs viszemāko radio traucējumu līmeni, tomēr nav atbildēts jautājums, vai tie sniegs augstāku caurlaidspēju.

Pētījumā [78] ar modelēšanas palīdzību ir noteikta caurlaidspēja maršrutu komplektam ar *a)* pilnībā nošķirtu radio kanālu (starp maršrutiem nav traucējumu); *b)* daļēji nošķirtu; *c)* traucējošiem maršrutiem. Kā tas sagaidāms, labāko rezultātu uzrāda pirmais scenārijs. Tomēr scenāriji ir pārbaudīti, kad maršrutu garums (lēcienu skaits) ir līdzīgs, neņemot vērā, ka reālākā scenārijā, lai maršrutus attālinātu, var būt nepieciešams iesaistīt vairāk mezglu. Tā kā [78] traucējumu apgabals ir pieņemts divu lēcienu attālumā, nav noskaidrots, vai ir efektīvi izmantot metrikas, kas ļauj panākt lielāku nošķirtību. Tādēļ otrs uzdevums, kas ir veikts 5. nodaļā: **pārbaudīta starpmaršrutu attāluma ietekme uz kopējo caurlaidspēju un analizēti apstākļi, kādos maksimālu attālumu ir efektīvi izmantot kā maršrutu izvēles kritēriju.**

3.2. Viedo antenu pielietošana

Viedās antenas ļauj uzlabot radio kanāla izmantošanas efektivitāti un palielināt datu pārraides ātrumu, tādēļ promocijas darbā tās ir pielietotas kā risinājums starpmaršrutu traucējumu samazināšanai. Viedās antenas ir komplicēts temats, tāpēc ir sniegts plašāks ievads ar teorētisko pamatu un to līdzšinējo pielietojumu *ad-hoc* tīklā.

Viedā antena ir antenu režģis, kurš sastāv no daudziem izstarojošiem elementiem un kurā ir pielietotas digitālās signāla apstrādes (DSP) metodes, lai apstrādātu signālu katrā elementā, uzlabojot pārraides efektivitāti. Ir divi viedo antenu veidi [93], [94]: virziendarbības antenu režģi un adaptīvi antenu režģi. Virziendarbības antenu režģis ļauj fokusēt izstaroto enerģiju noteiktā telpas virzienā, nodrošinot vērsumu. Adaptīvs antenu režģis var nodrošināt gan vērsumu telpā, gan MIMO pārraidi, izmantojot paralēlus signālu izplatīšanās ceļus. Nodaļā ir atsevišķi apskatīti virziendarbības *ad-hoc* tīkli un MIMO *ad-hoc* tīkli, kur pirmajā gadījumā var pielietot abus antenu režģu veidus, savukārt otrajā – tikai adaptīvu antenu režģi.

3.2.1. Virziendarbības *ad-hoc* tīkli

Antenu režģis ļauj mainīt antenas tālā lauka vērsumu, nodrošinot jaudas pastiprinājumu konkrētā virzienā un vājinājumu citos. Šo paņēmieni sauc par virziendarbības vērsuma formēšanu (BF no angl. *beamforming*) [93], un to var pielietot gan raidītāja, gan uztvērēja pusē (lai vienkāršotu izklāstu, daudzviet tekstā, minot vienu no pusēm, ir domātas abas). Vērsumu formē, mainot amplitūdu un fāzi signālam, kuru pārraida/uztver no katra režģa elementa. Atšķirībā no klasiskiem fāzēto antenu režģiem, kur to veic ar shēmatiskiem paņēmieniem, promocijas darbā ir pielietota tikai digitāla signālu apstrāde.

Virziendarbības BF *ad-hoc* tīkliem ir aktuāls temats jau kopš pirmā IEEE 802.11 standarta parādīšanās, jo:

- vājinot nevēlamos virzienos, ir pieļaujams vairāk vienlaicīgi aktīvu tīkla savienojumu ar augstāku SINR līmeni uztvērējos;
- pastiprinot jaudu konkrētā virzienā, var palielināt raidīšanas attālumu, kas ļauj veidot maršrutus ar mazāku lēcienu skaitu.

Netiešā veidā, palielinoties telpiskais atkalizmantojamībai, uzlabojoties SINR un saīsinoties maršrutiem, kopējais datu pārraides ātrums tīklā pieaugs (skatīt arī tīkla kopsakarību analīzi 2. nodaļā).

Arī MIMO sistēmā var nodrošināt virziendarbības BF, ja raidītājs un uztvērējs atrodas tiešā redzamībā. Tomēr MIMO sistēmas tiek orientētas uz ieguvumiem, ko sniedz signālu daudzceļu izplatība. Tam tiek pielietoti MIMO BF paņēmieni, kas ir apskatīti 3.2.2. apakšnodaļā. Virziendarbības BF ir tikai viens no tā apakšgadījumiem, ko var sasniegt ar vienkāršākām antenām un signāla apstrādes metodēm. Turklāt virziendarbība veido teorētisko pamatu daudziem MIMO principiem, tādēļ tā ir apskatīta atsevišķi šajā apakšnodaļā.

Virziendarbības teorētiskie pamati. Antenu režģa vērsumu veido divu faktoru mijiedarbe (3.1.): katra izstarojošā elementa faktors EF un režģa faktors RF , kas atkarīgs no tā ģeometrijas:

$$EF \times RF. \quad (3.1)$$

Promocijas darbā ir analizēta tikai režģa faktora ietekme uz antenas vērsumu, pieņemot, ka elementi ir izotropi starotāji ($EF = 1$).

Kā piemērs ir apskatīts uztvērējs ar lineāru antenu režģi, kurā pienāk šaurjoslas signāls no virziena θ (3.1. attēlā). Antenu režģa elementi ir izvietoti telpā ar soli, kas parasti ir vismaz pusviļņa garuma attālumā. Attālums līdz signāla avotam ir daudzkārt lielāks par attālumu starp režģa elementiem (tālais lauks). Katrā no elementiem signāls pienāks ar aizturi laikā. Ņemot 1. elementu par atskaites punktu, laika aizturi uz n -to elementu τ_n aprēķina:

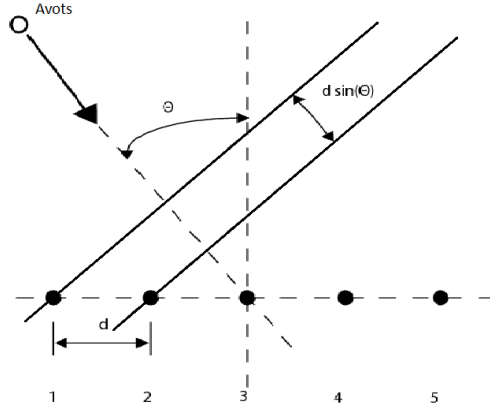
$$\tau_n = \frac{(n-1)d \sin \theta}{c} \quad n = 1, 2 \dots N, \quad (3.2)$$

kur N – režģa elementu skaits;

d – attālums starp režģa elementiem;

c – gaismas ātrums.

Lineāru režģi ar N elementiem pieraksta ar reakcijas vektoru (3.3.), kurš parāda pienākošā signāla fāzes izmaiņu katrā no režģa elementiem. Summējot vektora elementus (3.4.), aprēķina reakcijas koeficientu jeb režģa faktoru, kas parāda jaudas



3.1. att. Lineārā režģī pienākošs signāls.

pastiprinājumu virzienā θ :

$$\mathbf{a}_\theta = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{\frac{-j d \sin \theta}{c}} \\ e^{\frac{-j 2 d \sin \theta}{c}} \\ \vdots \\ e^{\frac{-j (N-1) d \sin \theta}{c}} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

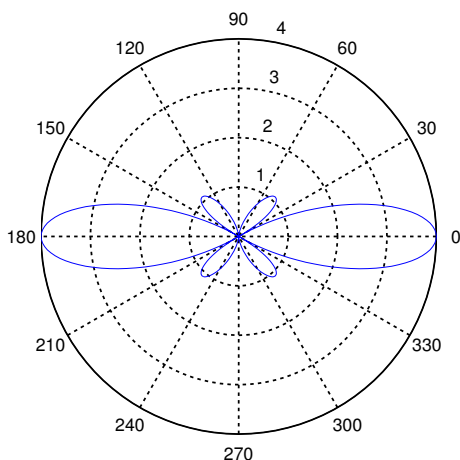
$$RF_\theta = \sum_{n=1}^N e^{\frac{-j (n-1) d \sin \theta}{c}}. \quad (3.4)$$

Nosakot RF_θ visiem virzieniem, iegūst antenu režģa vērsuma diagrammu. Lineāram režģim ar četriem elementiem, kuri izvietoti telpā ar 6 cm soli (2,4 GHz frekvencē), vērsuma diagramma azimuta plaknē ir parādīta 3.2. attēlā. Jaudas līmeņa maksimumu, ja $\theta = 0$, sauc par galveno vāli; mazākus maksimumus ($\theta = \pm 50$) par sānu vālēm.

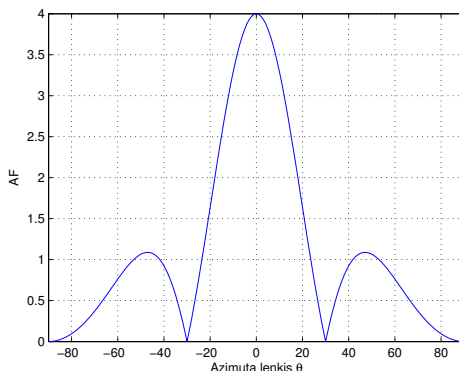
Formula (3.4.) parāda pastiprinājuma koeficientu, ko nodrošina fāzes nobīde katrā elementā sakarā ar to izvietojumu telpā. Papildus tam, lineāri kombinējot vektoru $\mathbf{a}_\theta$ ar svāra koeficientu vektoru $\boldsymbol{\omega}^H = [\omega_1 \omega_2 \cdots \omega_N]$ (3.5.), var panākt citu pastiprinājumu virzienā θ un attiecīgi arī novirzīt maksimumu 3.2. attēla vērsumu diagrammās. Manipulācijas ar fāzi un amplitūdu tiek veiktas, lai svērtā summa pastiprinātu vai vājinātu signālu, kas pienāk no kāda konkrēta virziena. Signāla amplitūdu uztvērēja izejā aprēķina pēc formulas (3.6.):

$$RF_\theta = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_\theta, \quad (3.5)$$

$$y(k) = RF_\theta s(k) = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_\theta s(k), \quad (3.6)$$



(a) Polārās koordinātēs



(b) Dekarta koordinātēs

3.2. att. Lineāra antenu režģa vērsuma diagramma azimuta plaknē.

kur ω – vektors ar antenu režģa svāra koeficientiem;
 $s(k)$ – pienākošā signāla k -tā nolase.

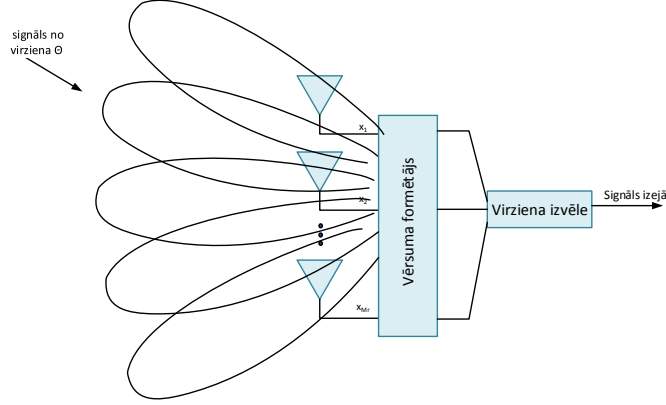
Ar lineāru režģi var formēt vērsumu divās dimensijās. Ar cirkulāra vai kvadrātiska režģa palīdzību to iespējams veikt trīs dimensijās.

Vērsuma formēšanas paņēmieni. Iepriekšējā apakšnodaļā apskatīti fizikālie pamati tam, kā veidojas antenu režģa vērsums. Tālāk ir doti konkrēti paņēmieni, kā ar signālu apstrādes metodēm panākt vērsumu noteiktā virzienā. Uzdevums ir saistīts ar optimāla svāra koeficientu vektora ω atrašanu, kas apmierina kādus dotos kritērijus, piemēram, maksimizēt vēlamu signālu un mazināt traucējumus no nevēlamajiem signāliem. Pēc tā, kā formē vērsumu, var nodalīt vairākus antenu režģu veidus [48], [93], [95], kas uzskatīti tālāk.

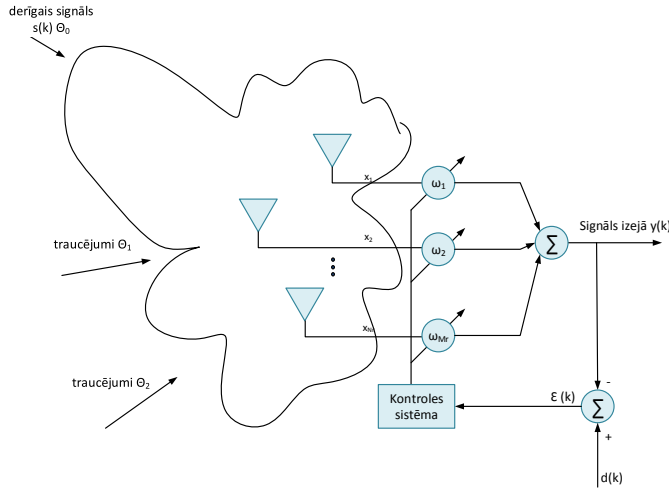
- Pārslēdzamās vāles režģis. Galveno vāli pārslēdz ar noteiktu soli telpā (3.3a. attēlā). Galvenie ierobežojumi ir saistīti ar fiksētiem vāles virzieniem, kas ne vienmēr nodrošina maksimumu pret vēlamu raidītāju/uztvērēju [95]. Šī iemesla dēļ ir arī grūti izsekot kustīgus objektus, kuri izjūt signāla līmeņa kritumu, pārvietojoties starp lapu nosegtajiem sektoriem [48].
- Vadāmās vāles (skanējošs) režģis, kura galveno vāli var virtuāli pavērst jebkurā telpas virzienā. Traucējumus rada sānu vāles, ja tās ir vērstas pret nevēlamo virzienu.
- Adaptīvs antenu režģis vienlaicīgi vada vērsuma maksimumu pret vēlamu virzienu un minimizē pastiprinājuma koeficientu pret nevēlamajiem virzieniem (3.3b. at-

tēlā).

Tālāk promocijas darbā antenu režģa darbība ir apskatīta tikai divās telpas dimensijās, tādēļ jēdziena “vāle” vietā ir lietots jēdziens “lapa”, kas ir vāles projekcija 2-D telpā.



(a) Pārslēdzamās vāles režģis



(b) Adaptīvs antenu režģis

3.3. att. Virziendarbības antenu režģu veidi.

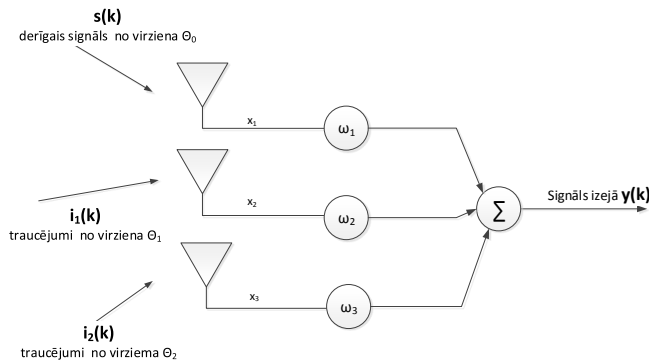
Jaudas maksimuma vēršana vajadzīgajā virzienā ir relatīvi vienkārša un balstās uz zināšanām par krītošā signāla leņķi (AoA). Svara koeficientu vektors, kas vēršīs maksimumu pret signālu no virziena θ_d , antenu režģim ar reakcijas vektoru formulā (3.3.) aprēķināms:

$$\boldsymbol{\omega} = \left[e^{\frac{j n d \sin \theta_d}{c}} \right] \quad n = 0, 1 \dots N - 1. \quad (3.7)$$

Ar adaptīvu antenu režģi papildu maksimuma vadīšanai var mazināt traucējumus no nevēlamajiem virzieniem, sasniedzot visaugstāko telpisko atkalizmantojamību. Kā viens no kritērijiem, lai maksimizētu derīgo signālu un minimizētu traucējumus, tiek izmantots maksimāls SINR. Nulles piespiešanas (ZF) vērsuma formēšana ir viena no metodēm, ar kuras palīdzību svara koeficientu vektoru atrod tādu, lai nevēlamo virzietu reakcijas koeficients tiektos uz 0, kas automātiski arī maksimizē SINR. Kā piemērs ir apskatīta heuristiska metode [96]. Uztvērējā no fiksētiem virzieniem pienāk derīgais signāls $s(k)$ un traucējošie signāli $i_1(k), i_2(k)$ (3.4. attēls). Antenu režģa reakciju var pierakstīt matricas formā, kur katra kolona satur reakcijas vektoru $\mathbf{a}$ vienam virzienam:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{\theta_0} \quad \mathbf{a}_{\theta_1} \quad \mathbf{a}_{\theta_2}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{-\frac{j d \sin \theta_0}{c}} & e^{-\frac{j d \sin \theta_1}{c}} & e^{-\frac{j d \sin \theta_2}{c}} \\ e^{-\frac{j 2 d \sin \theta_0}{c}} & e^{-\frac{j 2 d \sin \theta_1}{c}} & e^{-\frac{j 2 d \sin \theta_2}{c}} \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Jāatrod ir optimāls svara koeficientu vektors $\boldsymbol{\omega}^H = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3]$. Izmantojot sakarību



3.4. att. No N dažādiem virzieniem pienākoši signāli lineāra režģa uztvērējā.

(3.6.) un ietverot traucējošos signālus, $y(k)$ uztvērēja izejā ir aprēķināms:

$$y(k) = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{A} \begin{bmatrix} s(k) \\ i_1(k) \\ i_2(k) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Pieņemot, ka visu pienākošo signālu amplitūda ir 1, var sastādīt vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} y_0 = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_{\theta_0} = \omega_1 + \omega_2 e^{-\frac{j d \sin \theta_0}{c}} + \omega_3 e^{-\frac{j 2 d \sin \theta_0}{c}} = 1 \\ y_1 = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_{\theta_1} = \omega_1 + \omega_2 e^{-\frac{j d \sin \theta_1}{c}} + \omega_3 e^{-\frac{j 2 d \sin \theta_1}{c}} = 0 \\ y_2 = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_{\theta_2} = \omega_1 + \omega_2 e^{-\frac{j d \sin \theta_2}{c}} + \omega_3 e^{-\frac{j 2 d \sin \theta_2}{c}} = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Pierakstot īsāk un izsakot ω :

$$\omega^H \mathbf{A} = \mathbf{u}^T, \quad (3.11)$$

$$\omega^H = \mathbf{u}^T \mathbf{A}^{-1}, \quad (3.12)$$

kur $\mathbf{u}$ – bāzes vektors $[1 \ 0 \ 0]^T$.

Vispārīgā gadījumā, kad pienākošo signālu var būt mazāk par režģa elementu skaitu ($\mathbf{A}$ nav $N \times N$ matrica un līdz ar to nav invertējama), nulles piespiešanai izmanto $\mathbf{A}$ pseidoinversiju [97]:

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^H (\mathbf{A} \mathbf{A}^H)^{-1}, \quad (3.13)$$

$$\omega^H = \mathbf{u}^T \mathbf{A}^+, \quad (3.14)$$

kur $\mathbf{A}^+$ – matricas $\mathbf{A}$ pseidoinversija;

$\mathbf{u}^T$ – bāzes vektors, kura garums ir vienāds ar kopējo signālu skaitu.

Apskatītais ZF BF paņēmieni neietver adaptivitāti, ar to saprotot dinamisku vērsu pielāgošanu mainīgiem apstākļiem. Derīgā signāla un traucējošo signālu virzieniem mainoties, algoritmam jāspēj ātri pielāgot režģa svāra koeficientus. Tam var izmantot uz kļūdas gradientu balstītas metodes [96], piemēram, minimālo vidējo kvadrātu (LMS) metodi. Šāda shēma ietver atgriezenisko saiti koeficientu pārskatīšanai (parādīta 3.3b. attēlā). Par kritēriju izmanto kļūdas signālu, kuram meklē minimālu kvadrātisko vērtību starp references signālu d un signālu uztvērēja izejā y :

$$\epsilon(k)^2 = |d(k) - y(k)|^2, \quad (3.15)$$

kur $\epsilon(k)$ – kļūdas signāla k -tā nolase;

$d(k)$ – references signāla k -tā nolase;

$y(k)$ – k -tā nolase signālam uztvērēja izejā.

LMS metode balstīta uz zināšanām par pienākošo signālu, ko var iepriekš noskaidrot, piemēram, ar pilotsecības palīdzību.

Virziendarbības pielietošana *ad-hoc* tīklā. Virziendarbības efektivitāte *ad-hoc* tīklu caurlaidspējas palielināšanā, salīdzinot ar parastām antenām, ir pierādīta ar teorētiskiem pētījumiem [94], [98], [99], kā arī eksperimentos ar reālām iekārtām [100].

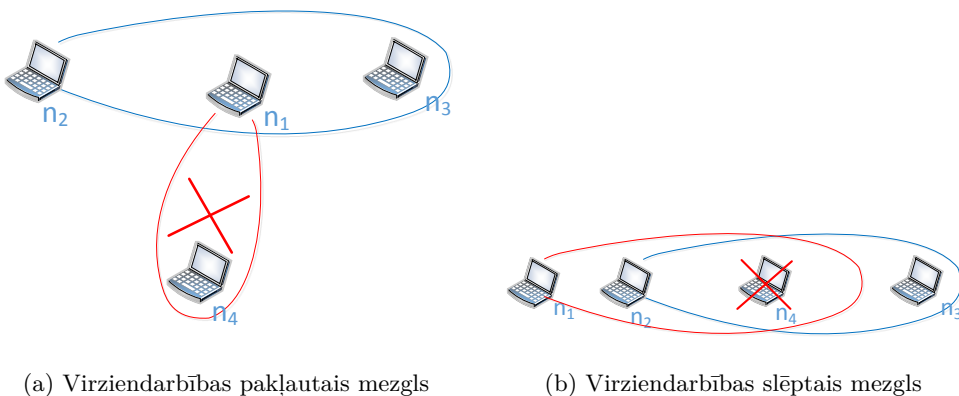
Ir iespējami vairāki virziendarbības režīmi *ad-hoc* tīklā atkarībā no tā, vai antenu režģis ir abās radio kanāla pusēs (pilna virziendarbība) vai tikai vienā. Tikai pilna virziendarbība var nodrošināt maksimālu telpisko atkalizmantojamību [10]. Pilnas virziendarbības *ad-hoc* tīklā, caurlaidspējas maksimālā robeža palielinās ar kārtu $\frac{1}{\alpha\beta}$, kur

α un β ir galvenās lapas platumi attiecīgi raidītājā un uztvērējā [99]. Papildu ieguvumu vērsuma formēšanai sniedz jaudas regulēšana [98]. To var veikt pirms katra datu kadra nosūtīšanas, iestādot optimālu jaudu raidītājā, kas nodrošina ne lielāku pārraidis attālumu kā nepieciešams stabilai pārraidei. Tas ļauj samazināt traucējumus kaimiņmezgliem un taupīt enerģiju.

Viedo antenu pielietojumam ir vairāki būtiski ierobežojumi.

- Zema efektivitāte stipri izkļiedētā vidē, kur signāli izplatās pa daudziem ceļiem un uztvērējā var pienākt no dažādiem virzieniem [93]. Ja signāla komponentu izkļiedes leņķis (*angular spread of environment*) uztvērējā ir platāks par galvenās lapas platumu, virziendarbība var nebūt efektīva, jo zaudē daļu enerģijas. Izkļiedētā vidē ir raksturīga *ad-hoc* tīkliem, jo iekārtas atrodas tuvāk zemei un bieži tiek lietotas iekšējās. Šādai videi adaptīvs antenu režģis ir atzīts par piemērotāku [93], [101].
- Lai arī jaudas pastiprinājums ļauj nodrošināt lielāku raidīšanas attālumu un īsākus maršrutu, *ad-hoc* tīklam tas samazina telpisko atkalizmantojamību un caurlaidspējas potenciālu [94], [100]. Eksperimentāli novērota sānu lapu negatīvā ietekme uz traucējumu līmeni [100] (sānu lapas ar pastiprinājumu > 1 redzamas arī 3.2. attēlā). Raidīšanas attāluma palielināšana uzlabo savienojamību tīklā ar mazu mezglu blīvumu, jo vienkāršo maršrutu izveidi. Ja ir mazs mezglu blīvums un zema slodze, tad netiek ietekmēta arī radio kanāla telpiskā atkalizmantojamība [94].
- Viedajām antenām ir vājš atbalsts MAC un tīkla slāņa protokolos. IEEE 802.11 standarta protokoli nav paredzēti, piemēram, kanāla piekļuvei vai maršrutešanai ar virziendarbību. Tālāk ir uzskaitītas potenciālās problēmas, ja CSMA/CA protokols tiktu izmantots bez modifikācijām virziendarbības *ad-hoc* tīklā [48].
 - Virziendarbības pakļautais mezgls (3.5a. attēls). Notiek pārraide ar virziendarbību no mezgla n_2 uz mezglu n_3 . Pieņemot, ka n_1 būs saņēmis CTS ziņojumu no n_3 , tas pārraidi uz n_4 nesāks, neraugoties uz to, ka tā n_3 netraucētu.
 - Virziendarbības slēptais mezgls (3.5b. attēls). Mezgls n_2 sūta datus mezglam n_3 . Tā kā n_1 , veicot PCS, ir uzrādīts brīvs kanāls, kā arī tas varētu nebūt saņēmis CTS ziņojumu no n_3 attāluma dēļ, tad tas uzsāk pārraidi uz n_4 . Tomēr tā radīs kolīziju, jo n_1 un n_3 galveno lapu vērsumi būs viens pret otru. Tiks radīti traucējumi ar pastiprinājumu $G_{n_1} G_{n_3}$.
 - “Kurlums” izpaužas, kad datu saņēmējs nav pavērsis galveno lapu pret mezglu, kurš ar viņu uzsāk RTS/CTS rokasspiedienu.

Virziendarbība ir fizikālā slāņa tehnoloģija, kuras efektīvai pielietošanai *ad-hoc* tīklā nepieciešamas MAC un tīkla slāņa modifikācijas, paredzot arī starpslāņu sadarbību.



3.5. att. Kanāla piekļuves problēmas virziendarbības *ad-hoc* tīklā ar CSMA/CA.

Veicot protokolu izstrādi virziendarbībai *ad-hoc* tīklā, var balstīties uz esošiem IEEE 802.11 protokoliem. Piemēram, lai pārliecinātos, ka adresāts ir gatavs saņemt datus, RTS/CTS rokasspiedienu veic parastā režīmā bez virziendarbības. Tajā pašā laikā citi mezgli šo kanāla rezervāciju ignorē, uzsākot pārraidi neatkarīgi no tās. Tas ļauj izvairīties no pakļautiem mezgliem, bet uz kolīzijas iespējamības pieauguma rēķina. Samazinās arī telpiskā atkalizmantojamība, bet kopumā caurlaidspēja palielinās [98].

Cita pieeja ir alternatīvu MAC protokolu izmantošana. Pārraides ar virziendarbību var organizēt laikspraugās, kur katrā laikspraugā režģa vērsums ir noteiktā virzienā [48], [101]. Tam ir līdzība ar bezkonfliktu daudzpiekļuves sistēmu TDMA. Atrodoties noteiktā attālumā, vienā laikspraugā var sazināties divi konfliktējoši mezglu pāri, kas ir TDMA ar telpisko atkalizmantojamību [48].

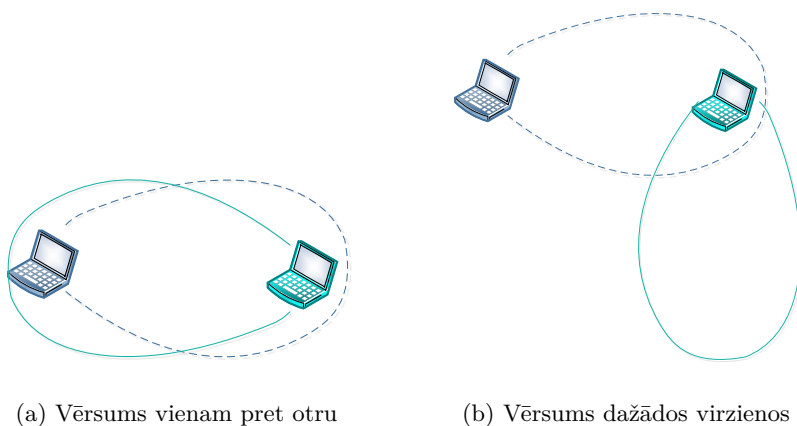
Ja tiek pielietoti efektīvi protokoli, virziendarbība var būt efektīva arī izkļiedējošā vidē (iekštelpās) [101]. Ja tas sniedz labāku rezultātu, izmanto signāla izplatīšanās ceļus bez tiešās redzamības. Galveno lomu orientē tādā virzienā, kas vienlaicīgi nodrošina maksimālu signāla stiprumu paredzētajam uztvērējam un minimālus traucējumus pārējiem. Izmantojot centralizētu uz TDMA balstītu MAC protokolu, eksperimentāli ir sasniegts 100% uzlabojums [101]. Lai arī pētījums ir veikts infrastruktūras tipa tīklā, virziendarbību izmantojot tikai AP pusē, tas parāda augstāku slāņu protokolu nozīmi.

Iepriekš apskatītie protokoli darbojas pie apsvēruma, ka mezgliem ir zināms virziens, kādā atrodas kaimiņmezgli. Kaimiņmezglu atklāšana ir atsevišķa problēma, kura attiecas uz jebkuru MAC un maršrutēšanas protokolu, tādēļ tā prasa dziļāku analīzi, īpaši pilnās virziendarbības gadījumā.

Kaimiņmezgli parasti tiek noskaidroti maršruta atklāšanas laikā, mezgliem apmaiņoties ar maršrutēšanas ziņojumiem. Izmantojot antenas bez vērsuma, kāda mezgla izsūtīto ziņojumu saņem visi tie mezgli, kuri ir uztveršanas attālumā, uzzinot par sū-

tītāja esamību un atkarībā no maršrutēšanas protokola arī par tā kaimiņmezgliem. Virziendarbības gadījumā ziņojumu nosūta konkrētā virzienā. Lai cits mezgls to saņemtu, noteiktu laika intervālu (laikspraugu) tā antenu režģa galvenajai lapai jābūt pārvērstai pret sūtītāju. Pretējā gadījumā atklāšana nenotiks un ziņojums būs jāsūta atkārtoti.

Kā piemērs problēmai ir apskatīta savienojuma izveide starp diviem mezgliem ar pārslēdzamām lapām, kuras var pārvērst četros virzienos. 3.6. attēlā ir parādīti divi gadījumi: *a)* galvenās lapas ir vērstas viena otrai pretī (3.6a.); *b)* viens no mezgliem pārvērsis galveno lapu citā virzienā (3.6b.). Nejauši izvēloties virzienus, varbūtība, ka vajadzīgajā brīdī lapas būs savstarpēji pretī, ir tikai $P = (\frac{1}{4})^2 = 0,0625$. Tas nozīmē, ka būs nepieciešami līdz pat 16 mēģinājumiem (laikspraugām), lai izveidotu savienojumu. Turklāt, sūtot ziņojumu, ir svarīgi, lai kaimiņmezgls tajā brīdī būtu uztveršanas režīmā, nevis pats sūtītu ziņojumu. Papildu ietekme var būt arī iekārtas novietojumam telpā. Galvenās lapas maksimums var nebūt precīzi vērstas pret kaimiņu, kā rezultātā veiksmīga savienojuma attālums būs mazāks. Visi šie faktori apgrūtina sakaru nodibināšanu.



3.6. att. Antenu režģu vērsums starp diviem mezgliem.

Ja mezgls ir vairāk par vienu kaimiņu, datu apmaiņa ar katru no tiem jāorganizē citā laikspraugā. Darbā [102] ir nodalīta atklāšanas fāze no datu apmaiņas fāzes. Vienošanās par laikspraugu datu apmaiņai tiek veikta jau atklāšanas fāzē, saskaņojot brīvo laikspraugu un virzienu, kurā antena jāpārvērš datu apmaiņas fāzē.

Ņemot vērā, ka esošie protokoli nav paredzēti kaimiņu atklāšanai, maršrutēšanu var veikt arī bez virziendarbības un virziendarbību var izmantot tikai datu apmaiņai. Tomēr šādi nevar izveidot maršrutu ar mazāku lēcienu skaitu, jo netiek izmantots antenu režģa pastiprinājums.

3.2.2. MIMO *ad-hoc* tīkli

MIMO sistēmu mērķis ir palielināt datu ātrumu un/vai samazināt ISI un BER, ko panāk, kombinējot signālus raidītājā un uztvērējā. Ja SISO sistēmās (tajā skaitā arī virziendarbībā) signāla izkliede un izplatīšanās pa vairākiem ceļiem ir nevēlama, tad MIMO sistēmās tā tiek izmantota. Pielietojot adaptīvu antenu režģi raidītājā un uztvērējā, ar DSP metodēm ir iespējams nodalīt pa dažādiem ceļiem uztvērējā pieņākošus signālus, panākot vairākas paralēlas telpiskās datu plūsmas. Datu pārraides ātrums tiek palielināts, nepaplašinot kanāla frekvenču joslu, bet izmantojot to efektīvāk.

Tā kā MIMO ļauj ievērojami palielināt datu pārraides ātrumu, tas var mazināt kanāla sāncensību *ad-hoc* tīklā, jo radio kanāls būs aizņemts īsāku laiku. MIMO trūkums ir krietni sarežģītāka signālu apstrāde, kas attiecīgi prasa iekārtas ar augstāku veiktspēju.

Teorētiskais pamats. MIMO sistēmas raidītājā no katra antenu režģa elementa pārraida signālu, kas atkarībā no MIMO režīma ir viena un tā paša signāla kopijas vai dažādi signāli. Katrā uztvērēja antenu režģa elementā pienāks un summēsies visi pārraidītie signāli. Tā kā antenu režģa elementi ir izvietoti ar atstatumiem, kā arī radioviļņu ceļā ir šķēršļi (izkļiedētāji), no katra raidītāja elementa pārraidītais signāls līdz katram uztvērēja antenas elementam izplatīsies pa citu ceļu un būs ar atšķirīgu amplitūdu un fāzi. Starp katru raidītāja un uztvērēja režģa elementu pāri veidojas kanāls ar pārvades koeficientu h , kas shematiski parādīts 3.7. attēlā. Matemātiski šaurjoslas MIMO sistēmu apraksta diskrēta laika modelis (3.16.) jeb (3.17.):

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{N_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{N_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{N_r} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

kur $\mathbf{H}$ – MIMO kanāla pārvades matrica;

h_{ji} – pārvades koeficients starp raidītāja režģa elementu i un uztvērēja elementu j ;

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

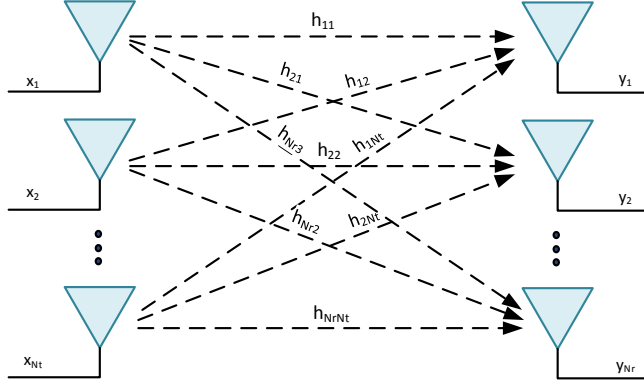
$\mathbf{y}$ – signāla vektors MIMO uztvērējā;

$\mathbf{n}$ – troksnis MIMO kanālā;

N_t – MIMO raidītāja režģa elementu skaits;

N_r – MIMO uztvērēja režģa elementu skaits.

MIMO sistēmas būtība ir tajā, ka pa dažādiem ceļiem pienākošos un katrā uztvē-



3.7. att. MIMO kanāls.

rēja antenu režģa elementā summējošos signālus ir iespēja nodalīt. Ja kanāla pārvades matrica $\mathbf{H}$ ir zināma, tai var veikt īpašvērtību dekompozīciju (SVD):

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H, \quad (3.18)$$

kur $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ – unitāras matricas;

$\mathbf{\Lambda}$ – $N_r \times N_t$ diagonāla matrica ar $\mathbf{H}$ īpašvērtībām.

Attiecīgi (3.16.) var pierakstīt:

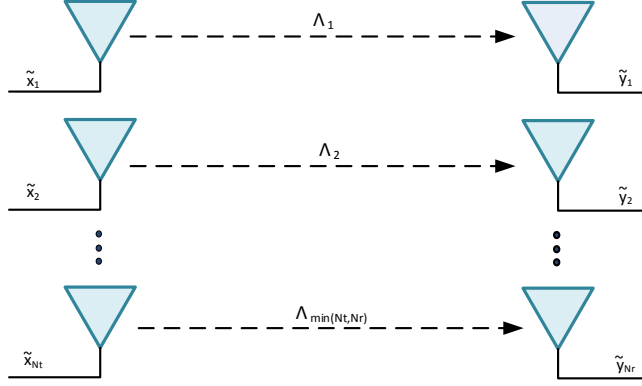
$$\mathbf{y} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H \mathbf{x} + \mathbf{n}. \quad (3.19)$$

Pārveidojot ieejas vektoru (priekšapstrāde) $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{V}^H \mathbf{x}$, $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{V}^H \mathbf{n}$ un izejas vektoru (šēpings jeb pēcapstrāde) $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}$, modelis var tikt pārrakstīts:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{\Lambda} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (3.20)$$

Ar šo matemātisko paņēmieni ir parādīts, ka MIMO kanālu var sadalīt paralēlos SISO apakškanālos (idejiski parādīts 3.8. attēlā). To skaitu nosaka matricas $\mathbf{H}$ rangs, kurš ir $R_H \leq \min(N_t, N_r)$. Stipri izkliedējošā vidē starp signālu izplatīšanās ceļiem būs mazāka korelācija, tāpēc ir iespēja sasniegt lielāku neatkarīgu (savstarpēji netraucējošu) apakškanālu skaitu.

Pielietojot SVD un piemērojot optimālu jaudu katram apakškanālam (raidītāja režģa elementam), var noteikt teorētisko MIMO kanāla caurlaidspēju. Jaudas piemērošanas algoritms ir atkarīgs no tā, vai raidītāja pusē ir pieejama kanāla informācija (pieņemot, ka uztvērēja pusē matrica $\mathbf{H}$ ir zināma). Gadījumā, kad raidītājā ir zināma matrica $\mathbf{H}$, katram apakškanālam piemēro daļu no kopējās jaudas ar *water-filling*



3.8. att. MIMO kanāla dekompozīcija paralēlos apakškanālos.

algoritmu [103], [104]. Tas nozīmē, ka jauda tiek sabalansēta starp kanāliem tā, lai maksimizētu kopējo caurlaidspēju. Savukārt bez kanāla informācijas raidītājā optimāla būs vienmērīga pārraides jaudas sadale starp apakškanāliem [103]. Šādai MIMO sistēmai Šenona caurlaidspēju C vispārīgā formā var izteikt:

$$C = B \log_2 \det \left[\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right], \quad (3.21)$$

kur B – frekvenču joslas platums;

$\mathbf{I}_{N_r}$ – identitātes matrica;

ρ – raidītāja kopējās jaudas un trokšņu jaudas attiecība $\frac{P_{Tx}}{P_n}$.

Veicot SVD $\mathbf{H}$ matricai, statistiskam kanālam caurlaidspējas aprēķins vienkāršojas:

$$C = \sum_{i=1}^{R_H} B \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_i}{N_t} \right), \quad (3.22)$$

kur γ_i – SNR katram apakškanālam jeb $\gamma_i = \frac{P \Lambda_i}{P_n}$;

R_H – $\mathbf{H}$ matricas rangs (no nulles atšķirīgas īpašvērtības).

MIMO pārraides paņēmieni. Atkarībā no priekš-/pēcapstrādes algoritma MIMO var sniegt atšķirīgus ieguvumus.

- Datu pārraides ātruma pieaugumu ar MIMO telpisko multipleksēšanu (SM). Multipleksējot datu plūsmu vairākās paralēlās datu pūsmās un to katru pārsūtot no cita režģa elementa caur virtuālu apakškanālu, ir iespējams teorētiski sasniegt R_H reizes lielāku datu ātrumu, salīdzinot ar SISO sistēmu.
- Kvalitātes uzlabojumu ar datu plūsmu dažādību (*diversity*). Pārraidot no katra režģa elementa svērtu signāla kopiju, uzlabojas tā kvalitāte uztvērējā, jo ir mazā-

ka iespēja visos apakškanālos saskarties ar sliktiem kanāla apstākļiem. Izvēloties uztvērējā signālu no apakškanāla ar augstāko SNR, samazinās BER. Jānodala divi gadījumi atkarībā no kanāla informācijas raidītājā.

- Ja kanāla informācija ir zināma, papildu ieguvumu plūsmu dažādībai var sniegt MIMO BF. Izvēloties optimālus režģa svara koeficientus raidītājā un uztvērējā, var palielināt SNR. BF gadījumā $\mathbf{U}$ un $\mathbf{V}$ matricas formulā (3.18.) vienkāršojas un pārveidojas svara koeficientu vektoriem.
- Bez kanāla informācijas var veikt datu plūsmu redundantu kodēšanu, nodrošinot labāku noturību pret fedingu. Pielietojot telpas-laika bloka kodus, var panākt ieguvumu neatkarīgi no antenu skaita uztvērēja, piemēram, Alamouti kodi [105] ļauj veidot virtuālus apakškanālus 2×1 MIMO sistēmā. Jāpiebilst, ka bez kanāla informācijas var izmantot arī MIMO BF tikai uztvērēja pusē.

Minētos ieguvumus var kombinēt, daļu antenu režģa resursu novirzot vienam paņēmienam un daļu – citam. Tālāk promocijas darbā ir apvienots MIMO SM ar BF (MIMO SM+BF), lai papildus datu ātruma palielināšanai izslēgtu traucējumus. Jāatzīmē, ka vienlaicīgi nevar sasniegt visu metožu maksimālu efektivitāti, jo to ierobežo antenu režģa brīvības pakāpes.

Ir vairāki paņēmieni MIMO sistēmu īstenošanai praksē [104], [106], [107].

- Pārraidāmo datu plūsmu kodēšana apvienojumā ar maksimālās varbūtības detektēšanu uztvērējā. Lai arī metode sniedz labāko rezultātu (pēc BER), tās sarežģītība palielinās eksponenciāli līdz ar režģa elementu skaitu un bitu skaitu modulācijas simbolā [106].
- Saskaldīt demodulāciju atsevišķos posmos ar mazāku sarežģītību, kas ir saistīts ar telpas-laika signālu apstrādi. Pēc šāda principa darbojas *Bell Laboratories Layered Space-Time* (BLAST) arhitektūras. Vienkāršākā ir V-BLAST (jeb H-BLAST) [108], savukārt efektīvākā, kas papildus SM ļauj izmantot ieguvumu no plūsmu dažādības, ir D-BLAST [109]. Šīm metodēm nav nepieciešam kanāla informācija uztvērējā.
- Daudzlietotāju MIMO sistēmām, kur parādās traucējumu problēma starp lietotājiem, tiek pielietotas ZF BF metodes [107]. Tām nepieciešama informācija par traucējumiem uztvērējā.

MIMO pielietojums *ad-hoc* tīklos. Līdzšinējā MIMO sistēmu pētniecība un izstrāde notikusi galvenokārt fizikālā slāņa tehnoloģiju uzlabošanā, kas ļāvis sasniegt ievērojamu progresu datu pārraidē starp divām iekārtām. Mazāk ir pētīta MIMO darbība tīkla līmenī, tajā skaitā arī *ad-hoc* tīkliem raksturīgajai daudzslēdņu pārraidei.

Atšķirībā no virziendarbības adaptīvs antenu režģis MIMO režīmā var darboties bez papildu IEEE 802.11 protokolu modifikācijām, jo kaimiņmezglu atklāšanu un ka-

nāla piekļuvi neierobežo vērsums telpā. MIMO fizikālā slāņa atbalsts ir ietverts arī IEEE 802.11 standarta n un ac papildinājumos. Piemēram, *Cisco Linksys WRT160NL* bezvadu maršrutētājs, kas aprīkots ar divu elementu antenu režģi, nodrošina divus MIMO pārraides paņēmienus: SM un plūsmu dažādību ar telpas-laika bloka kodiem. Paņēmiena izvēli nosaka modulācijas un kodēšanas shēma, kuru iekārta izvēlas automātiski atkarībā no traucējumu līmeņa kanālā. Veicot eksperimentālu MIMO darbības pārbaudi ar IEEE 802.11n iekārtām daudzlēcienu režīmā, darbā [110] ir secināts, ka, palielinoties lēcien skaitam, SM ieguvums samazinās un datu pārraides ātrums tuvojas vienas telpiskās plūsmas ātrumam. Tas parāda, ka *ad-hoc* tīklā netiek izmantots pilns MIMO potenciāls.

Tā kā maršrutā vienlaicīgi var būt aktīvi vairāki MIMO posmi (mezglu pāri), tad MIMO kanāls veidojas ne tikai katra posma ietvaros, bet starp jebkuriem diviem mezgliem maršruta ietvaros. Būtībā veidojas MIMO radio traucējumi. Katru MIMO datu plūsmu kaimiņmezgli izjūt kā atsevišķu traucējumu avotu. Lai šo problēmu risinātu, vairākos darbos ir piedāvāts izmantot ZF BF metodi [107], [111], [112], kas ļauj vienlaicīgi veikt SM un BF, tādējādi ļaujot daļu režģa resursu izmantot pārraides ātruma un daļu telpiskās atkalizmantojamības palielināšanai. Uztvērējā ir iespējams nodalīt derīgā signāla plūsmas no traucējošām plūsmām, jo derīgā signāla raidītājs un traucējumu avoti atrodas dažādās vietās telpā un to apakškanāli ir neatkarīgi. Kā norāda [107], lai izmantotu ZF BF metodi, ir jābūt pieejamai informācijai uztvērējā par kanālu gan starp derīgā signāla raidītāju un uztvērēju, gan starp traucējošiem mezgliem un uztvērēju. MIMO ZF BF matemātiskais modelis *ad-hoc* tīkliem, kurš ir pielietots arī promocijas darba ietvaros, dots 4.2.3. apakšnodaļā.

Darbā [107] ir piedāvāts starpslāņu protokols “HYB”, kurš nodrošina MIMO ZF BF metodi datu pārraidei. Kanāla piekļuvi regulē IEEE 802.11 MAC metode, fizikālā nesēja jušanu un RTS/CTS rokasspiedienu veicot atsevišķā vadības kanālā bez antenas vērsuma. RTS ziņojumu standarta informācija ir papildināta ar pilotsecību kanāla novērtēšanai uztvērējā, kā arī raidītāja izvēlētajiem režģa elementu svara koeficientiem. Visi mezgli, kas saņem šādu ziņojumu, var novērtēt kanālu starp ziņojuma sūtītāju un sevi un attiecīgi pielāgot savus svara koeficientus uztveršanai vai traucējumu izslēgšanai. MIMO pārraidi uzsāk atsevišķā datu kanālā pēc veiksmīga RTS/CTS rokasspiediena kontroles kanālā, izmantojot aprēķinātos svara koeficientus. Kontroles un datu kanāla nodalīšana nav obligāta, bet sniedz labāku telpisko atkalizmantojamību.

3.2.3. Starpmaršrutu traucējumu samazināšanas iespēju analīze

Viedās antenas ir daudzsološs risinājums, jo tās līdzīgi kā VMP, palielina radio kanāla telpisko atkalizmantojamību, kas ir aktuāli IEEE 802.11 standarta tīklos. Saskaņā ar nodaļā veikto analīzi, viedās antenas var iedalīt divās lielās grupās pēc to pielietojuma: virziendarbībai vai MIMO pārraidei. Katru no grupām var iedalīt sīkāk pēc izmantotajiem signālu apstrādes paņēmieniem, kas sniedz dažādus ieguvumus.

- Virziendarbība ar:
 - pārslēdzamās/vadāmās lapas antenu režģi;
 - adaptīvu antenu režģi, kas nodrošina traucējumu izslēgšanu.
- MIMO pārraide ar adaptīvu antenu režģi, nodrošinot:
 - SM paralēlu datu plūsmu pārraidei;
 - plūsmu dažādību, tajā skaitā BF traucējumu izslēgšanai;
 - MIMO SM+BF, kas apvieno abus iepriekšējos.

Šāds iedalījums ir ievērots arī promocijas darbā veiktajos pētījumos. Tālāk ir analizēta viedo antenu pielietošana VMP un definēti veicamie pētniecības uzdevumi.

Virziendarbība. Ir atrodami daudzi pētījumi par virziendarbību *ad-hoc* tīklos, pārraidot datus caur vienu maršrutu (plašāk iepriekš 3.2.1. nodaļā), taču tās pielietošana VMP, lai mazinātu traucējumus starp maršrutiem, ir maz pētīta [81], [113]. Piemēram, darbā [113] ir piedāvātas tikai izmaiņas protokolam, lai uzlabotu tīkla savienojamību.

Lai arī virziendarbība krietni samazina traucējumus starp maršrutiem, vēl joprojām traucējumi pastāv maršruta iekšienē raidītāja galvenās lapas vērsuma dēļ, kura parasti pārklājas ar kaimiņmezgliem. Kā viena no maršrutu novērtēšanas metrikām ir piedāvāts galveno lapu pārklāšanās gadījumu skaits gan maršruta ietvaros, gan starp maršrutiem [81]. Šāda pieeja apvieno viedās antenas ar piemērotu maršrutu izvēli. Metrika ir ieviesta virziendarbības DSR protokolā un ar datormodelēšanu novērtēta tās efektivitāte divu maršrutu scenārijiem, ja galvenās lapas platums ir 40° , kas nesniedz skaidrību par virziendarbības efektivitāti citos gadījumos. Ir jāveic papildu **novērtēšana dažādiem galvenās lapas platumiem (režģa elementu skaitam) un maršrutu skaitam komplektā**, lai noteiktu optimālos pielietošanas apstākļus.

Raidīšanas attāluma palielināšana, ko sniedz antenu režģa jaudas apstiprinājums, ir atzīts kā neefektīvs *ad-hoc* tīklam kopumā [94], [100]. Tā kā video pārraides gadījumā primāri ir jānodrošina augsta caurlaidspēja maršrutos starp datu avotu un adresātu, tad lietderīgi ir veikt papildu pētījumus par **virziendarbības pastiprinājuma ietekmi uz vairāku maršrutu pārraidi**.

MIMO. Praktiski nav pētījumu par MIMO pielietošanu VMP. Vienīgais darbs, kurā ir apskatīti vairāki maršruti, ir [114], bet tajā pārraide netiek nodrošināta starp vienu datu avotu un adresāta pāri, kas ir raksturīgs video straumēšanas pielietojumos. Tādēļ 5. nodaļā ar modelēšanas palīdzību **ir novērtēta MIMO efektivitāte traucējumu samazināšanā vairāku maršrutu apstākļos.**

Piemērota viedās antenas veida izvēle ir vēl viens aktuāls jautājums, kas VMP gadījumā nav pētīts. Tam ir nozīme kognitīvu iekārtu izstrādē, kurām jāspēj pielāgot sava konfigurācija vides un tīkla apstākļiem. Līdzšinējos pētījumos, piemēram, [81], [94], [100], [113], [114], kas neapskata konkrēti VMP, secināts, ka dažādu viedo antenu efektivitāte atkarīga no vides izkļiedes, mezglu blīvuma un tīkla noslodzes.

Stipri izkļiedējošā vidē visefektīvākā būs MIMO tehnoloģija, tai seko adaptīvs virziendarbības antenu režģis, un vājāko rezultātu uzrāda pārslēdzamās/vadāmās lapas režģis [94]. Virziendarbības antenu režģim ir zema efektivitāte iekšstelpās signāla atstarošanās dēļ (3.2.1. apakšnodaļa), kas savukārt ir priekšrocība MIMO. Turpretī MIMO nesniegs pārraides ātruma pieaugumu brīvā telpā un praktiski darbosies virziendarbības BF režīma. Tas nozīmē, ka abu tehnoloģiju ieguvumi nav sasniedzami vienlaicīgi, jo, samazinot galvenās lapas platumu virziendarbībā, vienlaicīgi samazinās iespējamie izkļiedētā izstarojuma virzieni MIMO pārraidei.

Virziendarbības antenu režģi uzrāda labākus rezultātus, ja ir mazs mezglu blīvums, jo antenas pastiprinājums nodrošina lielāku raidīšanas attālumu un līdz ar to labāku tīkla savienojumu [94]. Tomēr tas var būt spēkā tikai zemas tīkla noslodzes gadījumā (neliels skaits aktīvo mezglu), jo lielāks raidīšanas attālums samazina telpisko atkalizmantojamību [100].

MIMO SM+BF darbojas efektīvāk zemas tīkla noslodzes gadījumā, jo tad visus režģa resursus var novirzīt SM un palielināt datu ātrumu. Virziendarbības antenu režģi ir mazāk efektīvi, jo resursus, kas netiek izmantoti traucējumu izslēgšanai, nevar novirzīt pārraides ātruma paaugstināšanai. Efektivitāte izlīdzinās augstas intensitātes gadījumā.

Balstoties uz šajā nodaļā veikto viedo antenu analīzi un iepriekš doto tīkla kopsakarību modeli, tālāk ir apkopotas viedo antenu priekšrocības salīdzinājumā ar parastām antenām VMP raksturīgos apstākļos (publicēts arī autora darbā [115]). VMP apstākļus, kas to atšķir no pārraides vienā maršrutā, raksturo šādas iezīmes:

- iespējami vairāki maršruti starp vienu datu avotu un adresātu;
- vairāku maršrutu gadījumā datu pārraidē būs iesaistīts vairāk mezglu;
- maršruti būs garāki, jo nepieciešams tos telpiski nošķirt;
- maršruti atradīsies relatīvi tuvu, jo parasti mezglu skaits ir ierobežots;
- galapunkti (datu avots un adresāts) ir savienoti ar vairākiem kaimiņmezgļiem,

līdz ar to tie strādā vairākos telpas virzienos, kuru leņķiskā nošķirtība var būt neliela.

Paredzot video plūsmu kā pielietojumu, jāreķinās ar intensīvu datu plūsmu maršrutos un iespējamām tās virzieniem – vienvirzienu (video straumēšana) vai divvirzienu (videokonference).

Iepriekš minēto apstākļu ietekme uz dažādu viedo antenu veidu pielietojumu ir analizēta 3.1. tabulā. Katram raksturojumam ir uzskaitītas saistītās problēmas mezgliem ar parastām (viena elementa) antenām un attiecīgie ieguvumi vai trūkumi, pielietojot mezglus ar viedām antenām (virziendarbība vai MIMO). 5. nodaļā **salīdzinājums ir veikts ar datormodelešanu.**

3.1. tabula

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 avotu/adresātu 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	Palielināts 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	SM palielina pārraides ātrumu, kas ļauj samazināt MAC sāncensību
Intensīva datu plūsmas maršrutos	Paaugstināts MAC sacensības līmenis augsta tīkla savienojumu noslogojuma dēļ	MAC sacensība samazinās, jo vērsums uzlabo telpisko atkalizmantojamību	

3.3. Secinājumi

Divas galvenās traucējumu samazināšanas pieejas: piemērotu maršrutu izvēle un viedo antenu pielietošana. Piemērotu maršrutu izvēle nozīmē izvēlēties konkrētam scenārijam piemērotu maršrutu komplektu gan pēc maršrutu skaita, gan ar mazāku savstarpējo ietekmi. Ietekmi var raksturot ar attālumu starp maršrutiem, tomēr nav noskaidrots, **vai telpiski nošķirti maršruti vienmēr sniegs augstāku caurlaidspēju**. Ir jāmeklē **maršrutu izvēles kritēriji**, kuri balstās uz viegli nosakāmām metrikām, tajā pašā laikā ietverot traucējumus.

Viedās antenas ir daudzsološs risinājums, jo, līdzīgi kā VMP, ir vērsts uz radio kanāla telpiskās atkalizmantojamības palielināšanu. Lai pielietotu viedās antenas *ad-hoc* tīklā, ir nepieciešami MAC un maršrutēšanas protokolu uzlabojumi. Virziendarbībai šobrīd ir vājš atbalsts no protokolu puses, savukārt IEEE 802.11 ietvertais MIMO atbalsts ir efektīvs tikai viena lēciena pārraidē.

Ad-hoc tīkliem ir piedāvāti vairāki viedo antenu veidi, kuru izvēli ietekmē, pirmkārt, radio viļņu izkliedes līmenis vidē, otrkārt, tīkla topoloģijas un noslodzes parametri. Kognitīvai iekārtai jābūt spējīgai strādāt dažādos režīmos, pārslēdzoties starp virziendarbību vai MIMO un pielāgojot antenu režģa parametrus. *Ad-hoc* tīkliem efektīvākās ir viedās antenas, kuras ietver signālu apstrādes metodes adaptīvai vērsuma formēšanai, ļaujot novērst starpmezglu traucējumus – adaptīvs virziendarbības antenu režģis un MIMO sistēma ar telpisko multipleksēšanu un vērsuma formēšanu. Raidīšanas attāluma palielināšana, ko sniedz antenu režģa jaudas apstiprinājums, viennozīmīgi nenodrošina augstāku caurlaidspēju. **Līdz šim veiktie pētījumi nav salīdzinājuši dažādu viedo antenu veidu efektivitāti vairāku maršrutu apstākļos.**

Šie risinājumi ir jāpārbauda, lai novērtētu to spēju uzlabot datu pārraides efektivitāti *ad-hoc* tīklā. To ir plānots veikt ar modelēšanu 5. nodaļā, tāpēc nākamajā nodaļā ir izstrādāta metode un rīki šī uzdevuma veikšanai.

4. METODES UN RĪKU IZSTRĀDE CAURLAIDSPĒJAS NOTEIKŠANAI

3. nodaļā ir piedāvāti risinājumi starp-maršrutu traucējumu samazināšanai, kuru spēja uzlabot datu pārraides efektivitāti *ad-hoc* tīklā ir jānovērtē. Eksperimentāli pētījumi ar reālām iekārtām prasa lielus finansiālus ieguldījumus, tāpēc traucējumu samazināšanas paņēmienus ir plānots pārbaudīt ar modelēšanu.

Risinājumu efektivitātes novērtējumam jābūt neatkarīgam no konkrēta scenārija un grūti prognozējamiem parametriem, piemēram, mezglu izvietojuma. Tomēr tam jāparāda interesējošo parametru, piemēram, starpmaršrutu attāluma, režģa elementu skaita u.c., ietekmi 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 samazināšanas paņēmienus, un ātrdarbīga metode, kas, izmantojot šos modeļus, aprēķina maršrutu caurlaidspēju.

Šajā nodaļā ir aprakstīta vairāku maršrutu pētniecībai pilnveidotā metode un izstrādātais *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīks. Noslēgumā veikta precizitātes pārbaude un meklēti risinājumi ātrākai rezultātu ieguvei.

4.1. Modelēšanas metožu analīze

Modelēšana balstās uz matemātiskiem modeļiem, kas apraksta fizikālus procesus sistēmā un ļauj pētīt un izprast tās darbību. Modeļi datu pārraidei starp diviem mezgliem (punkts-punkts sakari) ir salīdzinoši vienkārši, piemēram, kanāla teorētiskās caurlaidspējas novērtēšanai bieži lieto Šenona teorēmu [103], kas parāda teorētisko pārraides ātruma robežu. *Ad-hoc* tīklā maršrutu veido vairāki tīkla savienojumi, kas vienlaicīgi nevar būt aktīvi, līdz ar to ir nepieciešams modelēt atsevišķus procesus. Starp tīkla savienojumiem pastāv radio traucējumi, kas samazina caurlaidspēju katrā savienojumā un maršrutā kopumā, tāpēc nepieciešams precīzs traucējumu modelis. Šajā apakšnodaļā ir veikts pārskats par modelēšanas metodēm un pamatota konkrētas metodes izvēle.

Traucējumu modelis. *Ad-hoc* tīkla modelēšanā pamatā ir traucējumu modelis [116] (saukts arī par MAC protokola modeli), kas nosaka, kuri tīkla savienojumi drīkst būt aktīvi vienlaicīgi tajā pašā radio kanālā, neradot savstarpējos traucējumus, kas ir lielāki par noteiktu sliekšni. Plaši tiek izmantots uz attālumu balstīts traucējumu mo-

delis [5], [117], kurš nosaka, ka noteiktā attālumā ap uztvērēju (traucējumu apgabalā d_I) pārraides no citiem raidītājiem nav pieļaujamas. Matemātiski tas ietver nosacījumu, ka attālums d_{ij} starp raidītāju i un uztvērēju j nav lielāks par pārraides attālumu d_{Tx} un neviena cits mezgls k , kurš atrodas j traucējumu apgabalā d_I , neraida:

$$\begin{cases} d_{ij} \leq d_{Tx} \\ \text{neviens cits mezgls } k, \text{ kam spēkā } d_{kj} \leq d_I, \text{ neraida.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Citos darbos attāluma modelis ir vienkāršots par lēcienu modeli, nosakot, ka divas pārraides ir iespējamās vienlaicīgi, ja raidītāji atrodas vismaz viena vai vairāku lēcienu attālumā no uztvērējiem, kuriem tie traucē [78].

Par visprecīzāko ir atzīts fizikālais traucējumu modelis [116], kurā tiek ņemti vērā aditīvi traucējumi no visiem paralēli raidošajiem mezgliem un tiek nodrošināts, ka netiek pārsniegts noteikts sliekšnis. Šī modeļa ieviešana modelēšanas rīkos ir krietni sarežģītāka, tāpēc vairumā darbu (piemēram, [5], [78]) ir izmantots uz attālumu balstīts modelis. Promocijas darbā tomēr ir īstenots fizikālais traucējumu modelis, kas ņem vērā aditīvos traucējumus un imitē CSMA/CA darbību.

Traucējumu modeli bieži reprezentē ar konfliktu grafu [5], kura virsotnes ir tīkla savienojumi, bet saites starp virsotnēm parāda konfliktus starp savienojumiem (vienlaicīga pārraide nav pieļaujama). Tas parāda, kuri tīkla savienojumi ir pieļaujami vienlaicīgi, veidojot neatkarīgas savienojumu kopas.

Asimptotiska caurlaidspējas robeža. Kopš IEEE 802.11 standarta pieņemšanas 90. gadu beigās ir daudzi pētījumi par fundamentālām *ad-hoc* tīklu veiktspējas robežām. Piemēri darbiem, kuros ar analītiskām metodēm ir noteikta asimptotiska caurlaidspējas robeža: daudzlēcienu tīklam kopumā [117]; virziendarbības *ad-hoc* tīklam [99]; MIMO *ad-hoc* tīklam [118]. Darbā [117] ir pierādīts, ka, pielietojot (4.1.) traucējumu modeli ([117] saukts par protokola modeli), pārraides ātrums, ar kādu var sazināties divi mezgli tīklā ar nejaušiem parametriem (mezglu izvietojumus, trafika modelis), krītas asimptotiski kā $\frac{C}{\sqrt{n \log n}}$, kur C ir datu pārraides ātrums beztraucējumu apstākļos un n ir mezglu skaits. Labākajā gadījumā, kad mezglu izvietojums, trafiks, raidīšanas attālums katrai pārraidei ir izvēlēti optimāli, robeža nevar pārsniegt $\frac{C}{\sqrt{n}}$. Robežas saglabājas arī fizikālam traucējumu modelim, kur uzstādījums ir nodrošināt SINR līmeni virs noteikta sliekšņa. Darbā [99] ir noteikta caurlaidspējas robeža virziendarbības *ad-hoc* tīklam. Caurlaidspēja palielinās ar kārtu $\frac{1}{\alpha\beta}$ pilnās virziendarbības tīklā, kur α un β ir galvenās lapas platums attiecīgi raidītājā un uztvērējā. Savukārt MIMO *ad-hoc* tīklā ar nejaušu mezglu izvietojumu sasniedzamā caurlaidspēja ir $\Theta(\frac{NC}{\sqrt{n \ln n}})$, kur N ir antenu režģa elementu skaits un C ir katras paralēlās datu plūsmas ātrums. Šie pētījumi ir nozīmīgi, lai atklātu *ad-hoc* tīkla pamatīpašības, kā,

piemēram, caurlaidspējas atkarību no mezglu skaita tīklā u.c., tomēr tie neparāda konkrētas tīkla topoloģijas un maršrutu potenciālu.

Vairāku maršrutu caurlaidspējas noteikšana. Promocijas darba pētījumiem ir jānosaka maršrutu caurlaidspēja starp konkrētiem tīkla mezgliem, lai novērtētu traucējumu samazināšanas paņēmieni efektivitāti.

Uz diskrētu notikumu balstīti modelēšanas rīki, tādi kā NS-2 un OPNET, ir plaši pielietoti tīkla protokolu izstrādē [29], [119], bet nav piemērotākie, lai novērtētu zemāko tīkla slāņu darbības efektivitāti. Šie rīki imitē pakešdatu pārraidi tīklā, tādēļ datu pārraides ātrums būs mainīgs atkarībā no izvēlēta trafika modeļa, transporta protokola un parametriem un ietvers protokolu virstēriņu u.c. Lai noteiktu datu pārraides ātrumu, katrā scenārijā ir jānosūta pietiekams skaits datu pakešu. Modelēšana ir jāatkārto vairākas reizes ar dažādiem nejauši ģenerētiem trafika modeļiem, lai iegūtu vidējo rādītāju. Tas nav izdevīgi, lai iegūtu rezultātus liela skaita dažādu scenāriju. Vēl viens iemesls, kādēļ tradicionāli tīkla modelēšanas rīki nav pielietojami promocijas darba mērķu sasniegšanai, ir ierobežotas fizikālā slāņa modelēšanas iespējas, piemēram, nav ietverti viedo antenu modeļi.

Alternatīvi var pielietot analītiskas metodes, piemēram, grafu teorijā zināmo maksimālās plūsmas uzdevumu [5], [6], [78], [90], [114]. Pielietojot šo metodi datu pārraides tīklu modelēšanai, pārraides tiek organizētas laikspraugās, nosakot tīkla savienojumu grupas, kuras drīkst darboties vienā laikspraugā. Laikspraugu plānojumu (garumu) atrod tādu, kas nodrošinātu maksimālu datu plūsmas ātrumu starp datu avotu un adresātu, ņemot vērā arī traucējumu modeli. Šī metode ir balstīta uz iedomāta koordinatora esamību tīklā, kas nodrošina ideālu (optimālu) pārraižu plānošanu. Neraugoties uz to, ka iegūtais datu plūsmas ātrums ir teorētisks, tas parāda katram scenārijam labāko sasniedzamo rādītāju jeb caurlaidspēju. Šādi noteikta caurlaidspēja atklāj zemāko OSI slāņu iespējas un ļauj savstarpēji salīdzināt maršrutus neatkarīgi no pārraidāmajiem datiem.

Analītiskā metode ietver lielu skaitu mainīgo lielumu, kas pieaug līdz ar mezglu skaitu scenārijā, tāpēc uzdevumam tiek meklēts skaitlisks rezultāts ar optimizāciju. Optimāla plānojuma atrašana tiek formulēta kā lineāra optimizācijas problēma. Ir nošķiramas vairākas pieejas atkarībā no optimizācijā iekļautajiem parametriem. Vispirms daļa darbu integrē kopā maršrutēšanu (tīkla slānī) ar laikspraugu plānošanu (MAC slānī), optimizācijas rezultātā nosakot arī maršrutus. Pretēja pieeja ir pieņemt, ka maršrutēšana darbojas neatkarīgi un izmanto plūsmu piešķirumu maršrutiem kā optimizācijas ievades parametru [78]. Vēl viens iedalījums – vai katrs tīkla savienojums ir plānots neatkarīgi no citiem, vai arī plānojumu veic neatkarīgām savienojumu kopām, kuras nosaka konfliktu grafs (skat. iepriekš par traucējumu modeli). Pirmajā gadījumā katrā laikspraugā atrod optimālu savienojumu kombināciju [114]. Otrajā gadījumā

kopas ir determinētas un optimizē laikspraugas garumu katrai no tām (cik ilgi kopā ietvertie tīkla savienojumi drīkstēs būt aktīvi) [5], [6], [78], kas ļauj pārbaudīt esošu traucējumu modeļu (t.i., MAC protokolu) ietekmi uz caurlaidspēju. Promocijas darbā ir analizēta starpmaršrutu traucējumu ietekme uz maršrutu izvēles lēmumiem, tādēļ pētījumiem piemērotāka ir laikspraugu garuma optimizācija, paredzot, ka darbojas neatkarīgs maršrutēšanas protokols un tīkla savienojumu kopas nosaka CSMA/CA.

Optimāls laikspraugu garuma plānojums ir meklēts [5], [6]. Balstoties uz konfliktu grafu, sastāda neatkarīgas tīkla savienojumu kopas (pārraidēšanas shēmas darbā [6]), kuru vienlaicīgu pārraidi pieļauj traucējumu modelis. Neatkarīgajām kopām meklē optimālu laikspraugu garuma plānojumu, kas nodrošina lielāko iespējamo datu pārraidēšanas ātrumu starp diviem mezgliem vairākos lēcienos. To formulē kā maksimālās plūsmas lineāru optimizācijas problēmu [5], ar kuru meklē tādu atrisinājumu, kurš maksimizē no datu avota izejošo summāro datu plūsmu. Šajos darbos vairākus maršrutus neanalizē kā atsevišķu gadījumu, bet šāds metodes pielietojums nav izslēgts.

Maksimālās plūsmas problēmas atrisināšana ir piemērota maršrutu caurlaidspējas noteikšanai, jo ļauj katru no avota izejošo datu plūsmu attiecināt uz citu maršrutu. Šādi metode ir pielietota [78], lai noteiktu caurlaidspēju dažādiem maršrutu komplektiem starp datu avotu un adresātu. Tomēr [78] ir izmantots vienkāršs traucējumu modelis, kas balstās uz traucējumu apgabalu viena lēciena attālumā un arī CSMA/CA darbību viena lēciena attālumā, kas neļauj precīzi novērtēt traucējumu ietekmi uz VMP. Promocijas darbā ir pielietota maksimālās plūsmas metode, bet ar pilnveidotu traucējumu modeli.

4.2. Maršrutu caurlaidspējas noteikšana ar lineāru optimizāciju

Promocijas darbā ir izmantota lineāra optimizācija maksimālās plūsmas uzdevumu atrisināšanai, atrodot optimālu laikspraugu garuma plānojumu. Līdzīga metode ir izmantota [5], [6], [78], taču šajā darbā tā ir pilnveidota:

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

Veiktie uzlabojumi ir aprakstīti arī promocijas darba autora publikācijās [115], [120].

Maršrutu caurlaidspējas noteikšanu ar šo metodi var iedalīt vairākos posmos:

- meklē vienlaicīgi atļautās pārraidēšanas, ko nosaka maršruti un traucējumu modelis;
- aprēķina tīkla savienojumu datu pārraidēšanas ātrumu;
- ar lineāru optimizāciju nosaka maksimālu datu plūsmas ātrumu maršrutos.

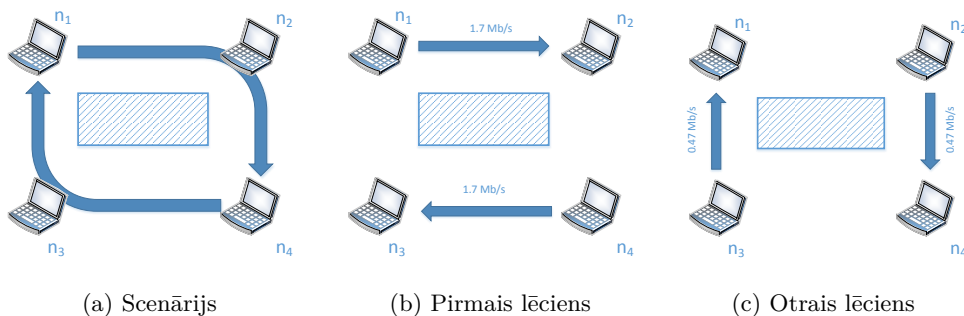
4.2.1. apakšnodaļā ir paskaidroti metodē izmantotie elementi. 4.2.2. apakšnodaļā ir

izklāstīta pārraides shēmu sastādīšana, izmantojot pilnveidoto traucējumu modeli. 4.2.3. apakšnodaļā ir aprakstīti fizikālā slāņa modeļi, kas izmantoti datu pārraides ātruma aprēķināšanai. Visbeidzot noslēgumā ir dots optimizācijas uzdevums.

4.2.1. Metodes pamatelementi

Pārraides shēma. Konkrētā laika momentā tīklā notiekošo aktivitāti raksturo pārraides shēma [6] (citos darbos ir lietots jēdziens “neatkarīga kopa” [5], [78]). Pārraides shēma ir tādu tīkla savienojumu kopa, kuros pieļaujama vienlaicīga datu pārraide, izmantojot doto traucējumu modeli un ievērojot citus protokolu uzliktus ierobežojumus. Grupējot tīkla savienojumus dažādās kombinācijās, var sastādīt visas iespējamās pārraides shēmas, kas promocijas darbā saukta par **pārraides shēmu kopumu**. Secīgi dodot pārraides shēmām piekļuvi kanālam, tiek realizēta daudzlēcienu datu pārraide.

Kā piemērs ir apskatīts scenārijs 4.1a. attēlā ar četriem mezgliem, kur n_1 sūta datus uz n_4 , bet n_4 uz n_1 . Nosacījums ir, ka katram datu kadram ir tikai viens adresāts (uniraide) un mezgls nevar vienlaicīgi raidīt un uztvert (pus-duplekša pārraide). Tā kā pa vidu ir šķērslis, kas ierobežo pārraides attālumu, pārraide notiek divos lēcienos, izmantojot n_2 un n_3 kā relejmezglus. Viena iespējamā shēma ir S_1 (4.2.), kad katrā



4.1. att. Datu pārraides shēmu ilustrācija.

pārraidē tiek veikts pirmais lēciens (4.1b. attēlā). Vienlaicīgi ir aktīvi divi mezglu pāri. Ja ir pus-duplekša pārraides ierobežojums, citi aktīvi pāri šajā shēmā nav iespējami. Nākamajā laika momentā, kad dati starp pirmajiem pāriem ir pārsūtīti, aktīvi būs nākamie divi pāri (4.1c. attēls), kurus raksturo pārraides shēmā S_2 :

$$S_1 = \begin{bmatrix} n_1 \rightarrow n_2 \\ n_4 \rightarrow n_3 \end{bmatrix} \quad S_2 = \begin{bmatrix} n_2 \rightarrow n_4 \\ n_3 \rightarrow n_1 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Konkrētajam scenārijam citas shēmas nebūs iespējamās (ja pārraide ir vienvirziena). Divvirzienu pārraidei, kā arī tīklā ar vairāk mezgliem, shēmu skaits palielināsies.

Datu pārraides ātrums. Maksimālais pārraides ātrums jeb caurlaidspēja, ar kādu var darboties tīkla savienojums, pastāvot traucējumiem no citiem pārraides shēmas tīkla savienojumiem. Modelēšanā pārraides ātrumu nosaka izmantotais fizikālā slāņa modelis, kas plašāk aprakstīts 4.2.3. apakšnodaļā.

Optimāls kanāla laika plānojums. Tā kā mezgli darbojas vienā radio kanālā, tad kanāla laiks starp pārraides shēmām ir jāsadala, katrai no shēmām atvēlot daļu no kopējā laika. To, cik ilgi shēma būs aktīva, var raksturot ar svara koeficientu p , kam spēkā nosacījumi:

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad \sum_{i=1}^k p_i = 1 \quad i = 1 \dots k, \quad (4.3)$$

kur p_i – svara (kanāla laika) koeficients pārraides shēmai ar indeksu i ;
 k – pārraides shēmu skaits.

Šādam laika sadalījumam ir līdzība ar laikdales kanāla piekļuvi (piemēram, TDMA), organizējot pārraidi laikspraugās. Visi shēmā ietvertie tīkla savienojumi piešķirtajā laikspraugā būs aktīvi vienlaicīgi.

Pārraides shēmu svērtā summa veido pilno pārraidi (4.4.). Atkarībā no laika (svara koeficientiem) mainās atsevišķu tīkla savienojumu vidējā caurlaidspēja C :

$$C = \sum_{i=1}^k p_i S_i, \quad (4.4)$$

kur S_i – pārraides shēma ar indeksu i .

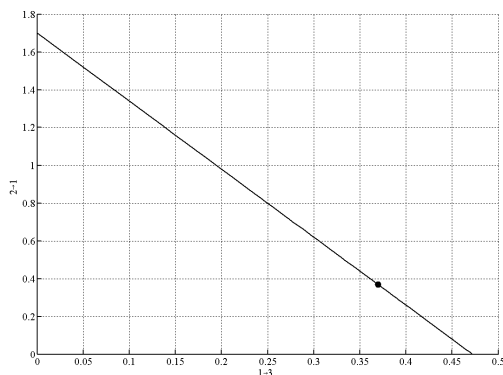
4.1. attēlā dotajam scenārijam, izvēloties laika plānojumu $p_1 = 0.25$ un $p_2 = 0.75$ un izmantojot iepriekš aprēķinātu caurlaidspēju (kā piemērs 4.1b. un 4.1c. attēlā pievienotas iespējamās vērtības), vidējais divu lēcienu pārraides ātrums aprēķināms:

$$C = p_1 S_1 + p_2 S_2 = 0.25 \begin{bmatrix} 0.47 \\ 0.47 \end{bmatrix} + 0.75 \begin{bmatrix} 1.7 \\ 1.7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.39 \\ 1.39 \end{bmatrix} \text{ Mb/s.} \quad (4.5)$$

Jāņem vērā, ka ar šādu plānojumu S_2 shēmas mezgli sūta vairāk datu, nekā tie saņem no kaimiņiem. Tas ir iespējams tikai gadījumos, kad tiem buferatmiņā ir dati vai arī tie paši ir datu avoti.

Dažādi laika plānojumi jeb koeficientu p kombinācijas, kas ir piemērotas pārraides shēmām, veidos tīkla caurlaidspējas reģionu [6], kas parāda caurlaidspējas amplitūdu katram tīkla savienojumam atkarībā no caurlaidspējas citos savienojumos. Reģiona šķēlums savienojumam $n_1 \rightarrow n_3$ un $n_2 \rightarrow n_1$ ir parādīts 4.2. attēlā. Taisne parāda, kā mainās maksimālais datu pārraides ātrums katrā no savienojumiem atkarībā no kanāla

laika, kas tam piešķirts. Punkts parāda vienādu pārraides ātrumu abos savienojumos. Optimizācijas uzdevums ir atrast tādu laika plānojumu, kurš nodrošinātu maksimālu datu pārraides ātrumu visos tīkla savienojumos.



4.2. att. Caurlaidspējas reģiona šķēlums $n_1 \rightarrow n_3$ un $n_2 \rightarrow n_1$.

Metodes pamatelementi ir cieši saistīti ar izstrādāto tīkla kopsakarību modeli (2. nodaļā). Katra atsevišķa pārraides shēma nosaka radio traucējumu līmeni un tīkla savienojumu datu pārraides ātrumu, savukārt pārraides shēmu kopums ar kanāla laika plānojumu parāda MAC sāncensību. Šie elementi kopā, atrodot optimālu plānojumu, nosaka maršruta caurlaidspēju.

4.2.2. Pārraides shēmu sastādīšana

Pārraides shēmas sastāda, balstoties uz nosacījumiem, ko uzliek maršrutēšanas un traucējumu modelis, papildus ievērojot pusdupleksas pārraides nosacījumu. Maršrutēšana nosaka, kuri tīkla savienojumi veido pārraides shēmas, tādēļ apskatīta vispirms.

Maršrutēšanas modelis. Tiek pieņemts, ka maršrutēšanas protokols ir atklājis vairākus maršrutus starp datu avotu un adresātu un izvēlējis komplektu datu pārraidei, kuram jānosaka kopējā caurlaidspēja. Šeit parādās atšķirība no darbiem [5], [6], kur maršrutēšana ir integrēta ar laikspraugu plānošanu un maršrutu nosaka optimāls plānojums. Vēl viens pieņēmums – ārpus maršrutiem datu pārraide nenotiek. Līdzīgi kā [78], pārraides shēmas veido no tiem tīkla savienojumiem, kuri pieder maršrutiem.

Maršrutu komplektam piederošie tīkla savienojumi veido kopu L . Kā piemērs ir

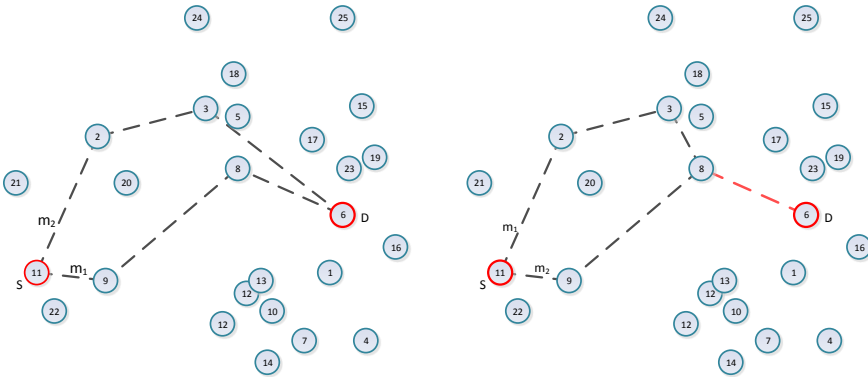
izmantots 4.3a. attēlā parādītais maršrutu komplekts ($M = 2$), kuru apraksta kopa:

$$L = \left\{ \begin{array}{l} n_{11} \rightarrow n_2 \\ n_2 \rightarrow n_3 \\ n_3 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \\ n_9 \rightarrow n_8 \\ n_8 \rightarrow n_6 \end{array} \right\}. \quad (4.6)$$

Pārraidē shēmas veido no kopas L elementiem. Ja pieņem, ka tīklā darbojas bezkonfliktu MAC metode, nodrošinot pārraidē bez traucējumiem, tad kopas (4.6.) ietvertos tīkla savienojumus var sadalīt šādās pārraidē shēmās:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_2 \rightarrow n_3 \\ n_8 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_{11} \rightarrow n_2 \\ n_8 \rightarrow n_6 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_3 \rightarrow n_6 \\ n_9 \rightarrow n_8 \\ n_{11} \rightarrow n_2 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_3 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_2 \rightarrow n_3 \\ n_9 \rightarrow n_8 \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

Sastādītās pārraidē shēmas veido pilnu shēmu kopumu. Netiek pieļautas nepilnas shēmas, kad, piemēram, $n_2 \rightarrow n_3$, raida un tajā laikā citas pārraidē nenotiek. To nosaka vēl viens pieņēmums, ka mezgliem buferatmiņā vienmēr ir dati, kas piešķirtajā laikspraugā tiek nosūtīti ar maksimāli iespējamo datu pārraidē ātrumu. Redzams, ka katrs savienojums parādās vairākās pārraidē shēmās, kas nozīmē, ka tam vairākkārt būs dota piekļuve kanālam.



(a) Mezglu nošķirti maršruti

(b) Koplietots tīkla savienojums.

4.3. att. Divi pārraidē maršruti m_1 un m_2 starp datu avotu n_{11} un adresātu n_6 .

Kopīgi mezgli starp maršrutiem. Līdz šim izmantotās metodes [5], [6] neparedz gadījumus, kad tīkla savienojums ir kopīgs vairākiem maršrutiem. Lai arī [78] apskatītajos scenārijos ir šādi savienojumi, netiek piedāvāta metodika, kā ar tiem rī-

koties optimizācijas uzdevumā. Šāda scenārija piemērs ir 4.3b. attēlā – ar koplietotu savienojumu $n_8 \rightarrow n_6$. Netiek ņemts vērā, ka koplietotā savienojumā tiek pārraidītas divas vai vairākas neatkarīgas plūsmas, kuras pieder dažādiem maršrutiem un katra patērē kanāla laiku datu pārraidei. Minētajās metodēs ir iespējama tikai viena plūsma katrā tīkla savienojumā, kam netiek plānots papildu kanāla laiks.

Promocijas darbā ir rasts risinājums – savienojumu, kurš apvieno vairākas datu plūsmas starp datu avotu un adresātu, iedomāti sadala vairākos savienojumos, katru savai plūsmai. Lai to ieviestu metodē, iekavās ir pievienots attiecīgā maršruta identifikators, jo katra plūsma ir saistīta ar savu maršrutu. Kopa L ar koplietotu savienojumu:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{11} \rightarrow n_2(1) \\ n_2 \rightarrow n_3(1) \\ n_3 \rightarrow n_8(1) \\ n_8 \rightarrow n_6(1) \\ n_{11} \rightarrow n_9(2) \\ n_9 \rightarrow n_8(2) \\ n_8 \rightarrow n_6(2) \end{array} \right\}. \quad (4.8)$$

Koplietots savienojums (4.8.) parādās vairākkārt ar dažādiem identifikatoriem, veidojot atsevišķas vienības, kuras ir nodalītas dažādās pārraides shēmās kā savstarpēji konkurējošas. Šāda pieeja ir korekta, jo reālā tīklā, kamēr tiek pārraidīts datu kadrs no vienas plūsmas, citu plūsmu kadriem jāgaida rindā.

Traucējumu modelis. Pārraides shēmas sastāda no kopas L elementiem atbilstoši traucējumu modelim, kas nosaka, kuri tīkla savienojumi drīkst būt aktīvi vienlaicīgi. Promocijas darbā ir īstenots fizikāls traucējumu modelis (4.1. apakšnodaļā), kas ir balstīts uz CSMA/CA protokola PCS mehānismu (virtuālā nesēja jušana netiek pielietota). Modelis ņem vērā aditīvu traucējumu jaudu no visām pārraidēm. Atšķirībā no modeļa [116] traucējumi ir novērtēti tikai attiecībā pret raidītāju, neuzliekot SINR sliekšņa ierobežojumus uztvērējā. Tas nozīmē, ka pārraides shēmā ir iekļauti tie tīkla savienojumi, kuru vienlaicīgu pārraidi pieļauj PCS, neinteresējoties par SINR līmeni uztvērējā. Šāda pieeja ir pieļaujama, jo radio kanāla caurlaidspēja starp diviem mezgliem tiek noteikta ar Šenona formulu (4.11.), kas ļauj noteikt caurlaidspēju ar jebkuru SINR līmeni uztvērējā. Tas ļauj precīzāk novērtēt MAC protokola ietekmi.

Vienlaicīgi pieļaujamas pārraides nosaka PCS sliekšnis P_{CST} . Pārraides shēmas veido visas iespējamās tīkla savienojumu kombinācijas, kas sastādītas tā, ka summārā traucējumu jauda $P_{\sum I}$, ko jūt katrs no shēmā ietvertajiem raidītājiem, kad citi shēmas raidītāji ir aktīvi, ir zemāka par P_{CST} , papildus ņemot vērā fona troksni P_N :

$$P_{\sum I} + P_N < P_{CST}. \quad (4.9)$$

Papildu nosacījums, ka $P_{PCST} > P_N$, pretējā gadījumā pārraide nebūs iespējama aizņemtā kanāla stāvokļa dēļ. Piemēram, pieņemot, ka PCS nosacītais darbības rādius d_{PCS} (skat. iepriekš 1.4.3. apakšnodaļā) ir lielāks par viena lēciena attālumu,

4.3a. attēla scenārijam atrastā pārraides shēma $\left\{ \begin{array}{l} n_2 \rightarrow n_3 \\ n_8 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \end{array} \right\}$ nav pieļaujama. Pār-

raide $n_2 \rightarrow n_3$ rada pietiekami stiprus traucējumus, lai mezgls n_{11} justu aizņemtu kanālu un līdz ar to pārraidi atliktu. Viens no konfliktējošiem tīkla savienojumiem ir jāizslēdz, līdz ar to palielināsies iespējamo pārraides shēmu skaits. Visu iespējamo pārraides shēmu atrašanai, kad ir spēkā nosacījums (4.9.), ir izveidots efektīvs algoritms, kurš aprakstīts 4.3.4. apakšnodaļā.

Traucējumu modelis var atšķirties, izmantojot viedās antenas. Virziendarbības *ad-hoc* tīkliem PCS var veikt ar virziendarbību un bez tās, kas ietekmēs $P_{\Sigma I}$ noteikšanu, paredzot antenu režģa vērsumu. Pielietojot ZFBF, pietiekama antenu režģa elementu skaita gadījumā PCS nav nepieciešams, jo visi traucējumi ir novērsti.

4.2.3. Datu pārraides ātruma noteikšana

Tālākiem aprēķiniem ir jāpāriet uz datu pārraides ātrumu, ko veic, pārraides shēmām aprēķinot datu pārraides ātrumu un izveidojot datu pārraides ātruma vektoru (līdzīgi kā [6]). Vektors satur informāciju par katra pārraides shēmā ietvertā tīkla savienojuma pārraides ātrumu, pastāvot aditīviem traucējumiem no citiem shēmas savienojumiem. Vektora garums ir vienāds ar aktīvo tīkla savienojumu skaitu jeb kopas L garumu. Aprēķinātā savienojuma caurlaidspēja tiek ierakstīta tajā vektora elementā, kura kārtas numurs sakrīt ar savienojuma atrašanās vietu kopā L . Pārējie vektora elementi, kuri atbilst shēmā neiekļautajiem savienojumiem, ir 0. Šāds pieraksts atvieglos vienādojumu sistēmas sastādīšanu optimizācijas uzdevumam. Izveidotās pārraides shēmas scenārijam 4.3a. attēlā var aizstāt ar zemāk dotajiem datu pārraides ātruma vektoriem $\mathbf{r}$ (uzskatāmībai kreisajā pusē dota aktīvo savienojumu kopa L):

$$L = \left\{ \begin{array}{l} n_{11} \rightarrow n_2 \\ n_2 \rightarrow n_3 \\ n_3 \rightarrow n_6 \\ n_{11} \rightarrow n_9 \\ n_9 \rightarrow n_8 \\ n_8 \rightarrow n_6 \end{array} \right\} \quad \mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \\ r_4 \\ 0 \\ r_6 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_3 = \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \\ r_3 \\ 0 \\ r_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_3 \\ r_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \\ 0 \\ r_5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Katra tīkla savienojuma vidējo caurlaidspēju veido datu ātrumu vektoru svērtā summa, kuras svāra koeficientus nosaka ar optimizāciju.

Datu pārraides ātruma aprēķināšanai starpmezglu radio traucējumu apstākļos ir vajadzīgi fizikālie radio kanāla modeļi. Shēmu, pēc kādas modelē kanāla caurlaidspēju pārraidei ar parastām antenām (SISO pārraide), var pielietot arī viedajām antenām (virziendarbības un MIMO), tādēļ vispirms ir apskatīti modeļi SISO pārraidei.

Radio kanāla caurlaidspēja. Datu pārraides ātrumu, ar kādu var sazināties divi mezgli, pirmkārt, nosaka tehnoloģija un, otrkārt, uztveršanas apstākļi uztvērējā – traucējumu līmenis un derīgā signāla jaudas līmenis. Uztveršanas apstākļus var raksturot ar SINR, kam plaši tiek pielietots empīrisks modelis [6], [116]. SINR γ ir derīgā signāla jauda pret Gausa (fona) trokšņu un starpmezglu traucējumu jaudu summu:

$$\gamma = \frac{P_i^{Tx} G_{ij}}{N_0 B + P_{\Sigma I}}, \quad (4.10)$$

kur P_i^{Tx} – raidītāja jauda mezglam ar indeksu i (derīgais signāls);
 G_{ij} – kanāla pastiprinājuma koeficients starp raidītāju un uztvērēju ar indeksiem i un j ;
 N_0 – fona trokšņa spektrālais blīvums;
 B – frekvenču joslas platums;
 $P_{\Sigma I}$ – summārā traucējošo signālu jauda no citiem mezgliem.

Trokšņu un traucējumu summēšana ir korekta, jo daudzlietotāju sistēmās, tajā skaitā *ad-hoc* tīklā, no daudziem avotiem (mezgliem) pienākoši signāli summējoties aptuveni ir ar Gausa sadalījumu [103]. Citu mezglu radītie traucējumi ir noteicošais traucējumu veids *ad-hoc* tīklā.

Teorētisko pārraides ātruma robežu starp diviem mezgliem nosaka Šenona teorēma (4.11.). Pieņemot, ka traucējumiem ir Gausa sadalījums, SNR var aizvietot ar γ :

$$C = B \log_2(1 + SNR). \quad (4.11)$$

Radioviļņu izplatīšanās modelis nosaka kanāla pastiprinājuma koeficientu SINR modelī (4.10.) starp derīgā signāla raidītāju un uztvērēju un katru traucējumu avotu un uztvērēju. Vienkāršotiem aprēķiniem, abstrahējoties no signālu pārraides, pastiprinājuma koeficientu starp diviem mezgliem i un j nosaka ar kombinēto pārraides ceļa zudumu (*path loss*) un aizēnojuma (*shadowing*) modeli [103]:

$$G_{ij} = \frac{P_j^{Rx}}{P_i^{Tx}} = K S_{ij} G_i G_j \left[\frac{d_0}{d} \right]^\alpha, \quad (4.12)$$

kur P_i^{Tx} – raidītāja jauda mezglam ar indeksu i (derīgais signāls);
 P_j^{Rx} – uztvertā derīgā signāla jauda mezglā ar indeksu j ;
 G_i, G_j – attiecīgi raidītāja un uztvērēja antenas pastiprinājuma koeficients;
 d – attālums starp raidītāju un uztvērēju;
 d_0 – references attālums antenas tālajā laukā;
 α – pārraides ceļa zudumu parametrs;
 S_{ij} – gadījuma rakstura komponente;
 K – konstante, kas atkarīga no antenas parametriem un vidējā G_{ij} .

K vērtību pieņem vienādu ar pārraides ceļa vājinājumu brīvā telpā no avota references attālumā d_0 (4.13.). References attālums tiek ņemts antenas tālajā laukā (iekštelpu bezvadu pārraides sistēmām parasti 1 m):

$$K = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2}, \quad (4.13)$$

kur λ – viļņa garums.

Pārraides ceļa zudumu parametru (*path-loss exponent*) nosaka empīriski, veicot mērījumus konkrētā vietā. Tipiskās vērtības, kas tiek izmantotas modeļēšanas programmās, piemēram, NS-2, ir dotas 4.1. tabulā [4].

4.1. tabula

Empīriski noteiktas pārraides ceļa zudumu parametra vērtības [4]

Vide		α
Ārpus telpām	Brīva telpa	2
	Urbanizēta vide	2,7–5
Iekštelpas	Tiešā redzamībā	1,6–1,8
	Bez tiešās redzamības	4–6

Signālam izplatoties telpā, radio kanāla vājinājums var būt neprognozējami mainīgs ceļā esošu objektu dēļ. Tā kā šādu objektu izmēri un īpašības ir neparedzamas, kanāla pastiprinājuma koeficienta izmaiņas var raksturot ar statistiskiem modeļiem [103], piemēram, ar logaritmisku normālsadalījumu:

$$S_{ij} = 10^{\frac{N_{ij}(\mu, \sigma)}{10}}, \quad (4.14)$$

kur N_{ij} ir gadījuma skaitlis ar matemātisko cerību $\mu = 0$ un empīriski noteiktu dis-

persiju σ robežās 4–12 dB (atkarībā no izplatīšanas vides).

Ja $\alpha = 2$ un $\sigma = 0$, tad formula (4.12.) reducējas par brīvas telpas modeli:

$$G_{ij} = \frac{G_i G_j \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}. \quad (4.15)$$

Virziendarbība. Tā kā virziendarbības gadījumā raidītājs un uztvērējs atrodas tiešā redzamībā, tad kanālu raksturo iepriekš apskatītais SINR modelis (4.10.), ietverot tajā antenu režģa vērsumu. Aptuvenu kanāla caurlaidspējas teorētisko robežu var novērtēt pēc formulas (4.16.) [94], kurā tā ir atkarīga no SNR un virziendarbības pastiprinājuma koeficienta G :

$$C \approx \log_2(1 + SNR \cdot G). \quad (4.16)$$

Pārslēdzamās/vadāmās lapas antenu režģim $G = G_i G_j = N^2$, kur G_i un G_j ir raidītāja un uztvērēja galvenās lapas pastiprinājuma koeficienti; N – režģa elementu skaits. Adaptīvam antenu režģim, novēršot traucējumu no $N - 1$ virzieniem, $G = 4N$. Formula (4.16.) ir spēkā, ja traucējumi no nevēlamajiem virzieniem ir novērsti, kas ne vienmēr ir iespējams. Precīzākiem aprēķiniem izmanto antenu režģa vērsuma diagrammu un radioviļņu izplatīšanās modeli kanāla pastiprinājuma koeficienta noteikšanai.

Kanāla pastiprinājuma koeficientu aprēķina ar SISO pārraides radioviļņu izplatīšanās modeli (4.12.) [98]:

$$P_j^{Rx} = P_i^{Tx} G_{ij} G_i G_j, \quad (4.17)$$

$$G_{ij} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 d_0^2} \left[\frac{d_0}{d} \right]^4, \quad (4.18)$$

kur G_i – antenu režģa pastiprinājuma koeficients mezglā i virzienā pret mezglu j ;
 G_j – pastiprinājuma koeficients mezglā j virzienā pret mezglu i .

Līdzīgi kā derīgajam signālam, aprēķināta arī traucējumu jauda no mezgla k :

$$P_{jk}^{Rx} = P_k^{Tx} G_{kj} G_k G_j, \quad (4.19)$$

kur P_{jk} – uztvertā traucējumu jauda mezglā ar indeksu j no mezgla k ;
 P_k^{Tx} – raidītāja jauda traucējošam mezglam ar indeksu k ;
 G_{kj} – kanāla pastiprinājuma koeficients starp mezgliem k un j ;
 G_k – antenu režģa pastiprinājuma koeficients mezglā k virzienā pret mezglu j ;
 G_j – pastiprinājuma koeficients mezglā j virzienā pret mezglu k .

Antenu režģa pastiprinājuma koeficientu vajadzīgajam virzienam aprēķina ar 3.2.1. apakšnodaļā dotajiem paņēmieniem. Virzienu nosaka pēc zināmām kaimiņmezglu koor-

dinātēm vai izmantojot AoA noteikšanas metodes (promocijas darbā ir izmantotas koordinātes). Pārslēdzamās lapas antenu režģim ir jāņem vērā, cik precīzi maksimums ir vērsts pret vajadzīgo virzienu, ko nosaka pārslēgšanas solis. Svara koeficienti ω parasti ir iepriekš aprēķināti un tos izvēlas no tabulas atbilstošajam virzienam. Ar adaptīvu virziendarbības antenu režģi teorētiski iespējams novērst traucējumus no $N - 1$ virzieniem. Vērsuma iegūšanai var lietot ZF BF metodi. Tomēr pastāv variācijas, vai traucējumus samazina tikai uztvērējā vai vienlaicīgi arī raidītājā, tāpēc izmanto kooperatīvu traucējumu izslēgšanu, kas ir apskatīts apakšnodaļas noslēgumā.

MIMO pārraide. MIMO modeļi daudzlēcienu tīklam, salīdzinot ar virziendarbību, ir sarežģītāki, jo ietver MIMO radio traucējumus. Traucējumu novēršanai starp MIMO datu plūsmām izmanto MIMO ZF BF metodi. Sarežģījumus rada optimālu priekš-/pēcapstrādes koeficientu atrašana vairākiem raidītājs/uztvērējs pāriem, jo modelim vienlaicīgi jāietver gan SM paralēlu datu plūsmu nodrošināšanai, gan BF metodes traucējumu izslēgšanai no kaimiņmezgliem (MIMO SM+BF).

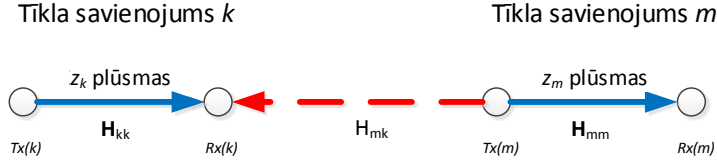
MIMO kanāla caurlaidspējas modeli apraksta formula (3.16.). Vidējais pastiprinājuma koeficients katram apakškanālam ($\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ īpašvērtības Λ), apskatot daudzas kanāla realizācijas, būs nemainīgs [111]. Tas ļauj Λ tuvināti aizstāt ar identitātes matricu un caurlaidspēju aprēķināt pēc (4.20.)[94]:

$$C \approx Bz_k \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{z_k} \right), \quad (4.20)$$

kur z_k – MIMO plūsmu skaits.

Modelis prasa noskaidrot SNR, kas ir atkarīga no radioviļņu izplatīšanās modeļa, un MIMO plūsmu skaitu z_k , kurš daudzlēcienu tīklā ir atkarīgs ne tikai no antenu režģa elementu skaita, bet arī no traucējošu mezglu skaita. MIMO kanāls ir sadalīts vairākos paralēlos SISO apakškanālos, tāpēc katram no tiem pielieto SISO radioviļņu izplatīšanās modeli un kanāla pastiprinājuma koeficientu nosaka pēc formulas (4.17.).

Lai noteiktu MIMO datu plūsmu skaitu z_k , ZF vērsuma formēšanas metodi virziendarbības tīklam (3.2.1. apakšnodaļā) vispārina daudzlēcienu MIMO tīklam, pielietojot to gan raidītājā, gan uztvērējā [111]. Pieņem, ka tīklā ir L vienlaicīgi aktīvu tīkla savienojumu. I_k ir to savienojumu kopums, kuri rada traucējumus uztvērējam $Rx(k)$ savienojumā k . $\mathbf{H}_{mk}$ ir kanāla pārvades matrica traucējumiem starp raidītāju $Tx(m)$ savienojumā m un uztvērēju $Rx(k)$ savienojumā k (4.4. attēlā). Lai nodalītu z_k derīgās plūsmas savienojumā k un izslēgtu traucējumus no savienojuma m traucējošām plūsmām z_m , ir jāatrod priekšapstrādes un pēcapstrādes koeficientu matricas (līdzīgi kā (3.19.)). Saņemtais signāls y_k uztvērējā $Rx(k)$ aprēķināms pēc (4.21.), kur saskaitāmā pirmais loceklis ir derīgā signāla daļa, otrais ir traucējumu daļa, kas jāsamazina, un



4.4. att. Divi konfliktējoši tīkla savienojumi.

trešais ir fona troksnis n_k . Traucējumus izslēdz tādas $\mathbf{U}$ un $\mathbf{V}$ matricas, kad izpildās vienādojums (4.22.)[111]:

$$y_k = \mathbf{U}_k^T \mathbf{H}_{kk} \mathbf{V}_k x_k + \sum_{m \in I_k} \mathbf{U}_k^T \mathbf{H}_{mk} \mathbf{V}_m x_m + n_k, \quad (4.21)$$

$$\mathbf{U}_k^T \mathbf{H}_{mk} \mathbf{V}_m = 0, \quad \forall k, m \in I_k. \quad (4.22)$$

Vienādojuma (4.22.) atrisinājums nodrošina L vienlaicīgi aktīvus tīkla savienojumus beztraucējumu apstākļos.

Lai atrastu optimālu $\mathbf{U}$ un $\mathbf{V}$ kopu visiem L savienojumiem, izpildot nosacījumu (4.22.), ir jārisina bilineāra vienādojumu sistēma, kas praktiski ir neizdevīgi jau trīs vienlaicīgi aktīvu savienojumu gadījumā [111], [121]. “HYB” protokols [107] šo problēmu risina decentralizēti, meklējot antenu režģa koeficientus katrā tīkla mezglā atsevišķi, balstoties uz informāciju tikai par kaimiņmezglu lietotajiem koeficientiem. Šāda pieeja negarantē optimālus koeficientus visā tīklā, kas ir svarīgi, novērtējot *ad-hoc* tīkla teorētisko caurlaidspēju.

Uz brīvības pakāpēm balstīts MIMO modelis. Daudzlēcienu tīkla darbība ir vairāk saistīta ar augstākiem OSI slāņiem, tādēļ teorētiskiem pētījumiem izdevīga ir MIMO modeļu vienkāršošana, abstrahējoties no fizikālajiem BF procesiem. MIMO analīzei daudz-lēcienu tīklā tiek izmantoti uz brīvības pakāpēm balstīti modeļi [94], [107], [111], [118], [121]. Brīvības pakāpes jēdziens ir saistīts ar režģa elementu skaitu un matricas $\mathbf{H}$ rangu, ļaujot režģim ar N elementiem nodrošināt N telpiskās brīvības pakāpes. Mezglā patērē vienu brīvības pakāpi katrai derīgai datu plūsmai un vienu – traucējošas plūsmas izslēgšanai no kaimiņmezgliem. Traucējumu izslēgšanu veic gan raidītāja, gan uztvērēja pusē.

Arī promocijas darbā ir izmantots uz brīvības pakāpēm balstīts MIMO modelis [111], [121]. Šajā modelī MIMO datu plūsmu skaita piešķiršana un traucējumu izslēgšana ir organizēta kooperatīvi mezglu līmenī. Tā vietā, lai risinātu (4.21.) un (4.22.), ir izmantotas matricu $\mathbf{U}$ un $\mathbf{V}$ dimensijas, kas parāda ierobežojumus iespējamajām

brīvības pakāpēm. Secīgi nosakot dimensijas, matricu modeli var reducēt uz brīvības pakāpju modeli.

Kā piemērs ir izmantots 4.4. attēlā parādītais scenārijs ar diviem tīkla savienojumiem k un m . Pirmajā savienojumā ir izmantots 3×3 MIMO SM+BF un otrajā 2×2 MIMO SM+BF, tāpēc attiecīgi $Tx(k)$ un $Rx(k)$ katram ir trīs brīvības pakāpes, bet $Tx(m)$ un $Rx(m)$ – divas, ko nosaka antenu režģa elementu skaits. Vispirms savienojuma m raidītājā $Tx(m)$, neņemot vērā savienojumu k , patvaļīgi izvēlas priekšapstrādes matricu $\mathbf{V}_m$, kas bez ierobežojumiem nodrošina divas datu plūsmas uz $Rx(m)$. Nākamajā solī uztvērējā $Rx(k)$ meklē pēcapstrādes matrica $\mathbf{U}_k$, kas vienlaicīgi izslēdz traucējumus no savienojuma m divām datu plūsmām un ļauj saņemt derīgo datu plūsmas no $Tx(k)$. Lai atrastu $\mathbf{U}_k$, ir jāatrisina matricu vienādojums (4.23.), kur $\mathbf{V}_m$ ir jau zināms:

$$(\mathbf{H}_{mk}\mathbf{V}_m)^T\mathbf{U}_k = 0, \quad \forall k, m \in I_k. \quad (4.23)$$

Vienādojumam ir atrisinājums, ja visi $\mathbf{U}_k$ kolonu vektori atradīsies $(\mathbf{H}_{mk}\mathbf{V}_m)^T$ nulles telpā. Nosakot nulles telpas dimensijas, iegūst iespējamo datu plūsmu skaitu savienojumā k :

$$\dim(\text{null}((\mathbf{H}_{mk}\mathbf{V}_m)^T)) = 3 - 2 = 1. \quad (4.24)$$

Risinājums parāda, ka savienojuma k uztvērējs $Rx(k)$ var saņemt vienu datu plūsmu no raidītāja $Tx(k)$ beztraucējumu apstākļos, patērējot vienu brīvības pakāpi datu plūsmai un divas traucējumu izslēgšanai no savienojuma m . Lai $Tx(k)$ viena datu plūsma netraucētu savienojuma m uztvērējam $Rx(m)$ saņemt paredzētās divas datu plūsmas, ir jāveic traucējumu izslēgšana raidītājā $Tx(k)$ vai uztvērējā $Rx(m)$. Tā kā $Rx(m)$ ir iztērējis visas brīvības pakāpes, traucējumu izslēgšanu veic raidītājā $Tx(k)$. Uztvērējā $Rx(m)$ brīvi izvēlas matricu $\mathbf{U}_m$ un nosaka priekšapstrādes matricu $\mathbf{V}_k$ raidītājā $Tx(k)$:

$$(\mathbf{U}_m^T\mathbf{H}_{km})\mathbf{V}_k = 0, \quad \forall k, m \in I_k \quad (4.25)$$

$$\dim(\text{null}((\mathbf{U}_m^T\mathbf{H}_{km})^T)) = 3 - 2 = 1. \quad (4.26)$$

Darbība (4.26.) ietver to, ka ir patērētas divas brīvības pakāpes traucējumu izslēgšanai (vienu uz katru savienojuma m plūsmu) un viena atliek, lai nodrošinātu datu plūsmu savienojumā k . Veikt abpusēju traucējumu izslēgšanu gan $Tx(k)$, gan $Rx(m)$ nav lietderīgi, jo $Rx(m)$ patērētu brīvības pakāpes, kas citādi ir izmantotas papildu datu plūsmas nodrošināšanai (citos gadījumos traucējumu izslēgšanai uz/no citiem savienojumiem tīklā).

Pēc vienkārša modeļa ir noteikts, ka savienojumā k var nodrošināt vienu datu plūsmu ($z_k = 1$) un savienojumā m – divas datu plūsmas ($z_m = 2$) –, vienlaicīgi novēršot traucējumus, kas veidojas starp šīm plūsmām. Tālāk, pielietojot formulu (4.20.), var

aprēķināt katra savienojuma caurlaidspēju.

No piemēra var redzēt, ka priekš-/pēcapstrādes matricu noteikšana ir veikta secīgi, vispirms atrodot $\mathbf{V}_m$ un tikai pēc tam $\mathbf{U}_k$, lai izslēgtu traucējumus; pēc tam atrod $\mathbf{U}_m$, un visbeidzot – $\mathbf{V}_k$. Tā kā matricas $\mathbf{U}$ un $\mathbf{V}$ ir saistītas ar konkrētiem tīkla mezgliem, tad var sastādīt mezglu secību, kādā ir veikta datu plūsmu piešķiršana un traucējumu izslēgšana:

$$Tx(m) \rightarrow Rx(k) \rightarrow Rx(m) \rightarrow Tx(k). \quad (4.27)$$

Vispārinot uz L savienojumiem, efektīvai brīvības pakāpju izmantošanai jāievēro uz secību balstīta traucējumu izslēgšanas (OBIC) shēma [111], kas nosaka:

- ja mezgls ir raidītājs, tam ir jāizslēdz traucējumi pret uztvērējiem, kuru secības kārtas numurs ir pirms tā;
- ja mezgls ir uztvērējs, tam ir jāizslēdz traucējumi no raidītājiem, kuru secības kārtas numurs ir pirms tā.

Šādu saskaņotu traucējumu izslēgšanu var saukt par kooperatīvu. Optimālu plānojumu, kas nodrošinātu maksimālu kopējo caurlaidspēju, iespējams atrast, mainot (4.27.) secību, kā arī pieļaujamo datu plūsmu skaitu z_k katrā savienojumā (tie ir optimizācijas objekti). Uz brīvības pakāpēm balstīts MIMO modelis ir optimāls, un caurlaidspēja sakrīt ar matricu modeli iegūtu rezultātu [118].

Brīvības pakāpju modelis virziendarbībai. MIMO ietver arī virziendarbības vērsuma formēšanu kā atsevišķu gadījumu, kad, izmantojot adaptīvu antenu režģi, var nodrošināt vienu datu plūsmu, raidītājam un uztvērējam atrodoties tiešā redzamībā (neizmanto SM). Līdz ar to uz brīvības pakāpēm balstītu modeli var izmantot arī virziendarbības modelēšanai *ad-hoc* tīklos. Maksimālais datu plūsmu skaits ir jāierobežo līdz vienai ($z_k = 1$). Attiecīgi matricas $\mathbf{U}$ un $\mathbf{V}$ vienkāršojas par svara koeficientu vektoriem $\mathbf{u}$ un $\mathbf{v}$. Brīvības pakāpju resursi traucējumu izslēgšanai katrā mezglā būs $N - 1$, kuru izlietojumu var organizēt kooperatīvi pēc OBIC shēmas vai abpusēji gan raidītājos, gan uztvērējos. Uz brīvības pakāpēm balstīta virziendarbības modeļa novērtējums salīdzinājumā ar fizikālo modeli veikts 4.3. nodaļā.

4.2.4. Maršrutu caurlaidspējas noteikšana

Maršruta caurlaidspēju nosaka tajā ietilpstošo tīkla savienojumu caurlaidspēja. Tā kā savienojumi ir sadalīti pārraides shēmās, tad uzdevums ir atrast tādu laika plānojumu p pilnam shēmu komplektam, kas nodrošinātu maksimālu datu pārraides ātrumu maršrutos un raksturotu to caurlaidspēju.

Lai atrastu optimālu laika plānojumu (p vērtības), ar lineāru optimizāciju tiek ri-

sināta maksimālās plūsmas problēma, kas nosaka maksimizēt no datu avota izejošās plūsmas. Vairāku maršrutu scenārijam tas nozīmē maksimizēt datu ātrumu tajos savienojumos, kas ietver datu avotu. Tā kā plūsmai maršruta ietvaros jābūt nemainīgai, tad tas automātiski maksimizēs datu ātrumu visos maršrutam piederošajos savienojumos. Uzdevumu var formulēt šādi:

$$\max \sum_{l_{si} \in L} C_{si}, \quad (4.28)$$

kur C_{si} – pārraides ātrums plūsmai no datu avota s uz kaimiņmezglu i .

Papildu nosacījumus veidos tālāk dotā lineāra vienādojumu sistēma. Tiek pieņemts, ka ir izveidotas k pārraides shēmas un noteikti to datu pārraides ātruma vektori.

- 1) Sastāda datu pārraides ātruma vektoru $\mathbf{r}_k$ svērtu summu, kura veido katra tīkla savienojuma kopējo svērtu caurlaidspēju:

$$p_1 \mathbf{r}_1 + p_2 \mathbf{r}_2 \dots p_k \mathbf{r}_k \leq \mathbf{c}, \quad (4.29)$$

$$\text{kur } \mathbf{r}_k = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_{i \rightarrow j} \end{bmatrix} \text{ ir datu ātrumu vektors } k\text{-tai pārraides shēmai, } \mathbf{c} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{i \rightarrow j} \end{bmatrix}$$

ir summārās caurlaidspējas vektors, kura katrs elements satur tīkla savienojuma svērtu caurlaidspējas summu.

- 2) Datu plūsmai katra maršruta m_k ietvaros jābūt vienmērīgai, nodrošinot, ka mezgls neraida vairāk datu, nekā tiek saņemts no kaimiņmezgla.

$$C_{si} = C_{ij} \quad \forall l_{ij} \in L_{m_k}, \quad (4.30)$$

kur L_{m_k} – maršrutus veidojošo tīkla savienojumu kopas L apakškopa maršrutam m_k . Ja visos maršrutos paredz vienādu datu plūsmas ātrumu, nosacījumu (4.30.) vienkāršo:

$$C_{si} = C_{ij} \quad \forall l_{ij} \in L. \quad (4.31)$$

Tas nosaka vienādu datu pārraides ātrumu arī visos maršrutu komplektu M veidojošajos tīkla savienojumos. Ar nosacījumu (4.30.) pastāv iespēja, ka kādā no maršrutiem datu plūsmas ātrums ir 0, ja šāds risinājums nodrošina augstāku summāro datu pārraides ātrumu maršrutu komplektam, tāpēc tālākajā darbā ir izmantots tikai nosacījums (4.31.).

- 3) Kanāla laika sadalījuma koeficientu p_k summai jābūt vienādai vai mazākai par 1:

$$p_1 + p_2 + \dots + p_k \leq 1. \quad (4.32)$$

4) Katra tīkla savienojuma svērtai datu pārraides ātrumu summai jābūt lielākai > 0 :

$$\forall C_{ij} \geq 0. \quad (4.33)$$

Kā piemērs – 4.3a. attēla scenārijam ir formulēts optimizācijas uzdevums (4.34.). Piemērojot nosacījumus (4.29.)–(4.33.) piecām iespējamām pārraides shēmām (traucējumu modelis netiek izmantots), kurām ir aprēķināts datu pārraides ātrums r , ir sastādīta vienādojumu sistēma (4.35.). Ar pierakstu $r_{i \rightarrow j(k)}$ ir jāsaprot tīkla savienojuma $i \rightarrow j$ datu pārraides ātrums pārraides shēmā k :

$$\max (C_{11 \rightarrow 2} + C_{11 \rightarrow 9}), \quad (4.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 + p_2 r_{11 \rightarrow 2(2)} + p_3 r_{11 \rightarrow 2(3)} + 0 + 0 \geq C_{11 \rightarrow 2} \\ p_1 r_{2 \rightarrow 3(1)} + 0 + 0 + 0 + p_5 r_{2 \rightarrow 3(5)} \geq C_{2 \rightarrow 3} \\ 0 + 0 + p_3 r_{3 \rightarrow 6(3)} + p_4 r_{3 \rightarrow 6(4)} + 0 \geq C_{3 \rightarrow 6} \\ p_1 r_{11 \rightarrow 9(1)} + 0 + 0 + p_4 r_{11 \rightarrow 9(4)} + 0 \geq C_{11 \rightarrow 9} \\ 0 + 0 + p_3 r_{9 \rightarrow 8(3)} + 0 + p_5 r_{9 \rightarrow 8(5)} \geq C_{9 \rightarrow 8} \\ p_1 r_{8 \rightarrow 6(1)} + p_2 r_{8 \rightarrow 6(2)} + 0 + 0 + 0 \geq C_{8 \rightarrow 6} \\ C_{11 \rightarrow 2} = C_{2 \rightarrow 3} = C_{3 \rightarrow 6} \\ C_{11 \rightarrow 9} = C_{9 \rightarrow 8} = C_{8 \rightarrow 6} \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 \leq 1 \\ C_{11 \rightarrow 2} \geq 0 \\ C_{2 \rightarrow 3} \geq 0 \\ C_{3 \rightarrow 6} \geq 0 \\ C_{11 \rightarrow 9} \geq 0 \\ C_{9 \rightarrow 8} \geq 0 \\ C_{8 \rightarrow 6} \geq 0 \end{array} \right. \quad (4.35)$$

Atrodot uzdevuma (4.34.) atrisinājumu (optimālās p un C vērtības), ir izrēķināts optimāls laika plānojums un tam atbilstošā maršrutu komplekta caurlaidspēja.

4.2.5. Metodes ierobežojumi

Izrēķinātā maksimālā caurlaidspēja ir iespējama tikai teorētiski, kad ir optimāls kanāla laika sadalījums starp pārraides shēmām, kuru var nodrošināt centralizēti vadāms kanāla piekļuves protokols. *Ad-hoc* tīklā izmantotais CSMA/CA protokols nodrošina nejaušu piekļuvi kanālam, kuru ietekmē savstarpējā mezglu sāncensība un atkāpšanās

taimeris. Līdz ar to pārraides shēmu esamība ir idealizēta un reālā tīklā caurlaidspēja būs zemāka. Neraugoties uz to, metode parāda maršrutu potenciālu, kāds būtu sa-sniedzams, uzlabojot MAC protokolus. Metode apvieno TDMA izmantoto laikspraugu plānošanu ar CSMA/CA telpisko atkalizmantojamību, tāpēc tā ir piemērota viedajām antenām, kuru darbība balstās uz laikspraugām.

Metodē ir pieņēmums, ka piešķirtajā laikspraugā mezgli pārraidi uzsāk uzreiz ar maksimāli iespējamo datu pārraides ātrumu un tā ir nepārtraukta visu laikspraugas garumu. Tas nozīmē, ka mezgliem buferatmiņā vienmēr ir dati, ko raidīt. Šāds pieņē-mums ir svarīgs, jo pārraides shēmām netiek ievērota secība, kādā tās piekļūst kanālam. Tas nav pretrunā ar video pārraidi vairākos maršrutos, kur tiek izmantots pilns tīkla potenciāls. Ierobežoti ir pētījumi scenārijiem, kur parādās fona trafika noslodze ārpus maršrutiem, kas neizmanto pilnu visu kanāla caurlaidspēju.

Laiku, cik ilgi tīkla savienojums aizņem radio kanālu, reālā tīklā nosaka datu kad-ra izmērs. Izmantotajā metodē ir pieņēmums, ka laikspraugu garumu nosaka centrāls koordinators, turklāt vienlaicīgi notiekošās pārraides sākas un beidzas sinhroni. Lai šādi pārraidītu kadrus ar dažādu izmēru, būtu jāveic to fragmentēšana pēc laiksprau-gu garuma.

Promocijas darbā metode ir pielietota caurlaidspējas noteikšanai *ad-hoc* tīklam ar nekustīgiem mezgliem. Darbā [6] ir parādīts, ka metodi var pielietot arī kustīgiem scenārijiem, paredzot mainīgu kanāla vājinājumu. Tajā pašā darbā ir arī noteikts, ka kustīgums palielina vidējo caurlaidspēju, analizējot daudzas kanāla realizācijas.

4.4. apakšnodaļā ir veikta papildu analīze, lai noskaidrotu nosacījumus, kādi ne-pieciešami, lai metodi varētu pielietot *ad-hoc* tīkliem.

4.3. MATLAB rīks *ad-hoc* tīkla modelēšanai

Šajā apakšdaļā ir aprakstītas izstrādātās datorprogrammas, kuru uzdevums ir imi-tēt VMP *ad-hoc* tīklā un noteikt maršrutu caurlaidspēju ar iepriekš aprakstīto ana-lītisko metodi. Izstrādāto datorprogrammu kopums veido tīkla modelēšanas rīku vai-rāku maršrutu pētniecībai un ir atspoguļots arī promocijas darba autora publikācijās [120][122]. Galvenā motivācija šāda rīka izstrādei ir nepieciešamība:

- īstenot datorprogrammā iepriekšējā apakšnodaļā aprakstītos matemātiskos mo-delus un analītisko metodi;
- sagatavot nejaušus scenārijus ar nejaušu laukuma izmēru, mezglu izvietojumu, datu avota un adresāta pāra izvēli, maršrutiem u.c. ievades parametriem;
- ar statistiskiem paņēmieniem apstrādāt lielu skaitu rezultātu;
- izstrādāt algoritmus, kurus nākotnē var integrēt maršrutēšanas protokolos un kognitīvos algoritmos tīkla kvalitātes metriku novērtēšanai.

Promocijas darbā modelēšanas rīks ir pielietots traucējumu samazināšanas paņēmieni novērtēšanai 5. nodaļā, lai noteiktu caurlaidspējas atkarību no maršrutus raksturojošiem parametriem (piemēram, starpmaršrutu attāluma). Papildus ir pārbaudīta analītiskās metodes rezultātu precizitāte salīdzinājumā ar citiem modelēšanas rīkiem.

Apakšnodaļas sākumā ir aprakstīta vispārīga modelēšanas rīka uzbūve. Tālākajās apakšnodaļās metodiski izklāstīta atsevišķu bloku funkcionalitāte, programmas algoritmi un to implementācija, kā arī ieteicamie parametri to pielietošanai.

4.3.1. Vispārīga modelēšanas rīka uzbūve

Rīka galvenie funkcionālie bloki parādīti 4.5. attēlā dotajā shēmā. Bloks shēma attēlo secīgu programmas daļu izpildi, lai nonāktu līdz rezultātam.

Scenārija izveide. Pēc lietotāja dotiem ievades parametriem ģenerē *ad-hoc* tīklu.

Maršrutēšana. Atrod maršrutus starp datu avotu un adresātu un nosaka to raksturīgos parametrus, pēc kuriem atlasa piemērotu komplektu.

Pārraidēšanas shēmu sastādīšana. Katram maršrutu komplektam sastāda iespējamās pārraidēšanas shēmas.

Datu pārraidēšanas ātruma noteikšana. Nosaka datu pārraidēšanas ātrumu shēmās ietvertajiem tīkla savienojumiem.

Viedo antenu modulis. Palīgbloks diviem iepriekšējiem blokiem, lai fizikālā slāņa modeļos ietvertu antenu režģa efektus.

Maksimālā datu plūsmas ātruma noteikšana. Ar lineāras optimizācijas palīdzību nosaka maršrutu komplekta caurlaidspēju.

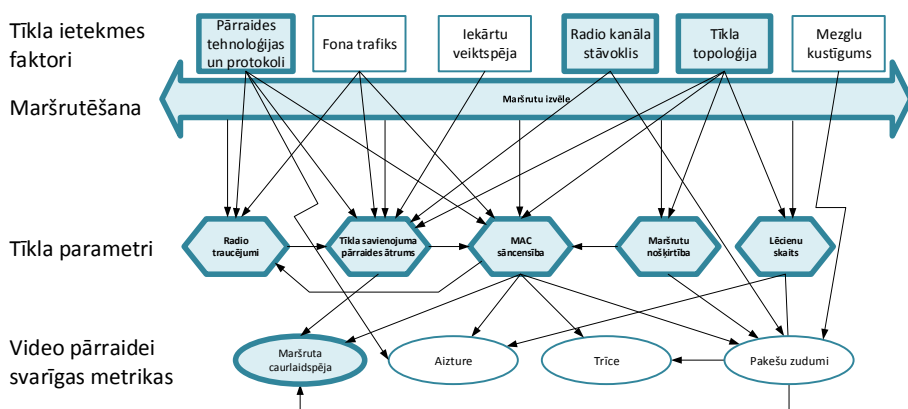
Rezultātu izvade un analīze.

Parametru konvertēšana NS-2 formātā. Palīgbloks scenārija parametru pārveidošanai NS-2 tīkla modelēšanas programmas formātā.

NS-2 modelēšanas rīks. Papildu bloks sasaistei ar NS-2 [4] tīkla modelēšanas programmu rezultātu precizitātes pārbaudei.

Datorprogrammas ir izstrādātas *Mathworks* MATLAB [7] vidē un to kods ir publiski pieejams *GitHub* repozitorijā <https://github.com/cikol/NetMat>. Atsevišķi koda fragmenti ir aizgūti no [6]. Katrs no modelēšanas rīka blokiem realizēts kā viena vai vairākas MATLAB programmas (MATLAB terminoloģijā – funkcijas), kas apvienotas zem vienas galvenās funkcijas (kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/main_tool.m). Katrā galvenās funkcijas izpildes reizē tiek ģenerēts scenārijs ar noteiktu ievades parametru kopumu, tādēļ statistisku rezultātu iegūšanai nepieciešama daudzkārtēja tās izpilde. Funkcijas izpildi var veikt gan lokāli uz personālā datora, gan RTU HPC klasterī, izmantojot *MATLAB Distributed Computing Server* (MATLAB DCS) moduli paralēliem aprēķiniem.

Izstrādātais modelēšanas rīks ir veidots pēc promocijas darbā (2.4. apakšnodaļā)



4.6. att. Tīkla parametru kopsakarību modeļa realizācija.

Papildus ir nepieciešamas atrunas par rīka pielietojamību:

- noteiktā caurlaidspēja ir teorētiska un parāda maršrutu potenciālu;
- mezgli ir izvietoti vienā plaknē (divdimensionāls tīkls);
- mezgli ir nekustīgi;
- viens pārraides kanāls visiem mezgliem gan raidīšanai, gan uztveršanai;
- vienādi raidīšanas un uztveršanas parametri visos mezglos.

4.3.2. Scenārija izveide

Scenārija izveides bloka mērķis ir pēc lietotāja dotajiem ievades parametriem ģenerēt *ad-hoc* tīklu ar nejaušu mezglu izvietojumu un nejauši izvēlētu datu avotu un adresātu. Tālāk ir aprakstīti atsevišķi scenārija izveides posmi.

Ievades parametri. 4.2. tabula apkopo ievades parametrus, kurus definē lietotājs pirms programmas darbības uzsākšanas.

Ievades parametru kopsavilkums

Parametru grupa	Parametrs	Iespējamās vērtības
Pārtraides kanāls	Radio viļņu izplatīšanās modelis	Pārtraides ceļa zudumu modelis [*]
	Pārtraides zudumu parametrs α	2–5
	Frekvence f	2,45 GHz
	Kanāla platums B	20 MHz
Mezgli	Raidīšanas jauda P_{Tx}	0,1 W (20 dbm)
	Uztvērēja jutība P_0	$3,16 \cdot 10^{-11}$ W (-75 dbm)
	Troksnis uztvērēja ieejā P_N	-101 dB ^{**}
Tīkls	Maks. savienojuma attālums d_{Tx}	atkarīgs no citiem parametriem ^{***}
	Laukuma malas garums a	nejaušs, ar vienmērīgu sadalījumu robežās no $2d_{Tx}$ līdz $8d_{Tx}$
	Mezglu skaits n	Atkarībā no laukuma izmēra ^{****}
	Mezglu izvietojums (topoloģija)	nejaušs ar vienmērīgu sadalījumu
MAC	Metode	CSMA/CA; RTS/CTS izslēgts
	PCS darbības rādiuss d_{PCS}	0; d_{Tx} ; $1,5d_{Tx}$; $2d_{Tx}$; $2,5d_{Tx}$ ^{***}
Maršrutešana	Algoritms	SMR[56], AODVM [12], SMR [*]
	Max komplektu skaits	neierobežots
	Maršrutu skaits komplektā	1–4
	Krustojumu skaits	neierobežots
	Koplietotu mezglu skaits	neierobežots
Viedā antena	Elementu skaits N	1–64
	Režīms	virziendarbība vai MIMO
	BF metode	ZF

^{*} S_{ij} komponente radioviļņu izplatīšanās modelī (4.12.) netiek ņemta vērā; aizēnojumā deviācija $\sigma = 0$ dB;

^{**} Siltumtrokšņa jauda uztvērēja ieejā ir aprēķināms pēc formulas:

$$P_N = kTB, \quad (4.36)$$

kur k – Bolcmaņa konstante;
 T – absolūtā temperatūra Kelvīnos;
 B – frekvenču joslas platums.

20 MHz platam kanālam trokšņa jauda ir -101 dBm;

^{***} maksimālo raidīšanas attālumu aprēķina, izmantojot pārtraides kanāla parametrus, uztvērēja jutību un raidīšanas jaudu. Attālumu izsaka no radio viļņu izplatīšanās modeļa

(4.12.), P_j^{Rx} aizstājot ar jutību P_0 :

$$d_{Tx} = \frac{P_i^{Tx} K}{P_0^{\frac{1}{\alpha}}}, \quad (4.37)$$

kur d_{Tx} – maksimālais pārraides attālums;
 P_i^{Tx} – raidītāja jauda;
 P_0 – uztvērējā jutība;
 K – brīvas telpas zudumi 1 m attālumā;
 α – pārraides zudumu parametrs;

**** mezglu skaits ir jāizvēlas tāds, lai nodrošinātu tīkla savienojamību un iespēju izveidot vajadzīgo maršrutu skaitu. Sākotnējo laukumā S izvietojamo mezglu skaitu aprēķina ar empīriski iegūtu formulu:

$$n \approx \frac{a}{(d_{Tx} 0,6)^2}, \quad (4.38)$$

kur n – mezglu skaits;
 a – scenārija laukuma (kvadrāta) malas garums.

Tīkla izveide. Pēc dotajiem ievades parametriem izveido mezglus un izvieto tos tīklā. Papildus nosaka tīkla topoloģijas parametrus (starpmezglu attālums, radio kanāla vājinājums u.c.) un katra mezgla kaimiņmezglus. Tīkla izveides funkcijas algoritms un kodi doti 1. pielikumā.

Datu avota un adresāta pāra izvēle. No visiem tīkla mezgliem nejauši izvēlas datu avotu un adresātu, starp kuriem tiks meklēti maršruti. Lai izvairītos no tuvu esošu mezglu izvēles, attālumam starp tiem d_{sd} jābūt lielākam par noteiktu robežu, piemēram:

$$d_{sd} > \frac{\max(d_{ij})}{1,5}. \quad (4.39)$$

4.3.3. Maršrutēšana

Maršrutēšanas bloka uzdevums ir atklāt vairākus maršrutus starp iepriekš nejauši izvēlēto datu avotu un adresātu, grupēt tos komplektos un noteikt raksturīgos parametrus. Vispirms ir izvēlēts piemērots maršrutēšanas algoritms, kas var nodrošināt pietiekamu maršrutu komplektu dažādību 5. nodaļā veiktajiem pētījumiem. Tālāk ir aprakstīts maršrutēšanas protokola MATLAB modeļa izstrāde.

Maršrutēšanas protokola izvēle. Protokolam ir jāatbilst šādiem nosacījumiem:

- minimāls plūdināšanas virstēriņš, jo no tā atkarīgs modelēšanai nepieciešamais laiks, kas palielinās līdz ar iterāciju skaitu maršrutēšanas ziņojumu pārsūtīšanai;
- jāatrod maksimāli liels maršrutu skaits, lai nodrošinātu maršrutu dažādību;
- statistiski mezgli, līdz ar to nav nepieciešamas procedūras pārrāvumu novēršanai;
- katrā scenārijā datu pārraide notiek starp vienu datu avota un adresāta pāri.

Nepieciešamība pēc zema virstēriņa un apsvērumi, ka maršruti jāatklāj tikai starp diviem mezgliem, liek izvēlēties reaktīvu maršrutēšanas pieeju. MATLAB modeļu izstrādei ir izvēlēti divi VMP protokoli: SMR [56] un AODVM[12]. Pirmais izmanto avotmaršrutēšanas algoritmu, otrais – distances vektora algoritmu. Konkrēto protokolu izvēli var pamatot ar to vienkāršību un zemu virstēriņu. Tālāk izklāstīts maršrutu atklāšanas algoritms katram protokolam, atklājot to stiprās un vājās puses.

SMR protokola pamatā ir DSR protokols, kura algoritms ir izklāstīts 1.2. apakšno daļā. Avotmaršrutēšanas pieeja ir izdevīga ar to, ka visi RREQ ziņojumi, kuri nonāk līdz adresātam, jau satur gatavus maršrutus, no kuriem adresāts var izvēlēties maršrutu komplektu. Lai nodrošinātu maksimāli nošķirtus maršrutus, relejmezgliem nav atļauts atbildēt datu avotam ar RREP ziņojumu, pat ja tiem ir saglabāts maršruta ieraksts uz adresātu. Papildus, lai novērstu maršrutu pārklāšanos, ne visas RREQ kopijas tiek ignorētas. Lai samazinātu virstēriņu, vidējie mezgli pārsūta tās kopijas, kuras pienāk no cita kaimiņa nekā iepriekšējās, kā arī tās, kuru lēcieni skaits nav lielāks par pirmo saņemto RREQ. No otras puses, ierobežojot kopijas, ierobežo maršrutu dažādību, jo tiek atklāts mazāk maršrutu.

AODVM ir modificēts AODV protokols, kas ļauj atrast vairākus mezglu nošķirtus maršrutus. Papildu tradicionālai maršrutēšanas tabulai relejmezglos ir izmantota RREQ tabula. Tā vieta, lai ignorētu RREQ kopijas, tajās ietvertu maršrutēšanas informāciju ieraksta RREQ tabulā. Līdzīgi kā SMR, relejmezgliem nav ļauts atbildēt RREP datu avotam. Adresāts, saņemot RREQ ziņojumu, ģenerē RREP, kuru nosūta datu avotam caur reverso maršrutu. Kad relejmezgls saņem RREP ziņojumu, tas izdzēš no RREQ tabulas ierakstu par kaimiņu, no kura ziņojums ir saņemts, un pievieno ierakstu savai maršrutēšanas tabulai, norādot virzienu uz adresātu. Relejmezgls pēc RREQ tabulas nosaka kaimiņu, caur kuru ir mazākais lēcieni skaits līdz datu avotam, un pārsūta tam RREP ziņojumu. Lai nodrošinātu, ka mezgls nav ietverts vairāk nekā vienā maršrutā, citiem mezgliem “dzirdot” kādu mezglu pārsūtām RREP ziņojumu, tie izdzēš tam atbilstošos ierakstu no RREQ tabulas. Ja relejmezgls, kurš saņem RREP ziņojumu, nevar to pārsūtīt (RREQ tabula ir tukša), tas ģenerē kļūdas ziņojumu un nosūta to kaimiņam, no kura RREP saņemts. Kaimiņš RREP pārsūta citam savam kaimiņam. Avotmezgls katru saņemto RREP apstiprina, nosūtot ziņojumu adresātam.

AODVM teorētiski nodrošinās vēl mazāku virstēriņu nekā SMR, jo relejmezgli pārsūta tikai pirmo RREQ ziņojumu. Ziņojuma kopiju informāciju saglabā RREQ tabulā, kam ir nepieciešami papildu atmiņas resursi. AODVM atšķirībā no SMR atklāj tikai

mezglu nošķirtus maršrutus, kas tiecas būt īsākā ceļa, līdz ar to potenciāla maršrutu komplektu dažādība arī var samazināties. MATLAB īstenoto algoritmu efektivitāte abiem protokoliem ir salīdzināta 4.4. apakšnodaļā.

Lai palielinātu atrasto maršrutu skaitu un potenciāli arī palielinātu maršrutu komplektu dažādību starp vienu datu avota un adresāta pāri, promocijas darbā ir piedāvāts modificēt SMR protokola nosacījumus, pēc kuriem apstrādā RREQ ziņojumus. Tālāk darbā protokola modifikācija ir apzīmēta ar SMR*. Relejmezgls pārsūta RREQ ziņojumu, ja tas ir:

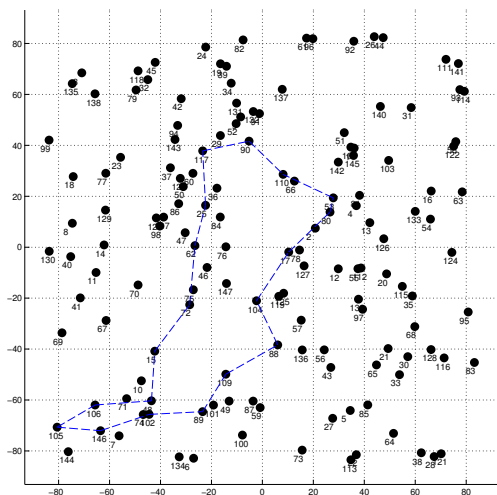
- pirmais saņemtais ziņojums no konkrētā datu avota;
- ziņojuma kopija, un izpildās šādi nosacījumi:
 - mezgls nav iekļauts ziņojuma nestajā maršruta ierakstā (novērš cilpas);
 - maršruta ieraksts nesatur nevienu kopīgo mezglu, neskaitot datu avotu, ar iepriekš pārsūtītajiem maršrutiem RREQ ziņojumiem; lai pārbaudītu nosacījumu, mezgliem buferatmiņā jāglabā visi pārsūtītie maršrutu ieraksti.

Adresāts pieņem visus RREQ ziņojumus, lai maršrutu dažādība būtu lielāka.

Maršrutu atklāšanas algoritma MATLAB modelis. Ir izstrādāti vienkāršoti protokolu modeļi, kas ietver tikai maršrutu atklāšanas algoritmu starp diviem nejauši izvēlētiem mezgliem tīklā, neņemot vērā zemāku slāņu darbību, kā kanāla piekļuvi un datu kadru pārraidi. Apskatītie protokoli izmanto RREQ ziņojuma plūdināšanu tīklā, ko ir grūti īstenot šādā vienkāršotā modelī. Reālā tīklā sūtītāju un ziņojuma izsūtīšanas momentu nosaka MAC protokols. Izveidotais modelis ir balstīts uz nejaušu mezglu izvēli: no visiem mezgliem, kam atmiņā buferī ir ziņojums, algoritms nejauši izvēlas vienu, kam ir atļauts pārsūtīt ziņojumu saviem kaimiņiem. Tiek ņemts vērā, ka katram mezglam ir pilns saraksts ar saviem kaimiņiem. MATLAB funkciju algoritmi un kodi realizētajiem SMR, SMR* un AODVM protokoliem parādīt 2. pielikumā.

Maršrutu komplektu izveide. Izpildot maršrutēšanas programmu ar vienu vai otru algoritmu, ir atrasti maršruti, kurus grupē dažādās kombinācijās, lai sastādītu maršrutu komplektus. Maršrutu komplekts ir derīgs, ja maršruti nekrustojas un kopīgo mezglu skaits starp maršrutiem nepārsniedz noteiktu robežu. Ja atrasto maršrutu skaits ir mazāks par maršrutu komplekta izveidei nepieciešamo vai arī nav neviena komplekta, kas apmierina dotos kritērijus, programmas darbību atkārtoti no scenārija uzstādīšanas posma, izvēloties citu datu avota un adresāta pāri.

Scenārija piemērs ar nejauši izvēlētiem 147 mezgliem, kurā atrasts divu maršrutu komplekts starp mezgliem n_{105} un n_{90} , dots 4.7. attēlā. Raidīšanas attālums ir 23,4 metri.



4.7. att. Tīkla piemērs ar diviem maršrutiem.

Maršrutu raksturošana un atlase. Nosaka maršrutu komplektu raksturojošus parametrus, kurus izmanto piemērotu maršrutu atlasei:

- attālums starp datu avotu un adresātu (lēcienos), kuru nosaka īsākais maršruts starp abiem;
- maršrutu skaits komplektā;
- vidējais komplekta lēcienu skaits;
- kopīgu mezglu skaits;
- telpiskā nošķirtība jeb starpmaršrutu attālums.

No uzskaitītajiem vissarežģītāk ir noteikt starpmaršrutu attālumu, jo maršrutu komplekta ģeometrija ir sarežģīta un nav vienotas pieejas, kā to mērīt. Tā kā mezglu koordinātes ir zināmas, promocijas darbā izmantota metode Eiklīda starpmaršrutu attālumu noteikšanai [79]. Reālā tīklā tās pielietošana prasītu ar pozicionēšanas sistēmu aprīkottus mezglus. Attālumu $d_{m_1 m_2}$ starp maršrutiem m_1 un m_2 var aprēķināt, nosakot vidējo attālumu starp abus maršrutus veidojošajiem mezgliem (4.40.). Attālums d_{im_2} starp mezglu i maršrutā m_1 un maršrutu m_2 ir vienāds ar minimālo attālumu, kas ņemts no visiem attālumiem starp i un katru maršruta m_2 mezglu j (4.41.):

$$d_{m_1 m_2} = \frac{\sum_{i \in m_1} d_{im_2}}{n_h(m_1)}, \quad (4.40)$$

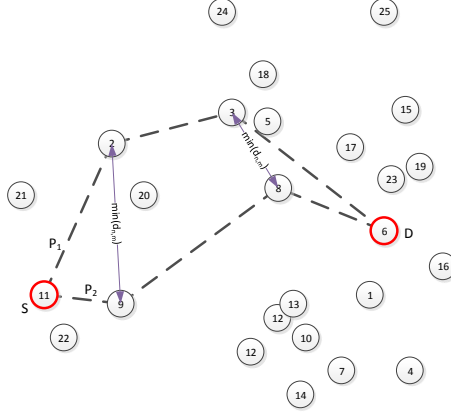
$$d_{im_2} = \min_{j \in m_2} (d_{ij}), \quad (4.41)$$

kur $n_h(m_1)$ – lēcienu skaits maršrutā m_1

Ja maršruti nav simetriski, tad starpmaršrutu attālumu aprēķina pēc (4.42.). Vislielāko

telpisko nošķirtību nodrošina tāds maršrutu komplekts, kuram Γ ir vislielākais:

$$\Gamma(m_1, m_2) = \frac{d_{m_1 m_2} + d_{m_2 m_1}}{2} \quad (4.42)$$



4.8. att. Starpmaršrutu attālums, ko veido minimālie attālumi starp mezgliem.

Metode ļauj novērtēt attālumu divu maršrutu scenārijiem, tāpēc, lai noteiktu starpmaršrutu attālumus komplektam ar lielāku maršrutu skaitu, tas ir mērīts starp ārējiem maršrutiem (pieņemot, ka maršruti nekrustojas). Tas parāda komplekta vidējo starpmaršrutu attālumu, jo attālumu summa starp katriem diviem blakus maršrutiem ir vienāda ar ārējo starpmaršrutu attālumu. Atsevišķi var noteikt arī minimālo starpmaršrutu attālumu, lai raksturotu pašus tuvākos maršrutus.

4.3.4. Pārraidē shēmu sastādīšana

Bloka uzdevums ir sastādīt pārraidē shēmas maršrutu komplektam M , kuru veido tīkla savienojumu kopa L . To veic, balstoties uz 4.2.2. apakšnodaļa izklāstīto aditīvo traucējumu modeli, kas imitē CSMA/CA protokola darbību.

Visu iespējamo pārraidē shēmu atrašana ar nosacījumu (4.9.) 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 atkārtojot līdz nevienam savienojumam ievietot vairs nevar. Tad veido nākamo shēmu, kamēr visas iespējamās shēmas atrastas. Uzdevumu aprūpina vairāki tālāk uzskaitītie apstākļi.

- Ir nepietiekami pārbaudīt, vai pārraidē shēmā iekļaujamais savienojums nekon-

fliktē ar kādu jau tajā iekļauto savienojumu (konfliktu grafa pieeja [5], [78]). 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.

Pilns algoritms un MATLAB funkcijas kods parādīti 3. pielikumā.

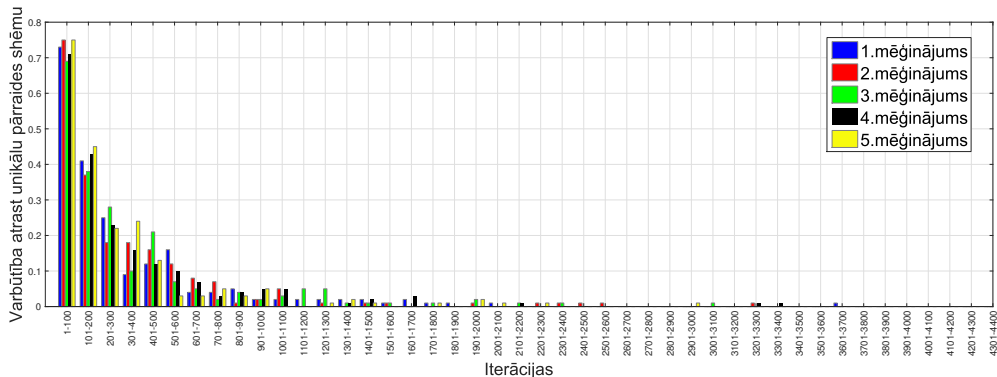
Programmas laikietilpīgākā daļa ir jaunizveidotas shēmas salīdzināšana ar iepriekš atrastajām. To var veikt, piemēram, ar MATLAB iebūvēto funkciju `setxor` jeb kopas izslēdzošo “vai”. Izpildot komandu `setxor(S1,S2,'rows')`, tiks izvadīti tie tīkla savienojumi (matricas rindas), kuri pārraides shēmām S_1 un S_2 nav kopīgi. Ja funkcijas izpilde dod tukšu kopu, S_1 un S_2 ir vienādi. Lai atrastu shēmas 4.7. attēla scenārijam, vidēji ir nepieciešamas 1100 iterācijas jeb mēģinājumi sastādīt jaunu pārraides shēmu. Lai pārbaudītu, vai jaunā shēma ir unikāla, ir izmantots cikls, kas pēc kārtas to salīdzina ar visām iepriekš atrastajām. Šajā ciklā funkcija `setxor` ir izsaukta 61399 reīzu (ciklu pārtrauc, ja ir atrasta sakritība), patērējot 97,5% no programmas kopējā izpildei nepieciešamā laika (62,5 sekundēm). Lai šo procesu paātrinātu, salīdzināšanu veic nevis kopas elementiem, bet tās raksturojošiem identifikatoriem. Var iegūt kopas jeb pārraides shēmas identifikatoru, summējot tajā ietverto mezglu indeksus. Piemēram,

shēmas $S \left\{ \begin{array}{l} n_{88} \rightarrow n_{104} \\ n_{90} \rightarrow n_{110} \\ n_{105} \rightarrow n_{106} \end{array} \right\}$ identifikators ir $88 + 90 + 105 + 104 + 110 + 106 = 603$. Tā

kā pastāv iespējamība, ka identifikators var sakrist arī atšķirīgām shēmām, papildus var pielietot funkciju `setxor`, lai salīdzinātu tikai kopas ar vienādiem identifikatoriem. Iepriekš apskatītajā piemērā, izmantojot uz identifikatoriem balstītu meklēšanu, `setxor` ir izsaukts 1375 reizes, patērējot 46,4% no kopējā izpildes laika, kas ir samazinājies līdz 3,3 sekundēm. Pielietojot sarežģītāku algoritmu, var iegūt unikālu identifikatoru katrai shēmai, kas detalizētāk netiek apskatīts. Izstrādātajā programmas kodā funkcija `setxor` ir aizstāta ar ātrdarbīgāku algoritmu (3. pielikumā dotajā saitē).

Visu shēmu atrašanas ticamība atkarīga no meklēšanas iterāciju skaita. Tā kā pārraides shēmas veido nosacījumus optimizācijas problēmai, nepilnīgs shēmu kopums samazina rezultātu precizitāti (samazinās caurlaidspēja). Par to, ka ir atrastas visas shēmas, liecina vairākkārtēja tādu iterāciju atkārtošāns, kurās neviena jauna shēma netiek atrasta. 4.9. attēlā parādīta varbūtība atrast unikālu shēmu atkarībā no iterā-

ciju skaita (iterācijas ir sadalītas intervālos pa 100). Ir izmantoti dati par 4.7. attēla scenāriju ar 19 aktīviem tīkla savienojumiem, un nosacītais PCS apgabala rādiuss ir $2d_{Tx}$. Shēmu meklēšana ir atkārtota 5 reizes, iegūstot atšķirīgus rezultātus, ko parāda dažādu krāsu joslas 4.9. attēlā.



4.9. att. Varbūtība atrast unikālu pārraides shēmu atkarībā no meklēšanas iterāciju skaita.

Optimāls meklēšanas iterāciju skaits, kad programmas darbību var apturēt, ir noteikts empīriski. Grafikā redzams, ka aptuveni pēdējās 500 iterācijas visos meklēšanas mēģinājumos ir bijušas neveiksmīgas un ar augstu ticamību ir atrastas visas shēmas. Nepieciešamo iterāciju skaits ir atkarīgs no L kopas izmēra, tādēļ tālākos pētījumos meklēšana ir pārtraukta, kad neveiksmīgo iterāciju skaits ir sasniedzis $25 \times num(L)$.

4.3.5. Datu pārraides ātruma noteikšana

Bloka uzdevums ir aprēķināt datu pārraides ātrumu iepriekšējā solī atrasto pārraides shēmu ietvertajiem tīkla savienojumiem. To saglabā datu pārraides ātruma vektoros, kuri veido nosacījumus optimizācijas problēmai. MATLAB funkcijas algoritms dots 4. pielikumā.

Lai veiktu traucējumu izslēgšanu un MIMO pārraidi, papildus ir izmantots **viedo antenu programmas bloks**. Bloka uzdevums ir noteikt antenu režģa ietekmi uz radio kanāla pastiprinājuma koeficientu starp mezgliem pārraides shēmā, kā arī pieļaujamo MIMO datu plūsmu skaitu katrā tīkla savienojumā. To nodrošina ar vairākām bloka funkcijām:

- traucējumu izslēgšanas shēmu kooperatīvai traucējumu novēršanai;
- vērsuma formēšanu traucējumu izslēgšanai;
- MIMO telpisko multipleksēšanu MIMO datu plūsmu iegūšanai.

Viedo antenu bloku izsauc datu pārraides ātruma vektoru aprēķināšana laikā, ja režģa elementu skaits $N > 1$. Pielietojot vadāmās lapas antenu režģi, šo bloku var izmantot,

lai īstenotu virziendarbības PCS pārraides shēmu sastādīšanai.

Traucējumu izslēgšanas shēma nosaka kārtību, kādā mezgli izslēdz traucējumus viens pret otru. Traucējumu izslēgšana tiek organizēta pārraides shēmas ietvaros. Izstrādātais rīks paredz divus režīmus:

- “duplekss” – traucējumu izslēgšana ir abpusēja (katrs raidītājs izslēdz traucējumus pret visiem traucētajiem uztvērējiem un otrādi);
- OBIC – ir izmantota OBIC shēma [111], kas nosaka traucējumu izslēgšanu tikai vienā radio kanāla pusē (vai nu raidītājā pret traucēto uztvērēju vai uztvērējā pret traucējošo raidītāju); šo režīmu izmanto, ja raidītājā/uztvērējā traucējumu izslēgšanai ir lietota ZF BF metode.

Lai īstenotu OBIC, pārraides shēmā ietvertie mezgli (gan raidītāji, gan uztvērēji) ir jāsakārto noteiktā secībā, jo katram mezglam noteiks, pret kuriem citiem mezgliem traucējumi būs jāizslēdz. Pašu secību arī var optimizēt, bet tas promocijas darbā nav apskatīts un secība ir nejauša. Funkcijas algoritms parādīts 5. pielikumā.

Vērsma formēšana. Lai noteiktu antenas vērsumu starp katriem diviem pārraides shēmas mezgliem, izmanto 4.2.3. apakšnodaļā aprakstītās vērsma formēšanas metodes un papildus ņem vērā traucējumu izslēgšanas shēmu. Optimālos svara koeficientus atrod tāds, lai virzītu vērsma maksimumu pret derīgo raidītāju/uztvērēju un minimumu pret pārējiem mezgliem. Ir nodrošināti vairāki virziendarbības vērsma formēšanas režīmi, kas ietekmēs precizitāti, ar kādu minimumi ir vērsti pret traucējošajiem virzieniem:

- vadāmās lapas antenu režģis raidītājā un uztvērējā;
- vadāmās lapas antenu režģis raidītājā un adaptīvs režģis uztvērējā, kas nodrošina traucējumu izslēgšanu ar ZFBF metodi;
- adaptīvs antenu režģis gan raidītājā, gan uztvērējā.

Alternatīvi ZF vērsma formēšanas metodei, ar kuru meklē antenu režģa elementu svara koeficientus (tālāk saukta par fizikālo modeli), līdzīgi kā MIMO var pielietot uz brīvības pakāpēm balstītu metodi (4.2.3. apakšnodaļā). Tā nosaka, ka mezgls ar N elementu antenu režģi nodrošina $N - 1$ brīvības pakāpes traucējumu izslēgšanai pret $N - 1$ virzieniem, uz katru virzienu patērējot vienu brīvības pakāpi. Uz brīvības pakāpēm balstīta modeļa precizitāte salīdzinājumā ar fizikālo modeli ir pārbaudīta 4.4. apakšnodaļā. MATLAB funkciju algoritmi un kodi abiem virziendarbības vērsma formēšanas variantiem parādīti 5. pielikumā.

MIMO. Ir īstenots 4.2.3. apakšnodaļā aprakstītais uz brīvības pakāpēm balstīts MIMO modelis, kas nosaka paralēlo datu plūsmu skaitu, veicot darbības ar brīvības pakāpēm. Traucējumu izslēgšanu veic ar iepriekš doto brīvības pakāpju virziendarbības

modeli un OBIC shēmu. Ja pie vienas MIMO datu plūsmas katrā tīkla savienojumā nav iespējams izslēgt visus traucējumus, vairāk MIMO datu plūsmu netiek piešķirts un visi mezgli darbojas virziendarbības vērsuma formēšanas režīmā. Tīkla savienojumam piešķir papildu MIMO datu plūsmas, ievērojot šādus nosacījumus:

- ja raidītājam un uztvērējam ir pietiekami brīvības pakāpju, lai to nodrošinātu un vienlaicīgi izslēgtu traucējumus uz citu savienojumu datu plūsmām;
- ja šī plūsma nerada vairāk traucējumu, kā kaimiņmezgli spēj izslēgt ar sev pieejamām brīvības pakāpēm (ir nodrošināti beztraucējumu apstākļi);
- lai nodrošinātu iepriekšējos punktus, datu plūsmu skaits katrā savienojumā tiek palielināts pakāpeniski pa vienai, ejot cauri visiem savienojumiem pārraides shēmā.

Atšķirībā no [111], kur piedāvāts optimāls risinājums visa tīkla ietvaros, promocijas darbā izmantotā metode paredz datu plūsmu sadalījumu tikai pārraides shēmas ietvaros.

MATLAB funkciju algoritmi un kods MIMO realizācijai parādīts 5. pielikumā.

Virziendarbības fiziska nesēja jušana. Virziendarbības PCS ir nodrošināts tikai ar vadāmas lapas antenu režģi raidītājā. Kanāla “klausīšanās” notiek ar vērsumu, kuru nosaka raidītāja antenu režģa vērsuma diagramma, galveno lapu vērsot pret plānoto datu saņēmēju.

4.3.6. Maršrutu caurlaidspējas noteikšana

Bloka uzdevums ir atrast tādu laika plānojumu pārraides shēmām, kas nodrošinātu maksimālu kopējo caurlaidspēju. Izpildes rezultātā tiek izvadīta summārā maršrutu komplekta caurlaidspēja.

Ir izmantota lineāra optimizācija maksimālas plūsmas uzdevuma (4.28.) atrisināšanai (aprakstīts 4.2.4. apakšnodaļā). Pēc nosacījumiem (4.29.)–(4.33.), izmantojot noteiktos datu pārraides ātruma vektorus, sastāda lineāru vienādojumu sistēmu. Nosacījumus (4.30.) vai (4.31.) izvēlas atkarībā no tā, vai visos maršrutos datu plūsmas ātrums ir vienāds, vai arī tas var atšķirties, tādā gadījuma meklējot maksimālo summāro plūsmu.

MATLAB funkcijas kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/max_flow.m. Lineāra optimizācijas uzdevuma atrisināšanai ir izmantots no MATLAB ārējs programmatūras modulis *Mixed Integer Linear Programming solver (lpsolve)* [123].

4.4. Metodes un izstrādātā rīka novērtēšana

Šajā apakšnodaļā ir pārbaudīta analītiskās metodes un uz tās balstītā MATLAB rīka pielietojamība, kā arī savstarpēji salīdzināti algoritmu varianti: *a)* maršrutu atklāšanai; *b)* kooperatīvas traucējumu izslēgšanai. Papildus ir novērtēta modelēšanas rīka un tā algoritmu ātrdarbība.

4.4.1. Rezultātu ticamība

Lai pārbaudītu analītiskās metodes un izstrādātā modelēšanas rīka sniegto rezultātu ticamību, ir veikta salīdzināšana ar NS-2 tīkla modelēšanas rīku. Tās mērķis ir noskaidrot, vai uz optimizāciju balstīta tīkla modelēšana var aizstāt tradicionālus tīkla modelēšanas rīkus maršrutu potenciālai novērtēšanai. NS-2 ir ņemts par etalonu, jo tā ir akadēmiskajā vidē plaši lietota aptvertā koda programmatūra [119]. Salīdzināšana ir veikta, vienu un to pašu scenāriju izpildot gan izstrādātajā rīkā, gan NS-2 un iespēju robežās izmantojot tos pašus raidīšanas un tīkla topoloģijas parametrus. Rezultātu atšķirība pieļaujama tikai absolūtajās caurlaidspējas vērtībās, bet ne kopējās tendencēs, novērtējot rezultātu korelāciju.

NS-2 ievades failus sagatavo automātiski, konvertējot *ad-hoc* tīkla parametrus starp MATLAB un NS2 formātu. Modelēšanā ir izmantoti NS-2 PHY un MAC modeļu paplašinājumi (*PhyExt* un *MacExt*), kas ļauj modelēt IEEE 802.11g tīklus ar aditīvu fizikālo traucējumu modeli [124]. Modelēšanā izmantotie NS-2 iestatījumi parādīti 6. pielikumā. Lai imitētu video pārraidi, maršrutos sūta CBR datu plūsmu, kurai izmanto UDP transporta protokolu (paketes izmērs – 512 baiti). Analizējot NS-2 izvades (*trace*) failu, nosaka veiksmīgi saņemto datu apjomu laika vienībā un aprēķina datu pārraides ātrumu. Caurlaidspēju nosaka, pakāpeniski (ik pēc 1 sekundes) palielinot datu plūsmas pārraides ātrumu maršrutos līdz robežai, kad sākas tīkla pārblīve. Pārblīvi liecina pakešu zudumi, kuriem pārsniedzot noteiktu sliekšni (zudušo pakešu skaits >1%) fiksē maksimālo datu pārraides ātrumu (caurlaidspēju). Katru scenāriju atkārto vairākas reizes, lai noteiktu vidējo vērtību.

Rezultātu atbilstība starp abām modelēšanas vidēm var būt atkarīga no ievades parametru izvēles, tādēļ ir noskaidrota atsevišķu parametru pieļaujamā vērtību amplitūda. Ņemot vērā, ka rīka plānotais pielietojums ir starpmaršrutu traucējumu pētīšana, pirmkārt, svarīgi ir noskaidrot pieļaujamo PCS sliekšņa amplitūdu. Piecas PCS sliekšņa vērtības (izteiktas kā nosacītais attālums: $d_{PCS} = d_{Tx}$; $d_{PCS} = 1,5d_{Tx}$; $d_{PCS} = 2d_{Tx}$; $d_{PCS} = 2,5d_{Tx}$; $d_{PCS} = 4d_{Tx}$) ir pārbaudītas kombinācijā ar vairākiem citiem parametriem.

- Divas pārraides zudumu parametra α vērtības: brīva telpa $\alpha = 2$ un absorbējoša

$\alpha = 4$. Katrai no tām ir cits maksimālais pārraides attālums, attiecīgi $d_{Tx} = 548$ m un $d_{Tx} = 23,4$ m.

- Attālums starp datu avotu un adresātu d_{sd} (metros), sadalot pārbaudāmo vērtību apgabalu ($2d_{Tx}$ līdz $8d_{Tx}$) trīs intervālos.
- Trīs dažādās fona trokšņa jaudas vērtības: -91, -101, -111 dBm.

4.10. attēlā parādīti izrēķinātie korelācijas koeficienti starp MATLAB rīka un NS2 aprēķināto caurlaidspēju ar dažādām ievades parametru kombinācijām. Atsevišķi rezultāti tiek iegūti, ja $\alpha = 2$ (4.10a.) un ja $\alpha = 4$ (4.10b.). Kopā iegūti rezultāti no vairāk nekā 1700 dažādiem scenārijiem ar nejauši izvēlētu laukuma izmēru un attālumu starp datu avotu un adresātu, kā arī dažāda maršruta skaita komplektā (no 1 līdz 4). Ar zaļo krāsu ir attēlotas tās ievades parametru kombinācijas, kurām korelācijas koeficients ir $\geq 0,5$.

Pārraides zudumu parametrs $\alpha=2$; $d_{Tx}=548$ m					Pārraides zudumu parametrs $\alpha=4$; $d_{Tx}=23.4$ m				
PCS darbības rādiuss	Troksnis (dBm)	Attālums starp datu avotu un adresātu			PCS darbības rādiuss	Troksnis (dBm)	Attālums starp datu avotu un adresātu		
		814-2375 m	2375-3936 m	3936-5497 m			26-92 m	92-158 m	158-224 m
548 m	-111	-0.20	-0.78	-0.07	23.4 m	-111	-0.26	-0.37	0.00
	-101	-0.31	-0.79	-0.02		-101	-0.35	-0.53	-0.13
	-91	-0.41	-0.77	-0.20		-91	-0.40	-0.54	-0.15
821 m	-111	0.56	0.00	0.54	35.1 m	-111	0.53	0.45	0.35
	-101	0.53	0.01	0.53		-101	0.62	0.26	0.32
	-91	0.49	-0.01	0.55		-91	0.38	0.33	0.44
1095 m	-111	0.88	0.69	0.72	46.8 m	-111	0.88	0.70	0.72
	-101	0.89	0.66	0.76		-101	0.91	0.74	0.68
	-91	0.90	0.68	0.79		-91	0.92	0.75	0.81
1369 m	-111	0.91	0.63	0.86	58.5 m	-111	0.94	0.69	0.80
	-101	0.93	0.67	0.86		-101	0.96	0.76	0.82
	-91	0.96	0.77	0.90		-91	0.96	0.57	0.53
2190 m	-111	0.99	0.79	0.79	93.6 m	-111	0.99	0.93	0.90
	-101	0.99	0.85	0.84		-101	0.99	0.97	0.94
	-91	0.99	0.97	0.94		-91	NaN	NaN	NaN

(a) Zudumu parametrs $\alpha = 2$, $d_{Tx} = 548$ m (b) Zudumu parametrs $\alpha = 4$, $d_{Tx} = 23,4$ m

4.10. att. Korelācija starp MATLAB rīka un NS-2 sniegtajiem rezultātiem.

Iegūtie rezultāti ļauj izdarīt šādus secinājumus.

- Ir izteikta korelācija vairumā gadījumu un abām α vērtībām tā ir līdzīga.
- Arī attālumam starp datu avotu un adresātu nav izteiktas ietekmes, tomēr ne daudz augstāku sakritību sniedz scenāriji ar lielāku attālumu.
- Fona trokšņa līmenim nav izteiktas ietekmes, kaut gan, izvēloties tā vērtību, jāņem vērā PCS sliekšnis. Ja d_{PCS} tieksies uz bezgalību, tad pārraide nenotiks vispār, jo fona troksnis būs pietiekams, lai pārsniegtu PCS sliekšni (to var novērot, ja troksnis ir -91 dBm un ir liels d_{PCS}). Savukārt, ja d_{PCS} tieksies uz 0, tad SINR būs zem sliekšņa veiksmīgai pārraidei pat ar vismazāko datu pārraides ātrumu. Tālākiem pētījumiem ir izmantots -101 dBm trokšņa jaudas līmenis.
- Lielāks PCS ietekmes apgabala rādiuss $\geq 2d_{Tx}$ nodrošina augstāku rezultātu sakritību. Liels PCS rādiuss nav lietderīgs samazinātas telpiskās atkalizmanto-

jamības dēļ, tādēļ tālākos pētījumos ir izmantota empīriski noteikta optimālā vērtība $\approx 2d_{Tx}$.

- Vāja korelācija ir starp rezultātiem, kas iegūti ar NS-2 un MATLAB rīku, kad ir mazs PCS apgabala rādiuss. Tas liecina par analītiskajā metodē izmantotā traucējumu modeļa nepilnību šādiem gadījumiem. Reālos apstākļos kolīziju līmenim būtu jāpieaug, bet analītiskā metode to neietver.

Atrastie optimālie ievades parametru vērtību diapazoni ir pielietoti tālākajos pētījumos.

4.4.2. Virziendarbības vērsuma formēšanas modeļu salīdzināšana

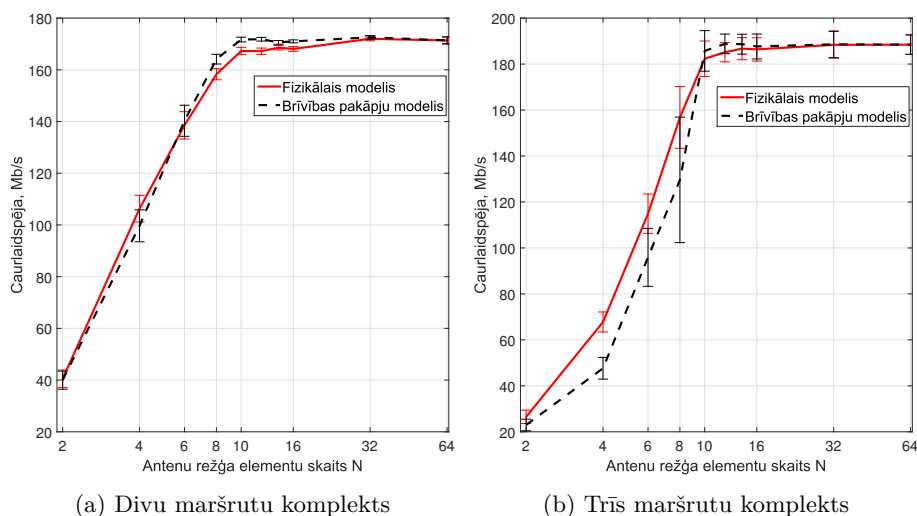
Šajā apakšnodaļā ir salīdzināti divi virziendarbības vērsuma formēšanas modeļi adaptīvam antenu režģim:

- modelis, kas paredz optimālu režģa elementu svāra koeficientu atrašanu ar ZF BF metodi (tālāk saukts par fizikālu vērsuma formēšanas modeli);
- uz brīvības pakāpēm balstīts modelis, kas nosaka N elementu režģim $N - 1$ brīvības pakāpes traucējumu izslēgšanai uz $N - 1$ virzieniem; nepietiekama brīvības pakāpju gadījuma, traucējumus izslēdz selektīvi pret daļu virzienu.

Salīdzināšanas mērķis ir noskaidrot brīvības pakāpju modeļa sniegto rezultātu precizitāti, jo tā programmatūras implementācija ir vienkāršāka un ātrdarbīgāka. Tā kā fizikāls vērsuma formēšanas modelis precīzāk apraksta antenu režģa darbību, tas ir izmantots par etalonu.

Abi modeļi ir salīdzināti izstrādātajā modelēšanas rīkā, analizējot 3700 dažādus scenārijus ar nejaušu mezglu izkārtojumu un nejaušiem datu avota un adresāta pāriem. Režģa elementu skaits N mainās robežās no 2 līdz 64 un maršrutu skaits komplektā ir divi vai trīs, katrai N vērtībai aprēķinot vidējo caurlaidspēju. Rezultāti ir parādīti 4.11. attēlā, atsevišķi nodalot scenārijus ar diviem (4.11a.) un trim maršrutiem (4.11b. attēlā) komplektā. Abiem modeļiem pielietota “duplekss” traucējumu izslēgšanas shēma, kas nosaka, ka traucējumus izslēdz abpusēji (traucējošā raidītājā un traucējumus izjūtošā uztvērējā).

Abu modeļu sniegtais rezultāts ir līdzīgs, maksimāla atšķirība pret fizikālo modeli ir 6% divu maršrutu komplektam, 30% trīs maršrutu komplektam. Ja režģa elementu skaits ir neliels, tad fizikālais vērsuma formēšanas modelis nodrošina augstāku caurlaidspēju. To var skaidrot ar atšķirīgu modeļu darbību situācijā, kad režģa elementu skaits ir mazāks par traucējošo mezglu skaitu. Fizikālā modelī tiek maksimizēts SINR, līdz ar to vērsuma amplitūda iespēju robežās samazinās pret visiem nevēlamajiem virzieniem (lai arī nulle nav iegūstama). Uz brīvības pakāpēm balstīta modeļa algoritms



4.11. att. Vēsuma formēšanas modeļu salīdzinājums.

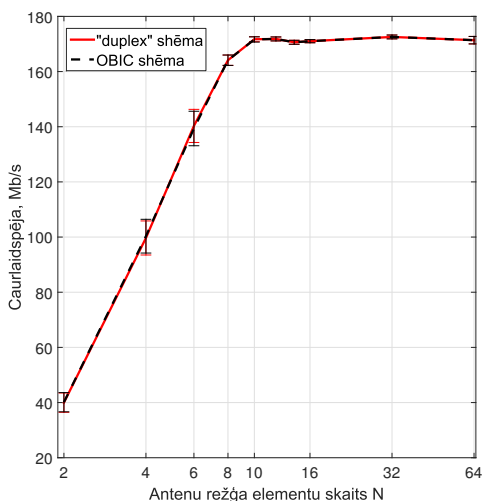
šādā situācijā veic selektīvu traucējumu izslēgšanu, no atsevišķiem virzieniem pieļaujot traucējumus pilnā apmērā. Lielāka režģa elementu skaita gadījumā ($N=8-2$) brīvības pakāpju modelis uzrāda augstāku caurlaidspēju, jo ir idealizēts un nodrošina efektīvāku traucējumu izslēgšanu. Elementu skaitam > 32 abu modeļu sniegtais rezultāts izlīdzinās. Tendences ir līdzīgas gan divu, gan trīs maršrutu scenārijiem. Ņemot vērā, ka rezultātu atšķirība ir neliela, tuvinātiem aprēķiniem uz brīvības pakāpēm balstīts modelis var aizstāt fizikālu vēsuma formēšanas modeli.

Ir salīdzināta arī traucējumu izslēgšanas shēmu efektivitāte:

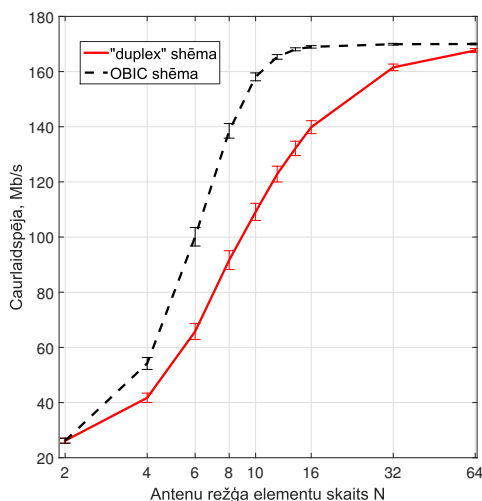
- “duplekss” – traucējumu izslēgšana ir abpusēja (traucējošā raidītājā un traucējumus izjūtošā uztvērējā);
- OBIC – traucējumu izslēgšana ir tikai vienā pusē (traucējošā raidītājā vai traucējumus izjūtošā uztvērējā) un ir organizēta kooperatīvi (paskaidrots 4.2.3. apakšnodaļā).

Ir izmantots uz brīvības pakāpēm balstīts vēsuma formēšanas modelis. Optimālas secības izveidei OBIC modeli var pielietot dažādus kritērijus un viens no tādiem ir režģa elementu skaits, piešķirot augstāku prioritāti mezgliem ar mazāku režģa elementu skaitu. Kā tas ir demonstrēts piemērā 4.2.3. apakšnodaļā, tas sniedz efektīvāku brīvības pakāpju izlietojumu. Tas prasa analizēt arī tādus scenārijus, kur mezgliem viena tīkla ietveros ir dažāds režģa elementu skaits. Pēc līdzīgas metodikas ir noteikta vidējā caurlaidspējas atkarība no N katrai traucējumu izslēgšanas shēmai, ja $M = 2$ (4.12. attēlā).

4.12a. attēlā parādīts katras traucējumu izslēgšanas shēmas sniegtais rezultāts, ja visi mezgli tīklā ir homogēni (ar vienādu N) un mezglu secība OBIC shēmā ir nejauša.



(a) Elementu skaits visos mezglos vienāds



(b) Mainīgs elementu skaits

4.12. att. Traucējumu izslēgšanas shēmu salīdzinājums.

Rezultāti parāda, ka OBIC ieguvumu nesniedz. 4.12a. attēla rezultāti iegūti, kad ir mainīgs režģa elementu skaits N , kurš katrā mezglā ir izvēlēts nejauši robežās no 2 līdz N_{max} , un mezglu secība OBIC shēmā ir pēc elementu skaita. Rezultāti parāda, ka OBIC uzlabo traucējumu izslēgšanas efektivitāti. Turklāt caurlaidspēja ir aptuveni līdzīga tai, kas ir sasniedzama homogēnā tīklā maksimālā režģa elementu skaita gadījumā visos tīkla mezglos.

Promocijas darbā nebija plānots detalizētāk apskatīt nehomogēnu *ad-hoc* tīklu, līdz ar to tālākos pētījumos ir pielietots uz brīvības pakāpēm balstīts virziendarbības vērsuma formēšanas modelis, neparedzot kooperatīvu traucējumu izslēgšanu.

4.4.3. Maršrutēšanas algoritmu efektivitātes novērtēšana

Apakšnodaļā ir novērtēta maršrutēšanas protokolu un to MATLAB modeļu efektivitāte, lai izvēlētos piemērotu 5. nodaļas pētījumiem. Savstarpēji ir salīdzināti maršrutu atklāšanas algoritmi protokolam: SMR un tā modificēta versijai SMR*, un AODVM. Efektivitātes novērtēšanai ir izmantota līdzīga metodika kā [12], kur ir analizēta mezglu nošķirtu maršrutu pieejamība dažāda mezglu blīvuma scenārijos.

Darbā [12] ir izmantoti divi efektivitātes rādītāji: vidējais mezglu nošķirtu maršrutu skaits, kas ir atklāti viena maršrutēšanas izsaukuma laikā, un varbūtība, ka atrasto nošķirto maršrutu skaits nav mazāks par noteiktu sliekšni. Promocijas darbā maršrutēšanas protokola efektivitāte ir vērtēta ar trim tālāk uzskaitītajiem rādītājiem.

- Varbūtība izveidot vismaz vienu maršrutu komplektu vienā maršrutu atklāšanas

mēģinājumā (maršruti ir mezglu nošķirti un telpiski nekrustojas).

- Relatīvā dažādība maršrutu komplektiem, kas atrasti starp vienu datu avota un adresāts pāri. Dažādību vērtē pēc starpmaršrutu attāluma, kura aprēķināšanas metode ir dota 4.3.3. apakšnodaļā. Relatīvā dažādība ir aprēķināta pēc formulas:

$$d_{rel} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{sd}}, \quad (4.43)$$

kur d_{max} – starpmaršrutu attālums visvairāk nošķirtākajiem maršrutiem;
 d_{min} – komplektam ar vismazāk nošķirtajiem maršrutiem;
 d_{sd} – tiešais attālums starp datu avotu un adresātu (Eiklīda).

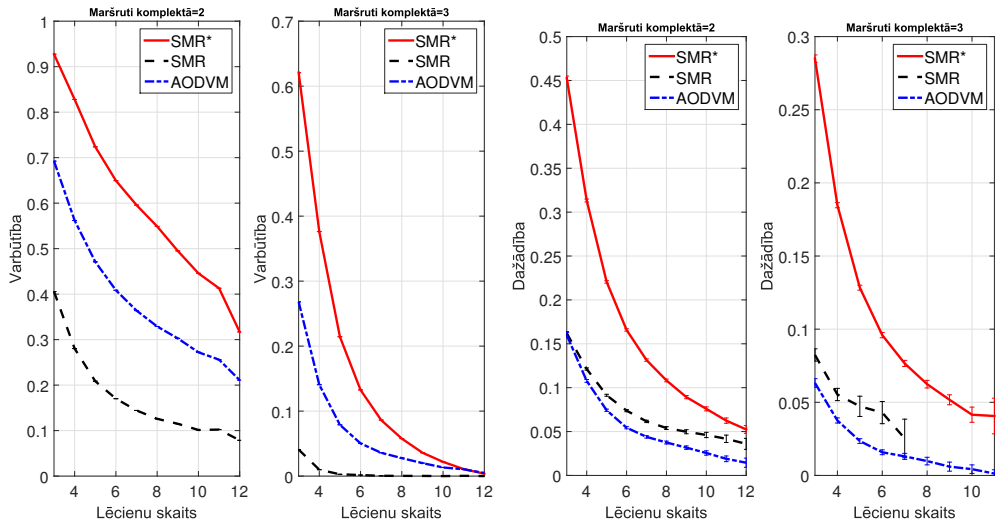
- Vidējais laiks, kas nepieciešams maršruta atklāšanai. Vērtēti ir tikai tie scenāriji, kuros izdevies izveidot vismaz vienu maršrutu komplektu.

Efektivitātes rādītāji katram protokolam grafiski parādīti 4.13. attēlā. Katrs efektivitātes rādītājs ir iegūts, aprēķinot vidējo vērtību daudziem rezultātiem, kas iegūti, modelējot lielu skaitu nejaušu scenāriju: kopā 3395 dažādas topoloģijas nejauša izmēra kvadrātveida laukumā, katrā topoloģijā 100 dažādi datu avota un adresāts pāri. Atsevišķi ir vērtēti maršrutu komplekti, kas sastāv no diviem un trīs mezglu nošķirtiem maršrutiem. Kā arguments uz x ass ir izmantots lēcienu skaits starp datu avotu un adresātu. Lēcienu skaitu nosaka īsākais atrastais maršruts starp abiem.

Savstarpēji salīdzinot SMR un AODVM sniegto rezultātu, AODVM ar lielāku varbūtību izveido maršrutu komplektu (4.13a.), savukārt SMR var piedāvāt nedaudz lielāku maršrutu dažādību (4.13b.). Modificēts SMR (SMR*) protokols atrod maršrutu komplektu ar augstāku varbūtību, un komplekti ir ar lielāku dažādību, salīdzinot ar SMR un AODVM. Cena tam ir ilgāks vidējais maršrutēšanas laiks (4.13c.), jo jāpārsūta vairāk RREQ ziņojumu kopiju (lielāks plūdināšanas virstēriņš) un katrai kopijai ir jāveic salīdzināšana ar ierakstiem relejmezgla buferatmiņā. Tomēr vienlaicīgi jāņem vērā arī varbūtība izveidot maršrutu komplektu, jo lielākas varbūtības gadījumā nepieciešamais maršrutēšanas atkārtojumu skaits būs mazāks. Tā kā SMR* gadījumā varbūtība ir augstāka, tad vidējais laiks maršrutu komplekta izveidei būs tuvāks pārējiem protokolam. Pētniecības nolūkiem SMR* virstēriņš ir pieļaujams, tādēļ, lai nodrošinātu maršrutu komplektu dažādību, tas tiek izvēlēts tālākiem pētījumiem 5. nodaļā.

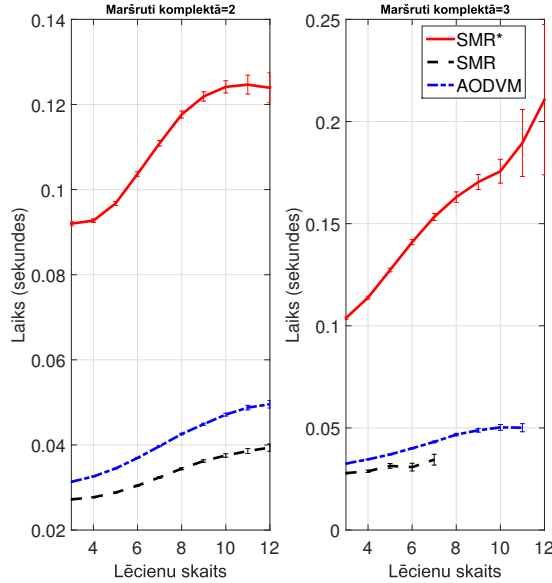
4.4.4. Ātrdarbības novērtēšana

Katra scenārija analīze prasa noteiktu laiku, un tas ir atkarīgs no mezglu skaita scenārijā, maršrutu skaita komplektā, kā arī antenas režģa elementu skaita u.c. parametriem. Iepriekšējā apakšnodaļā analizēta maršrutēšanas algoritma ietekme uz



(a) Varbūtība izveidot komplektu

(b) Maršrutu komplektu dažādība



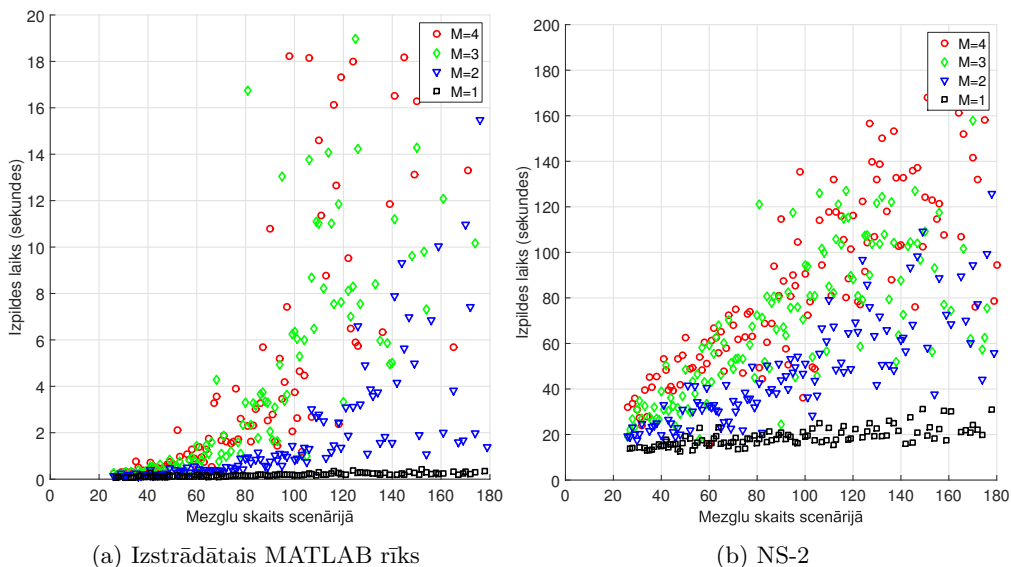
(c) Maršrutešanas laiks

4.13. att. Maršrutēšanas protokolu efektivitāte.

modeļēšanai nepieciešamo laiku (4.13c. attēlā). Šajā apakšnodaļā, turpinot algoritmu ātrdarbības analīzi, ir noteikts caurlaidspējas aprēķināšanai patērētais laiks, un tas ir salīdzināts ar NS-2.

4.14. attēlā parādīta patērētā laika atkarība no mezglu skaita atsevišķi izstrādātajam MATLAB rīkam (4.14a. attēls) un NS-2 (4.14b. attēls). Rezultāti iegūti, modelējot daudzus scenārijus ar nejaušu mezglu izkārtojumu, laukuma izmēru un nejauši izvē-

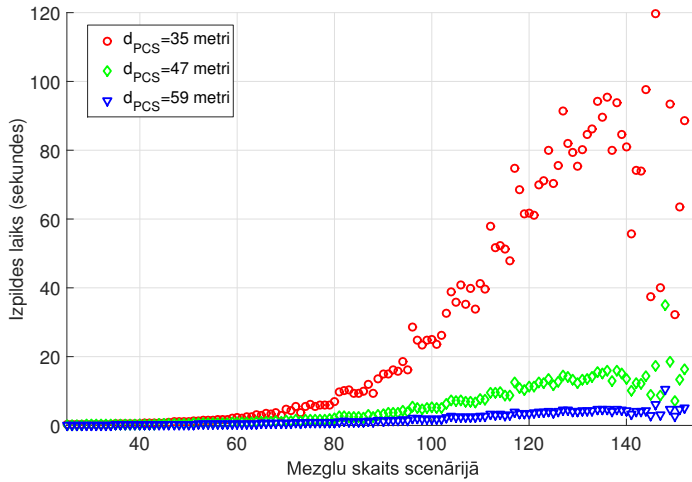
lētu datu avota un adresāta pāri, starp kuriem ir atrasti mezglu nošķirti maršruti, un aprēķinot vidējo laiku katram mezglu skaitam. Tā kā scenārija sarežģītība ir atkarīga arī no maršrutu skaita komplektā, tad parādīti rezultāti dažādam maršrutu skaitam (M ir no 1 līdz 4).



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

Caurlaidspējas noteikšana, modelējot NS-2 (4.14b.), prasa līdz pat 10 reizēm vairāk laika, salīdzinot ar MATLAB īstenoto maksimālās plūsmas metodi (4.14a.). Var novērot, ka abos gadījumos 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 (aprakstīta 4.4.1. apakšnodaļā), bet nesniedz vērtējumu par NS-2 programmu kopumā.

Veicot detalizētāku patērētā laika analīzi, ir novērojams, ka MATLAB rīka darbības ātrums ir stipri atkarīgs no PCS apgabala rādiusa. Ja PCS rādiuss ir mazāks, tad pārraides shēmā iespējams lielāks skaits tīkla savienojumu, līdz ar to iespējamās vairāk kombināciju. Tas ietekmē, pirmkārt, iterāciju skaitu visu shēmu atrašanai; otrkārt, veidojas vairāk mainīgo optimizācijas problēmas (4.28.) risināšanai. 4.15. attēlā parādīta vidējā izpildes laika atkarība no mezglu skaita trīs maršrutu komplektiem ar dažādiem PCS darbības rādiusiem. Rezultāti parāda, ka tālākiem pētījumiem izvēlētais PCS darbības rādiuss $2d_{T_x} \approx 47m$ nodrošina optimālu izpildes laiku. Mazāka rādiusa izvēle nav vēlama, jo izpildes laiks, palielinoties mezglu skaitam, strauji palielinās.



4.15. att. Izpildes laika atkarība no mezglu skaita ar dažādiem PCS darbības rādiusiem.

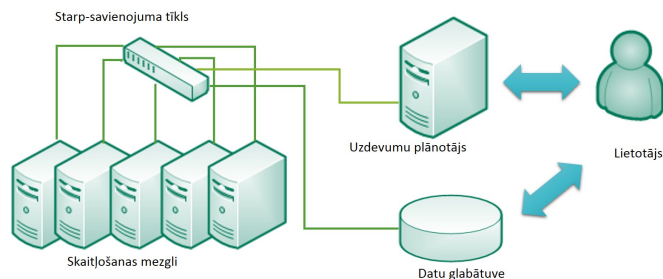
4.5. Superdatora izmantošana

Liela skaita scenāriju analīze rada nopietnu skaitļošanas problēmu, tādēļ šādu uzdevumu risināšanai tiek izmantoti superdatori. Superdators ir abstrakts jēdziens, ar kuru mūsdienās tiek apzīmētas dažādu arhitektūru skaitļošanas sistēmas: koplietas atmiņas lieldators, HPC klasteris, *Grid* u.c.

- Koplietas atmiņas lieldators ļauj laikietilpīga uzdevuma sadalīšanu un daļu paralēlu izpildi uz daudziem procesoriem. Datu apmaiņa starp procesoriem ir ātra un relatīvi vienkārši realizējama, jo operatīvā atmiņa ir kopīga.
- HPC klasteri var izmantot gan paralēlai skaitļošanai ar MPI palīdzību, nodrošinot viena liela uzdevuma paralēlu izpildi, gan distributīvai skaitļošanai, izpildot daudzus neatkarīgus uzdevumus uz atsevišķiem serveriem vai procesoriem. Klasiera shēma dota 4.16. attēlā. Klasteris sastāv no viena galvenā mezgla (uzdevumu pārvaldnieka) un daudziem skaitļošanas mezgliem (atmiņa ir nodalīta). Svarīga klastera sastāvdaļa ir datu pārraides tīkls, kas savieno skaitļošanas mezglus un nodrošina datu apmaiņu starp uzdevuma daļām un piekļuvi datu glabātuvei. Skaitļošanas klasterim parasti var pieslēgties attālināti caur lietotāju saskarni, kas ietver komandas uzdevumu iesūtīšanai un kontrolei. Šobrīd lielākā daļa pasaules ātrāko skaitļošanas sistēmu ir klastera arhitektūras [125].
- *Grid* apvieno daudzus ģeogrāfiski un administratīvu izkaisītus skaitļošanas resursus, starp kuriem var būt arī abi iepriekš minētie. Tas nodrošina, pirmkārt, milzīgas skaitļošanas jaudas un, otrkārt, vidi sadarbībai, ļaujot resursu koplietošanu. *Grid* skaitļošanu izmanto tāda mēroga uzdevumu risināšanai kā CERN lielā hadronu paātrinātāja datu apstrāde [126].

Lai noskaidrotu piemērotāko skaitļošanas sistēmu promocijas darba pētījumu specifikai, ir nepieciešams analizēt skaitļošanas uzdevuma veidu un meklēt paralēlas izpildes iespējas. Uzdevums ietver divu veidu skaitļošanas metodes:

- modeļošanu veic lielam skaitam scenāriju ar nejaušiem (pēc noteikta sadalījuma likuma) ievades parametriem, kas ir Montekarlo modeļošana;
- papildus katram scenārijam tiek padoti konkrēti ievades parametri, prasot pārbaudi ar dažādām to vērtību kombinācijām. Šāds uzdevumu formulējums tiek saukts par parametrisku (angliski arī *parameter sweep*).



4.16. att. HPC klastera shēma.

Abas metodes pieļauj sadalīšanu daudzos neatkarīgos uzdevumos, kuru izpildei piemērota ir distributīva skaitļošanas vide. Par uzdevumu ir uzskatīta katra programmas izpilde, kurā analizē vienu vai vairākus scenārijus ar doto ieejas parametru kopumu. Uzdevums ir neatkarīgs, jo izpildes laikā tas nav saistīts ar citiem uzdevumiem, līdz ar to klastera mezglu savstarpējam komunikācijas ātrumam nav noteicoša loma. Šādu vidi nodrošina HPC klasteris vai *Grid*, tomēr pēdējais nav nepieciešams, jo uzdevuma apjoms nav pietiekami liels. Vēl sīkāka saskaldīšana prasītu komunikāciju starp uzdevuma daļām, kam jāizmanto vai nu koplietotās atmiņas lieldators, vai HPC klasteris ar MPI, kas promocijas darbā veiktajam uzdevumam nav efektīvi. Laika ieguvums ir panākts, lielu skaitu uzdevumu risinot vienlaicīgi uz daudziem CPU, kam secīgai izpildei uz viena datora būtu vajadzīgs vairāk kopējā laika.

Izstrādātie algoritmi ir realizēti un modeļošana veikta RTU HPC klasterī ar kopumā 720 CPU kodoliem un aptuvenu faktisko skaitļošanas veikspēju 20 teraFLOPS. Klastera parametri:

- 384 CPU kodoli *Intel Xeon E5-2680v3* ar 2,50 GHz takts frekvenci;
- 288 CPU kodoli *Intel Xeon X5670 @ 2,3 GHz*
- 2–5 GB operatīvā atmiņa uz vienu kodolu;
- *Infiniband* mezglu starpsavienojuma tīkls;
- *Centos 6* operētājsistēma;
- *Moab* programmnodrošinājums uzdevumu pārvaldībai.

Uz klastera mezgliem ir instalēts MATLAB DCS modulis, kuru izsauc, uzdevumam

nokļūstot uz mezgla. Izmantojot “MATLAB *Parallel Computing Toolbox*” uz lietotāja datora, uzdevumu var nosūtīt izpildei uz klasteri tieši no MATLAB saskarnes. Šo funkcionalitāti izmanto arī izstrādātais tīkla modelēšanas rīks, ļaujot lietotājam norādīt, vai scenāriju izpildīt lokāli uz personālā datora vai nosūtīt to uz klasteri. Rezultātu apkopošanas un analīzes darbu var veikt personālajā datorā, jo tas neprasa lielus skaitļošanas resursus.

Kopējais laiks, kas būtu jāpatērē uz personālā datora, kura veikspēja ir ekvivalenta viena *Intel Xeon* CPU kodola veikspējai, lai iegūtu 5. nodaļā sniegtos rezultātus, ir aptuveni 37 000 CPU stundas jeb 1542 dienas. Lai arī nav precīzi noteikts, cik laika HPC ir ļāvis ietaupīt, teorētiski uzdevumu var atrisināt līdz pat 128 reizēm ātrāk, kas ir pieejamo MATLAB DCS licenču skaits.

4.6. Secinājumi

Lai pārbaudītu traucējumu samazināšanas paņēmieni efektivitāti, nosakot to ietekmi uz vairāku maršrutu caurlaidspēju, **ir izvēlēta analītiska metode, kuras pamatā ir maksimālās plūsmas uzdevuma atrisināšana ar lineāru optimizāciju**. Optimizējot laikspraugu garumu, kurās darbojas tīkla savienojumi, atrod maksimālu datu plūsmas ātrumu maršrutos jeb caurlaidspēju. Noteiktā caurlaidspēja ir teorētiska ar idealizētu MAC protokolu, bet tā arī parāda maršrutu potenciālu, ļaujot savstarpēji salīdzināt gan maršrutu komplektus, gan traucējumu samazināšanas paņēmienus. Labāks teorētiskais rezultāts liecina par labāku rezultātu arī reālam tīklam tuvākos apstākļos, ko apstiprina rezultātu salīdzināšana ar NS-2.

Ad-hoc tīklu modelēšanas atbilstība reālam tīklam ir atkarīga no izmantotā traucējumu modeļa. Lai precīzāk modelētu starpmaršrutu traucējumus, **šajā nodaļā ir izstrādāts imitācijas modelis, kas ietver aditīvus radio traucējumus**, imitējot fiziskā nesēja jušanu raidītājā. Fiziskā nesēja jušanas sliekšnis nosaka, kuri tīkla savienojumi var veikt pārraidi vienlaicīgi, šādi veidojot neatkarīgas kopas jeb pārraides shēmas. Visu iespējamo pārraides shēmu atrašana ir komplicēts uzdevums, kam ir izveidots efektīvs algoritms un ir pielietotas paralēlās skaitļošanas metodes.

Metode ir īstenota praktiski, MATLAB programmētā *ad-hoc* tīkla modelēšanas rīkā ietverot papildu funkcijas nejaušu scenāriju sagatavošanai, maršrutēšanai un viedo antenu modeļiem. Rīka izstrādē ir izmantots tīkla parametru kopsakarību modelis, kas dod loģisku shēmu, pēc kādas analizēt tīkla parametrus. Ar modelēšanas rīku ir pārbaudīta metodes sniegto rezultātu ticamība. Stipra korelācija ar NS-2, kad PCS apgabala rādiuss aptuveni divas reizes lielāks par raidīšanas attālumu, apstiprina traucējumu modeļa un metodes pielietojamību. Modelēšanas rīks ļauj līdz 10 reizēm ātrāk noteikt maršrutu komplekta caurlaidspēju, salīdzinot ar NS-2 pielietoto metodi.

Var secināt, ka hibrīdā metode, kas balstās uz maksimālās plūsmas uzdevumu un autora izstrādātu imitācijas modeli, ir efektīvs risinājums vairāku maršrutu caurlaidspējas novērtēšanai.

Izstrādātais MATLAB modelis maršrutu atklāšanas algoritmam ļauj nodrošināt lielāku maršrutu komplektu dažādību starp vienu datu avota un adresāta pāri, salīdzinot ar oriģinālo SMR vai AODVM protokolu. Tas ir īpaši svarīgi 5. nodaļā, pētot maršrutu komplekta izvēles kritēriju atkarību no tīkla apstākļiem. Kā negatīvais efekts dažādībai ir lielāks protokola virstēriņš, kas palielina modeļēšanai nepieciešamo laiku.

Uz brīvības pakāpēm balstīts modelis vienkāršo ne tikai MIMO modeļēšanu daudzslēcienu tīklā, bet to efektīvi pielietot arī vērsuma formēšanai ar adaptīvu virziendarbības antenu režģi, ļaujot nemeklēt antenu režģa elementu svāra koeficientus. Modeļēšanas ceļā noskaidrots, ka virziendarbības vērsuma formēšana, pielietojot kooperatīvu traucējumu izslēgšanas shēmu (OBIC), kad traucējumus novērš vai nu raidītājā, vai traucējumus izjūtošā uztvērējā, ir efektīva, ja mezgli ir aprīkoti ar dažādu antenu režģa elementu skaitu. Savukārt homogēnā tīklā tā sniedz līdzīgu rezultātu abpusējai traucējumu izslēgšanai (vienlaicīgi traucējošā raidītājā un traucējumus izjūtošā uztvērējā).

Izstrādātais modeļēšanas rīks dod iespēju noteikt caurlaidspēju lielumam skaitam nejaušu scenāriju un pēc tam novērtēt vidēji statistiskās caurlaidspējas atkarību no tīkla parametriem. Šāda pieeja ir izmantota 5. nodaļā, lai pētītu traucējumu samazināšanas risinājumus. Kopējo modeļēšanai nepieciešamo laiku var efektīvi samazināt ar paralēlo skaitļošanu. **Konkrētajam skaitļošanas uzdevumam piemērota ir distributīva skaitļošanas vide**, kas ļauj daudzu neatkarīgu uzdevumu paralēlu apstrādi. 5. nodaļas pētījumiem ir izmantots RTU HPC klasteris.

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 samazināšanai. Iepriekšējās nodaļas var uzskatīt par sagatavošanos posmiem šādu pētījumu veikšanai: veikta situācijas analīze, izstrādāts tīkla parametru kopsakarību modelis un meklēti risinājumi traucējumu samazināšanai. Gala rezultātā izstrādāta analītiska metode, kas ietver šos risinājumus, kā arī MATLAB rīks datormodelēšanai.

Šajā nodaļā ar datormodelēšanas palīdzību ir pārbaudīta traucējumu samazināšanas paņēmienu efektivitāte. Ir pētītas sakarības starp tīkla un maršrutu komplektu raksturojošiem parametriem, noskaidrojot optimālu maršrutu skaitu un kritērijus, pēc kuriem jāizvēlas maršruti, lai sasniegtu augstāku caurlaidspēju. Pētījums ir veikts piecos posmos, kuros ir pārbaudīts:

- 1) optimālais maršrutu skaits komplektā;
- 2) starpmaršrutu attāluma ietekme uz caurlaidspēju;
- 3) maršrutu izvēles kritērija ietekme uz caurlaidspēju;
- 4) vairāku maršrutu pārraides efektivitāte ar viedām antenām;
- 5) maršrutu izvēles kritēriji ar viedām antenām.

Pētījuma rezultāti sākotnēji ir izklāstīti promocijas darba autora publikācijās [115], [120], [122]. Nodaļas nobeigumā ir izstrādātas rekomendācijas piemērota maršrutu komplekta izvēlei atkarībā no izmantotā antenu veida un tīkla apstākļiem, kuru var izmantot traucējumus ietverošos (*interference-aware*) maršrutešanas protokolos.

5.1. Novērtēšanas metodika

Pētījumiem ir izmantots izstrādātais tīkla modelēšanas rīks (4. nodaļa), kurš ar analītisku metodi ļauj noteikt maršruta komplekta teorētisko caurlaidspējas robežu. Rezultātu iegūšanai ir izmantotas matemātiskās statistikas metodes un Montekarlo modelēšana. Risinājumu efektivitāte ir novērtēta, nosakot vidēji statistisko caurlaidspēju lielam skaitam nejaušu scenāriju (t.i., tīkla topoloģiju), kas ietver nejaušu: *a*) laukuma izmēru; *b*) mezglu izvietojumu; *c*) datu avotu un adresātu; *d*) 1., 2. un 4. pētījumu posmā nejaušu maršrutu komplekta izvēli. Gadījumskaitļus ģenerē ar vienmērīgu sadalījumu. Šādā veidā ir iegūta no tīkla topoloģijas neatkarīga caurlaidspējas atkarība no pētāmajiem parametriem. Lai paātrinātu rezultātu iegūšanu, ir izmantota paralēlā skaitļošana uz RTU HPC klastera.

Apskatīti ir tikai statistiski scenāriji (nekustīgi mezgli), ko pieļauj pētījumu objekts, kas ir traucējumu un maršrutu ģeometrisku raksturlielumu ietekme uz caurlaidspējas robežu.

Viens no pētījumu apakšuzdevumiem ir noteikt sakarību starp tīkla parametriem un maršruta komplekta parametriem. Tas ļaus atkarībā no apstākļiem izvēlēties piemērotu maršrutu komplektu. Tālāk ir definēti pētījumā izmantotie parametri.

- Tīkla apstākļus raksturo šādi parametri (saskaņā kopsakarību modeli 4.6. attēlā):
 - radioviļņu pārraides zudumu parametrs α (skat. 4.1. tabulu), kas raksturo vidi; pētījumos izmantotas divas vērtības $\alpha = 2$ un $\alpha = 4$, no kurām pirmā atbilst brīvai telpai, otrā – absorbējošai videi iekštelpās;
 - attālums starp datu avotu un adresātu (lēcienu), kas ir viens no topoloģijas parametriem; attālumu nosaka īsākā atrastā maršruta lēcienu skaits;
 - analizējot viedās antenas, kā parametrs izmantots režģa elementu skaits N , kas ir saistīts ar tehnoloģiju.
- Maršrutu komplektu raksturo metrikas: maršrutu skaits, starpmaršrutu attālumus, kopējais mezglus skaits.

Modelēšanas rīka ievades parametri apkopoti 5.1. tabulā atbilstoši IEEE 802.11g/n standarta iekārtām. Atsevišķi parādīti arī viedo antenu pētījumos izmantotie parametri. Tā kā viedo antenu gadījumā nav pētīti un izstrādāti maršrutu atklāšanas algoritmi, maršrutēšanu veic bez antenu vērsuma. Tiek arī pieņemts, ka eksistē protokols, kas koordinē to, lai mezgli datu pārraides fāzē nodrošinātu antenu režģa vērsuma maksimumu vajadzīgajā virzienā. Tas neietekmē maksimāli sasniedzamo datu pārraides ātrumu.

5.2. Modelēšanas rezultāti un analīze

1. Optimāls maršrutu skaits komplektā. Ir veikta datormodelēšana, lai noskaidrotu, kā mainās VMP efektivitāte, palielinot vienlaicīgi izmantoto maršrutu skaitu (komplekta lielumu). Maršrutu komplekta izvēle ir nejauša.

5.1. attēlā parādīta sasniedzamā caurlaidspēja dažādam maršrutu komplekta lielumam M (maršrutu skaits no 1 līdz 4). Tā kā attālums starp datu avotu un adresātu d_h (lēcienu) ietekmē maršrutu potenciālo nošķirtību, tad caurlaidspēja ir iegūta atkarībā no šī attāluma (horizontālā ass). Papildus ir noskaidrots, kāda ietekme ir vides absorbējošām īpašībām, kas tiek raksturotas ar radioviļņu pārraides zudumu parametru α formulā (4.12.), dodot atsevišķus grafikus, ja $\alpha = 2$ (5.2a. attēlā) un ja $\alpha = 4$ (5.2b. attēlā).

Kopējais analizēto scenāriju skaits ir ≈ 49000 , ja $\alpha = 2$, un ≈ 44000 , ja $\alpha = 4$. Katrs punkts parāda vidējo caurlaidspēju, kuru nosaka vismaz 100 vērtības, ja $M = 1$,

Modelēšanas parametri

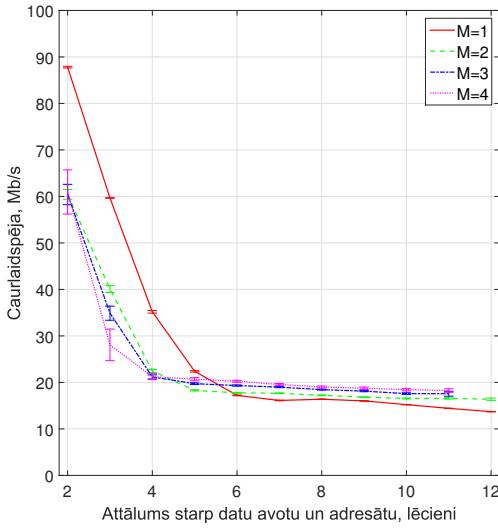
Kopējie modelēšanas parametri atbilstoši IEEE 802.11g/n standartam	
Parametrs	Vērtība
Radioviļņu izplatīšanās modelis	Pārtraides ceļa zudumu ar $\alpha = 2$ vai $\alpha = 4$
Raidīšanas jauda P_{Tx}	0,1 W
Uztvērēja jutība P_0	3,16e-11 W (75 dBm)
Maksimālais pārtraides attālums d_{Tx} atkarībā no zudumu 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
Pārtraides 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 parametri	$\alpha = 4$
Režģa elements	Izotropisks starotājs
Režģa elementu skaits	Vienāds visos mezglos 2–32
Attālums starp režģa elementiem	0,06 m

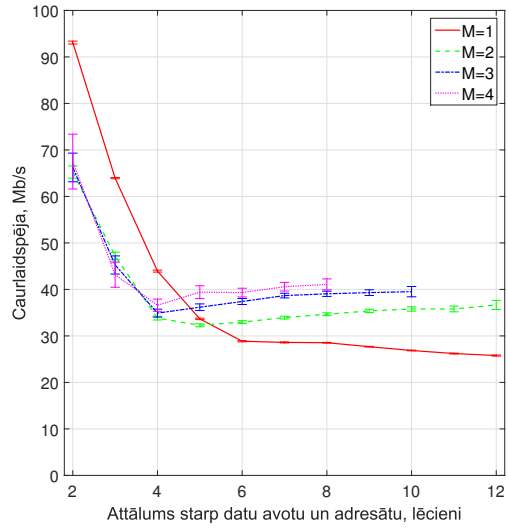
$M = 2$, un vismaz 20 vērtības, ja $M = 3$, $M = 4$. Attēlā parādīts arī ticamības intervāls, kas ietver 95% gadījumu.

5.1a. attēla rezultāti (kad $\alpha = 2$) parāda, ka nav sasniedzams vērā ņemams caurlaidspējas pieaugums, palielinot maršrutu skaitu. Kad attālums ir neliels (līdz 4 lēcieniem), novērojama caurlaidspējas samazināšanās, palielinot maršrutu skaitu, kas skaidrojams ar strauju lēcien skaita palielināšanos, lai nodalītu maršrutus. Optimālais maršrutu skaits šajā gadījumā ir 1.

Vidē ar lielākiem pārtraides zudumiem ($\alpha = 4$) VMP ir efektīvāka (5.1b. attēlā), tomēr nelielam d_h (2–4 lēcieni), palielinot maršrutu skaitu, efektivitāte samazinās. Ja attālums ir lielāks par 4 lēcieniem, maršrutu skaita palielināšana līdz četri sniedz caurlaidspējas pieaugumu līdz 30% pret vienu maršrutu, kas liecina par mazāku traucējumu ietekmi, salīdzinot ar $\alpha = 2$. Tas skaidrojams ar straujāku signāla amplitūdas rimšanu, palielinoties attālumam līdz uztvērējam. Rezultātā radio traucējumiem no mezgliem, kuri ir ārpus PCS apgabala, būs relatīvi mazāka ietekme uz SINR. Tas saskan ar [117]



(a) Pārtraides zudumu parametrs $\alpha = 2$



(b) Pārtraides zudumu parametrs $\alpha = 4$

5.1. att. Caurlaidspējas pieaugums, palielinot maršrutu skaitu komplektā.

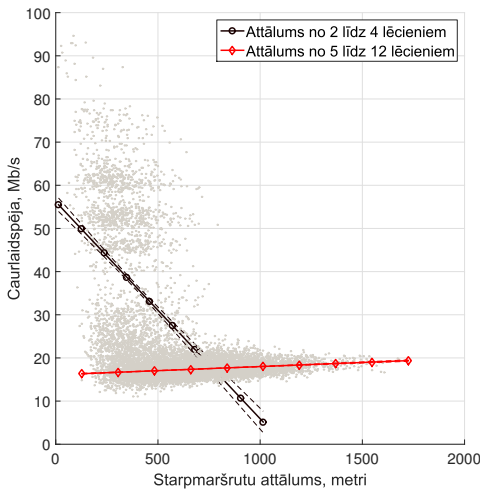
pētījumiem – α pieaugot, uzlabojas tīkla kopējā caurlaidspēja. Optimālais maršrutu skaits, ja $\alpha = 4$: neliela d_h gadījumā maršrutu skaita palielināšana nav lietderīga; 5 lēcieni un vairāk – maršrutu skaits var tikt palielināts līdz 3 vai 4. Vienlaicīgi jāņem vērā, ka, palielinoties maršrutu skaitam, pieaug tīkla enerģijas patēriņš un maršrutēšanas sarežģītība, bet datu ātruma pieaugums ir relatīvi neliels.

Rezultāti ļauj secināt, ka, palielinot maršrutu skaitu, starpmaršrutu traucējumi ierobežo kopējo caurlaidspējas pieaugumu, īpaši, ja $\alpha = 2$. VMP efektivitāte ir saistīta ar attālumu starp datu avotu un adresātu. Lai uzlabotu efektivitāti, jāņem vērā maršrutu telpiskā nošķirtība, kas ir pētīts tālāk.

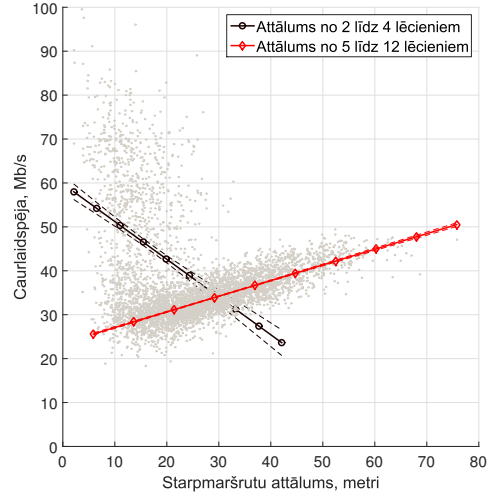
2. Starpmaršrutu attāluma ietekme uz caurlaidspēju. Šajā pētījumu posmā ir noskaidrots, vai telpiskās nošķirtības palielināšana uzlabo VMP efektivitāti un kādos apstākļos. Starpmaršrutu attālumu aprēķina ar 4.3.3. apakšnodaļā doto metodi divu maršrutu scenārijam.

5.2. attēlā katrs punkts parāda caurlaidspējas atkarību no starpmaršrutu attāluma vienam scenārijam. Modelēšana ir veikta ar dažādām radio viļņu pārtraides zudumu parametra α vērtībām: $\alpha = 2$ (5.2a. attēls) un $\alpha = 4$ (5.2b. attēls). Kopējais analizēto scenāriju skaits: ≈ 10000 (ja $\alpha = 2$); ≈ 5000 (ja $\alpha = 4$). Lai izklaidētos datos novērtētu caurlaidspējas izmaiņu tendenci, palielinoties attālumam starp maršrutiem, ir pielietota lineārās regresijas analīze. Iegūtā sakarība ir attēlota ar nepārtrauktu taisnu līniju, papildus uzrādot regresijas taisnes ticamības intervālu (ar pārtrauktu līniju), ja ticamības varbūtība ir 0,95. Tā kā lielākā attālumā starp datu avotu un adresātu d_h var

nodrošināt arī lielāku starpmaršrutu attālumu, ir iegūtas divas atsevišķas regresijas taisnes, kad d_h ir robežās no 2 līdz 4 lēcieniem un no 5 līdz 12 lēcieniem (izriet no iepriekšējā pētījuma posma).



(a) Pārraidēšanas zudumu parametrs $\alpha = 2$



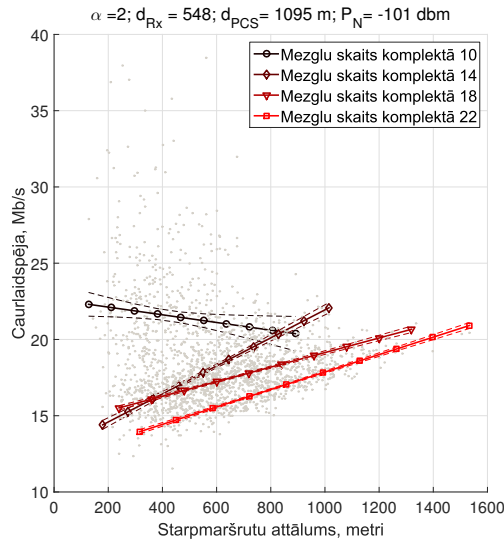
(b) Pārraidēšanas zudumu parametrs $\alpha = 4$

5.2. att. Starpmaršrutu attāluma ietekme uz caurlaidspēju dažādos attālos starp datu avotu un adresātu.

5.2a. attēlā (ja $\alpha = 2$) novērojams, ka caurlaidspējas pieaugums, palielinoties attālumam starp maršrutiem, ir nebūtisks, vai maza d_h gadījumā caurlaidspēja pat strauji samazinās. To var skaidrot ar mezglu skaita relatīvi strauju pieaugumu, ja maršrutus attālina. Caurlaidspējas kritumu mezglu skaita dēļ nosaka sakarība $\frac{C}{n \cdot \log n}$ [117], kas ir spēkā arī vairāku maršrutu apstākļiem. Mezglu skaita ietekmi apstiprina 5.3. attēls, kurā parādīta caurlaidspējas atkarība no starpmaršrutu attāluma, ja mezglu skaits maršrutu komplektā ir nemainīgs. Par parametru izmantotais mezglu skaits ir izvēlēts nejauši. Attēlā var novērot regresijas taisnes stāvuma palielināšanos, kas liecina par VMP efektivitātes pieaugumu.

5.2a. attēls parāda – ja α vērtība ir lielāka, starpmaršrutu attāluma pieaugumam ir pozitīva ietekme uz caurlaidspēju (to parāda regresijas taisnes slīpuma izmaiņas, tām pagriežoties pret pulksteņa rādītāja virzienu). Vienlaicīgi jāņem vērā, ka pārraidēšanas attālums stipri absorbējošā vidē ir mazāks.

Regresijas taisnes pozitīvs slīpums norāda uz starpmaršrutu attāluma noteicošu ietekmi uz caurlaidspēju, bet negatīvs slīpums (ja ir mazs d_h) norāda uz pretēju tendenci, kad noteicošais ir mezglu skaits. Horizontāla taisne (ja $\alpha = 2$) parāda, ka telpiskās nošķirtības sniegtais caurlaidspējas pieaugums ir kompensēts ar kritumu mezglu skaita pieauguma dēļ. Ar dotajiem modelēšanas nosacījumiem 4–5 lēcieni ir robeža, kur mainās dažādu faktoru ietekmes raksturs uz datu pārraidēšanas ātrumu.



5.3. att. Caurlaidspējas atkarība no starpmaršrutu attāluma nemainīgam mezglu skaitam.

Pētījums ļauj izdarīt secinājumu, ka vidē ar lielākiem pārraides zudumiem *a)* VMP sniedz augstāku caurlaidspēju; *b)* starpmaršrutu attāluma palielināšana dod papildu ieguvumu; un ka atkarībā no d_h maršrutu izvēlē ir jāpiešķir augstāka prioritāte komplektiem ar mazāku mezglu skaitu vai lielāku starpmaršrutu attālumu.

3. Maršrutu izvēles kritērija ietekme uz caurlaidspēju. Iepriekšējos pētījuma posmos ir secināts, ja datu avots un adresāts atrodas tuvu, tad starpmaršrutu attāluma palielināšana nepalielina caurlaidspēju un tad noteicošais faktors ir mezglu skaits maršrutu komplektā. Pretēji –, ja datu avots un adresāts ir tālu, starpmaršrutu attāluma palielināšana uzlabo caurlaidspēju. Tam ir jāietekmē maršrutu izvēles kritēriji vienā vai otrā gadījumā.

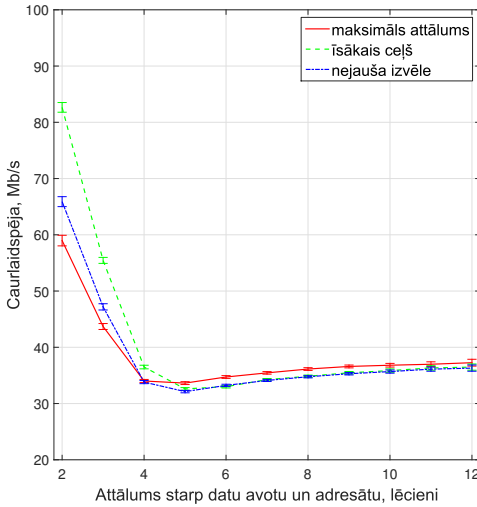
Maršrutu komplekta raksturošanai ir izmantotas divas metrikas: starpmaršrutu attālums un vidējais lēcienu skaits. Balstoties uz šīm metrikām, ir iespējami divi atšķirīgi maršrutu komplekta izvēles kritēriji:

- komplekts ar maksimālu starpmaršrutu attālumu;
- komplekts ar īsāka ceļa mezglu nošķirtiem maršrutiem, kas primāri nodrošina mazāko vidējo lēcienu skaitu un tikai pēc tam maksimālu starpmaršrutu attālumu.

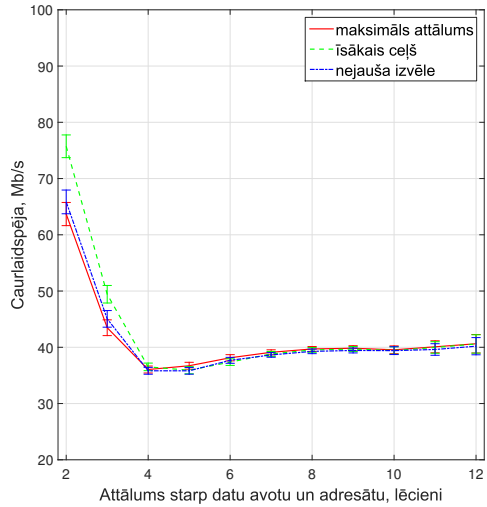
Sagaidāms, ka katrs no kritērijiem būs piemērotāks citiem tīkla apstākļiem. Modelēšanas laikā katrā scenārijā starp datu avotu un adresātu ir izveidoti viens vai vairāki dažādi maršrutu komplekti, ko nodrošina uzlabotais SMR maršrutēšanas protokols. Komplektiem piemēro abus kritērijus (“maksimāls attālums” vai “īsākais ceļš”), lai

izvēlētos iespējami atšķirīgus. Papildus, salīdzināšanas nolūkos, izvēlas vienu nejaušu mezglu nošķirtu maršrutu komplektu, kas atbilst 1. un 2. pētījuma posma maršrutu izvēles stratēģijai.

Katra kritērija efektivitāte (to raksturo caurlaidspēja) ir noteikta atkarībā no attāluma starp datu avotu un adresātu d_h . Rezultāti apkopoti 5.4. attēlā, parādot kritēriju sniegumu, ja $M = 2$ (5.4a. attēlā) un $M = 3$ (5.4b. attēlā). Pārraidēs zudumu parametrs α ir 4, jo ar mazāku tā vērtību VMP nedod efektu. Ja $M = 4$, nevar nodrošināt pietiekamu maršrutu komplektu dažādību, tādēļ to neapskata. Kopējais analizēto scenāriju skaits ir ≈ 15000 , ja $M = 2$, un ≈ 2000 , ja $M = 3$, un katru punktu grafikā nosaka vismaz 100 rezultāti.



(a) Divu maršrutu komplekts $M = 2$



(b) Trīs maršrutu komplekts $M = 3$

5.4. att. Maršrutu izvēles kritērija ietekme uz caurlaidspēju atkarībā no attāluma starp datu avotu un adresātu.

5.4. attēlā var novērot, ka neliela d_h gadījumā īsākā ceļa kritērijs ir ievērojami efektīvāks par maksimālā starpmaršrutu attāluma kritēriju gan ja $M = 2$, gan ja $M = 3$. Uzlabojums, kuru var sasniegt 3 lēcienu attālumā, salīdzinot ar nejaušu izvēli, ir aptuveni 20%. Savukārt maksimālā attāluma kritērijs ir efektīvāks, kad datu avots un adresāts atrodas 5–10 lēcienu attālumā, bet ieguvums ir mazāks (ja $M = 3$ – pat vērā neņemams). Attālumā lielākā par 10 lēcieni, statistiski nav nozīmēs, kuru kritēriju izvēlēties. Tā kā lielā attālumā strauji samazinās relatīvā maršrutu dažādība (skatīt iepriekš 4.13. attēlā), tas ierobežo arī kritēriju snieguma atšķirību. Attāluma robeža, lai izvēlētos vienu vai otru kritēriju, ir aptuveni 5 lēcieni: kad $d_h < 5$, jāizmanto “īsākā ceļa” kritērijs; kad $d_h \geq 4$, jāizmanto “maksimāls attālums”. Nejauša izvēle nesniedz labāku rezultātu nevienā gadījumā.

Rezultāti ļauj secināt – ja attālums starp datu avotu un adresātu ir neliels, tad traucējumus ietverošām metrikām ir nebūtiska loma un labākais risinājums ir izvēlēties īsākos maršrutus. Palielinoties attālumam starp datu avotu un adresātu, starpmaršrutu traucējumu loma palielinās, tāpēc papildu ieguvumu dod to telpiska nošķirtība.

Raksturīgi, ka pie 4–6 lēcieniem caurlaidspēja ir vismazākā gan 2 maršrutu ($M = 2$), gan 3 maršrutu ($M = 3$) gadījumā neatkarīgi no maršrutu komplekta izvēles kritērija. Novērojams arī caurlaidspējas maksimums, ja ir mazs attālums d_h , un neliels pieaugums arī, ja attālums ir liels. Pirmajā gadījumā tas skaidrojams ar mazāku iesaistīto mezglu skaitu, bet otrajā liecina par iespēju šādā attālumā efektīvi nošķirt maršrutus.

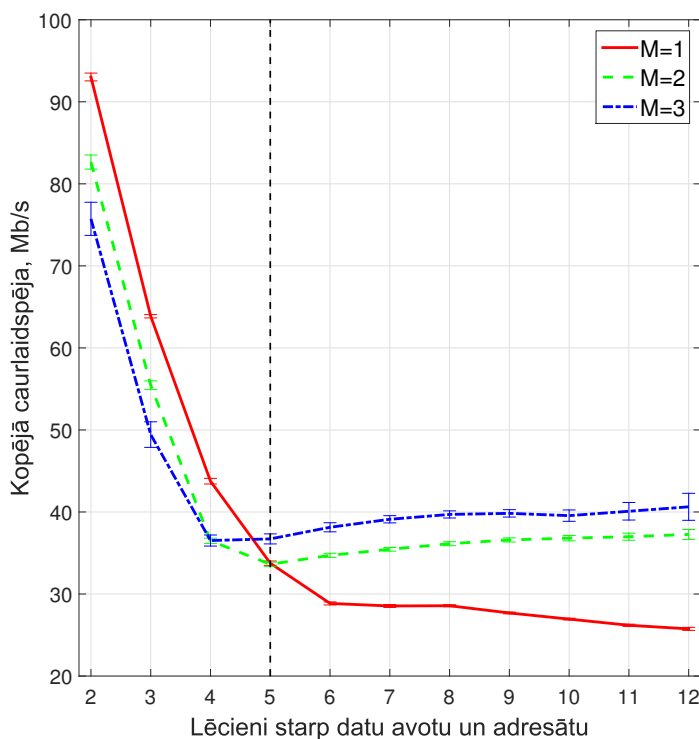
Pirmo trīs pētījuma posmu rezultāti (bez viedajām antenām) ir apkopoti 5.5. attēlā, parādot caurlaidspējas atkarību no lēcienu skaita $M = 1$, $M = 2$ un $M = 3$, ievērojot optimālus maršrutu izvēles kritērijus, t.i., “īsākā ceļa” vai “maksimāla attāluma” atkarībā no attāluma starp datu avotu un adresātu. Attēls parāda – ja attālums ir mazs (2–4 lēcieni), tad *ad-hoc* tīklā bez viedajām antenām vislielāko datu pārraides ātrumu var sasniegt ar vienu maršrutu ($M = 1$), neraugoties uz “īsākā ceļa” kritērija izmantošanu. Datu pārraide, izmantojot VMP, kļūst efektīva lielākā attālumā (5–10 lēcieni), kad, palielinot maršrutu skaitu no 1 līdz 3, datu pārraides ātrums palielinās līdz pat 50%. Var secināt, ka piemērotākie apstākļi vairāku maršrutu izmantošanai *ad-hoc* tīklā ir tad, kad attālums starp datu avotu un adresātu ir lielāks par kritisko robežu (5 lēcieni), neraugoties uz optimālu izvēles kritēriju.

4. Vairāku maršrutu pārraides efektivitāte ar viedajām antenām. Ir veikts viedo antenu veidu salīdzinājums starpmaršrutu traucējumu samazināšanai. No 3.2. nodaļā apskatītajiem viedo antenu veidiem un pielietošanas režīmiem tālāk izmantoti:

- 1) vadāmās lapas režģis bez jaudas pastiprinājuma raidīšanas attāluma palielināšanai (vērsma amplitūdu normalizē tā, lai maksimālais raidīšanas attālums būtu vienāds ar attālumu antenai bez vērsma);
- 2) vadāmās lapas režģis ar pastiprinājumu, kas palielina kanāla pastiprinājuma koeficientu N^2 reižu;
- 3) adaptīvs antenu režģis virziendarbībai bez pastiprinājuma;
- 4) adaptīvs antenu režģis raidītājā/uztvērējā, nodrošinot MIMO SM+BF; kopējā raidīšanas jauda starp MIMO apakškanāliem tiek sadalīta vienmērīgi.

Tīkls ir homogēns, kur visi mezgli izmanto vienādus antenu parametrus.

Viedo antenu pielietošana ietekmē MAC metodes izvēli un līdz ar to arī modelēšanā izmantoto traucējumu modeli (dots 4.2.2. apakšnodaļā). CSMA/CA protokola PCS mehānisms var darboties vairākos režīmos atkarībā no iepriekš uzskaitīto viedo antenu veidiem.



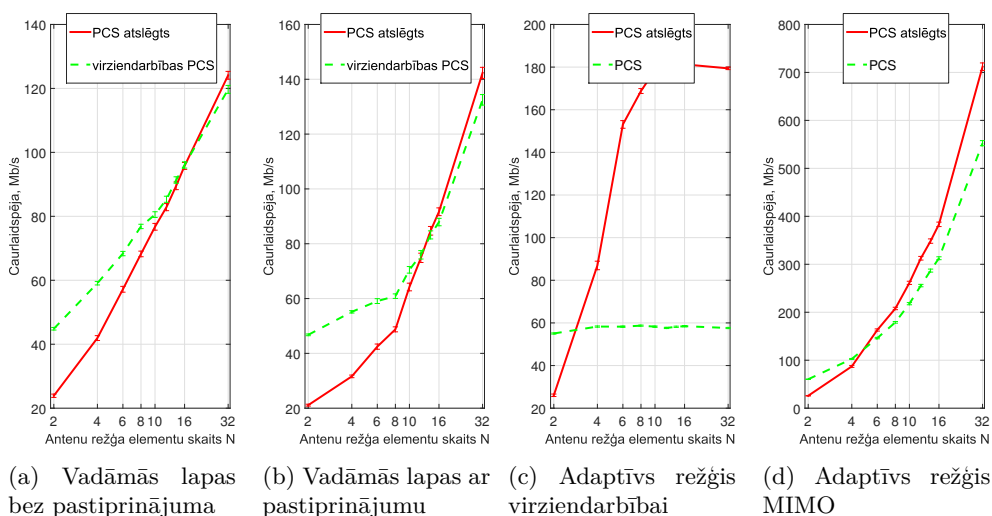
5.5. att. Datu pārraides efektivitāte atkarībā no maršrutu skaita ar optimāliem maršrutu izvēles kritērijiem; $\alpha = 4$.

- 1) PCS ir atslēgts – traucējumu modelis neierobežo vienlaicīgi aktīvos tīkla savienojumus; pielietojams visiem viedo antenu veidiem;
- 2) PCS, neizmantojot antenu režģa vērsumu (raidītājam “dzirdot” kanālu visos telpas virzienos vienādi) – traucējumu modelis ir tāds pats kā pētījumos bez viedām antenām; pielietojams adaptīvam antenu režģim gan virziendarbības, gan MIMO režīmā;
- 3) virziendarbības PCS, kad raidītājs “dzird” kanālu ar vērsumu; pielietots tikai vadāmās lapas antenu režģim.

Vispirms ir salīdzināta PCS režīma ietekme uz caurlaidspēju, lai tālākiem pētījumiem izvēlētos piemērotāko viedās antenas veida un traucējuma modeļa kombināciju.

5.6. attēlā ir dota PCS pielietošanas efektivitāte (caurlaidspēja atkarībā no režģa elementu skaita N) katram viedo antenu veidam (atsevišķi 5.6a., 5.6b., 5.6c., 5.6d. attēlā). Maršrutu skaits komplektā ir mainīgs (2 līdz 4). Kopējais rezultātos ietvertu scenāriju skaits ir vismaz 36000 un katra punkta vērtību nosaka vismaz 300 rezultāti.

Salīdzinot attēlus, var secināt, ka PCS mehānisms būtiski neuzlabo caurlaidspēju nevienam no viedo antenu veidiem. Tas skaidrojams ar to, ka PCS palielina bloķēto

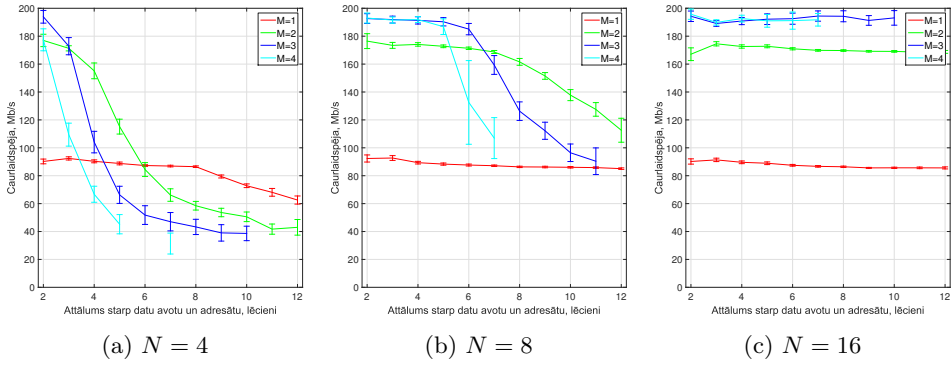


5.6. att. PCS efektivitāte *ad-hoc* tīklā ar viedajām antenām.

mezglu skaitu, kas ierobežo viedo antenu potenciālu palielināt telpisko atkalizmantojamību. Nelielu caurlaidspējas uzlabojumu PCS sniedz vadāmās lapas režģim, savukārt adaptīvam režģim gan virziendarbības, gan MIMO režīmā caurlaidspēja samazinās, ja režģa elementu skaits ir lielāks par divi. Pamatojoties uz to, turpmākajos pētījuma posmos vadāmās lapas antenu režģis ir izmantots ar virziendarbības PCS, adaptīvs režģis – ar atslēgtu PCS.

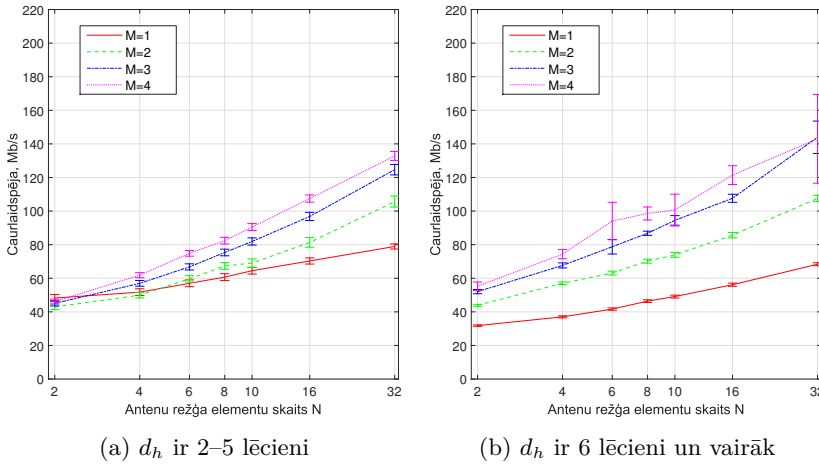
Tālāk ir pētīta viedo antenu efektivitāte starpmaršrutu traucējumu samazināšanā, ko raksturo sasniedzamais kopējais datu pārraides ātrums. Vispirms ir pārbaudīts, vai, pielietojot viedās antenas, datu pārraides ātrums un optimālais maršrutu skaits ir atkarīgs no attāluma starp datu avotu adresātu d_h . 5.7. attēlā ir parādīts viens gadījums ar adaptīvu virziendarbības antenu režģi. Ir iegūta caurlaidspējas atkarība no d_h dažādam maršrutu skaitam M ; atsevišķos grafikos $N = 4$, $N = 8$ un $N = 16$. Līdzīgi rezultāti ir iegūti arī pārējiem viedo antenu veidiem. No tiem var secināt, ka lielākam N attāluma ietekme samazinās. Ja N ir mazs, visiem virziendarbības antenu režģiem attālums ietekmē optimālo maršrutu skaitu, tāpēc tas ir jāņem vērā tālākos pētījumos. Līdzīgi kā iepriekš, robeža, kad mainās dažādu ietekmes faktoru raksturs, ir aptuveni 4–6 lēcieni. MIMO gadījumā attālums ietekmē tikai datu pārraides ātrumu, bet ne optimālo maršrutu skaitu, tāpēc tas tālākā analizē netiek ņemts vērā.

Tālāk noskaidrots optimālais maršrutu skaits dažādiem viedo antenu veidiem atkarībā no antenu režģa elementu skaita N . 5.8. attēlā parādīts rezultāts vadāmās lapas antenu režģim bez pastiprinājuma; 5.9. attēlā – vadāmās lapas režģim ar pastiprinājumu; 5.10. attēlā – adaptīvam virziendarbības antenu režģim; 5.11. attēlā – adaptīvam režģim MIMO režīmā. Virziendarbības antenu režģiem ir pētīti divi dažādi attāluma



5.7. att. Attāluma d_h ietekme uz caurlaidspēju dažādiem N .

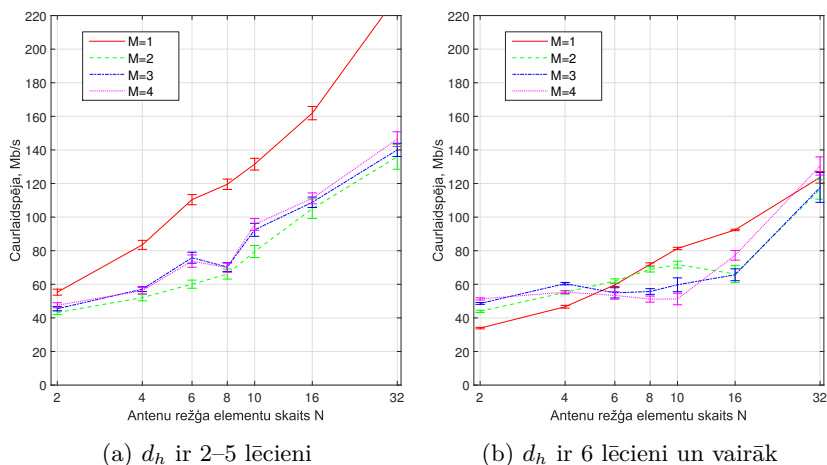
intervāli starp datu avotu un adresātu: d_h ir 2–5 lēcieni, un d_h ir 6 lēcieni un vairāk. Kopējais analizēto scenāriju skaits ir 36000, un katra punkta vērtību nosaka vismaz 300 rezultātu, ja $M = 1$ un $M = 2$, 40 rezultātu, ja $M = 3$, un 14 rezultātu, ja $M = 4$.



5.8. att. Optimāls maršrutu skaits atkarībā no N vadāmās lapas režģim bez pastiprinājuma.

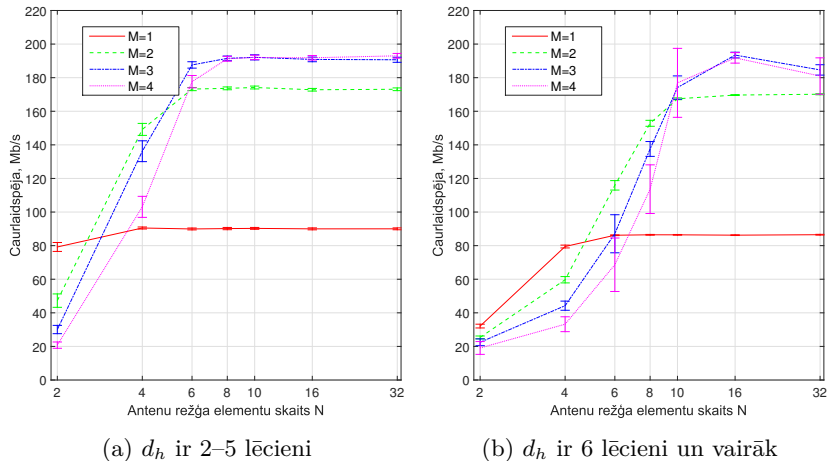
5.8. attēls parāda, ka, pielietojot **vadāmās lapas antenu režģi bez jaudas pastiprinājuma**, VMP ir efektīvāka, d_h ir lielāks. Tad ir iespējams nodrošināt stabili caurlaidspējas pieaugumu, palielinot maršrutu skaitu no $M = 1$ līdz $M = 3$ neatkarīgi no N . Mazam d_h maršrutu skaita palielināšana dod efektu, ja $N > 6$.

Izmantojot **vadāmās lapas režģi ar pastiprinājumu** (5.9. attēlā), praktiski visos gadījumos lielākais datu pārraides ātrums ir sasniedzams ar $M = 1$, un tas ir lielāks nekā režģim bez pastiprinājuma. Pastiprinājums ļauj samazināt lēcien skaitu (lielāka N gadījumā līdz pat vienam vai diviem lēcieniem) un līdz ar to ievērojami



5.9. att. Optimāls maršrutu skaits atkarībā no N vadāmās lapas režģim ar pastiprinājumu.

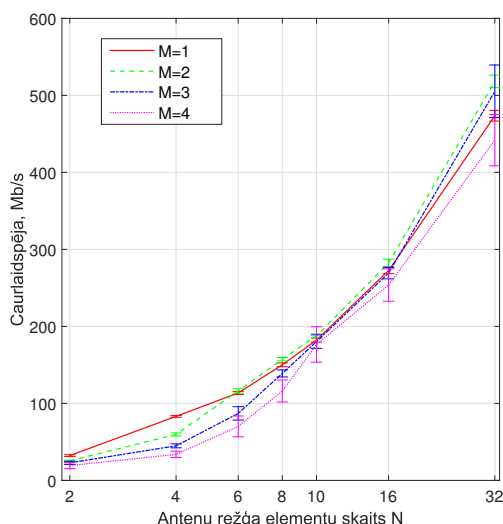
palielināt viena maršruta caurlaidspēju. Palielinot maršrutu skaitu, maksimāli sasniežamā caurlaidspēja saglabājas aptuveni tādā pašā līmenī vai ir zemāka nekā antenu režģim bez pastiprinājuma. Tas skaidrojams ar to, ka tiek pastiprināta ne tikai galvenā lapa, bet arī sānu lapas, kas rada radio traucējumus mezgliem blakus maršrutos.



5.10. att. Optimāls maršrutu skaits atkarībā no N adaptīvam virziendarbības režģim.

Analizējot 5.10. attēlus, var secināt, ka **adaptīvs režģis virziendarbības režīmā**, ja $N \geq 6$, nodrošina visefektīvāko vairāku maršrutu pārraidi – maršrutu skaita palielināšana līdz $M = 2$ caurlaidspēju pat dubulto. Ja elementu skaits ir mazs, tad augstāku caurlaidspēju nodrošina viens maršruts, jo VMP gadījumā nepietiek brīvības pakāpju, lai izslēgtu traucējumus no mezgliem blakus maršrutos. Ja $N \geq 10$, novēro-

jams piesātinājums, kad caurlaidspēja neturpina palielināties līdz ar režģa elementu skaitu, jo brīvības pakāpju skaits ir pietiekams, lai izslēgtu traucējumus no visiem traucējošajiem mezgliem. Tas nozīmē, ka ir sasniegts maksimāls ieguvums no telpiskās atkalizmantojamības. Salīdzinot 5.10a. un 5.10b. attēlu, var novērot, ka attālums d_h ietekmē tikai režģa elementu skaitu, pie kura VMP ir efektīva. Mazākā attālumā (2–5 lēcieni) – traucējošo mezglus skaits arī ir mazāks, tāpēc nepieciešams mazāk režģa elementu, lai traucējumus novērstu.

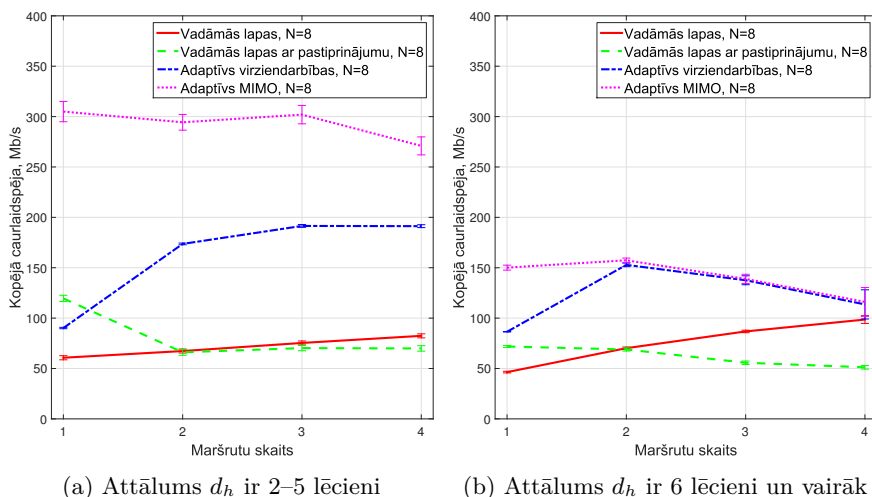


5.11. att. Optimāls maršrutu skaits atkarībā no N adaptīvam režģim MIMO režīmā.

5.11. attēls parāda – lai arī **MIMO** nodrošina kopumā augstāko caurlaidspēju (līdz pat trim reizēm, salīdzinot ar virziendarbību), maršrutu skaita palielināšana nedod vērā ņemamu caurlaidspējas pieaugumu. Tas ir skaidrojams ar brīvības pakāpju patērēšanu, lai izslēgtu traucējumus no daudzām paralēlām MIMO datu plūsmām blakus maršrutos. Līdz ar to nepaliek brīvības pakāpes, lai nodrošinātu derīgās datu plūsmas, kas palielina datu ātrumu. Neliels pieaugums gan parādās, ja $N = 32$, bet šādu elementu skaitu ir problemātiski nodrošināt mobilās iekārtās. Var secināt, ka MIMO pārraide nav efektīva vairāku maršrutu apstākļos, tomēr to ir efektīvi pielietot ar vienu maršrutu, kad vide ir pietiekami izkliedējoša.

Lai uzskatāmi salīdzinātu viedo antenu veidus savā starpā, pētījuma rezultāti ir apkopoti 5.12. attēlā, parādot caurlaidspējas atkarību no maršrutu skaita, ja $N = 8$. Salīdzinājums ir veikts divos atšķirīgos attāluma intervālos starp datu avotu un adresātu: 2–5 lēcieni (5.12a. attēls) un 6 lēcieni un vairāk (5.12b. attēls).

Var secināt, ka VMP efektivitāte ar viedajām antenām ir vairāk atkarīga no N nekā no attāluma starp datu avotu un adresātu, jo N nodrošina iespēju samazināt traucējumus. Režģa elementu skaitam jābūt pietiekamam, lai samazinātu traucējumus, kas



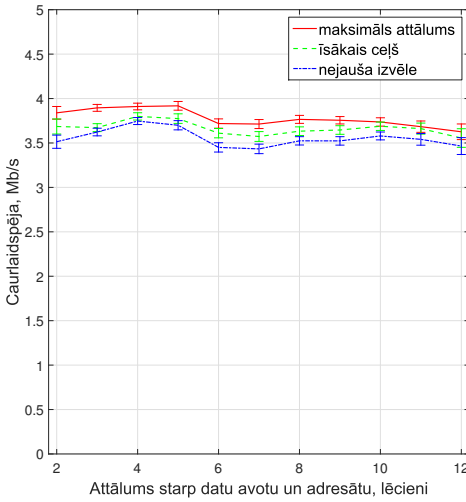
5.12. att. Kopējās caurlaidspējas atkarība no maršrutu skaita dažādiem viedo antenu veidiem.

rodas mezglu skaita pieauguma dēļ, palielinoties maršrutu skaitam. Attālums vairāk ietekmē datu pārraides ātrumu – jo mazāks attālums, jo pārraides ātrums augstāks. Efektīvākie antenu veidi VMP ir adaptīvs antenu režģis virziendarbības režīmā un vadāmās lapas antenu režģis, kam vienīgajam novērojama būtiska optimālā maršrutu skaita atkarība no attāluma starp datu avotu un adresātu.

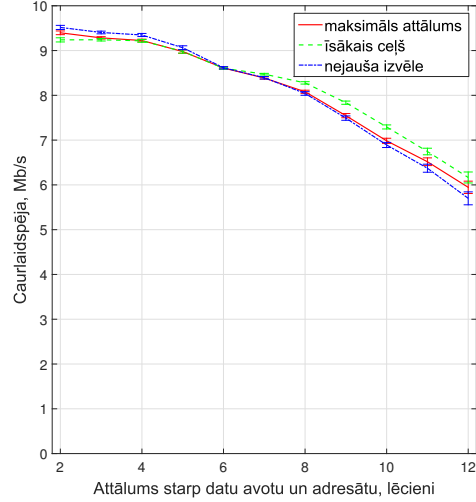
5. Maršrutu izvēles kritēriji ar viedām antenām. Ir noskaidroti optimāli maršrutu izvēles kritēriji *ad-hoc* tīklam ar viedām antenām. Pētījumā iekļauti tikai tie viedo antenu veidi, kuri pēc iepriekšējiem rezultātiem ir efektīvi VMP apstākļos, t.i., vadāmās lapas antenu režģis bez pastiprinājuma un adaptīvs antenu režģis virziendarbības režīmā.

Ir izmantoti 3. pētījuma posmā dotie maršrutu komplekta izvēles kritēriji: “maksimāls attālums”, “īsākais ceļš”, kā arī “nejauša izvēle”. Katra kritērija sniegtā caurlaidspēja ir pārbaudīta atkarībā no attāluma starp datu avotu un adresātu d_h . Rezultāti doti režģa elementu skaitam $N = 8$, kas nodrošina efektīvu caurlaidspējas pieaugumu (palielinot maršrutu skaitu) abiem režģu veidiem. Maršrutu skaits scenārijā mainās no divi līdz trīs. Rezultāti parādīti 5.13. attēlā atsevišķi katram antenu režģa veidam (5.13a. un 5.13b.). Kopējais analizēto scenāriju skaits ≈ 13000 , un katru vērtību nosaka vismaz 60 rezultāti.

5.13a. attēls parāda, ka vadāmās lapas antenu režģim nedaudz augstāku caurlaidspēju nodrošina maršruti ar lielāku savstarpējo attālumu neatkarīgi no d_h . Savukārt adaptīvam antenu režģim (5.13b.) maršrutu izvēles kritērijam ir relatīvi maza ietekme uz caurlaidspēju. Veicot pārbaudi arī ar citu režģa elementu skaitu, nevienam



(a) Vadāmās lapas antenu režģis ($N = 8$)



(b) Adaptīvs virziendarbības režģis ($N = 8$)

5.13. att. Maršrutu izvēles kritērija atkarība no attāluma starp datu avotu un adresātu.

no antenu veidiem nav novērojama optimālā kritērija atkarība no N . Tas ļauj secināt, ka neatkarīgi no apstākļiem vadāmās lapas antenu režģim jāizvēlas maršruti ar lielāku savstarpējo attālumu, savukārt adaptīvam antenu režģim (virziendarbības režīmā) – īsākā ceļa maršruti, kas ļautu noslogot mazāku skaitu mezglu.

5.3. Rekomendācijas caurlaidspējas palielināšanai

Apkopojot pētījumu rezultātus, ir izstrādātas rekomendācijas traucējumu ietekmes samazināšanai uz caurlaidspēju. Tās apvieno piemērotu maršrutu izvēli ar viedo antenu pielietošanu un ļauj izvēlēties antenas veidu, optimālu maršrutu skaitu komplektā un izvēles kritēriju. Rekomendāciju pielietošanai ir tālāk uzskaitītie soļi.

- 1) Izvēlas antenas veidu: parastā vai viedā antena. Viedās antenas nodrošina augstāku caurlaidspēju, kas ir atkarīga arī no antenu režģa veida un PCS pielietošanas. Viedus var sarindot šādā secībā no zemākas uz augstāku sasniedzamo caurlaidspēju: vadāmās lapas bez pastiprinājuma, vadāmās lapas ar pastiprinājumu, adaptīvs virziendarbības antenu režģis un adaptīvs MIMO antenu režģis. PCS sniedz pozitīvu efektu tikai vadāmās lapas režģiem.
- 2) Nosaka parametrus (tīkla apstākļus), kuri svarīgi katram no antenu veidiem:
 - parastai antena: vides raksturojumu α un attālumu starp datu avotu un adresātu;
 - viedā antena: režģa elementu skaitu N un attālumu starp datu avotu un adresātu.

- 3) Izvēlas optimālu maršrutu skaitu un izvēles kritēriju, pamatojoties uz tālāk dotajām rekomendācijām.

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 īsāka 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:

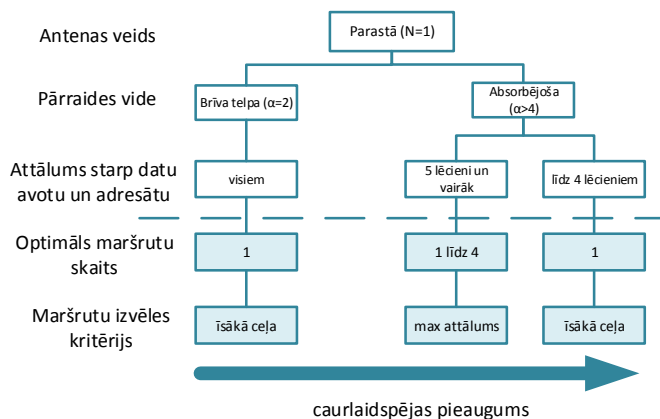
- vadāmās lapas antenu režģim bez virziendarbības pastiprinājuma jāņem vērā attālums starp datu avotu un adresātu: *a*) ja attālums ir neliels (2–4 lēcieni) un ja N ir līdz 6, izvēlas vienu īsākā ceļa maršrutu; ja N ir 8 un vairāk, izvēlas līdz 4 maksimāli nošķirtus maršrutus; *b*) lielākā attālumā (5 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 .

Rekomendējot optimālu maršrutu skaitu, bez caurlaidspējas ir ņemti vērā arī papildu faktori: *a*) iespējamība atrast mezglu nošķirtus maršrutus; *b*) iesaistīto mezglu skaits un attiecīgi potenciālais enerģijas patēriņš. Līdz ar to ir rekomendēts izvēlēties komplektu ar mazāku skaitu maršrutu, ja tas nodrošina līdzīgu vai nebūtiski lielāku caurlaidspēju tai, ko var sasniegt ar lielāku skaitu maršrutu.

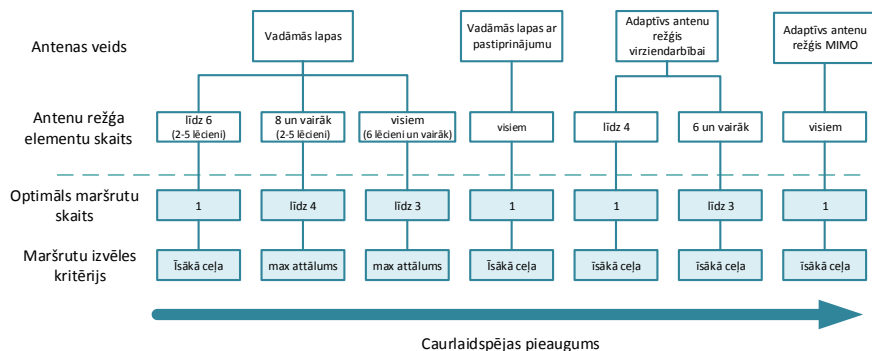
Rekomendācijas ir parādītas shematiski 5.14. attēlā atsevišķi *ad-hoc* tīklam ar parastām antenām (5.14a.) un ar viedām antenām (5.14b.). Antenu veidi un parametri ir sarindoti sasniedzamās caurlaidspējas pieauguma virzienā no kreisās uz labo pusi.

Izstrādātās rekomendācijas ir izmantojamas:

- maršrutēšanas protokola lēmumu pieņemšanas algoritmā, lai atkarībā no tīkla apstākļiem, t.i., pieejamā antenu veida un citiem parametriem, izvēlētos optimālu maršruta komplektu;
- lai kognitīvā *ad-hoc* tīklā, kura mezgli spējīgi izmantot jebkuru tehnoloģiju, izvēlētos labākos pārraides parametrus, t.i., antenas veidu un maršrutu komplektu, kas nodrošina potenciāli augstāku caurlaidspēju.



(a) Parastai antenai



(b) Viedām antenām

5.14. att. Rekomendācijas optimālu maršrutešanas parametru izvēlei.

5.4. Secinājumi

Šajā nodaļā ir veikta datormodelēšana ar izstrādāto MATLAB rīku. Traucējumu samazināšanas paņēmieni efektivitāte ir novērtēta, nosakot vidēji statistisko caurlaidspēju lielam skaitam nejaušu scenāriju. Ir modelēta optimāla maršrutu izvēle VMP, gan maršrutu skaita, gan maršrutu komplekta izvēles kritēriju ziņā (īsākais ceļš, maksimālais attālums starp maršrutiem vai nejauša izvēle). Iegūtie rezultāti apstiprina iepriekšējās nodaļās izdarītos secinājumus par svarīgākajiem faktoriem, kas ietekmē maksimāli iespējamo caurlaidspēju bezvadu *ad-hoc* tīklā.

Datu pārtraides ātrums ir atkarīgs galvenokārt no lēcieni skaita maršrutā starp da-

tu avotu un adresātu, kā arī no savstarpējiem traucējumiem datu pārraides 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 pārraides attālumu starp mezgliem. Savstarpējie traucējumi ir atkarīgi gan no attāluma starp maršruti VMP, gan no radioviļņu pārraides 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 pārraides ātrumu var sasniegt ar vienu maršrutu ($M = 1$). Datu pārraide, izmantojot VMP, kļūst efektīva lielākā attālumā (5 lēcieni un vairāk), tomēr, ja pārraides zudumu parametrs tuvojas brīvas telpas apstākļiem $\alpha = 2$, ieguvums ir vērā neņemams. Ja ir lielāki pārraides zudumi ($\alpha = 4$), palielinot maršrutu skaitu no 1 līdz 3, tad datu pārraides ātrums palielinās līdz pat 50%. Var secināt, ka **piemērotākie apstākļi vairāku maršrutu izmantošanai *ad-hoc* tīklā ir pie lielākiem pārraides zudumiem un kad attālums starp datu avotu un adresātu nav mazāks par kritisko robežu, kas ir 5 lēcieni.**

Ir pārbaudīts, vai optimālu maršrutu izvēles kritēriju pielietošana var uzlabot pārraides efektivitāti. Palielinot attālumu starp maršruti, samazinās savstarpējie traucējumi, taču pieaug lēcienu skaits, tāpēc datu pārraides ātrums nemainās vai pat samazinās. Neliels datu pārraides ātruma palielinājums gan novērojams, ja $\alpha = 4$ un ja attālums starp datu avotu un adresātu ir lielāks par 4 lēcieniem. Ar dotajiem modelēšanas nosacījumiem 4–6 lēcieni ir kritiskā robeža, kad mainās dažādu faktoru ietekmes raksturs uz datu pārraides ātrumu, kas ietekmē arī maršrutu izvēles kritēriju.

Salīdzinot trīs maršrutu komplekta izvēles kritērijus (īsākā ceļa mezglu nošķirtu maršrutu komplekts, komplekts ar maksimālu starpmaršrutu attālumu un nejauša izvēle), noskaidrots, ka īsākā ceļa maršrutu komplekts ļauj nodrošināt līdz 20% augstāku caurlaidspēju, ja pārraides attālums līdz 4 lēcieniem, bet maksimāls starpmaršrutu attālums dod labāku rezultātu, ja attālums ir 5–10 lēcieni, tomēr ieguvums ir mazāks (ja $M = 3$ – var pat neņemt vērā). Attālumā, kas lielāks par 10 lēcieniem, nav atšķirības, pēc kāda kritērija izvēlēties maršrutu komplektu. Nejauša izvēle nesniedz labāku rezultātu nevienā gadījumā. Neraugoties uz optimālu izvēles kritēriju izmantošanu, kritiskā attāluma robeža starp datu avotu un adresātu paliek spēkā.

Datu pārraides ātruma palielināšana iespējama, kombinējot optimālu maršrutu izvēli ar viedo antenu pielietošanu, tā samazinot savstarpējos traucējumus. Dažādu viedo antenu veidu modelēšana parāda:

- adaptīvs antenu režģis virziendarbības režīmā (viena telpiskā plūsma) nodrošina augstāko caurlaidspējas pieaugumu (vairāk nekā divas reizes), palielinot maršrutu skaitu līdz divi, kas ļauj secināt, ka **tas ir efektīvākais viedo antenu veids starpmaršrutu traucējumu samazināšanai;**

- MIMO tehnoloģija nodrošina kopumā augstāko tīkla caurlaidspēju, taču tā nedod būtisku ieguvumu VMP gadījumā;
- vadāmās lapas antenu režģis, neizmantojot pastiprinājumu pārraides attāluma palielināšanai, samazina starpmaršrutu traucējumus un ir pielietojams VMP, bet, izmantojot pastiprinājumu, ir efektīvs tikai pārraidei caur vienu maršrutu.

Viedo antenu potenciāls traucējumu samazināšanā no citiem mezgliem ir galvenokārt atkarīgs no brīvības pakāpju skaita, ko nosaka antenu režģa elementu skaits. Ja iespējamo traucētāju skaits palielinās, kas notiek, pirmkārt, datu avotam un adresātam atrodoties tālāk, un, otrkārt, izvēloties vairāk maršrutu, tad arī brīvības pakāpju skaits ir jāpalielina. Adaptīvam antenu režģim jānodrošina vismaz 6 elementi, lai vairāku maršrutu pārraide dotu vērā ņemamu uzlabojumu. Kad tiek izmantoti vairāki maršruti, brīvības pakāpes ir efektīvāk izmantot traucējumu samazināšanai nekā datu pārraides ātruma palielināšanai ar papildu telpiskajām plūsmām.

Viedo antenu gadījumā maršrutu komplekta izvēles kritēriji ir atkarīgi no režģa veida. 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 parāda, ka optimāla maršrutu izvēle uzlabo vairāku maršrutu 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 un tīkla apstākļiem. Tās ir izmantojamās maršrutēšanas protokolu lēmumu pieņemšanas algoritmos. Lai arī pētījumi ir veikti nekustīgām *ad-hoc* tīkla topoloģijām, rekomendācijas var piemērot arī kustīgiem scenārijiem, kombinējot traucējumus ietverošas metrikas ar kustīgumu raksturojošām metrikām.

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 faktoros ar video pārraidei svarīgām metrikām un parāda loģisko shēmu, pēc kādas jāanalizē tīkls, lai noteiktu šīs metrikas.

Eksperimenti IEEE 802.11g/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 modelē-

šanas palīdzību, nosakot to ietekmi uz vidēji statistisko caurlaidspēju lielumam skaitam nejaušu scenāriju.

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

Metode vairāku maršrutu caurlaidspējas noteikšanai ir īstenota *MATLAB* vidē kā *ad-hoc* tīkla modeļošanas 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 daudzlēcienu apstākļos;
- modeļošanas rīks ļauj iegūt rezultātu līdz 10 reizēm ātrāk, salīdzinot ar NS-2, tādēļ tas ir efektīvi pielietojams daudzu scenāriju analīzei; kopējo modeļošanai nepieciešamo laiku samazina paralēlā skaitļošana, kas ir veikta HPC klasterī.

Veicot modeļošanu, 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 starpmaršrutu 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 lēcienus

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] Toupmpis 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] IEEE Standards Association Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Std 802.11-2012, IEEE. – 2012.
- [9] 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.
- [10] Mohapatra P. and Krishnamurthy S.V. (eds.) Ad hoc networks. Technologies and Protocols. – Springer. 2005.
- [11] 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.
- [12] Ye Z., Krishnamurthy S., and Tripathi S. A framework for reliable routing in mobile ad hoc networks// Proceedings of IEEE INFOCOM. – 2003., vol. 1 – pp. 270–280.
- [13] Yi J., Adnane A., David S., and Parrein B. Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks// Ad Hoc Networks. – 2011. – vol. 9, no. 1, – pp. 28 – 47.
- [14] Johnson D. and Maltz D. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks T. Imielinski and H. Korth (eds.), Mobile Computing, Springer US, vol. 353 of The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. 1996 – pp. 153–181.
- [15] Perkins C. and Royer E. Ad-hoc on-demand distance vector routing// Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. – 1999. – pp. 90–100.

- [16] 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.
- [17] Conti M. and Giordano S. Multihop Ad Hoc Networking: The Reality// IEEE Communications Magazine. – 2007. – vol. 45, no. 4, – pp. 88–95.
- [18] Freifunk.net. Internets. – <http://freifunk.net/en/> [Citēts: 11.12.14].
- [19] Al-Sultan S., Al-Doori M., Al-Bayatti A., and Zedan H. A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network// Journal of Network and Computer Applications. – 2014. – vol. 37, no. 1, – pp. 380–392.
- [20] Jiang D. and Delgrossi L. IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments// IEEE Vehicular Technology Conference(VTC Spring 2008). – 2008. – pp. 2036–2040.
- [21] Jansons J., Petersons E., and Bogdanovs N. Analyses and evaluation of wireless local area network in vehicular mobility scenarios// Elektronika ir Elektrotehnika. – 2013. – vol. 19, no. 2, – pp. 97–100.
- [22] Li F. and Wang Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey// IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2007. – vol. 2, no. 2, – pp. 12–22.
- [23] Akyildiz I., Su W., Sankarasubramaniam Y., and Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey// Computer Networks. – 2002. – vol. 38, no. 4, – pp. 393–422.
- [24] Callaway E., Gorday P., Hester L., Gutierrez J., Naeve M., Heile B., and Bahl V. Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks// IEEE Communications Magazine. – 2002. – vol. 40, no. 8, – pp. 70–77.
- [25] Khursheed K., Ahmad N., Imran M., and O’Nils M. The effect of packets relaying on the implementation issues of the visual sensor node// Elektronika ir Elektrotehnika. – 2013. – vol. 19, no. 10, – pp. 155–161.
- [26] Radi M., Dezfouli B., Bakar K., and Lee M. Multipath routing in wireless sensor networks: Survey and research challenges// Sensors. – 2012. – vol. 12, no. 1, – pp. 650–685.
- [27] Cikovskis L., Kulins J., Vdovins S., Slaidins I., and Zhuga B. Ad-hoc and Wireless Mesh Networks for Mobile Peer-to-Peer Collaboration// Scientific Journal of RTU. 7. series., Telekomunik cijas un elektronika. – 2009. – vol. 9, – pp. 50–57.
- [28] Watts D.J. Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness. – Princeton University Press, Princeton, NJ. 1999.
- [29] 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.
- [30] Karlsson J., Li H., and Eriksson J. Real-time video over wireless ad-hoc networks// International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). – 2005., vol. 2005 – p. 596.

- [31] Cermak G., Pinson M., and Wolf S. The Relationship Among Video Quality, Screen Resolution, and Bit Rate// IEEE Transactions on Broadcasting. – 2011. – vol. 57, no. 2, – pp. 258–262.
- [32] Setton E., Zhu X., and Girod B. Minimizing distortion for multi-path video streaming over ad hoc networks// International Conference on Image Processing (ICIP). – 2004., vol. 3 – pp. 1751–1754.
- [33] Apostolopoulos J.G., tian Tan W., and Wee S.J. Video Streaming: Concepts, Algorithms, and Systems. Tech. rep., HP Laboratories. – 2002.
- [34] Ostermann J., Bormans J., List P., Marpe D., Narroschke M., Pereira F., Stockhammer T., and Wedi T. Video coding with H.264/AVC: tools, performance, and complexity// IEEE Circuits and Systems Magazine. – 2004. – vol. 4, no. 1, – pp. 7–28.
- [35] Mitrovic D. Video Compression. Tech. rep., University of Edinburgh. – 2006.
- [36] P tersons E. and Ipatovs A. Performance Evaluation of WLAN Depending on Number of Workstations and Protocols// Proceedings of the International Conference Electrical and Control Technologies. – – 2006., – pp. 266–270.
- [37] Colman D.D. and Westcott D.A. CWNA: Certified Wireless Network Administrator Official Study Guide. – John Wiley & Sons. 2012.
- [38] Wang Y.H., Lin H.Z., and Chang S.M. Interference on multipath QoS routing for ad hoc wireless network// Proceedings of 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. – 2004. – pp. 104–109.
- [39] Zhou B., Marshall A., and Lee T.H. A contention-vector based hybrid scheduling algorithm for wireless networks//. – – 2013., – pp. 929–934.
- [40] Heusse M., Rousseau F., Berger-Sabbatel G., and Duda A. Performance anomaly of 802.11b// Proceedings of IEEE INFOCOM. – 2003., vol. 2 – pp. 836–843.
- [41] Tanenbaum A.S. Computer Networks, 4th ed. – Upper Saddle River, NJ, United States: Pearson Education International. 2003.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Verma L., Fakhrazadeh M., and Choi S. Wifi on steroids: 802.11AC and 802.11AD// IEEE Wireless Communications. – 2013. – vol. 20, no. 6, – pp. 30–35.
- [45] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications// IEEE Selected Areas in Communications. – 2005. – vol. 23, no. 2, – pp. 201–220.
- [46] Sengupta S. and Subbalakshmi K. Open research issues in multi-hop cognitive radio networks// IEEE Communications Magazine. – 2013. – vol. 51, no. 4, – pp. 168–176.

- [47] Smulders P. The road to 100 Gb/s wireless and beyond: basic issues and key directions// IEEE Communications Magazine. – 2013. – vol. 51, no. 12, – pp. 86–91.
- [48] Ramanathan R. Mobile Ad Hoc Networking. Antenna Beamforming and Power Control for Ad Hoc Networks. – IEEE Press/Wiley. 2004.
- [49] Krzysztofik W. Fractal Geometry in Electromagnetics Applications - from Antenna to Metamaterials// Microwave Review. – 2013. – vol. 19, no. 2, – pp. 3–14.
- [50] Zhu J., Guo X., Yang L., Conner W., Roy S., and Hazra M. Adapting physical carrier sensing to maximize spatial reuse in 802.11 mesh networks// Wireless Communications and Mobile Computing. – 2004. – vol. 4, no. 8, – pp. 933–946.
- [51] Thorpe C., Murphy S., and Murphy L. IEEE802.11k enabled adaptive physical carrier sense mechanism for wireless networks (K-APCS)// Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Performance Monitoring, Measurement, and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks ACM. – 2009. – pp. 209–215.
- [52] Mao S., Lin S., Panwar S., Wang Y., and Celebi E. Video Transport over Ad Hoc Networks: Multistream Coding with Multipath Transport// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2003. – vol. 21, no. 10, – pp. 1721–1737.
- [53] Setton E., Yoo T., Zhu X., Goldsmith A., and Girod B. Cross-layer design of ad hoc networks for real-time video streaming// IEEE Wireless Communications. – 2005. – vol. 12, no. 4, – pp. 59–64.
- [54] Mao S., Lin S., Wang Y., Panwar S., and Li Y. Multipath video transport over ad hoc networks// IEEE Wireless Communications. – 2005. – vol. 12, no. 4, – pp. 42–49.
- [55] 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.
- [56] Lee S.J. and Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks// IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2001., vol. 10 – pp. 3201–3205.
- [57] Schwartz H. and Wien M. Standards in a nutshell: The scalable video coding extension of the H.264/AVC standard// IEEE Signal Processing Magazine. – 2008. – vol. 25, no. 2, – pp. 135–141.
- [58] Fiandrotti A., Gallucci D., Masala E., and Martin J.D. High-performance h.264/svc video communications in 802.11e ad hoc networks// Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2009. – vol. 5464 LNCS, – pp. 200–210.
- [59] 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.

- [60] Mao S., Hou Y., Sherali H., and Midkiff S.F. Multimedia-centric routing for multiple description video in wireless mesh networks// IEEE Network. – 2008. – vol. 22, no. 1, – pp. 19–24.
- [61] Aguilar Igartua M. and Carrascal Frías V. Self-configured multipath routing using path lifetime for video-streaming services over Ad Hoc networks// Computer Communications. – 2010. – vol. 33, no. 15, – pp. 1879–1891.
- [62] International Organization for Standardization (ISO) ISO/IEC 7498-1:1994 Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model. Internets. – <http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>. 1994 [Citēts: 24.11.2015].
- [63] Conti M., Maselli G., Turi G., and Giordano S. Cross-layering in mobile ad hoc network design// Computer. – 2004. – vol. 37, no. 2, – pp. 48–51.
- [64] Gavrilovska L. Cross-Layering Approaches in Wireless Ad Hoc Networks// Wireless Personal Communications. – 2006. – vol. 37, no. 3-4, – pp. 271–290.
- [65] Baldo Nicola; Zorzi M. Fuzzy Logic for Cross-layer Optimization in Cognitive Radio Networks// IEEE Communications Magazine. – 2008. – vol. 46, no. 4, – pp. 64–71.
- [66] Wang Y., Panwar S., Lin S., and Mao S. Wireless video transport using path diversity: Multiple description vs. layered coding// International Conference on Image Processing (ICIP). – 2002., vol. 1 – pp. I/21–I/24.
- [67] Lee Y.C., Kim J., Altunbasak Y., and Mersereau R. Performance comparisons of layered and multiple description coded video streaming over error-prone networks// Proceedings of International Conference on Communications (ICC). – 2003., vol. 1 – pp. 35–39.
- [68] Apostolopoulos J.G. and Trott M.D. Path diversity for enhanced media streaming// IEEE Communications Magazine. – 2004. – vol. 42, no. 8, – pp. 80–87.
- [69] Xue P. and Chandra S. Revisiting multimedia streaming in mobile ad hoc networks// Proceedings of the 2006 international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video. – 2006. – pp. 1–7.
- [70] Andrejevs A. Wireless Ad-Hoc Technology Bachelor thesis, Riga Technical University. 2014.
- [71] 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.
- [72] Baldo N.; Zorzi M. Cognitive network access using fuzzy decision making// IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2009. – vol. 8, no. 7, – pp. 3523–3535.
- [73] Raspberry Pi. Internets. – <http://www.raspberrypi.org/>. 2014 [Citēts: 09.09.2014].
- [74] Basu P., Khan N., and Little T. A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks// International Conference on Distributed Computing Systems Workshop. – 2001. – pp. 413–418.

- [75] Kuladinithi K. Wireless Multi-hop Ad hoc Networks: Evaluation of Radio Disjoint Multipath Routing Ph.D. thesis, University of Bremen. 2009.
- [76] Asif H., Sheltami T.R., and Shakshuki E. Power consumption optimization and delay minimization in MANET// The 6th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia. – 2008. – pp. 67–73.
- [77] Chow C.O. and Ishii H. Enhancing real-time video streaming over mobile ad hoc networks using multipoint-to-point communication// Computer Communications. – 2007. – vol. 30, no. 8, – pp. 1754–1764.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] Roy S., Bandyopadhyay S., Ueda T., and Hasuike K. Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Omni Directional and Directional Antenna: A Comparative Study S. Das and S. Bhattacharya (eds.), Distributed Computing, Springer Berlin Heidelberg, vol. 2571 of Lecture Notes in Computer Science. 2002 – pp. 184–191.
- [81] Gharavi H. and Hu B. Directional antenna for Multipath ad hoc routing// 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. – 2009. – pp. 1–5.
- [82] 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.
- [83] de Haan R., Boucherie R., and van Ommeren J.K. The Impact of Interference on Optimal Multi-path Routing in Ad Hoc Networks L. Mason, T. Drwiega, and J. Yan (eds.), Managing Traffic Performance in Converged Networks, Springer Berlin Heidelberg, vol. 4516 of Lecture Notes in Computer Science. 2007 – pp. 803–815.
- [84] Cikovskis L., Vdovins S., and Slaidins I. Multipath Routing with Adaptive Carrier Sense for Video Applications in Wireless Ad-Hoc Networks// Elektronika ir Elektrotechnika. – 2011. – , no. 6, – pp. 37–42.
- [85] 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.
- [86] Granelli F., Riggio R., Rasheed T., and Miorandi D. WING/WORLD: An open experimental toolkit for the design and deployment of IEEE 802.11-based wireless mesh networks testbeds// Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking. – 2010. – vol. 2010, – pp. 1–17.
- [87] GNU General Public License. OpenWrt. 2011.
- [88] BSD license. Iperf 2.0.2. 2012.

- [89] Li X. and Cuthbert L. On-demand node-disjoint multipath routing in wireless ad hoc networks// Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on Washington, DC, USA. – 2004. – pp. 419–420.
- [90] Jia Z., Gupta R., Walrand J., and Varaiya P. Bandwidth guaranteed routing for ad-hoc networks with interference consideration// Proceedings of 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). – 2005. – pp. 3–9.
- [91] Kuladinithi K. and Görg C. DYMO Implementation on OPNET-Analysis of Results. Tech. rep. – 2005.
- [92] Wu K. and Harms J. Performance study of a multipath routing method for wireless mobile ad hoc networks// Proceedings of Ninth International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. – 2001. – pp. 99–107.
- [93] Winters J. Smart antenna techniques and their application to wireless ad hoc networks// IEEE Wireless Communications. – 2006. – vol. 13, no. 4, – pp. 77–83.
- [94] 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.
- [95] Bellofiore S., Balanis C., Foutz J., and Spanias A. Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1. Overview and antenna design// IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2002. – vol. 44, no. 3, – pp. 145–154.
- [96] Gross F.B. Smart Antennas for Wireless Communications With MATLAB. – McGraw-Hill. 2005.
- [97] Godara L. Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations// Proceedings of the IEEE. – 1997. – vol. 85, no. 8, – pp. 1195–1245.
- [98] Ramanathan R. On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas// Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing ACM, New York, NY, USA. – 2001., MobiHoc '01 – pp. 95–105.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] Liu X., Sheth A., Kaminsky M., Papagiannaki K., Seshan S., and Steenkiste P. DIRC: Increasing Indoor Wireless Capacity Using Directional Antennas// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2009 Conference on Data Communication ACM, New York, NY, USA. – 2009., SIGCOMM '09 – pp. 171–182.

- [102] Gentian Jakllari Wenjie Luo S.V.K. An Integrated Neighbor Discovery and MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Directional Antennas// IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2007. – vol. Volume 6, Issue 3, – pp. 1114–1124.
- [103] Goldsmith A. Wireless Communications. – Cambridge University Press, New York, NY, USA. 2005.
- [104] Molisch A.F. Wireless Communications. – John Wiley & Sons, second edition ed. 2011.
- [105] Alamouti S. A simple transmit diversity technique for wireless communications// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1998. – vol. 16, no. 8, – pp. 1451–1458.
- [106] Li X., Huang H., Lozano A., and Foschini G. Reduced-complexity detection algorithms for systems using multi-element arrays// IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). – 2000., vol. 2 – pp. 1072–1076 vol.2.
- [107] 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.
- [108] Wolniansky P., Foschini G., Golden G., and Valenzuela R. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel// Conference Proceedings of the International Symposium on Signals, Systems and Electronics. – – 1998., – pp. 295–300.
- [109] Foschini G.J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas// Bell Labs Technical Journal. – 1996. – vol. 1, no. 2, – pp. 41–59.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] Luo L., Wu D., and Liu H. Mimo-aware spectrum access and scheduling in multi-hop multi-channel wireless networks// Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2014. – vol. 8491, – pp. 161–172.
- [113] Li Y. and Man H. Analysis of Multiparh Routing for Ad Hoc Networks using Directional Antennas// IEEE Vehicular Technology Conference. – 2004., vol. 60 – pp. 2759–2763.
- [114] Zhang B., Jia X., Yang K., and Xie R. Multi-path Routing and Stream Scheduling with Spatial Multiplexing and Interference Cancellation in MIMO Networks// IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. – 2013. – pp. 256–261.

- [115] 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.
- [116] Liu J., Nishiyama H., Kato N., Kumagai T., and Takahara A. Toward modeling ad hoc networks: current situation and future direction// IEEE Wireless Communications. – 2013. – vol. 20, no. 6, – pp. 51–58.
- [117] Gupta P. and Kumar P. The capacity of wireless networks// IEEE Transactions on Information Theory. – 2000. – vol. 46, no. 2, – pp. 388–404.
- [118] Jiang C., Shi Y., Hou Y., and Kompella S. On the Asymptotic Capacity of Multi-Hop MIMO Ad Hoc Networks// IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2011. – vol. 10, no. 4, – pp. 1032–1037.
- [119] 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.
- [120] 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.
- [121] Shi Y., Liu J., Jiang C., Gao C., and Hou Y. An optimal link layer model for multi-hop MIMO networks// Proceedings IEEE INFOCOM. – 2011. – pp. 1916–1924.
- [122] 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.
- [123] GNU General Public License. Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver. 2013.
- [124] Chen Q., Schmidt-Eisenlohr F., Jiang D., Torrent-Moreno M., Delgrossi L., and Hartenstein H. Overhaul of Ieee 802.11 Modeling and Simulation in Ns-2// Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems. – 2007., MSWiM '07 – pp. 159–168.
- [125] TOP 500. Internets. – <http://www.top500.org/>. 2015 [Citēts: 26.03.2015].
- [126] Large Hadron Collider (LHC). Internets. – <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>. 2015 [Citēts: 26.03.2015].

PIELIKUMI

MATLAB funkcijas tīkla izveidei

Funkcijas algoritms:

- 1 Izveido n mezglus, katru saglabājot *Net* struktūras elementā *Net.node(n)*. (MATLAB funkcija *create_node*).
- 2 Mezglu izvietošana tīklā (MATLAB funkcija *new_network*). Mezglus izvieto dotajā laukumā a , ģenerējot nejaušas x un y koordinātes. Koordinātes ieraksta struktūras elementā *Net.positions*, kā $n \times 2$ matrica.
- 3 Starpmezglu parametru noteikšana. Aprēķina zemāk dotos parametrus starp katriem diviem tīkla mezgliem, kurus pieraksta $n \times n$ matricās.

- (a) Attālums, kuru aprēķina izmantojot 2. solī ģenerētās koordinātes:

$$\mathbf{D} = [d_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

kur elements i -tā rindā un j -tā kolonā $d_{i,j}$ satur attālums starp diviem tīkla mezgliem ar indeksiem i un j , $i = 1 \dots n$; $j = 1 \dots n$; $d_{i,j} = 0$, kad $i = j$

- (b) Radio kanāla vājinājums, kuru aprēķina izmantojot attālumus $\mathbf{D}$ un radio viļņu izplatīšanās modeļus:

$$\mathbf{G} = [G_{ij}] \quad (1.2)$$

kur elements G_{ij} satur vājinājumu starp mezgliem ar indeksiem i un j .

- (c) Savstarpējais novietojums polārās koordinātēs jeb AoA:

$$\mathbf{AoA} = [\beta_{ij}] \quad (1.3)$$

kur elements β_{ij} satur leņķi, ko veido taisne, kas savieno mezglus ar indeksu i un j , ar mezgla i polāro asi.

- 4 Kaimiņu atrašana (MATLAB funkcija *find_neighbours*).

- (a) Balstoties uz raidīšanas attālumu d_{Tx} (4.37.) un starpmezglu attālumu $\mathbf{D}$ (1.1.), katram mezglam nosaka kaimiņmezglus, kurus ieraksta struktūras elementā *Net.node(n).neighbours*.
- (b) Pārbauda mezglu savienojamību. Ja kaut vienam mezglam nav kaimiņmezglu, programmu atsāk no 2. soļa ar citu mezglu izkārtojumu.

Ja pēc noteikta skaita ciklu nav izdevies atrast izvietojumu, kas nodrošina savienojamību, mezglu skaitu palielina par viens un programmu atsāk no tīkla izveides posma. Mezglu skaita palielināšana nodrošina lielāku mezglu blīvumu.

Informāciju par tīklu saglabā MATLAB struktūras tipa mainīgajā *Net*.

MATLAB funkciju kodi:

- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/create_node.m
- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/create_node_directivity.m
- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/new_network.m
- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/find_neighbours.m

MATLAB funkcijas maršrutēšanai

SMR protokola modeļa algoritms.

- 1 Visiem mezgliem nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uzstāda 0.
- 2 Datu avotā n_{source} ģenerē RREQ ziņojums, kurš jāpārsūta adresātam n_{dest} . Ziņojums satur tikai vienu lauku: $\langle maršruts \rangle$.
- 3 Ziņojumu ievieto n_{source} buferatmiņā un nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju palielina par 1.
- 4 RREQ ziņojuma plūdināšana. Ciklu izpilda līdz nevienam mezglam nav nepārsūtītu ziņojumu.
 - (a) Kārtējā ziņojuma sūtītāja n izvēle. Pirmajā izpildes reizē $n = n_{source}$.
 - Atlasa mezglus ar mazāko lēcienu skaitu līdz n_{source} .
 - Nejauši izvēlas kārtējo ziņojuma sūtītāju n .
 - (b) Ņem vecāko nepārsūtītais RREQ ziņojums no n buferatmiņas.
 - (c) Maršruta ierakstam ziņojuma pievieno mezglu n .
 - (d) Izveido sarakstu ar mezgla n kaimiņiem
 - i. Pēc kārtas pārsūta RREQ ziņojumu katram kaimiņam n_b . Kaimiņš RREQ ziņojumu pieņem, ja:
 - tas ir pirmais saņemtais RREQ ziņojums;
 - tā ir RREQ ziņojuma kopija un izpildās šādi nosacījumi
 - no mezgla n ziņojums vēl nav ticis saņemts
 - RREQ ziņojumā ietvertā maršruta lēcienu skaits ir mazāks vai vienāds par iepriekš pārsūtītajiem
 - ii. Ziņojumu ievieto n_b buferī; nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju palielina par 1, ja $n_b \neq n_{dest}$
 - (e) mezgls n samazina nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju par 1.
- 5 izvada adresāta n_{dest} saņemtos maršrutus.

MATLAB funkciju kodi:

- SMR https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/find_route_smr.m
- SMR* https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/find_route_smr_mod.m

AODVM protokola modeļa algoritms. Algoritms dalās divās daļās, kad uzstāda reverso maršrutu ar RREQ un tiešo maršrutu ar RREP ziņojumu. Reversā maršruta uzstādīšana realizēta līdzīgi ar SMR, atšķirībai parādoties tikai RREQ ziņojuma laukos un saņemto ziņojumu apstrādē relejmezglos.

Reversā maršruta uzstādīšana.

- 1 Visiem mezgliem nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uzstāda 0.
- 2 Datu avotā n_{source} ģenerē RREQ ziņojums, kurš jāpārsūta adresātam n_{dest} . RREQ ziņojums satur šādus laukus: $\langle source_id, dest_id, hops \rangle$, kur s_id ir datu avota identifikators, $dest_id$ - adresāta identifikators, $hops$ - ziņojuma veikto lēcienu skaits.
- 3 Ziņojumu ievieto n_{source} buferatmiņā un nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uzstāda 1.
- 4 RREQ ziņojuma plūdināšana. Ciklu izpilda līdz nevienam mezglam nav nepārsūtītu ziņojumu.
 - (a) Kārtējo ziņojuma sūtītāju n izvēlas identiski kā SMR algoritmā.
 - (b) Ņem RREQ ziņojumu n buferatmiņas.
 - (c) Izveido sarakstu ar mezgla n kaimiņmezgliem.
 - i. RREQ ziņojumu pēc kārtas pārsūta katram kaimiņam n_b . Saņemot RREQ ziņojumu,

kaimiņš n_b pievieno RREQ tabulā maršruta ierakstu ar distances vektoru uz datu avotu:
 $< source_id, n_id, hops + 1 >$. Tālāk veic vienu no darbībām:

- ja tas ir pirmais saņemtais RREQ ziņojums, to ievieto n_b buferatmiņā un nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju palielina par 1.
- ja tā ir kopija, to tālāk nepārsūta.

(d) mezgls n uzstāda nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uz 0.

Tiešā maršruta uzstādīšana.

- 1 Visiem mezgliem nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uzstāda uz 0.
- 2 Adresāts n_{dest} katram kaimiņmezgla n_b nosūta RREP ziņojumu pārsūtīšanai datu avotam n_{source} .
- 3 Lai datu avots redzētu pilnu maršrutu līdz adresātam, līdzīgi kā avotmaršrutēšanā, maršrutu pievieno RREP ziņojumam. Šajā solī pievieno mezglu n_{dest}
- 4 Ziņojumu ievieto n_b buferatmiņā un tā nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uzstāda 1, ja $n_b \neq n_{source}$.
- 5 RREP ziņojuma pārsūtīšana līdz n_{source} . Ciklu izpilda līdz nevienam mezgla n nav nepārsūtītu RREP ziņojumu.

- (a) Kārtējo ziņojuma sūtītāju n izvēlas identiski kā SMR algoritmā.
- (b) Ņem vecāko nepārsūtītais RREP ziņojums no n buferatmiņas.
- (c) Mezglu n pievieno maršruta ierakstam RREP ziņojumā.
- (d) Vadoties pēc RREQ tabulas, meklē kaimiņu n_b , caur kuru n_{source} sasniedzams ar mazāko lēcieni skaitu.

- Maršruta ieraksts ir atrasts (vienāda lēcieni skaita gadījumā, ņem pēc kārtas pirmo).
 - i. ziņojumu ievieto n_b buferatmiņā un tā nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uzstāda uz 1, ja $n_b \neq n_{source}$.
 - ii. Attiecīgo ierakstu izdzēš no mezgla n RREQ tabulas un pievieno galvenajai maršrutēšanas tabulai (šis solis programmas izpildei nav nepieciešams, bet ir pievienots korekta, AODVM algoritma izklāstam).
 - iii. Ierakstus, kuros parādās mezgls n , izdzēš no visu mezgla n kaimiņmezglu RREQ tabulām, ieskaitot RREP saņēmēju. Šis solis novērš cilpas un mezgla n parādīšanos vairākos maršrutos vienlaicīgi.
- Ja mezglam n nav maršruta ieraksta uz n_{source} , kaimiņmezgla, no kura RREP iepriekš saņemts, paziņo par kļūdu. Kaimiņmezgls
 - i. izdzēš visus ierakstus par mezglu n no RREQ tabulas
 - ii. atjauno savu nepārsūtīto ziņojumu skaitītāju uz 1 (pats ziņojums glabājas buferatmiņā, jo netiek izdzēsts).

6 Izvada datu avota n_{source} saņemtos maršrutus.

MATLAB funkcijas kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/find_route_aodvm.m

Citu ar maršrutēšanu saistītu MATLAB funkciju kods:

- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/path_selection.m
- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/net_structure_character.m
- https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/select_path_sets.m

MATLAB funkcijas pārtraides shēmu izveidei

Funkcijas algoritms:

1 Sastāda konfliktu grafu matricas formā, kas satur informāciju par savstarpējiem konfliktiem starp katriem diviem kopas L tīkla savienojumiem l_k un l_m . Pārbauda:

- (a) kuri tīkla savienojumu pāri pārkāpj pus-dupleksas pārtraides nosacījumu;
- (b) kuru tīkla savienojumu pāru raidītāji, vienlaicīgi raidot, pārsniedz viens otra PCS sliekšni.
- (c) kāda ir savstarpēji "justā" jauda raidītājos, abiem savienojumiem esot aktīviem vienlaicīgi. Traucējumi ir simetriski, tāpēc nemainās atkarībā no tā, kurš raidītājs veic PCS un kurš raida savam uztvērējam. Traucējošā signāla jaudu $P_{l_k}^{l_m}$, ko l_k raidītājs "jūt" no l_m , aprēķina:

$$P_{l_k}^{l_m} = RF_{l_k} RF_{l_m} G_{l_k, l_m} P_{l_m}^{Tx} \quad (3.1)$$

kur RF_{l_k} un RF_{l_m} ir attiecīgi savienojumu l_k un l_m raidītāju antenu režģa vērsuma amplitūda vienam pret otru, kad galvenā lapa ir vērsta pret savu uztvērēju, G_{l_k, l_m} ir kanāla vājinājums starp raidītājiem, $P_{l_m}^{Tx}$ ir raidīšanas jauda. Ja antenas ir bez vērsuma RF_{l_k} un RF_{l_m} ir 1.

Konfliktu grafa matricas k -tajā rindā K_{l_k, l_m} , kas atbilst savienojumam l_k , un m -tajā kolonā, kas atbilst l_m , ieraksta:

- "1", ja vienlaicīga pārtraide nav iespējama a) un b) neizpildes dēļ
- $P_{l_k}^{l_m}$ pārējos gadījumos

2 Pārtraides shēmas sastādīšana

- (a) Definē tukšu pārtraides shēma S un pagaidu kopu L_{temp} , kas satur savienojumus, kurus var ievietot shēmā. Sākotnēji $L_{temp} = L$.
- (b) No kopas L_{temp} nejausi izvēlas savienojumu l_k , kuru ievieto tukšā shēmā S .
- (c) Atlasa jauna kopu L_{temp} , kura ietver tos tīkla savienojumus, kuri pēc konfliktu grafa ir pieļaujami vienā shēmā ar l_k . To apmierina visi tie elementi konfliktu $\mathbf{K}$ grafa k -tajā kolonā, kuri mazāki par $1 - (\mathbf{K}(:, l) < 1)$.
- (d) No kopas L_{temp} nejausi izvēlas kārtējo savienojumu l_k .
- (e) Tā kā shēma nav tukša, veic traucējumu līmeņa pārbaudi pēc aditīva fizikālā traucējumu modeļa. Summē traucējumu jaudu, ko l_k raidītājs jutīs no katra shēmai piederošā savienojuma raidītāja P_{l_m} , kad tie raida savam attiecīgajam uztvērējam. Ņem vērā arī fona trokšņa jaudu P_N .

$$P_{l_k}^{PCS} = P_N + P_{l_1} + P_{l_2} \dots P_{l_m} \quad \forall l_m \in S, l_m \neq l_k \quad (3.2)$$

- (f) Ja $P_{l_k}^{PCS}$ nepārsniedz PCS sliekšni, savienojumu var pievienot shēmai S . Ja PCS sliekšnis ir pārsniegts, l_k izslēdz no turpmākas iekļaušanas L_{temp} .
- (g) Tiek veidota jauna kopu L_{temp} un cikls atkārtots no 2b. soļa. Ja nav neviena tīkla

savienojuma, kas neradītu konfliktu ar shēmā iekļautajiem savienojumiem (L_{temp} ir tukšs), shēma ir pilnīga un tās veidošana ir pabeigta.

- 3 Pabeigtu shēmu pievieno pārraides shēmu kopumam S_{all} , ja tā ir unikāla (nav izveidota iepriekšējās iterācijās). Lai to noteiktu, veic tās salīdzināšanu iepriekš atrastajām. Shēmu atkārtosšanās ir iespējama, jo tīkla savienojumu ievietošana shēmā ir nejauša.
- 4 Programmas ciklu atkārtoti no soļa 2a. līdz ar augstu ticamību ir atrastas visas shēmas. To nosaka uzskaitot neveiksmīgas iterācijas, kurās izveidotā shēma sakrīt jau ar iepriekš izveidotu.
- 5 Bloka izvade ir unikālu shēmu kopums tīkla savienojumu kopai L , kuru tālāk var izmantot optimizācijas uzdevuma sastādīšanai.

MATLAB kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/find_schemes.m

MATLAB funkcijas datu pārraides ātruma vektoru aprēķināšanai

Funkcijas algoritms:

- 1 No pārraides shēmu kopuma secīgi ņem pārraides shēmu.
- 2 Nosaka antenu režģa vērsumu un paralēlo datu plūsmu skaitu pārraides shēmas mezgliem.
 - $n \times n$ antenas vērsuma amplitūdu matrica $\mathbf{RF}$, kuras elementi parāda amplitūdu starp katriem diviem shēmas mezgliem. Matricas elements i -tā rindā un j -tā kolonā $RF_{i,j}$ satur vērsuma amplitūdu mezglā ar indeksu i virzienā pret mezglu ar indeksu j ($i = 1 \dots n; j = 1 \dots n; RF_{i,j} = 1$, kad $i = j$). Virzienu ņem no iepriekš noteiktas matricas $\mathbf{AoA}$.
 - $1 \times k$ vektors $\mathbf{z}$, kura k -tais elements z_k satur shēmas k -tā tīkla savienojuma l_k datu plūsmu skaitu.

Atkarībā no režģa elementu skaita N

- (a) ja $N = 1$, antenas vērsuma amplitūda visos virzienos ir 1 ($RF_{i,j} = 1 \quad \forall i,j$) un tīkla savienojumos pieļaujama viena datu plūsma ($z_k = 1 \quad \forall k$);
- (b) ja $N > 1$ izsauc viedo antenu bloku 4.3.5..
- 3 Nosaka pārraides ātrumu katram shēmas ietvertajam savienojumam pēc 4.2.3. apakšnodaļa dotajiem fizikālā slāņa modeļiem.
 - (a) No shēmas secīgi ņem savienojumu l ar raidītāju i un uztvērēju j
 - (b) uztvērējā j aprēķina SINR

- i. Traucējumu jauda, ko uztvērējs j saņem no raidītāja savienojumā l_k

$$P_j^{l_k} = RF_{j,l_k} RF_{l_k,j} G_{l_k,j} P_i^{Tx} \quad (4.1)$$

kur RF_{j,l_k} ir antenas vērsuma amplitūda mezglā j pret savienojuma l_k raidītāju, kura galvenā lapa ir vērsta pret savienojuma l_k uztvērēju, ja $N=1$, tad RF_{j,l_k} un $RF_{l_k,j}$ ir 1. $G_{l_k,j}$ ir kanāla vājinājums starp uztvērēju j un raidītāju l_k , P_i^{Tx} ir raidītāja jauda.

- ii. summārā traucējumu jauda no shēmas tīkla savienojumiem

$$P_j^I = P_j^{l_1} + P_j^{l_2} + \dots + P_j^{l_k} = P_N + \sum P_{l_k} \quad l_k \neq j \quad (4.2)$$

- iii. derīgā signāla jauda no raidītāja i

$$P_j^{Rx} = RF_{i,j} RF_{j,i} G_{i,j} P_i^{Tx} \quad (4.3)$$

- iv. Aprēķina SINR

$$\gamma = \frac{P_j^{Rx}}{P_N + P_j^I} \quad (4.4)$$

kur P_N ir fona trokšņa jauda.

(c) Aprēķina savienojuma pārraides ātrumu

$$C \approx Bz_l \log_2(1 + \gamma) \left\lceil \frac{bit_i}{s} \right\rceil \quad (4.5)$$

(d) Pārraides ātrumu ieraksta datu ātruma vektora elementā, kas atbilst konkrētajam tīkla savienojumam.

(e) Ciklu atkārto no soļa 3a. līdz visiem savienojumiem noteikts pārraides ātrums

4 Datu pārraides ātruma vektoru saglabā matricas $\mathbf{R}$ kolonā, kas atbilst shēmas kārtas numuram. Ciklu atkārtots no 1. soļa līdz visām pārraides shēmām aprēķināti datu ātruma vektori.

5 Izvada datu pārraides ātruma matricu $\mathbf{R}$.

MATLAB kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/rate_vector.m

MATLAB funkcijas viedām antenām

Traucējumu izslēgšanas shēmas algoritms:

- 1 Pārraidēs shēmā ietvertos mezglus sakārtā noteiktā secībā
- 2 Izmantojot sastādīto secību, katram mezglam nosaka mezglus pret kuriem jāveic traucējumu izslēgšana. To veic atkarībā no izvēlēta traucējumu izslēgšanas režīma

(a) “duplekss” režīms nosaka

- i. ja mezgls ir raidītājs, tam jāizslēdz traucējumi pret visiem uztvērējiem;
- ii. ja tas ir uztvērējs, tam ir jāizslēdz traucējumi pret visiem raidītājiem.

(b) OBIC režīms paredz

- i. ja mezgls ir raidītājs, tam ir jāizslēdz traucējumi pret uztvērējiem, kuru secības kārtas numurs ir pirms tā.
- ii. ja mezgls ir uztvērējs, tam ir jāizslēdz traucējumi no raidītājiem, kuru secības kārtas numurs ir pirms tā.

- 3 Katram mezglam izvada atlasītos mezglus un tam patērēto brīvības pakāpju skaits N_I .

MATLAB kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/ic_scheme.m

Fizikālā virziendarbības modeļa algoritms:

- 1 Izmanto iepriekš sastādīto mezglu secību (sarakstu).

- (a) Secīgi ņem i -to mezglu no saraksta.
- (b) Nosaka mezglus, pret kuriem mezglā i jāveic traucējumu izslēgšana (pēc traucējumu izslēgšanas shēmas).
- (c) Pielietojot izvēlēto virziendarbības metodi, nosaka režģa elementu svāra koeficienti ω .
- (d) Nosaka vērsuma amplitūdu RF starp i -to mezglu un j -to kaimiņmezglu, kā arī paredzēto raidītāju/ uztvērēju.

$$RF_{ij} = \boldsymbol{\omega}_i^H \mathbf{a}(\theta) \quad (5.1)$$

kur θ virziena leņķis mezglā i pret mezglu j , ņemts no $\mathbf{AoA}$.

- vērsuma amplitūdu normalizē tā, lai maksimums sakrīt ar bez virziendarbības režīmu, kad $RF_{ij} = 1$.
 - amplitūda nav normalizēta, lai izmantotu virziendarbības pastiprināju (tikai vadāmās lapas režģim)
- (e) Vērsuma amplitūdu ieraksta matricas $\mathbf{RF}$ elementā $RF_{(i,j)}$ pēc 4.3.5. apakšnodaļā izklāstītās metodikas.
 - (f) Ciklu atkārtoti no 1a. soļa

- 2 Izvada matricu $\mathbf{RF}$ un paralēlo datu plūsmu vektoru $\mathbf{z}$ (virziendarbības režīmā $z_k = 1 \quad \forall k$).

MATLAB kods: <https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/ic.m>

Brīvības pakāpju virziendarbības modeļa algoritms:

- 1 Izmantoto iepriekš sastādīto mezglu secību (sarakstu).
- 2 Visiem raidītājiem un to attiecīgajiem uztvērējiem piešķir vienu paralēlo datu plūsmu ($z_l = 1$), kas patērē vienu brīvības pakāpi.
- 3 Veic traucējumu izslēgšanu. Katrs mezgls tam var izmantot $N_{DoF} = N - 1$ brīvības pakāpes.

(a) Secīgi ņem i -to mezglu no saraksta.

- (b) Nosaka mezglus, pret kuriem mezglā i jāveic traucējumu izslēgšana (pēc traucējumu izslēgšanas shēmas), un aprēķina N_I .
- (c) Ja $N_I \leq N_{DoF}$, visus traucējumus ir iespējams novērst.
- i. $\mathbf{RF}$ matricas elementā $RF_{i,j}$, kas atbilst i -tajam mezglam, ierakstīta vēsuma amplitūda 0 attiecībā pret katru mezglu j .
 - ii. pārējie $\mathbf{RF}$ matricas elementi, kas atbilst i -tajam mezglam, ir vienādi ar 1 (tai skaitā pret paredzēto raidītāju/uztvērēju)
- (d) Ja $N_I > N_{DoF}$, brīvības pakāpju skaits ir nepietiekams un traucējumus i -tajā mezglā var novērst tikai pret daļu no paredzētajiem mezgļiem.
- i. Sastāda mezglu kopu L_{IC} , kas selektīvi ietver tos mezglus pret kuriem traucējumi tiks izslēgti. Tos var izvēlēties pēc dažādiem kritērijiem;
 - augstāks kārtas numurs mezglu secībā
 - mazāks attāluma līdz traucējumus izslēdzošajam mezglam u.c.
 - ii. $\mathbf{RF}$ matricas elementā $RF_{i,j}$, kas atbilst i -tajam mezglam ieraksta vēsuma amplitūda 0 attiecībā pret katru mezglu j , kurš pieder kopai L_{IC}
 - iii. pārējie $\mathbf{RF}$ matricas elementi, kas atbilst i -tajam mezglam, ir vienādi ar 1 (tai skaitā pret paredzēto raidītāju/uztvērēju)
- (e) Ciklu atkārti no 3a. soļa.
- 4 Izvada matricu $\mathbf{RF}$ un paralēlo datu plūsmu vektoru $\mathbf{z}$ (virziendarbības režīmā $z_k = 1 \quad \forall k$).

MATLAB kods: <https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/ic.m>

MIMO modeļa algoritms:

- 1 Veic sākotnējo traucējumu izslēgšanu, izmantojot uz brīvības pakāpēm balstītu virziendarbības modeli un OBIC shēmu
- 2 Katram mezglam nosaka neizmantotas brīvības pakāpes $N_{DoF} = N - N_I - 1$, kur N ir režģa elementu skaits, N_I - mezglu skaits pret kuriem veic traucējumu izslēgšanu.
- 3 Ja visiem mezgļiem $N_{DoF} \leq 1$, datu plūsmu skaita palielināšana nav iespējama.
 - (a) Izvada $\mathbf{RF}$ un $\mathbf{z}$ ($z_k = 1 \quad \forall k$)
 - (b) Programmas izpildi neturpina.
- 4 Ja $N_{DoF} > 1$ spēka visiem mezgļiem, datu plūsmu skaita palielināšana ir iespējama.
 - (a) Izvēlas raidītāju un tā attiecīgais uztvērējs, kuriem datu plūsmu skaitu palielina par vienu. Tiem jāatbilst šādiem nosacījumiem:
 - mazākais līdz šim piešķirto datu plūsmu skaits;
 - pie vienāda datu plūsmu skaita augstāka prioritāte sarakstā.
 - (b) Veic traucējumu izslēgšanu, izmantojot uz brīvības pakāpēm balstītu virziendarbības modeli un OBIC shēmu.
 - (c) Aprēķina visu mezglu neizmantotās brīvības pakāpes $N_{DoF} = N - N_I - 1$.
 - (d) Ciklu atsāk no 4. soļa.
- 5 Izvada matricu $\mathbf{RF}$ un paralēlo datu plūsmu vektoru $\mathbf{z}$, kas satur katram shēmas savienojumam atbilstošo plūsmu skaitu.

MATLAB kods: https://github.com/cikol/NetMat/blob/master/mimo_dof.m

NS-2 iestatījumi

```

1 #Mezglā izveides parametri
2 $ns_ node-config -adhocRouting FIXRT \
3                 -llType LL \
4                 -macType Mac/802_11Ext \
5                 -ifqType Queue/DropTail/PriQueue \
6                 -ifqLen 50 \
7                 -antType Antenna/OmniAntenna \
8                 -propType Propagation/Shadowing \
9                 -phyType Phy/WirelessPhyExt \
10                -channel Channel/WirelessChannel \
11                -topoInstance $topo \

1 # PHY parametri
2 Phy/WirelessPhyExt set CStresh_ 1.97644e-12;
3 Phy/WirelessPhyExt set Pt_ 0.1
4 Phy/WirelessPhyExt set freq_ 2.45e9
5 Phy/WirelessPhyExt set noise_floor_ 8.00777e-14;
6 Phy/WirelessPhyExt set L_ 1.0
7 Phy/WirelessPhyExt set PowerMonitorThresh_ 2.66926e-14;
8 Phy/WirelessPhyExt set HeaderDuration_ 0.000020
9 Phy/WirelessPhyExt set BasicModulationScheme_ 0
10 Phy/WirelessPhyExt set PreambleCaptureSwitch_ 1
11 Phy/WirelessPhyExt set DataCaptureSwitch_ 0
12 Phy/WirelessPhyExt set SINR_PreambleCapture_ 1000
13 Phy/WirelessPhyExt set SINR_DataCapture_ 1000
14 Phy/WirelessPhyExt set trace_dist_ 1e1
15 Phy/WirelessPhyExt set PHY_DBG_ 0
16
17 #MAC parametri
18 Mac/802_11Ext set CWMin_ 15
19 Mac/802_11Ext set CWMax_ 1023
20 Mac/802_11Ext set SlotTime_ 0.000009
21 Mac/802_11Ext set SIFS_ 0.000016
22 Mac/802_11Ext set ShortRetryLimit_ 7
23 Mac/802_11Ext set LongRetryLimit_ 4
24 Mac/802_11Ext set HeaderDuration_ 0.000020
25 Mac/802_11Ext set SymbolDuration_ 0.000004
26 Mac/802_11Ext set BasicModulationScheme_ 0
27 Mac/802_11Ext set use_802_11a_flag_ true
28 Mac/802_11Ext set RTSThreshold_ 2346
29 Mac/802_11Ext set MAC_DBG_ 0
30
31 #Radiovilnu izplatīšanas modeļa parametri
32 Propagation/Shadowing set pathlossExp_ 4.0 ;
33 Propagation/Shadowing set std_db_ 0
34 Propagation/Shadowing set dist0_ 1.0
35 Propagation/Shadowing set seed_ 0
36
37 #Antenas parametri
38 Antenna/OmniAntenna set X_ 0
39 Antenna/OmniAntenna set Y_ 0
40 Antenna/OmniAntenna set Z_ 1.0
41 Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
42 Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0

```