



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Deniss Brodņevs

MOBILO TĪKLU ĪPAŠĪBU ANALĪZE BEZPILOTA LIDAPARĀTU TĀLVADĪBAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Aeronautikas institūts

Deniss Brodņevs

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**MOBILO TĪKLU ĪPAŠĪBU ANALĪZE
BEZPILOTA LIDAPARĀTU TĀLVADĪBAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. habil. sc. ing.*
VITĀLIJS PAVELKO

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Brodņevs D. Mobilo tīklu īpašību analīze bezpilota lidaparātu tālvadībai. Promocijas darba kopsavilkums.

Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. – 41 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P- 22” 2021. gada 26. februāra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.12.1/4.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 17. decembrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 204. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Volodymyr Kharchenko*,
Nacionālā aviācijas universitāte, Ukraina

Profesors *Dr. sc. ing. Ramunas Kikutis*,
Viļņas Ģedimīna tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. habil. sc. ing. Vladimirs Šestakovs*,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

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

Deniss Brodņevs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 111 attēlu, 29 tabulas, kopā 141 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 103 nosaukumi.

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

2D – *Two-Dimensional* – divdimensionāls

2G – *Second Generation* – otrās paaudzes

3G – *Third Generation* – trešās paaudzes

4G – *Fourth Generation* – ceturtās paaudzes

AGL – *Above Ground Level* – augstums virs zemes līmeņa

AMC – *Automatic Modulation and Coding* – automātiskā modulācija un kodēšana

BS – *Base Station* – mobilā tīkla bāzes stacija

C2 – *Command and Control* – vadība (pilotēšana) un kontrole (telemetrija)

CID – *Cell ID* – šūnas identifikācijas numurs

COTS – *Commercial-Off-The-Shelf* – risinājums, kas ir pieejams standartiegādei

D2D – *Device-to-Device* – savienojums starp mobilajām iekārtām

D2WAN – *Device-to-Wide Area Network* – savienojums starp mobilo iekārtu un globālo tīmekli

DAN – *Double Attached Node* – diviem tīkliem pievienota ierīce

DC-HSPA+ – *Dual Carrier – evolved High Speed Packet Access protocol* – attīstīts ātrgaitas pakešu piekļuves protokols ar divām nesējfrekvencēm

DNS – *Domain Name Server* – domēna vārda serveris

Ec/Io – *Energy per chip to Interference power ratio* – elementa radiosignāla enerģijas un traucējumu jaudas attiecība

EDGE – *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* – uzlaboti datu pārraides ātrumi GSM tīkla attīstībai

ETSI – *European Telecommunications Standards Institute* – Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts

FPV – *First Person View* – telekomunikācijas metode, ko izmanto ar radiosignālu kontrolētu ierīču vadībā

GCS – *Ground Control Station* – zemes vadības stacija

GPS – *Global Positioning System* – globālā pozicionēšanas sistēma

GSM – *Global System for Mobile communications* – globālā mobilo sakaru sistēma

HARQ – *Hybrid Automatic ReQuest* – hibrīds automātiskās retranslācijas pieprasījums

HF – *High Frequency* – augstfrekvenču diapozons

HSPA – *High Speed Packet Access* – ātrgaitas pakešu piekļuves protokols

HSPA+ – *evolved High Speed Packet Access* – attīstīts ātrgaitas pakešu piekļuves protokols

ICAO – *International Civil Aviation Organization* – Starptautiskā Civilās aviācijas organizācija

ICMP – *Internet Control Message Protocol* – tīkla ziņojumu kontroles protokols

IP – *Internet Protocol* – interneta protokols

IPDV – *IP Packet Delay Variation* – IP pakešu aiztures variācija (džiters)

IPPM – *IP Performance Metrics working group* – IP veiktspējas metriku darba grupa

IPTD – *IP Packet Transfer Delay* – IP pakešu pārsūtīšanas aizture

ITU – *International Telecommunication Union* – Starptautiskā Telekomunikāciju savienība

KPI – *Key Performance Indicator* – datu tīklu galvenais veiktspējas rādītājs

LOS – Line-of-Sight – tiešā redzamība
LTE – Long Term Evolution mobile network – ilgtermiņa evolūcijas mobilais tīkls
LTE-A – Long Term Evolution – Advanced – LTE tīkls ar paplašinātām funkcijām
MASL – Mean Altitude above Sea Level – vidējais augstums virs jūras līmeņa
MB – Mobile Broadband – platjoslas mobilo sakaru tīkls
MIMO – Multiple-Input and Multiple-Output – daudzkanālu ieeja un daudzkanālu izeja
MPTCP – MultiPath TCP – vairāku vienlaicīgu savienojumu protokols
OSPPt – Test based on Probability Plot of Ordered Statistics – atbilstības pārbaude, kas balstās uz varbūtības sadalījuma diagrammu
PIFA – Planar Inverted-F Antenna – plakana apgrieztā F veida antena
PRP – Parallel Redundancy Protocol – paralēlas redundances protokols
RC – Remote-Control – tāl vadība
RCV – Remote-Controlled Vehicle – radiovadāms virszemes robots
RPA – Remotely Piloted Aircraft – tāl vadības gaisa kuģis
RPAS – Remotely Piloted Aircraft System – tāl vadības gaisa kuģu sistēma
RSCP – Received Signal Code Power – uztvertā signāla koda jauda
RSRP – Reference Signal Received Power – pilota uztvertā signāla jauda
RSSI – Received Signal Strength Indicator – uztvertā signāla stipruma indikators
RTT – Round-Trip Time (two-way delay) – divvirzienu laika aizture
SAN – Single Attached Node – vienam tīklam pievienota ierīce
SINR – Signal to Interference plus Noise Ratio – signāla un “traucējumi plus troksnis” attiecība
STDEV – Standard Deviation – standartnovirze
TCP – Transmission Control Protocol – pārraides kontroles protokols
UE – mobile User Equipment – lietotāja aprīkojums, kas darbojas, izmantojot mobilos tīklus
UHF – Ultra-High Frequency – ultra augsto frekvenču diapazons
UMTS – Universal Mobile Telecommunication System – universālā mobilā telesakaru sistēma
VHF – Very High Frequency – ļoti augsto frekvenču diapazons
v.i. – virtual instrument (labview executive file) – programma, kas darbojas *LabVIEW* vidē
VLOS – Visual Line-Of-Sight – tiešās redzamības līnija (zona)
WAN – Wide Area Network – globālais tīmeklis

SATURS

PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI	7
1. ESOŠO TĀLVADĪBAS GAISA KUĢU BEZVADU SAKARU RISINĀJUMU PĀRSKATS	14
2. AIZTURES NOVERTĒJUMS MOBILO SAKARU TĪKLOS	15
2.1. Sadales likuma piemērošana aizturēm LTE šūnā.....	15
2.1.1. Logaritmiski normālā sadalījuma pieņēmums.....	19
2.1.2. LTE šūnas aizturu sadalījuma parametru ātra iegūšanas metode.....	20
2.2. Kustības ietekmes uz aizturēm 3G un LTE tīklos eksperimentāla izvērtēšana.....	21
2.3. Aizturu izvērtēšana konkrēta mobilo sakaru operatora mobilajā tīklā.....	22
2.3.1. LTE mobila tīkla aizturu modeļa izstrāde, izmantojot eksperimentāli iegūtos datus	23
2.4. Prasību izstrāde “C2 link” kanālam.....	24
2.5. Analīze par LTE mobilā tīkla aizturu atbilstību “C2 Link” prasībām.....	25
3. LIDOJUMA AUGSTUMA IETEKMES ANALĪZE UZ 3G UN LTE DATU PĀRRAIDES PAKALPOJUMU VEIKTSPĒJU	28
4. METODES, KĀ SAMAZINĀT NESTABILAS DATU PĀRSŪTĪŠANAS KVALITĀTES IETEKMI, KAD TIEK IZMANTOTS MOBILAIS SAKARU TĪKLS .	33
SECINĀJUMI	36
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	40

PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis

Mūsdienās jaunu industriju ar lielu ekonomisku potenciālu sāk veidot uz tālvadības gaisa kuģu bāzes (*Unmanned Aerial Vehicles; UAV* – šeit un turpmāk no angļu val.). *UAV* darbojas kā daļa no bezpilota lidaparāta sistēmas (*Unmanned Aerial System; UAS*). Lai varētu darboties, jebkurai tālvadības gaisa kuģu sistēmai (*Remotely Piloted Aircraft System; RPAS*) ir nepieciešams drošs komandas (tālvadības pulsts) un kontroles (telemetrija) radio kanāls. *ICAO* terminoloģijā šis radio kanāls tiek saukts par *Command and Control link* jeb *C2 link* [1].

Lai īstenotu *C2 link*, parasti izmanto *VHF* (ļoti augstas frekvences) un *UHF* (ultra augstas frekvences) diapazonus. Radioviļņi šajos frekvenču diapazonos parasti izplatās taisnās redzamības virzienā (*Line of Sight; LOS*). Šeit ir vērts atzīmēt, ka radioviļņu izplatības modelis *RPAS* atšķiras no tradicionālā modeļa, kas ir derīgs virszemes bezvadu sakariem, jo saziņa notiek starp iekārtām, no kurām viena atrodas uz zemes un otra – gaisā.

Galvenā problēma ir tāda, ka *UAV* lidojums notiek relatīvi zemā augstumā (parasti pieļaujamais augstums ir līdz 120 m virs zemes līmeņa (*Above Ground Level; AGL*), dažās apdzīvotās vietās maksimālais augstums ir 50 m *AGL*). Zems augstums, kā arī spēja ātri mainīt lidojuma augstumu un ātrumu, palielina iespējamību, ka *C2 link* būs bloķēts. Tas pats par sevi būtiski samazina maksimālo lidojuma diapazonu, kurā var garantēt drošu *C2 link* darbību.

Mobilo datu pārraides tehnoloģiju lietošana (piemēram, 2G, 3G, *LTE*) var būtiski palielināt *C2 link* darbības attālumu. Tomēr mobilo datu pārsūtīšanas pakalpojumi līdz *LTE* (ieskaitot), sākotnēji bija paredzēti virszemes lietotājiem. Līdz ar to šo pakalpojumu sniegšana lidojošiem lietotājiem netiek garantēta. Darba uzdevums ir novērtēt mobilo tīklu datu pārraides servisu piemērotību *C2 link* ieviešanai zemu lidojošiem (līdz 120 m) *UAV*.

Pētījuma mērķis

Darba mērķis ir novērtēt mobilo *LTE* tīklu datu pārraides pakalpojumu piemērotību *C2 link* īstenošanai zemu lidojošiem (līdz 120 m augstumam) mazizmēra (1. kategorijas) tālvadības gaisa kuģiem.

Uzdevumi

1. Mazizmēra tālvadības gaisa kuģu kontroles un vadības kanāla (*C2 link*) prasību izstrāde aizturēm.
2. Sadales likuma piemērošana uz aizturu lielumiem *LTE* tīklā.
3. Mobilā tīkla dažādu šūnu aizturu vērtību eksperimentāla novērtēšana.
4. Mobilā tīkla aizturu atbilstības analīze mazizmēra tālvadības gaisa kuģu kontroles un vadības kanāla (*C2 link*) prasībām.
5. Eksperimentāls novērtējums par dažādu sauszemes lietotāju mobilitātes veidu ietekmi uz mobila tīkla 3G un *LTE* datu pakalpojumu darbību.
6. Eksperimentāls novērtējums par lidošanas augstuma ietekmi uz mobilā tīkla 3G un *LTE* datu pakalpojumu darbību.
7. Paralēla rezerves risinājuma izmantošana, lai palielinātu kontroles un vadības kanāla (*C2 link*) drošumu un samazinātu aiztures.

Pētniecības metodes

Definēto mērķu un uzdevumu sasniegšanai tika izmantoti teorētiski un eksperimentāli līdzekļi.

Eksperimentālajos pētījumos ietilpst pilna mēroga eksperimenti pieejamos reāli darbojošos mobilajos tīklos Latvijā. Kā eksperimentālie pamatlīdzekļi tīkla galveno veiktspēju indikatoru (*Key Performance Indicators; KPI*) un mobilo datu pārsūtīšanas servisu eksperimentāliem novērtējumiem tika izmantoti 3G/LTE portatīvie tīkla moduļi. Eksperimentālie novērtējumi tika veikti, izmantojot nekustīgi izvietotu eksperimentālo aprīkojumu uz zemes virsmas, kā arī pārvietojot to pa zemi un gaisā. Šiem nolūkiem tīkla moduļi tika vai nu stacionāri instalēti, vai pārvietoti ar automašīnas palīdzību, vai pacelti gaisā ar 450 mm dronu, kas aprīkots ar kompanjondatoru, vai pārvietoti gaisā ar vieglu lidmašīnu.

Pirmais tīkla modulis ir *Huawei E3372h*. Tas ir aprīkots ar divām plakanām apgriezta F veida antenām (*PIFA*), kas nodrošina izvietoto uztveršanu (*receiver diversity*). Tā ir 24. kategorijas 3G ierīce, kas atbalsta 64-QAM modulāciju un var darboties divšūnu DC-HSPA+ režīmā, un LTE 4. kategorijas ierīce, kas atbalsta darbību LTE šūnās un atbalsta līdz 20 MHz joslas platumu. Pēc noklusējuma tā darbojas *Hi-Link* režīmā (*CdcEthernet*). Šajā režīmā tā darbojas kā rūteris (*NAT server*) un emulē virtuālo tīkla karti (*NDIS*). Tās konfigurācija tiek veikta, izmantojot *Web* saskarni. Lai radiotīkla veiktspējas indikatorus varētu pierakstīt, ierīce tika pārprogrammēta *Stick* režīmā (programmaparatūra *21.315.01.00.143_M_01*). *Stick* režīms ļauj piekļūt sērijas *AT* komandu un atskaišu standartu kopumam. Visas atskaites ir pierakstītas un apstrādātas, izmantojot virtuālo instrumentu (v.i.), kas ir izveidots *LabVIEW* vidē un ļauj datu eksportēšanu *MS Excel*.

Otrais tīkla modulis ir *Huawei ME909s-120*. Tā ir 3G 24. kategorijas un LTE 4. kategorijas ierīce. Galvenā atšķirība no iepriekšminētās ierīces ir tāda, ka šajā modulī nav iebūvētoantenu, un tas ļauj veikt meklēšanu arī LTE šūnām (iepriekšējā ierīce ļāva meklēt šūnas tikai 2G un 3G tīklos) un pēc noklusējuma darbojas *MB (Mobile Broadband)* režīmā. Lai piekļūtu sērijas *AT* komandu un atskaišu standartu kopumam, ierīce tika pārslēgta uz atklūdošanas (*debug*) režīmu.

Visus radiotīkla parametrus paziņoja tīkla modulis (*Huawei E3372h* vai *Huawei ME909s-120*). Braukšanas ātrums un atrašanās vieta tika iegūta, izmantojot *GPS* uztvērēju *BU-353-S4*, kas arī tika savienots ar v.i. lietojumprogrammu, izveidotu *LabVIEW* vidē. Šī lietojumprogramma ir nodrošinājusi iegūto datu dekodēšanu, kā arī to eksportu uz *MS Excel* failu.

Datu pārraides tīkla aizturi parasti novērtēja, izmantojot *ICMP* paketes, lai izslēgtu ietekmi no bāzes stacijas ātrā apstiprinājuma (*HARQ*). *ICMP* vaicājumi tika ģenerēti ar *ping* utilitāprogrammu. Dažos īpašos gadījumos tika izmantoti dažādi citu pakešu tipi. Datu pārraides tīkla *KPI* tika novērtētas saskaņā ar *ITU* ieteikumu *T-REC-Y.1541* [2].

Pētījuma teorētiskais pamats ir drošuma teorija. Aizturu lielumu un to īpašību analīzes tika veiktas, izmantojot varbūtības teorijas un matemātiskās statistikas metodes, tajā skaitā: sadales līkuma piemērotības analīze tika veikta, izmantojot varbūtības sadalījuma diagrammas, kā arī izmantojot piemērotības pārbaudes (*goodness-of-fit tests*); sadales likumu parametru noteikšana tika veikta, izmantojot maksimālās iespējamības metodi (*maximum likelihood method*), kā arī izmantojot fraktālus (pieņemot hipotēzi par sadalījuma likumu); aiztures parametru apraksts tika veikts, izmantojot mainīgo lielumu sistēmu; aiztures apraksts paralēli rezervēta kanālā tika

veikts, izmantojot minimuma funkciju. Lielākā daļa aprēķinu, kā arī datu apstrāde tika veikta ar *MATLAB* un *MS Excel* palīdzību.

Darba zinātniskā novitāte

Darba zinātniskā novitāte ir piemērotības un piemērojamības ierobežojumu pierādījums *LTE* mobilo tīklu datu pārsūtīšanas servisu piemērojamībai kā *C2 link* kanāla bezvada risinājumu mazizmēra zemu lidojošiem (1. grupas, līdz 120 m) tālvadības gaisa kuģiem (*UAV*). Tas ir sasniegts, novērtējot prognozējamās aiztures, kas iegūtas, izmantojot eksperimentāli saņemtus mobila tīkla aizturu novērtējumus. Tiek novērtēta arī īpašo situāciju ietekme, kas rodas dažāda veida mobilitātes dēļ, kā arī lidojumu laikā.

- Darbā ietvertas piemērotības pārbaudes (*goodness-of-fit* tests) sadalījumu likumu hipotēzēm aizturu lielumiem šūnās. Tika pierādīts, ka *LTE* šūnas vidējas aiztures un aiztures džitera vērtību novērtējumus ar pietiekamu precizitāti ir iespējams noteikt, izmantojot aproksimāciju pēc logaritmiski normāla sadalījuma.
- Ir piedāvāta metode mobilā tīkla aiztures aprakstam, izmantojot sūnu sadalījuma parametru divdimensionālo sadalījuma funkciju.
- Darbā ietverts to faktoru saraksts, kas izraisa īslaicīgu aiztures palielināšanu 3G tīklos (*HSPA+* un jaunākos), kad lietotāja aprīkojums (*UE*) pārvietojas pa zemi.
- Darbā definētas problēmas, kas izraisa palielinātas aiztures / palielinātu pazaudēto pakešu skaitu 3G tīklos (*HSPA+* un augstāk), kad lietotāja aprīkojums (*UE*) pārvietojas virs zemes virsmas (lido). Tika konstatēts, ka tādas pašas problēmas ir arī *LTE* tehnoloģijā, tādējādi var samazināt arī *LTE* datu servisa ražotspēju.
- Tika pierādīta paralēlas rezervēšanas risinājuma lietojuma efektivitāte mobilajos datu servisos. Tika piedāvāta paralēli rezervēta kanāla aizturu prognozēšanas metode. Šajā metodē tiek izmantotas zināmas kumulatīvas sadalījuma funkcijas (*CDF*) un pakešu zudumi paralēlajos tīklos. Šo metodi var izmantot dažādam paralēlo tīklu skaitam.

Darba praktiskā nozīme

Darba praktiskā vērtība ir raksturlielumu skaitlisko vērtību, kā arī sakaru kanāla piemērojamības ierobežojumu nodrošināšana bezvadu *C2 link* kanāla izveidei mazizmēra *UAV*, izmantojot *LTE* mobilo datu pārraidi.

- Darbā izstrādātas prasības tīkla aizturēm tālvadības kanālā (*RC*) un video kanālā (*FPV*) mazizmēra *UAV*.
- Darbs ietver skaitliskus aizturu raksturlielumus *Tele2-LV LTE* tīklam. Iepriekšminēto aizturu skaitliskie raksturlielumi ir aprakstīti, izmantojot sadalījuma parametru divdimensionālo sadales funkciju, pieņemot, ka aiztures *LTE* šūnā ir logaritmiski normāli sadalītas. Piedāvāto pieeju var izmantot, lai izvērtētu *LTE* tīkla aizturu atbilstību prasībām konkrētajos gadījumos un lai izvērtētu *LTE* tīkla atbilstību plānotam komunikācijas kanāla lietojumam.
- Darbs ietver logaritmiski normāla sadalījuma parametru ātro iegūšanas metodi, kas izmanto zināmus minimālo RTT_{min} un vidējo $RTT_{average}$ lielumus. Šī pieeja ir ērta, jo *ping* utilitātprogramma uzreiz attēlo šos statistiku lielumus. Darbā ir iekļautas arī rekomendācijas nepieciešamam mērījumu skaitam *LTE* tīklā.

- Darbs ietver dedžitera bufera izmēra rekomendācijas, kad video kanāls (*FPV*) tiek nodrošināts, izmantojot *LTE* tīklu. Piedāvātie lielumi novērtēti, izmantojot *Tele2-LV* tīkla aizturu skaitliskos raksturlielumus.
- Darbs ietver *LTE* tīkla piemērojamības ierobežojumus *C2 link* kanāla izveidei mazizmēra *UAV*. Šo ierobežojumu lielumi tika iegūti, izmantojot izstrādātās prasības *RC* un *FPV* kanāliem, kā arī eksperimentāli iegūtos *LTE Tele2-LV* aizturu skaitliskos raksturlielumus.
- Darbā piedāvāta metode, kas dod iespēju novērtēt mobila tīkla bāzes staciju (*BS*) pārklājumu gaisā.
- Darbā ietverts *PRP* un *MPTCP* rezervēto risinājumu izmantošanas eksperimentālais novērtējums. Minētie risinājumi mobilo datu servisos iepriekš netika izmantoti. *PRP* un *MPTCP* rezervēto risinājumu ražotspēju eksperimentālie dati apstiprināja šo risinājumu izmantošanas efektivitāti *LTE* tīklos. Sniegti arī ieteikumi par mobilo datu pārraides pakalpojumu izvēli, izveidojot paralēli rezervēto kanālu.

Aizstāvamās tēzes

- Izstrādātās prasības tālvadības (*RC*) un video (*FPV*) kanālu aizturēm ir piemērojamas mazizmēra *UAV*.
- *LTE* šūnu aizturu lielumus var aprakstīt, izmantojot logaritmiski normāla sadalījuma parametru novērtējumus. Šī pieeja neizraisa pamanāmas kļūdas aizturu vidējas un aizturu džitera lielumu noteikšanā.
- Aizturu novērtēšana šūnu tīklos (piemēram, mobilajā tīklā) ir jāveic katrā šūnā atsevišķi; rezultātus nedrīkst apvienot.
- *LTE* šūnu aizturu lielumu sadales parametru divdimensionālas sadales funkcijas izmantošana ar aproksimāciju pēc normāla sadalījuma ir efektīvs risinājums aizturu aprakstam *LTE* tīklā.
- Aiztures *LTE* tīklā pieredzējušam pilotam ļauj izmantot šo tīklu kā bezvada risinājumu mazizmēra *UAV* tālvadībai (*RC*) un video kanālam (*FPV*).
- Ja mobilā tīkla pārklājums ir pietiekams, tad *UAV* vārētu būt pilotējams, izmantojot video kanālu (*FPV*), tikai tad, ja video saspiedatspiedējs atbalsta 1 % pakešu zudumus. Šajā gadījumā dedžitera bufera izmēram ir jāatbilst *IPDV* vērtībai, kas tika noteikta uz robežas 0,99. Konstanta izmēra dedžitera bufera izmantošana *LTE* tīklā nedod iespēju iegūt pietiekami zemas aiztures, ko pieprasa video kanāls (*FPV*).
- 3G/*LTE* tīklu ražotspēja lidojošiem lietotājiem ir pakļauta negatīvajiem efektiem, tādiem kā palielināta interference un vairākas pārslēgšanas starp bāzes stacijām (*handovers*). Sarežģīts pārklājums gaisā izraisa *soft handover* funkcijas ļoti biežu aktivāciju, kas savukārt ievērojami palielina aiztures un džiteri, kā arī izraisa pakešu pārkārtošanu.
- 2G/3G/*LTE* bāzes staciju vertikāls pārklājums var tikt eksperimentāli novērtēts, izmantojot komunikācijas moduļa iebūvēto meklēšanas funkciju. Šī pieeja dod iespēju iegūt pilno pārklājuma attēlu, nevis tikai signāla parametrus no aktīvas bāzes stacijas.
- Paralēlas rezervēšanas lietojums 3G/*LTE* tīklos ir efektīvs rīks *C2 link* kanāla pieejamības un ražotspējas palielināšanai.

- Aiztures paralēli rezervētajā kanālā var tikt prognozētas, izmantojot piedāvāto metodi. Piedāvātajā metodē tiek lietota *ping* utilitārogrammas pieejamā statistika, un tā ir vairāk intuitīvi saprotama nekā eksistējošā pieeja, kuras pamatā ir Markova ķēdes.

Promocijas darba aprobācija

Par darba rezultātiem ziņots vairākās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Starptautiskā zinātniski praktiskā konference “Transport systems, logistics and engineering”: Mini UAV long- range communication link challenge, Riga, Latvia: Riga Aeronautical Institute, 2016.
2. RTU 57. starptautiskā zinātniskā konference: “Transports – Aerokosmiskā un transporta inženierija”: Latvijas mobilo sakaru operatoru datu pārsūtīšanas servisa kvalitātes eksperimentāla izpēte, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2016.
3. RTU 58. starptautiskā zinātniskā konference “Transports un aerokosmiskā inženierija”: Mobile user equipment reliable cellular data transfer service solution, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2017.
4. “IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering (RTUCON)”: High-Reliability Low-Latency Cellular Network Communication Solution for Static or Moving Ground Equipment Control, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2017.
5. “IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering (RTUCON)”: Reliable data communication link implementation via cellular LTE services for static or moving ground equipment control, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2018.
6. RTU 60. starptautiskā zinātniskā konference “Transports”: 3G/LTE mobilo tīklu signālu pārklājuma un kvalitātes mērīšana lielos augstumos, izmantojot attālināti vadāmo lidmašīnas sistēmu, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2019.
7. “IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering (RTUCON)”: Method for estimating delays in parallel redundant data transfer networks, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2019.
8. RTU 61. starptautiskā zinātniskā konference “Aviācijas transports”: UAV Control via Mobile Cellular Networks., Riga, Latvia: Riga Technical University, 2020.
9. “IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)”: An Approach to Constructing a Model of Delays in Cells of a Cellular Network Based on Experimentally Obtained Data, Riga, Latvia: Riga Technical University, 2020.

Darba rezultāti ir publicēti deviņos zinātniskajos rakstos.

1. D. Brodnevs and A. Kutins, “An Experimental Study of Ground-Based Equipment Real Time Data Transfer Possibility by Using Cellular Networks,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 11–19, Jul. 2017.
Indexing: Web of Science.
2. D. Brodnevs and A. Bezdels, “High – Reliability low – Latency cellular network communication solution for static or moving ground equipment control,” in *Proc. IEEE 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2017, pp. 1–6.
Indexing: IEEE, Scopus, Web of Science.
3. D. Brodnevs and A. Kutins, “Cellular networks selection for the remote control vehicles’ control channel setup with parallel redundancy,” *J. Mod. Technol. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 63–74, 2018.
4. D. Brodnevs, “Development of a Flexible Software Solution for Controlling Unmanned Air Vehicles via the Internet,” *Transp. Aerosp. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–43, 2018.
5. D. Brodnevs and A. Kutins, “Reliable data communication link implementation via cellular LTE services for static or moving ground equipment control,” in *Proc. IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2018, pp. 1–6.
Indexing: IEEE, Scopus, Web of Science.
6. D. Brodnevs and A. Kutins, “Deterioration Causes Evaluation of Third Generation Cellular LTE Services for Moving Unmanned Terrestrial and Aerial Systems,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 141–148, 2018.
Indexing: Web of Science.
7. D. Brodnevs and M. Hauka, “Method for estimating delays in parallel redundant data transfer networks,” in *Proc. IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2019, pp. 1–6.
Indexing: IEEE, Scopus, Web of Science.
8. D. Brodnevs and A. Kutins, “An Approach to Constructing a Model of Delays in Cells of a Cellular Network Based on Experimentally Obtained Data,” in *Proc. IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, 2020, pp. 206–211.
Indexing: IEEE, Scopus, Web of Science.
9. D. Brodnevs and A. Kutins, “Requirements of End-to-End Delays in Remote Control Channel for Remotely Piloted Aerial Systems,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 36, no. 2, pp. 18–27, 2021.
Indexing: IEEE, Scopus, Web of Science.

Darba struktūra

1. nodaļā ir esošo risinājumu pārskatīšana attiecībā uz *UAV* bezvadu komandās un kontroles kanālā (*Command and Control (C2) link*).
2. nodaļā ir analizēta 3G un *LTE* mobilo sakaru tīklu darbība, kā arī sniegts pārskats par 3G un *LTE* mobilo sakaru tīklu tehnoloģisko aspektu, kas būtiski ietekmē pakalpojumu kvalitāti. Tiek sniegts eksperimentāls novērtējums par mobilitātes ietekmi uz 3G un *LTE* tīklu veiktspēju. Tajā arī pierādīta sadales likuma piemērošana attiecībā uz aiztures vērtībām, kas attiecas uz *LTE* tīkliem, kā arī sniegti ieteikumi par nepieciešamo mērījumu skaitu, lai novērtētu parametrus ar vajadzīgo pielāides varbūtību. Tālāk nodaļā aprakstīta metode, kas ļauj aprēķināt sadales parametrus no zināmām minimālām *RTT* un viduvējām *RTT*, kas ir pieejamas no *ping* utilitprogrammas atskaitēm. Tiek nodrošināta divdimensionāla mainīgo lielumu sistēma *LTE* šūnu aizturēm. Visbeidzot, tiek sniegta reāli strādājoša *LTE* tīkla aizturu piemērotības analīze komandas un kontroles kanālam (*C2 link*).
3. nodaļā analizēti ierobežojošie faktori, kas samazina 3G un *LTE* veiktspēju lielā augstumā.
4. nodaļā aprakstīts matemātiskais modelis, kas ļauj paredzēt paralēli rezervētā tīkla veiktspēju, kā arī tā eksperimentālā pārbaude, ja tiek izmantoti divi rezerves *LTE* tīkli. Tajā ir arī divu eksperimentālo risinājumu apraksts rezerves risinājumiem (*PRP* un *multipath TCP*). Šo jau pieejamo risinājumu veiktspējas novērtējums mobilo sakaru tīklos līdz šim nebija iekļauts pieejamajos zinātniskajos dokumentos vai ziņojumos.

1. ESOŠO TĀLVADĪBAS GAISA KUĢU BEZVADU SAKARU RISINĀJUMU PĀRSKATS

Esošo tālvadības gaisa kuģu komunikācijas sistēmu analīze rāda, ka esošajiem risinājumiem izmanto *VHF* un *UHF* frekvenču joslas, kas ir pamatojams ar izmantoto antenu izmēru un aparatūras ieviešanas sarežģītību. *VHF* un *UHF* frekvenču joslas radio viļņi izplatās tiešās redzamības robežās (*LOS*), kas būtiski samazina maksimālo stabilas uztveršanas diapazonu. Ir svarīgi piezīmēt, ka šādu ierīču raidītāju izstaroto jaudu ierobežo tālvadības gaisa kuģa (*UAV*) bateriju jauda, kā arī *ETSI* komisijas prasības. Izstarotās jaudas ierobežojumi vēl vairāk samazina maksimālo darbības diapazonu.

Parasti risinājumi, kas ir pieejami standartiegādei (*COTS*), tiek izmantoti *UAV* radio sistēmas uzbūvei, kas iekļauj *IEEE 802.11* un *IEEE 802.15* ierīces. Teorētiski šādu ierīču maksimālais darbības diapazons ir līdz 15 km, taču reālā situācijā, ņemot vērā to, ka zemes virsma nav ideāli gluda, maksimālais raidīšanas diapazons starp virszemes vadības staciju (*GCS*) un *UAV* tipiski nepārsniedz 2 km attālumu.

Liela attāluma risinājumu (piemēram, *Lora*) izmantošana teorētiski ļauj iegūt maksimālu sakaru diapazonu līdz 10 km, turpretī reālajā dzīvē diapazons ir ierobežots līdz *LoraWAN* pakalpojumu operatora pārklājuma zonai (Latvijā *LoraWAN* pakalpojumu nodrošina TET (bijušais Lattelekom)). Tomēr *LoraWAN* pakalpojumu izmantošana *C2 link* ir apšaubāma, jo šajā sistēmā ir ļoti zems datu pārraides ātrums.

Maziem *RPA* nav iespējams izmantot virszemes *HF* komunikāciju risinājumus un satelītu komunikāciju sistēmas šo komunikācijas ierīču sarežģītības, antenu izmēru un sistēmu jaudas patēriņa dēļ.

Ideja izmantot bezpilota dronus kā radio retranslācijas stacijas ir plaši aprakstīta zinātniskajā literatūrā, tomēr ekonomiski lietderīgi šādi risinājumi ir tikai atsevišķos speciālos gadījumos.

Šobrīd mobilo sakaru tīklu (*2G*, *3G*, *LTE*) izmantošana ir uzskatāma par visefektīvāko un lētāko no mazizmēra risinājumiem, lai ievērojami palielinātu sakaru kanāla darbības diapazonu. Šobrīd jau ir pieejami vairāki projekti, kas ļauj izmantot nevis standarta radio sakaru kanālus, bet arī mobilo sakaru tīklus [3]–[7]. Šādi risinājumi ļauj izmantot mobilo sakaru tīklu kā alternatīvu komunikācijas risinājumu, kas balstās idejā “uz savu risku”.

2. AIZTURES NOVĒRTĒJUMS MOBILO SAKARU TĪKLOS

Pirms detalizētas 3G un *LTE* servisu darbības novērtēšanas ir jānovērtē to veikspēja. Iepriekšējs eksperimentāls novērtējums tika veikts šādi: institūta ēkā atradās stacionārie datori ar *Huawei 3372h* 3G/*LTE* modemiem. Tika izvēlēti divi galapunkti: serveris, kas atrodas universitātes ēkā, kā arī *Google free DNS* server (*IP: 8.8.8.8*). Lai atrastu cēloni gadījumā, ja notiek masīvs pakešu zudums, tika izmantoti divi galapunkti. Visi modemi bija ieslēgti atbilstošajā režīmā (3G vai *LTE*). Katrs modems bija aprīkots ar viena un tā pati operatora *SIM* kartēm: *LMT*, *Tele2-LV* un *Bite-LV*.

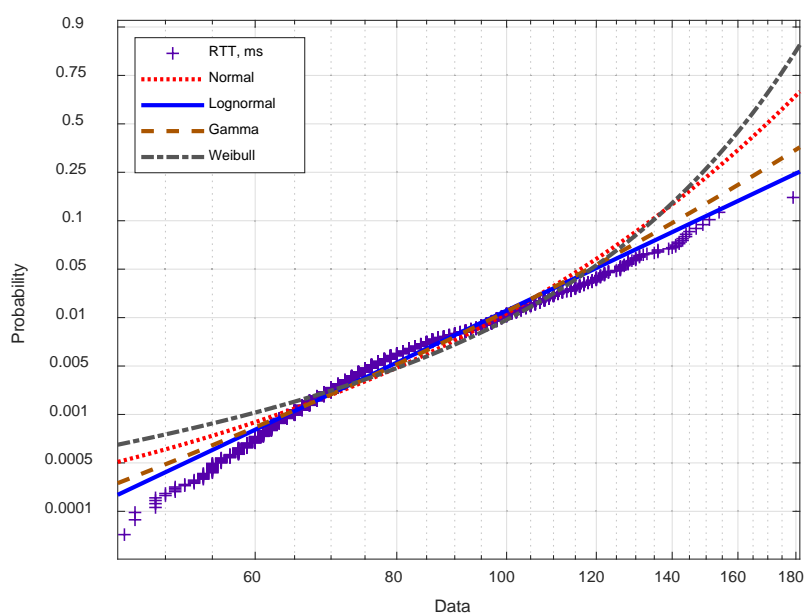
Pēc novērtējumu rezultātiem var secināt, ka 2016. gadā *LTE* tīkli Rīgā vēl nebija pilnībā ieviesti, savukārt 3G (*HSPA +* un *DC-HSPA +*) nodrošināja aiztures un pakešu zudumus, par kurām bija galvots. Jāatzīmē, ka pārslodzes gadījumā 3G *HSPA* tīkliem ir iespēja daļu lietotāju pārsūtīt uz zema ātruma kanālu (parasti to dēvē par *UMTS* režīmu). Tas rada apmēram četras reizes lielākas aiztures, bet ļauj zaudēto pakešu skaitam saglabāt samērā zemu robežu. *LTE* tīkliem nav šādu iespēju, un pārslodzes gadījumā daļa pakešu tiek zaudēta.

Eksperiments *LTE* tīklā tika atkārtots 2018. gadā, izmantojot tikai *Tele2* tīklu. Eksperiments apstiprināja, ka *LTE* pakalpojums ir kļuvis stabils un to var izmantot turpmākai novērtēšanai.

2.1. Sadales likuma piemērošana aizturēm *LTE* šūnā

Balstoties uz *RTT* vērtībām, kas iegūtas 2018. gadā *LTE* tīkla pētījumā, tika izveidotas kumulatīvas sadales funkcijas (*CDF*). Pēc tam tika veikts piemērojamā sadales likuma sākotnējais vizuālais novērtējums ar *Distribution Fitter* lietotnes palīdzību *MATLAB* vidē.

Šajā vizuālajā novērtējumā sakārtotie aizturu dati tiek salīdzināti ar sakārtotām iegūtajām vērtībām no gamma, logaritmiski normāla, normāla un Veibula sadalījumiem, kas redzami 2.1. attēlā. Lai novērtētu reāli strādājoša, noslogota tīkla aiztures, novērtējumā tika izmantoti *B3* diapazona *RTT* dati.



2.1. att. *B3* *LTE* joslas sakārtoto *RTT* vērtību varbūtības diagramma, salīdzinot ar normālo, logaritmisknormālo, gamma un Veibula sadalījumiem.

Sākotnējais vizuālais novērtējums liecina, ka *LTE* tīkla *RTT* vērtības visvairāk atbilst logaritmiski normāla sadalījuma likumam, un nākamais pēc atbilstības, visticamāk, ir gamma sadalījums. Lai kvantitatīvi novērtētu atbilstību sadalījuma likumam, tika izmantota pieņemšanas kritēriju analīze (*goodness-of-fit test*). Pirmo metodi dēvē par varbūtības pārbaudi uz varbūtības papīra (*Test based on Probability Plot of Ordered Statistics* jeb *OSPpt*). Šo metodi ir piedāvājis profesors Jurijs Paramonovs [8]. *OSPpt* statistikas vērtība hipotētiskai sadalījuma funkcijai tiek aprēķināta pēc formulas:

$$OSPpt = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{ns^2}}, \quad (2.1)$$

kur:

- OSPpt* – pieņemšanas kritērija statistiskais lielums;
- x_i – sakārtotie sagaidāmie lielumi $x_i = \hat{\theta}_0 + \hat{\theta}_1 E(\hat{X}_i)$;
- $\hat{\theta}_0$ un $\hat{\theta}_1$ – ir θ_0 un θ_1 parametru novērtējumi
- \hat{x}_i – sakārtotie eksperimentāli iegūtie lielumi;
- s^2 – ir $s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}$;
- n – eksperimentāli iegūto lielumu skaits.

OSPpt lielums tiek aprēķināts ar regresijas analīzes palīdzību, un tā vērtība ir neatkarīga no datu apjoma. Sagaidāmie x_i , kā arī eksperimentāli iegūtie \hat{x}_i lielumu kopumi veido diskrētas sadalījuma funkcijas ar noteikto lielumu daudzumu n . Lai samazinātu kļūdu, kas radusies x_i diskrēta rakstura dēļ, var izmantot Monte-Karlo metodi: sagaidāmo lielumu kopumi tiek veidoti *NMCorderStatistic* reizes, pēc kā katram x_i lielumam no i kārtas pozīcijas tiek meklēts vidējais lielums.

Kritiskās reģiona robežas lielums *OSPpt* testam tiek definēts ar 3.2. nevienādību.

$$OSPpt = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{ns^2}} > C_{alfa}, \quad (2.2)$$

kur:

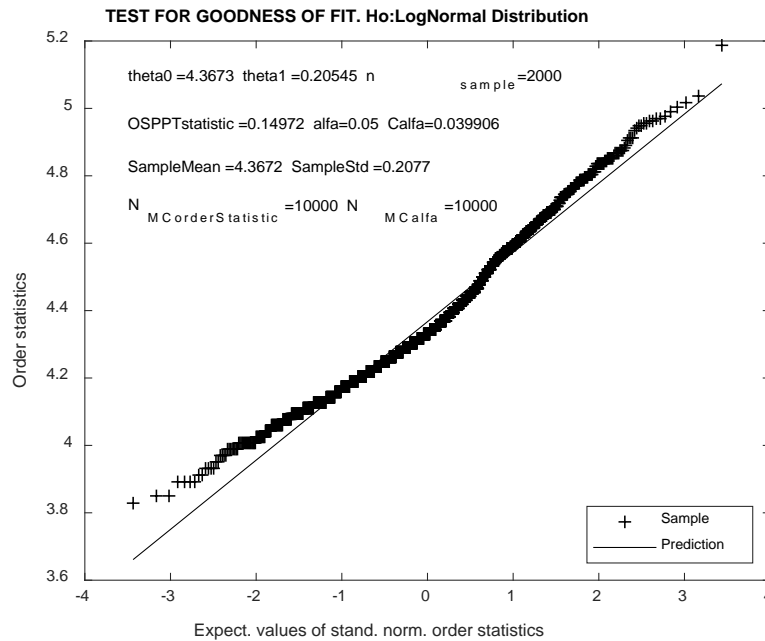
- C_{alfa} – kritiskā reģiona robeža;
- alfa* – nozīmīguma kritērijs.

Tātad noteiktas ticamības robežai *1-alfa*, ja $OSPpt > C_{alfa}$, nulles hipotēze par hipotētisko sadalījuma likumu nevarētu būt pieņemta. C_{alfa} ir *OSPpt* statistikas lielums. C lielumi tiek aprēķināti katriem diviem X_1 un X_2 sagaidāmo lielumu populāciju sakārtotiem lielumiem. Šie aprēķini tiek veikti *NMCalfa* reizes. Pēc tam C_{alfa} lielums tiek aprēķināts kā fraktāls no aproksimējoša normāla sadalījuma.

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_{1i} - \hat{x}_{2i})^2}{ns^2}}. \quad (2.3)$$

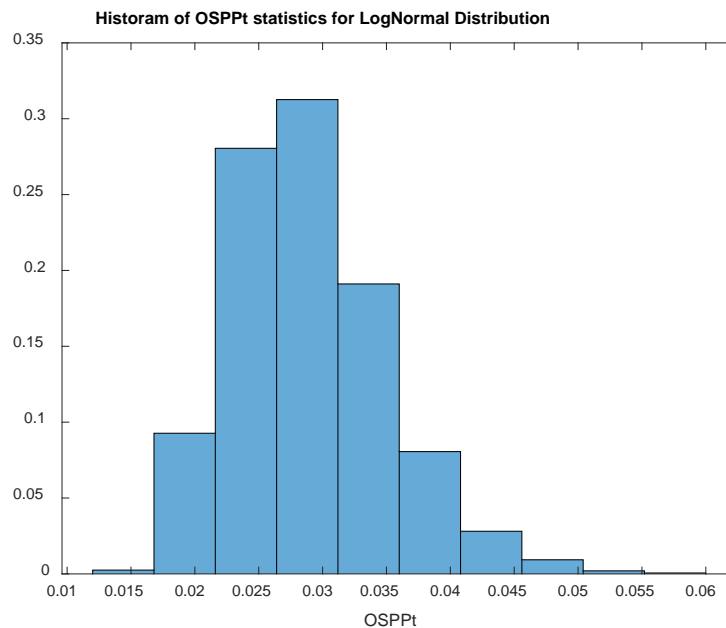
Parasti *IP Performance Metrics Working Group (IPPM)* veic analīzi ar nozīmīguma kritēriju 5%. Šajā darbā C_{alfa} arī tiks aprēķināta kā fraktāls no varbūtības $1 - 0,05 = 0,95$.

Lai nodrošinātu to, ka tīkla stāvoklis ievērojami nemainās, tika analizēti tikai pirmie 2000 mērījumu rezultāti. *RTT* lielumu grafiska reprezentācija logaritmiskajā skalā, kā arī nobīžu statistika (ierobežota pēc 95%) logaritmiski normāla sadalījuma hipotēzei redzama 2.2. un 2.4. attēlā.



2.2. att. Pārbaude pēc datu sakrītības ar logaritmiski normālo sadales likumu.

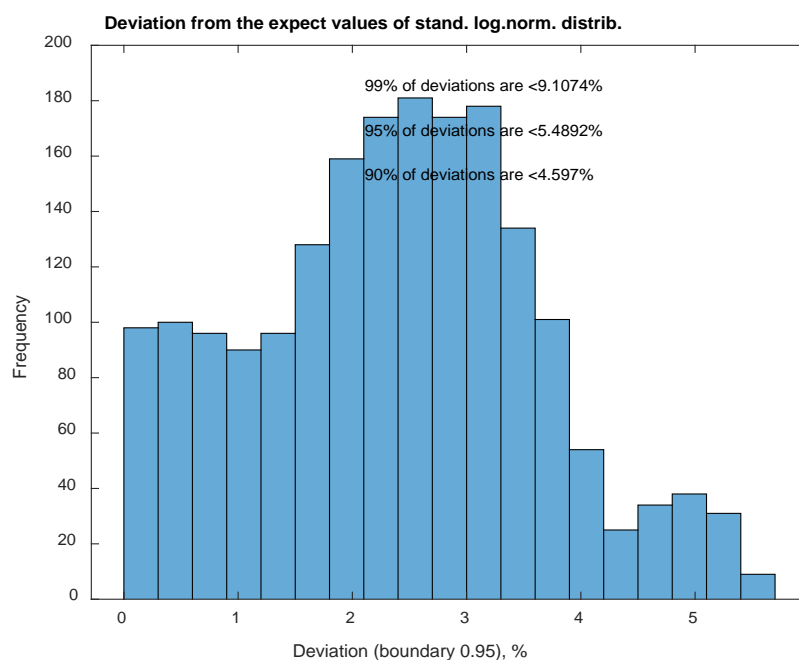
Ir redzams, ka $C_{\text{alfa}} = 0,039906$ ir daudz zemāka nekā $OSPPT = 0,14972$ vērtība, tādēļ hipotēze ir jānoraida. Saprotamībai tiks attēlota arī $OSPPT$ lielumu statistika C_{alfa} vērtībai (2.3. att.). Šeit C_{alfa} vērtība ir fraktāls no varbūtības $(1 - \text{alfa}) = 0,95$.



2.3. att. $OSPPT$ statistikas histogramma logaritmiski normāla sadalījuma hipotēzei.

Nobīžu Δx starp iegūtiem un prognozētiem logaritmiski normāli sadalītiem datiem histogramma redzama 2.4. attēlā, kur lielumi ir parādīti naturālā skalā. X ass ir ierobežota ar 0,95 varbūtības lielumu. Kā redzams, 95 % no nobīdēm ir mazākas par 5,4892 %. Nobīdes Δx starp eksperimentāliem datiem \hat{x}_i un prognozētiem lielumiem x_i ir definētas ar 2.4 formulu.

$$\Delta x_i = \left| \left(\frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right) \right| \cdot 100\% \quad (2.4)$$



2.4. att. Nobīžu histogramma starp iegūtiem un prognozētiem logaritmiski normāli sadalītiem datiem.

Novērtējumu ilustrācijas gamma, normāla un Veibula (*SEV* logaritmiskajā skalā) sadalījumu hipotēzēm ir parādītas promocijas darba pilnajā tekstā. *OSPpt* lielumi, kā arī nobīdes no prognozējamiem lielumiem apkopotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

OSPpt statistikas lielumi logaritmiski normāla, gamma, normāla un Veibula sadalījumu hipotēzēm

Nulles hipotēze	<i>OSPpt</i>	<i>C_{alfa}</i>	Nobīde no prognozējama lieluma (uz 0,90 robežas),%	Nobīde no prognozējama lieluma (uz 0,95 robežas),%	Nobīde no prognozējama lieluma (uz 0,99 robežas),%
<i>log-normal</i>	0,14972	0,039906	4,5970	5,4892	9,1074
<i>gamma</i>	0.17586	0,043469	5,5239	9,1548	17,8372
<i>normal</i>	0.26687	0,039949	8,4735	13,7242	31,8879
<i>Weibull</i>	0.37532	0,06546	11,0790	16,8631	28,9140

OSPpt lielumi rāda, ka *LTE* šūnas *RTT* lielumi neatbilst nevienam sadalījuma likumam, veicot nulles hipotēzes pārbaudi ar nozīmīguma kritēriju 0,05.

Tālāk tiks veikta *Anderson-Darling* analīze pieņemšanas kritērijam (*Anderson-Darling goodness-of-fit test; ADT*). *ADT* pārbaudes analīze ir rekomendēta dažādu tīklu metrikas pārbaudēm, piemēram, [9], [10]. Šajā analīzē nekorģēta *ADT* analīzes statistika *A* tiek definēta ar formulu:

$$A = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((2i - 1) \left(\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1})) \right) \right), \quad (2.5)$$

kur:

A – pieņemšanas kritērija statistikas lielums;

- n – eksperimentāli iegūto lielumu skaits;
- $F(X_i)$ – sagaidāma kumulatīva sadalījuma funkcija;
- X_i – sakārtotie sagaidāmie lielumi.

Tie paši $n = 2000$ eksperimentāli iegūtie dati tika analizēti ar *ADT*. Nozīmīguma kritērijs arī ir 5 %. *ADT* tiks izpildīts logaritmiski normālajiem, gamma, normālajiem, kā arī Veibula sadalījumiem *MATLAB* vidē, izmantojot funkciju *adtest*. Šo sadalījumu parametri nav zināmi, līdz ar to novērtējumi tiks iegūti ar maksimālās iespējamības metodi (*MLM*). Rezultāti logaritmiski normālajām, gamma, normālajām, kā arī Veibula sadalījumu hipotēzēm ir redzami 2.2. tabulā, kur A ir pieņemšanas kritērija statistikas lielums; P ir varbūtība novērot vēl ekstremālāko statistikas A lielumu nekā ir pašreizējai nulles hipotēzei; CV_α ir kritiskais lielums pie konkrēta nozīmīguma kritērija α .

2.2. tabula

ADT statistikas lielumi logaritmiski normāla, gamma, normāla un Veibula sadalījumu hipotēzēm

Nulles hipotēze	P	A	$CV_{0,05}$
<i>Log-Normal</i>	< 0,0005	15,786	0,75161
<i>Gamma</i>	< 0,0005	23,001	0,75161
<i>Normal</i>	< 0,0005	41,833	0,75161
<i>Weibull</i>	< 0,0005	59,394	0,76506

ADT analīzes rezultāti liecina par to, ka aiztures lielumi *LTE* šūnā neatbilst nevienam sadalījuma likumam, veicot nulles hipotēzes pārbaudi ar nozīmīguma kritēriju 0,05.

Neskatoties uz to, ka aiztures *LTE* šūnā neatbilst nevienam sadalījuma likumam (veicot analīzi ar ticamības līmeni 95 %), vizuāli tie visvairāk izskatās kā logaritmiski normālais sadalījums. Jāuzsver, ka 95 % nobīžu no sagaidāmiem lielumiem ir zemāki par 5,4892%. 2.1. attēlā redzams, ka vislielākās nobīdes starp eksperimentāli iegūtiem un sagaidāmiem lielumiem ir pie ļoti lieliem un ļoti maziem lielumiem. Jāatzīmē, ka aiztures minimālo vērtību tīklā nosaka šī tīkla aprīkojuma realizācija, kā arī šo minimālo vērtību var sasniegt tikai, kad tīklu izmanto viens vienīgs lietotājs. Taču, no vienas puses, logaritmiski normāla sadalījuma funkcija ir nepārtrauktas varbūtības funkcija, kas nozīmē – tai vispār nav noteikta minimāla vērtība. No otras puses, maksimālas aiztures vērtība realitātē ir definēta ar maksimālu pieņemamu aizturi, ko sasniedzot, pakete tiek uzskatīta par pazaudētu, un var tikt sūtīts pieprasījums pārsūtīt šo paketi no jauna. Tādējādi nav gluži korekti salīdzināt šo maksimālo vērtību ar lielumiem, iegūtiem no nepārtrauktas varbūtības funkcijas.

2.1.1. Logaritmiski normālā sadalījuma pieņēmums

Ņemot vērā to, ka vidējie *LTE* šūnas aizturu lielumi ļoti labi sakrīt ar logaritmiski normālo sadalījumu un tikai vislielākie un viszemākie lielumi atšķiras no tā, ir vērts izvērtēt gadījumu, ja aiztures *LTE* šūnā ir sadalītas pēc logaritmiski normāla sadalījuma. Ņemot vērā šo pieņēmumu, tiks izvērtētas kļūdas, kas ir radušās vidējās aiztures un pakešu džittera lielumu iegūšanas laikā.

Pirmkārt, tiks iegūts logaritmiski normāla sadalījuma parametru novērtējumi. Šeit varētu lietot vairākas metodes, tomēr maksimālās iespējamības metode (*maximum likelihood method; MLM*) ir vispiemērotākā cenzēto datu analīzei.

Pirmie $n = 2000$ eksperimentālo datu lielumi, kas tika izmantoti 2.1. nodaļā, tiks analizēti, izmantojot *MLM*. Respektīvi, iegūtie parametru novērtējumi ir $\hat{\theta}_0 = 4,367$ un $\hat{\theta}_1 = 0,20557$. Tad tie paši $n = 2000$ eksperimentālo datu lielumi tika analizēti, lai iegūtu *RTT* vidējo lielumu, kā arī to džiteru. Turpmāk 2000 gadījuma lielumi tika ģenerēti, pieņemot logaritmiski normālo sadalījumu un izmantojot parametru novērtējumus $\hat{\theta}_0 = 4,367$ un $\hat{\theta}_1 = 0,20557$. Pakešu džittera lielums tika noteikts kā vidēja nobīde no vidējas aiztures, izmantojot ieteikto *RFC3550* formulu [11].

Eksperimentāli saņemtiem datiem tika iegūti šādi lielumi: vidējais *RTT* = 80,62 ms; vidējais džiteris = 18,45 ms. Datiem, kas tika saņemti, izmantojot logaritmiski normāla sadalījuma funkciju un parametrus $\hat{\theta}_0 = 4,367$ un $\hat{\theta}_1 = 0,20557$, tika iegūts vidējais *RTT* lielums ir 80,67 ms (relatīvā kļūda 0,052 %); vidējais džitera lielums ir 18,40 ms (relatīvā kļūda 0,27 %). Relatīvo kļūdu vērtības tika noteiktas relatīvi eksperimentāliem datiem. Rezultāti apkopoti 2.3. tabulā.

2.3. tabula

Eksperimentāli iegūtie dati, kā arī aprēķinātie dati, pieņemot logaritmiski normālo sadalījumu

	<i>RTT</i> vidējais, ms	Džiteris vidējais, ms
Iegūtie no $n = 2000$ eksperimentāliem datiem	80,62	18,45
Iegūtie no $n = 2000$ aprēķinātiem datiem, izmantojot log-normālo sadalījumu un to parametru novērtējumus $\hat{\theta}_0$ un $\hat{\theta}_1$, kas tika iegūti no $n = 2000$ eksperimentāliem datiem	80,67	18,40
Kļūda, %	0,062	0,27

Var secināt, ka nolūkā iegūt novērtējumus vidējās aiztures un aiztures džitera lielumiem ar pietiekami mazu kļūdu var pieņemt hipotēzi par to, ka aiztures *LTE* šūnā atbilst logaritmiski normālam sadalījumam. Tādējādi turpmākajās sadaļās tiks pieņemts, ka aiztures *LTE* šūnās ir logaritmiski normāli sadalīti.

2.1.2. *LTE* šūnas aizturu sadalījuma parametru ātra iegūšanas metode

Apstiprinājums hipotēzei, ka *RTT* vērtības varētu būt aprakstītas ar logaritmiski normālā sadalījuma funkciju, ļauj aprakstīt konkrētas *LTE* šūnas *RTT* vērtības, izmantojot tikai divas sadales parametru vērtības $\theta_0 = \mu =$ mediāna un $\theta_1 = \sigma =$ standarta novirze, kas savukārt ir ļoti ērti. Tomēr, lai noteiktu sadalījuma parametrus, ir jāizmanto sarežģīti aprēķini, kas prasa lielus skaitļošanas resursus. Turklāt *ping* utilitprogramma neļauj iegūt visus aizturu lielumus, kas ir nepieciešami, lai veiktu šo analīzi.

Lai pēc iespējas vienkāršotu logaritmiski normāla sadalījuma parametru noteikšanas procesu, tika ierosināta šāda metode. Metodes pamatā ir zināmās vidējās un minimālās T_{avg} un T_{min} aizturu vērtības. Jāņem vērā, ka T_{avg} un T_{min} vērtības ir zināmas no standarta *ping* utilitprogrammas pārskata. Pieņemot hipotēzi, ka kvantils T_{min} ir vienāds ar $\Phi^{-1}(-3\sigma)$, var

noteikt sadalījuma funkcijas parametrus $\theta_0 = \mu = \text{median}$ un $\theta_1 = \sigma = \text{STDEV}$, risinot vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \sigma = \chi_p + \sqrt{\chi_p^2 \pm 2 \ln\left(\frac{T_{avg}}{T_{min}}\right)} \\ \mu = \ln(T_{min}) - \chi_p \sigma \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma = -3 + \sqrt{9 + 2 \ln\left(\frac{T_{avg}}{T_{min}}\right)} \\ \mu = \ln(T_{min}) + 3\sigma \end{cases} \quad (2.6)$$

Lai pārlicinoši noteiktu izplatīšanās parametrus no zināmajiem T_{avg} un T_{min} , ir jāprecizē nepieciešamais mērījumu skaits. Tiks noteikts mērījumu nepieciešamais skaits, lai iegūtu vismaz vienu T_{min} lielumu, kas ir definēts kā $p_l = 0,0014$ kvantils. Tas varētu būt izdarāms ar binomiāla sadalījuma palīdzību pie noteiktas varbūtības p^* .

$$n = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-p_1)} = \frac{\ln(1-0,99)}{\ln(1-0,0014)} \cong 3289 \quad (2.7)$$

$$n = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-p_1)} = \frac{\ln(1-0,999)}{\ln(1-0,0014)} \cong 4931 \quad (2.8)$$

Tātad ar varbūtību 99 % parādīsies vismaz viena T_{min} vērtība, ja izmērīto RTT vērtību skaits ir vismaz 3289; varbūtībai 99,9 % būs nepieciešama vismaz 4931 izmērīta RTT vērtība.

Novērtējot RTT vērtības, jānovērtē arī pakešu zudumi. Nepieciešamo mērījumu skaitu pakešu zudumu novērtēšanai var noteikt, izmantojot ticamības intervālus (CI). Tātad, ņemot vērā to, ka tipiskais pakešu zudumu lielums ir $p = 10^{-4}$, var noteikt, ka $CI \pm 30\%$, un varbūtības ticamības intervālā $\beta = 0,9$ iegūsim:

$$n = \frac{t_{\beta}^2 \cdot (1-p)}{p \cdot (k-1)^2} = \frac{2,576^2 \cdot (1-0,0001)}{0,0001 \cdot (1,3-1)^2} = 299909 \quad (2.9)$$

Ja $p = 10^{-4}$, $CI \pm 10\%$ un varbūtības ticamības intervālā $\beta = 0,9$ iegūsim:

$$n = \frac{t_{\beta}^2 \cdot (1-p)}{p \cdot (k-1)^2} = \frac{1,643^2 \cdot (1-0,0001)}{0,0001 \cdot (1,1-1)^2} = 2699179 \quad (2.10)$$

Tādējādi tipiskai pakešu zuduma vērtībai, kas ir 10^{-4} HSPA+ (un augstāk) tīklos [12], var aprēķināt, ka ticamības intervālam $\pm 30\%$ ar varbūtību trāpīt noteiktā diapazonā = 0,9 ir nepieciešami 299 909 RTT mērījumi; savukārt ticamības intervālam $\pm 10\%$ un varbūtībai trāpīt noteiktā diapazonā = 0,9 būs nepieciešami 2 699 179 mērījumi. Tādējādi ar tik daudziem mērījumiem nav šaubu, ka T_{min} jau pieņems ticamo vērtību.

2.2. Kustības ietekmes uz aizturēm 3G un LTE tīklos eksperimentāla izvērtēšana

Visi iepriekšminētie mērījumi tika veikti, izmantojot nekustīgu 3G/LTE modemu. Tagad ir jāizvērtē RTT mērījumu veikšanas iespējas kustībā, lai varētu veikt mērījumus dažādās šūnās, neapstādinot automašīnu.

Šo eksperimentu veikšanai tika izmantots Huawei 3372h modems. Lai būtu vieglāk pierakstīt tīkla parametrus, piemēram, signāla līmeni, interferenci, izmantotas šūnas ID (CID), modems tika pārprogrammēts stick (RAS) režīmā. Šajā režīmā Huawei 3372h dod piekļuvi "PC UP" seriālam portam, ļaujot piekļūt iepriekšminētajai informācijai.

Lai nodrošinātu *RTT* lielumu, mobilā tīkla parametru, kā arī *GPS* koordinātas un zemes ātruma ērtu pierakstu, tika izveidots virtuālais instruments (v.i.) *LabVIEW* vidē. Ar šo rīku var ne tikai apkopot visus datus, atšifrēt tos un pierakstīt vienotā tabulā, bet arī ērti eksportēt datus uz *MS Excel*.



2.5. att. Datu savākšanas ierīce.

Nākamajos eksperimentos modems tika nostiprināts uz koka pamata un novietots 1 m attālumā no automašīnas.

Saskaņā ar eksperimentu rezultātiem var secināt:

- 3G tīklu (*HSPA* + un augstāks) veiktspēja nav atkarīga no ātruma (pārbaudīts līdz 100 km/h), kā arī no paātrinājumiem. Pāreja no vienas bāzes stacijas uz nākamo (*handover*) nerada lielākas aiztures gadījumā, ja signāla līmenis ir pietiekams. Tomēr jāatzīmē, ka, mainoties kustības virzienam, dažas *RTT* vērtības palielinās. Taču šai ietekmei nebija atkarīgam rezultātu, tāpēc šo parādību aprakstīt neizdevās. Turklāt šie tīkli var palikt *UMTS* režīmā, ja parādās īslaicīgs signāla zudums.
- *LTE* tīklu darbība nav atkarīga ne no ātruma, ne paātrinājuma, ne no virziena izmaiņām.

2.3. Aizturu izvērtēšana konkrēta mobilo sakaru operatora mobilajā tīklā

Tika pierādīts, ka *LTE* tīkla darbība nav atkarīga no tā, vai termināls pārvietojas, vai ir stacionārs (vairumā gadījumu tas pats attiecas uz 3G *HSPA* + un augstāk), tāpēc var veikt mērījumus dažādās šūnās, pārvietojoties ar automašīnu un tai neapstājoties.

Mobilo tīklu veiktspēja ir atkarīga ne tikai no izmantotās tehnoloģijas (*GPRS*, *EDGE*, *HSPA*, *HSPA* +, *DC-HSPA* +, *LTE*, *LTE-A* utt.), bet arī no bāzes staciju virszemes līniju realizācijas. Eksperimentos kustībā aiztures vidējās vērtības izmaiņas jau bija pamanāmas atkarībā no izmantotās šūnas. Tagad ir jāveic mērījumi dažādās *LTE* šūnās tajā pašā operatorā, lai raksturotu kopējo *LTE* tīklu.

Pirmkārt, tika eksperimentāli pierādīts, ka ja signāla līmenis ir apmierinošs, tad mazo pakešu aiztures galvenokārt ir atkarīgas no mobila tīkla zemes līniju realizācijas (*terrestrial backhaul*), kā arī no katras šūnas slodzes. Lai to izdarītu, automašīnā tika uzstādīti divi *Huawei 3372h* modemi, no kuriem visi parametri tika reģistrēti, izmantojot v.i. *LabVIEW* vidē. Pirmais modems vienlaikus sūtīja *ICMP* pieprasījumus uz *Google DNS* serveri (kas atrodas *WAN* tīkla), kā arī uz otru modemu. Otrais modems bija aprīkots ar *SIM* karti ar reālu *IP* adresi. 3G un *LTE* tīklu darbības īpatnība ir tāda, ka datu plūsmas vienmēr iet caur mobilā tīkla operatora centrālo

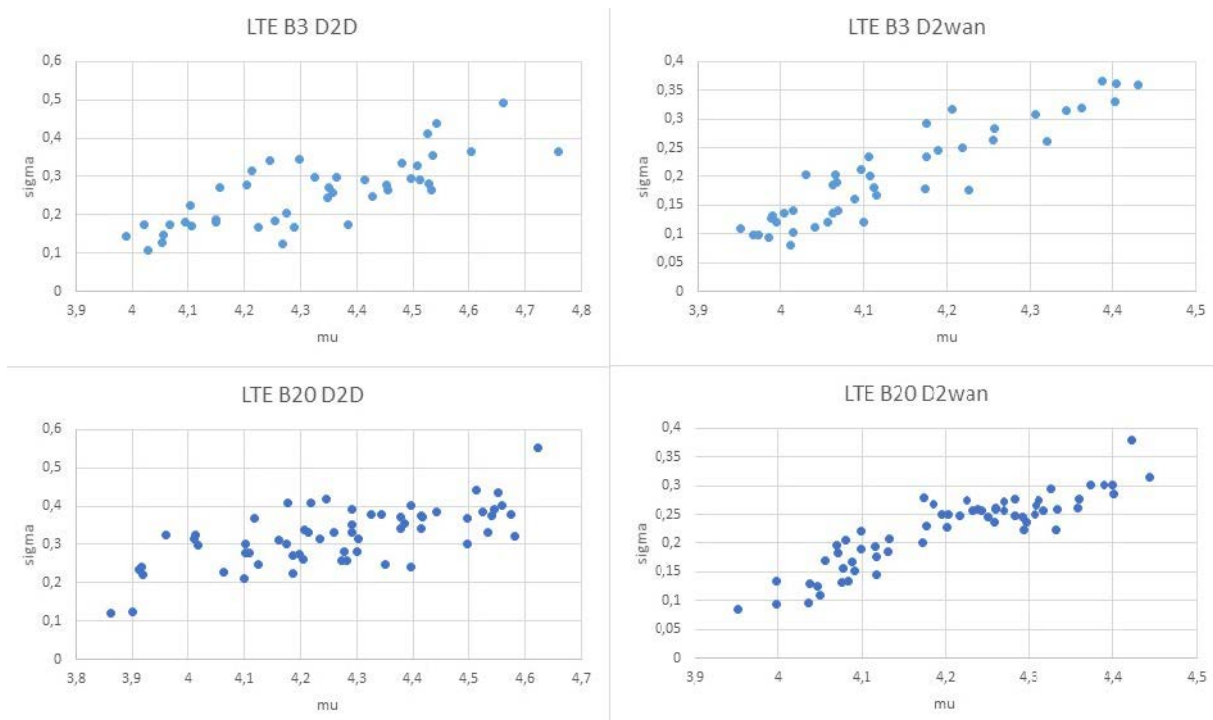
tīklu. Tādējādi pieprasījumi uz serveri, kas atrodas WAN tīklā, iet caur zemes līniju un radio kanālu divas reizes; runājot par pieprasījumiem uz otro modemu, pieprasījumi arī divas reizes iziet caur zemes līniju (jo tiešs savienojums starp lietotājiem (*D2D*) 3G un *LTE* tīklos nav nodrošināts). *RTT* vērtību mērījumu rezultātus aprēķina šādi: pirmkārt, visas vērtības, kas iegūtas ar signāla līmeni, kas ir sliktāks nekā ieteicams (pamatojoties uz *Cisco* rekomendācijām [13]), tiek atmesti. Tālāk katras šūnas *RTT* lielumi tiek apstrādāti atsevišķi. Eksperimentālo datu analīze pierādīja, ka aiztures palielinājums vai samazinājums, pārejot no vienas šūnas uz nākamo, notika proporcionāli gan serverim, kas atrodas WAN tīklā, gan pieprasījumam uz otro modemu. Tādējādi ir iespējams secināt, ka, ja radiosignāla līmenis un kvalitāte ir pietiekama, tad 3G *HSPA+* un *LTE* šūnu veiktspēju nosaka galvenokārt to zemes līniju īstenošana, ko sauc arī par “*first mile link*”. Tāpēc pastāvošais apgalvojums, ka abām mobilajām ierīcēm ir jābūt vienā šūnā, lai sasniegtu labāko veiktspēju, ir nepārprotams: pārejot uz nākamo šūnu, aiztures var palielināties vai samazināties, vai arī tās var nemainīties. Ir jāņem vērā arī tas, ka 3G šūnām tika novērota lielāka vidējā aiztures laika dispersija nekā *LTE* šūnām. Tas ir saistīts ar to, ka daudzas 3G šūnas pakāpeniski tika modernizētas no *UMTS* uz *HSPA+*, bet to virszemes līnijas netika modernizētas.

Iepriekš aprakstītā eksperimenta analīze tika veikta piecām 3G šūnām un sešām *LTE* šūnām. Neskatoties uz nelielo šūnu skaitu, rezultāti liecina par dažādu šūnu lielām *RTT* lielumu izmaiņām starp šūnām. Lai iegūtu visa *LTE* tīkla aiztures visaptverošu aprakstu viena operatora ietvaros, ir nepieciešams veikt un analizēt lielāku mērījumu skaitu dažādās šūnās.

2.3.1. *LTE* mobila tīkla aizturu modeļa izstrāde, izmantojot eksperimentāli iegūtos datus

Dažādu *LTE* šūnu aiztures novērtējums tika veikts *Tele2-LV* tīklā. 2G/3G šūnu pētījums netika veikts šo tehnoloģiju morālās novecošanās dēļ. Eksperimentālais novērtējums tika veikts šādi. Automašīnā tika fiksēti divi *Huawei 3372h* modemi. Lai samazinātu antenas diagrammu ietekmi, abi modemi tika orientēti vienādi. Pirmais modems sūtīja *ICMP* pieprasījumus uz otro modemu (*D2D* scenārijs) un *Google DNS* serverim (*D2WAN* scenārijs). Tika pierakstīti abu modemu radiosignālu parametri, kā arī to reģistrācija šūnas. Automašīna pārvietojās divas reizes, izmantojot publiskos ceļus un veicot 230 km attālumu. Pirmajā gadījumā abi modemi strādāja *LTE B3* diapazonā, otrajā – *LTE B20* diapazonā. Turklāt eksperimentālie dati tika apstrādāti šādi: pirmkārt, dati, kas bija iegūti ar *RSSI* signāla līmenī < -80 dBm (pamatojoties uz *Cisco* rekomendācijām [13]), tika atmesti, pēc kā dati tika sakārtoti pēc izmantotās šūnas *CID*, kad abi modemi tika reģistrēti vienā un tajā pašā šūnā. Vairāk nekā uz 1 sekundi aizkavētās paketes tika uzskatītas par zaudētām un turpmākajā analīzē netika ņemtas vērā. Turklāt, pieņemot hipotēzi, ka *LTE* tīkla aiztures lielumu sadalījums atbilst logaritmiski normālajam sadalījumam, tika noteikti sadalījumu parametri katrai šūnai. Detalizēts eksperimentāla apraksts, kā arī eksperimenta rezultāti ir publicēti [14].

Attēlojot sadalījuma parametru novērtējumus $\hat{\theta}_1 = \hat{\mu}$ (mediāna) x asī un $\hat{\theta}_2 = \hat{\sigma}$ (standartnovirze) y asī, mērījumu rezultātus var ērti vizualizēt:



2.6. att. Logaritmiski normāla sadalījuma parametru novērtējumi *D2D* un *D2WAN* scenārijiem *LTE B3* un *LTE B20* joslās.

Punktu novietojums grafikos liecina par pozitīvu korelāciju starp vērtībām. Turpmāk pieņemsim, ka parametru novērtējumi ir vienādi ar šo parametru vērtībām $\hat{\mu} = \mu$ un $\hat{\sigma} = \sigma$. Tā kā šūnu veiktspēja savā starpā nav atkarīgas, tad vērtības μ un σ katrai šūnai arī ir neatkarīgie lielumi. Tādējādi var viegli atrast nenobīdītus novērtējumus mediānām \hat{m}_μ un \hat{m}_σ , standartnovirzēm $\hat{\sigma}_\mu$ un $\hat{\sigma}_\sigma$, kā arī korelācijas koeficientu $r_{\mu\sigma}$ divdimensiju mainīgo μ un σ sistēmai aizturu *LTE* šūnās. Iegūtie novērtējumu lielumi apkopoti 2.4. tabulā.

2.4. tabula

Tele2-LV LTE tīkla aizturu divdimensiju mainīgo sistēmas parametru novērtējumi

Režīms	<i>LTE B3</i>		<i>LTE B20</i>	
	<i>D2D</i>	<i>D2wan</i>	<i>D2D</i>	<i>D2wan</i>
\hat{m}_μ	4,321111854	4,137481307	4,263534974	4,200827382
\hat{m}_σ	0,258320572	0,202567894	0,322766576	0,221865836
\hat{D}_μ	0,037543165	0,019163568	0,037950614	0,014353549
\hat{D}_σ	0,008008621	0,007172750	0,005791700	0,003842329
$\hat{\sigma}_\mu$	0,193760587	0,138432539	0,194809174	0,119806296
$\hat{\sigma}_\sigma$	0,089490898	0,084692087	0,076103222	0,061986520
$\hat{r}_{\mu\sigma}$	0,777179594	0,920297543	0,691265663	0,894327522

2.4. Prasību izstrāde *C2 link* kanālam

Šobrīd *UAV* radio sakaru kanāliem vienotu prasību nav. Tāpēc ir nepieciešams definēt prasības *C2 link* kanāla implementācijai. Darbā šīs prasības tiek raksturotas, izmantojot esošās prasības līdzīgām sistēmām [2], [15]–[20], kā arī pamatojoties uz eksperimentāliem pētījumiem

par maksimāli pieļaujamo aizturi gaisa kuģa vadības kanālos [21], [22]. Balstoties uz iepriekšminēto analīzi, var noteikt šādas prasības:

- kopējai divvirzienu aizturai (no komandas ievades brīža līdz atgriezeniskās saites displejam) tipiskam pilotam vajadzētu būt ≤ 150 ms; taču ir pieņemami arī līdz 200 ms (tajā gadījumā tipiskam pilotam būs vairāk jākoncentrējas);
- kopējai divvirzienu aizturai (no komandas ievades brīža līdz atgriezeniskās saites displejam) vajadzētu būt ≤ 310 ms pieredzējušam pilotam; taču ir pieņemami arī līdz 400 ms (tajā gadījumā pieredzējušam pilotam būs vairāk jākoncentrējas);
- ja video kanāls (*FPV*) tiek izmantots kā atgriezeniskā saite, video kanāla kopējās aiztures (ieskaitot apstrādes laiku saspiedatspiedējā) vienvirziena aizturai jābūt ≤ 150 ms (pieņemot, ka komandas datu pārsūtīšanas kanālā tipiskam pilotam ir 0 aizkavējums).

Pirms 3G un *LTE* pakalpojumu veiktspējas novērtēšanas jāpiemin arī 3G (*HSPA* un augstākas) un *LTE* datu pārraides sistēmu darbības aspekti. Iepriekšminēto sistēmu izveides galvenais mērķis bija palielināt datu pārsūtīšanas ātrumu. Šī iemesla dēļ automātiskās modulācijas un kodēšanas sistēma (*AMC*) izvēlas modulācijas shēmu tā, lai pakešu zudumi būtu 10 % [23]. Turklāt zaudētās paketes tiek atkārtoti pārraidītas ar ātrās pārsūtīšanas mehānismiem (*HARQ*), kas ir realizēti bāzes stacijā (*BS*) un mobilajā aprīkojumā (*UE*). Tas ļauj sasniegt visaugstāko datu pārraides ātrumu, taču arī palielina džiteri. Lai neļautu *TCP* mehānismiem mēģināt atkārtoti nosūtīt zaudētos datus paralēli *HARQ* mehānismam, *BS* pārtrauc *TCP* sesiju, automātiski nosūtot apstiprinājumu sūtītājam (tikai *TCP* paketēm). Šis fakts neļauj izmantot *ACK* ierašanās laiku kopējā tīkla *RTT* aiztures mērīšanai. Šī iemesla dēļ *ICMP* paketes tiks izmantotas šādos novērtējumos (ja vien nav norādīts citādi).

2.5. Analīze par *LTE* mobilā tīkla aizturu atbilstību *C2 link* prasībām

Tagad, kad ir raksturotas *Tele2-LV* operatora *LTE* šūnu aiztures, var sākt izvērtēt iespēju izveidot *C2 link*, izmantojot esošo *LTE* servisu.

2.4. nodaļā attiecībā uz vadības kanālu (*RC*) tika noteiktas šādas prasības:

- ≤ 150 ms aiztures ir ieteicamas tipiskam pilotam (ar ierobežojumu 200 ms);
- ≤ 310 ms aiztures ir ieteicamas pieredzējušam pilotam (ar ierobežojumu 400 ms).

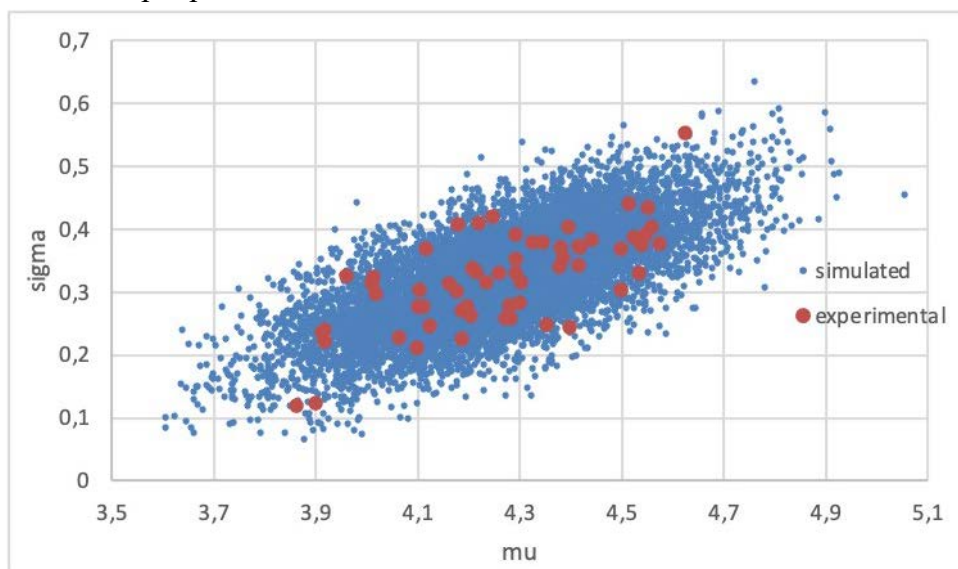
2.4. nodaļā tika noteiktas šādas prasības video kanālam (*FPV*):

- summārai vienvirziena aizturai jābūt ≤ 150 ms (tas ietver gan dekodēšanas bufera ietekmi, gan arī saspiedatspiedēja apstrādes laiku).

Pieņemot, ka tiek izmantoti “zerolatency” saspiedatspiedēji (piemēram, *H.264*, kas vienā reizē apstrādā vienu paketi), kopējā laika aizture sastāvēs no datu pārsūtīšanas līnijas aiztures un dedžitera bufera aiztures. Tiks pieņemts vislabākais gadījums, kad dedžitera bufera aizture ir vienāda ar *IPDV* vērtību. *IPDV* vērtība ir vienāda ar starpību starp vislielāko aizturi (fraktāls pie 0,999 varbūtības) un minimālo aizturi.

Lai iegūtu rezultātus, izmantosim *Tele2-LV LTE* tīkla aizturu parametru divdimensionālo mainīgo sistēmu, kas ir izveidota *D2D* scenārijam, kad tiek izmantota *B20* josla (800 MHz). Analīze tiks veikta, pieņemot, ka *LTE* šūnu *RTT* vērtības atbilst logaritmiski normālajam sadalījumam. 2.7. attēlā redzami simulētie (zili punktiņi) un eksperimentāli iegūtie (dzeltēni

punkti) parametri aizturu logaritmiski normālam sadalījumam šūnās. Simulācijas rezultāti sastāv no 50 000 simulētiem sadalījuma parametriem. Simulācija tiek veikta, izmantojot divdimensionālo mainīgo sistēmas aproksimāciju pēc normālā sadalījuma likuma; izmantotie eksperimentālie dati apkopoti 2.4. tabulā.



2.1. att. Dažādu LTE šūnu aizturu logaritmiski normālo sadalījumu parametri (*D2D* scenārijs *LTE-LTE* saitēm *B20* joslā, *Tele2-LV* operatora tīklā).

Vadības kanāla (*RC*) *RTT* aiztures lielumi tiks aprēķināti, izmantojot divdimensionālo mainīgo sistēmu, kas ir uzbūvēta pēc 2.4. tabulas datiem *D2D* scenārijam un *B20* joslas. Divdimensionāla mainīgo sistēma tika aproksimēta pēc normāla sadalījuma likuma. *RTT* lielumi tiks izteikti kā 0,999 fraktāli (ar mērķi parādīt, ka 99,9% gadījumos *RTT* lielumi nepārsniegs norādīto vērtību). 0,999 fraktāla lielums $\Phi^{-1}(0,999)$ tika noteikts, pieņemot hipotēzi, ka *RTT* lielumi *LTE* tīklos atbilst logaritmiski normālajam sadalījuma likumam.

IPDV noteikšanas problēma ir tā, ka šī metrika izmanto vienvirziena aizturi (*latency*), nevis *RTT* (divvirzīnu aizturi). Ir zināms, ka 3G un *LTE* tīklos augšuplādes (*uplink*) kanālam ir zemāka veikspēja nekā lejuplādes (*downlink*) kanālam. Tomēr šajā gadījumā *RTT* aiztures tika mērītas starp diviem *LTE* modemiem, kas nozīmē, ka *RTT* vērtība ietver divu augšuplādes un divu lejuplādes kanālu aiztures. Abi modemi atradās 1 m attālumā viens no otra un bija orientēti vienādi, tāpēc var secināt, ka signālu līmeņi bija vienādi, kas savukārt nozīmē, ka arī izvēlētās modulāciju un kodēšanas (*AMC*) shēmas bija vienādas. Ņemot vērā iepriekš minēto, sadalījumu parametri vienvirziena aizturu noteikšanai tiks noteikti šādi:

$$\theta_{0 RTT} = \mu_{RTT} = \ln(2) + \theta_{0 latency} = \ln(2) + \mu_{latency}, \quad (2.11)$$

$$\theta_{1 RTT} = \sigma_{RTT} = \theta_{1 latency} = \sigma_{latency}. \quad (2.12)$$

Pēc rezultātiem var secināt, ka tikai 25 % no *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % *RTT* būs zem 150 ms, un tikai 53 % no *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % *RTT* būs zem 200 ms. Pamatojoties uz to, var secināt, ka *LTE* tīklu izmantošana vadības kanālā nav piemērota parastam pilotam.

Pēc rezultātiem var secināt, ka 88 % no *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % *RTT* būs zem 310 ms, un 97 % no *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % *RTT* būs zem 400 ms. Pamatojoties uz to, var secināt, ka pieredzējis pilots var veikt *RC* darbības, izmantojot *LTE*

tīklu (tomēr ir jāņem vērā, ka reizēm pieredzējušam pilotam būs jāpievērš lielāka uzmanība, jo *RTT* aizture būs lielāka par 310 ms).

Lai novērtētu video kanālu, vispirms ir jānorāda dedžitera bufera izmērs. Spriežot pēc eksperimentālajiem datiem, var secināt, ka 310 ms dedžitera buferis būs pietiekams 99,9 % laikā. Tātad, pieņemot 310 ms dedžitera bufera izmēru (tas būs pietiekams 99,9 % gadījumos un veidos 0,1 % pakešu zudumus), aizture ir jānorāda kā minimāla aizture tīklā plus 175 ms aizture dedžitera buferī. Šādā gadījumā neviena no *LTE* šūnām neatbildīs *FPV* prasībām, kas ir < 150 ms.

Vel ir iespēja pieņemt, ka dedžitera bufera izmērs ir adaptīvs un vienāds ar *IPDV* vērtību. Dedžitera buferī nav papildu vietas, tāpēc *FPV* video kanāls darbosies ar nemainīgu aizturi, kas būs vienāda ar 0,999 fraktālu šajā šūnā. Šajā gadījumā tikai 86 % *LTE* šūnu apmierinās nepieciešamo aizturi, kurai jābūt < 150 ms ar pakešu zudumu ne vairāk par 0,1 %.

Modernie video kodeki var strādāt ar pakešu zudumiem līdz 1 % [16], tāpēc augstāka robeža *IPDV* varētu būt paņemta kā fraktālis pie varbūtības 0,99. Šajā gadījumā eksperimentālie dati liecina, ka 98 % no *LTE* šūnām apmierinās prasības *FPV* video kanāla izveidei.

Vēlreiz jāteic, ka visi iepriekšminētie dati ir derīgi tikai gadījumos, kad signāla līmenis un to kvalitāte ir “laba” (saskaņā ar rekomendāciju [13]).

3. LIDOJUMA AUGSTUMA IETEKSMES ANALĪZE UZ 3G UN LTE DATU PĀRRAIDES PAKALPOJUMU VEIKTSPĒJU

2G, 3G, LTE tīkli ir paredzēti lietotājiem, kas atrodas uz zemes, tāpēc bāzes staciju antenas ir noliekas uz leju. Neskatoties uz noliektajām antenām, esošie pētījumi norāda (piemēram, [24], [25]), ka mobilo tīklu pārklājums līdz 300 m augstumam virs zemes līmeņa (AGL) ir pietiekams, lai nodrošinātu iespējamo RPA kontroli, izmantojot mobilo datu pārraides pakalpojumus.

Teorētiski, palielinoties lidojuma augstumam, lietotāja aprīkojumam vajadzētu iegūt tiešu redzamību ar lielāku bāzes staciju skaitu. Tas savukārt izraisīs traucējumu pastiprinājumu, kas tika novēroti daudziem mērīšanas uzņēmumiem 2018. gadā, piemēram, [26], [27].

Saistībā ar promocijas darbu sākotnējā iepazīšanās ar situāciju tika veikta 2017. gadā vidū. Tolaik LTE tīklu darbības atkārtota pārbaude nebija veikta, tāpēc tika izmantots 3G pakalpojums. Huawei 3372h modems atradās vieglā lidmašīnā, kas lidoja pāri Spilves lidlaukam. Tika veikti divi apli. Lidojumu ietekmēja spēcīgs sānu vējš. Pirmajā aplī lidmašīnu pilotēja nepieredzējis pilots, otrajā – lidmašīnu pilotēja pieredzējis instruktors, un lidojums bija daudz stabilāks. Mērījumu rezultāti redzami 3.1. attēla grafikos. Pirmais grafiks parāda RTT vērtības, zaudētās paketes, zemes ātrumu un augstumu virs vidējā jūras līmeņa (MASL); otrais grafiks parāda tīkla rādītājus: RSSI (kreisā Y ass, zilā līkne dBm); Ec/Io (labā Y ass, sarkanā līkne dB). RTT vērtības tika mērītas starp UE un Google DNS serverī (IP: 8.8.8.8), izmantojot LMT tīklu.

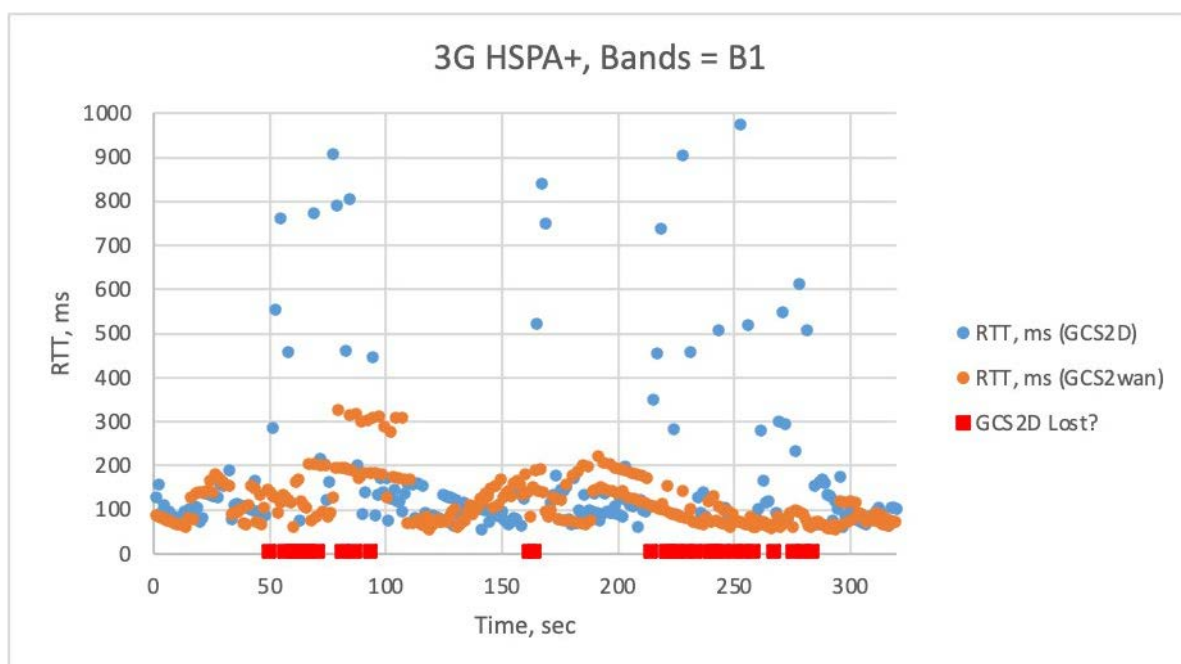


3.1. att. Tīkla veiktspēja pacelšanas laikā, divi apli ar vienu pacelšanos un vienu aplidošanu, kā arī vienu nosēšanos.

Eksperimenta rezultāti liecina, ka, neskatoties uz līdzīgām radio signāla kvalitātes norādēm, pirmajā kārtā aiztures ir daudz mazāk stabilas un zaudēto pakešu skaits ir ļoti liels. To var izskaidrot tikai ar faktu, ka lidojums otrajā aplī pieredzējušā instruktora vadībā bija daudz stabilāks. Tāpat ir iespējams novērot labi zināma fakta apstiprinājumu, ka, palielinoties augstumam, palielinās arī interference (Ec/Io indekss samazinās).

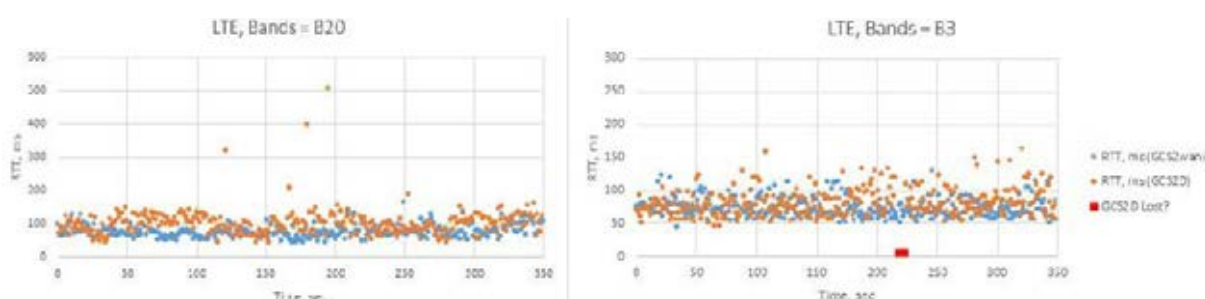
Atkārtojamu rezultātu iegūšana, izmantojot lidmašīnu, ir pārāk dārga, tāpēc 2018. gadā šim nolūkam tika izmantots kvadrokopters. Tas bija aprīkots ar Raspberry PI 3B datoru, kas

darbojas ar *Gentoo Linux operētājsistēmu*, kā arī tam bija pievienots *Huawei 3372h* modems. Vertikālais lidojums tika veikts Spilves pļavu kreisajā pusē, tālu prom no ceļiem, nelielu lidmašīnu pārejas zonas un traucējošiem objektiem. Pacelšanās tika veikta ar augstuma uzņemšanas ātrumu 1 m/s, pēc kura 115 m augstumā kvadrokopters karājās gaisā 15 sekundes, pēc tam tas nolaidās ar ātrumu 1 m/s. *RTT* tika mērīti līdz zemes stacijai, kas tika aprīkota ar otru *Huawei 3372h*. No *Huawei 3372h*, kas atrodas uz zemes, aiztures tika mērītas arī līdz *Google DNS* serverim, lai pārlicinātos, ka zemes stacijas modenam ir stabils datu serviss. 3G *Tele2-LV* tīkla rezultāti rādīja līdzīgus rezultātus ar tiem, kas bija iegūti 3G LMT tīklā 2017. gadā, izmantojot lidmašīnu. Diemžēl tajā laikā aparatūras realizācija vēl neļāva saņemt datus par radio signāla līmeni, tādēļ šis parametrs netiek parādīts.



3.7. att. *RTT* starp zemes staciju un kvadrokopteru (*GSC2D*) un starp zemes staciju un *Google DNS* serveri (*GCS2WAN*), 3G *HSPA+* režīmā *B1* joslā.

Līdzīgs eksperiments tika veikts *LTE Tele2-LV* tīklā. Rezultāti parādīja, ka *LTE* tīkla veiktspēja nav atkarīga no augstuma un pacelšanas/nolaišanās ātruma.

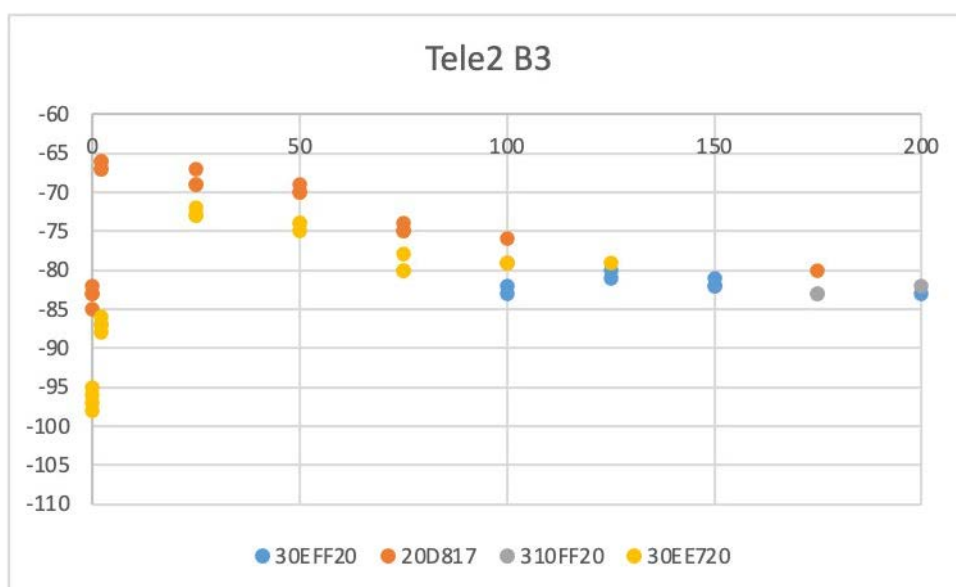


3.8. att. *RTT* starp zemes staciju un kvadrokopteru (*GSC2D*) un starp zemes staciju un *Google DNS* serveri (*GCS2WAN*), *LTE B3* un *B20* režīmā.

2019. gadā radās iespēja sīkāk izpētīt 3G un *LTE* tīklu pārklājumu, izmantojot kvadrokopteru. Tagad *Huawei ME909s-120* modulis tika izmantots kā mērierīce. Šī moduļa

priekšrocība ir tā, ka, pirmkārt, tas ļauj meklēt nevis tikai 3G, bet arī *LTE* šūnas, otrkārt, tas ir aprīkots ar ārējo nevirzīto antenu, kas ievērojami vienkāršo tās telpisko orientāciju, salīdzinot ar *PIFA* antenu, treškārt, uztvērēja otra (*diversity*) antena nebija pievienota, līdz ar to neietekmēja modema darbību.

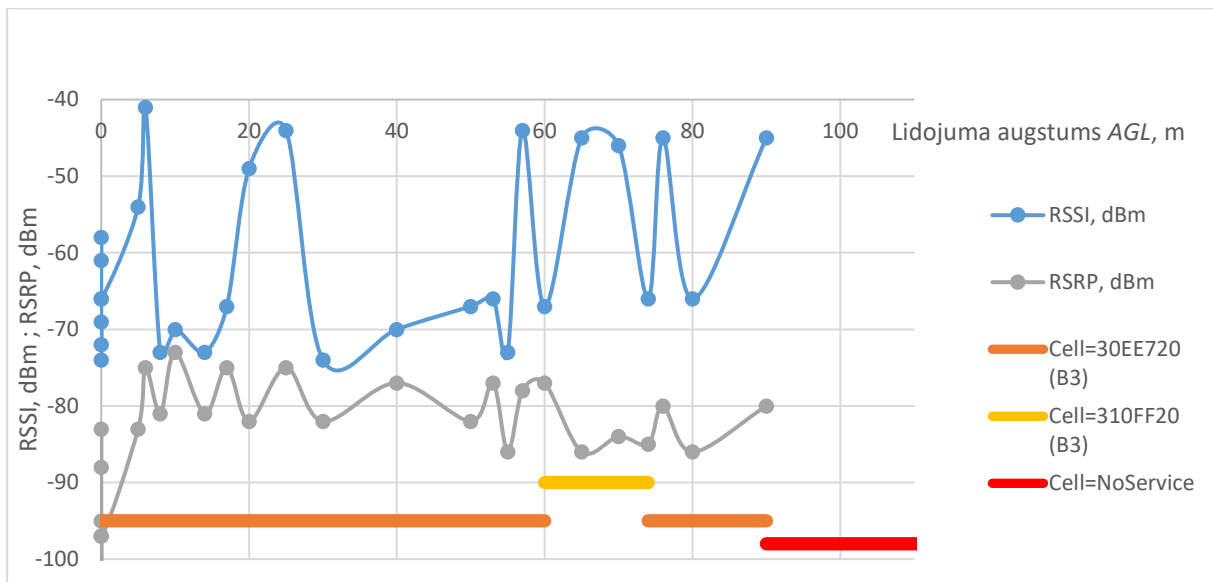
Saistībā ar ierobežoto akumulatora jaudu mērījumi tika veikti ar 25 metru augstuma soļiem. Katrā augstumā tika veikti divi mērījumi. Jāatzīmē, ka bāzes stacijas ne vienmēr atbild uz meklēšanas pieprasījumu, kā arī sānu vēja dēļ nebija iespējams noturēt antenu stingri vertikālā stāvoklī, tāpēc mērījumu rezultāti sāka svārstīties. Mērījumi tika veikti tikai *LTE* tīklā. Mērījumu rezultāti ir parādīti promocijas darbā, bet kopsavilkumā tiks parādītas (kā piemērs) tikai *B3* diapazonā *Tele2-LV* operatora bāzes stacijas. *X* ass parāda augstumu virs zemes līmeņa (*AGL*, m); pa *Y* asi – saņemto signālu līmeņi, dBm; šūnu *ID (CID)* ir parādītas krāsainajām atzīmēm un norādītas legendā.



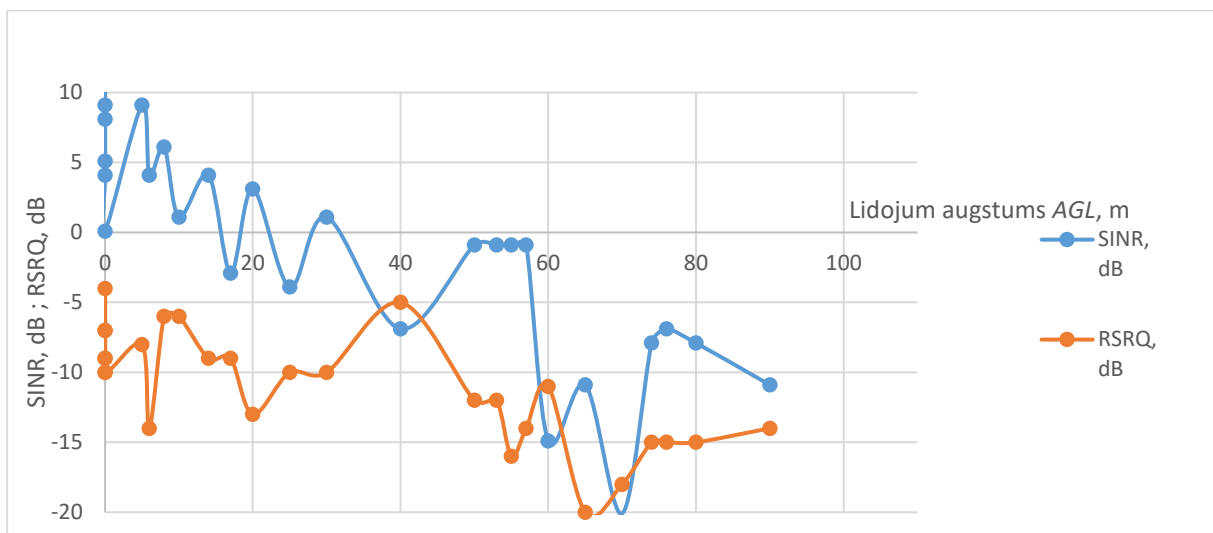
3.9. att. Vertikālais *Tele2-LV* *LTE* tīkla pārklājums *B3* joslā.

Eksperimentālie rezultāti liecina, ka *LTE* tīklu pārklājums ir pietiekams (−105 dBm tiek uzskatīts par “labu” signāla līmenī [13]), kas sola iespēju darboties līdz 200 metriem. Tomēr, lai nodrošinātu *LTE* ierīču efektīvu darbību, jānovērtē ne tikai signāla līmenis, bet arī signāla kvalitāte.

Šim nolūkam kvadrokopters vispirms tika pacelts gaisā, kur 130 m augstumā *LTE* serviss tika zaudēts. *LTE* serviss tika atjaunots 90 m augstumā. 3.11. un 3.12. attēla grafikos redzams nolaišanās posmā iegūtie signāla parametri.



3.11. att. *RSSI, RSRP* dBm pret augstumu, *Tele2-LV LTE* serviss.



3.10. att. *SINR, RSRQ* dB pret augstumu m, *Tele2-LV LTE* serviss, nolaišanās.

Tādējādi sākotnēji ir iespējams secināt, ka *LTE* serviss ir stabilāks lielākā augstumā nekā *3G HSPA +* serviss. Pamatojoties uz tīkla aiztures analīzi, *AMC* mehānisms *LTE* tīklos spēj efektīvi izvēlēties kodēšanas un modulācijas shēmu, pielāgojoties mainīgajiem traucējumiem. Tomēr, ja traucējumi pārsniedz noteiktu līmeni, *LTE* pakalpojums pazūdīs (literatūrā *SIRN* minimālā vērtība ir -6 dB, tomēr šajā eksperimentā serviss tika saglabāts līdz -10 dB).

Ir interesanti apsvērt atšķirību starp *3G* un *LTE* tīkliem. Lielā augstumā abos tīklos interference palielinās, tomēr *3G* tīklu veiktspēja, palielinoties augstumam, gandrīz nekavējoties sāk samazināties. Saskaņā ar autora viedokli to var izskaidrot ar diviem faktoriem. Pirmkārt, eksperimentu laikā ar automašīnu eksperimentāli tika parādīts, ka asas izmaiņas antenas izvietojumam palielina *3G* tīkla aiztures, savukārt *LTE* tīklos tas netika novērots (eksperimentālie rezultāti tika publicēti [28]). Otrkārt, pastāv minējums, ka ar *soft handover*, kas izmanto *3G* tīklu, pakešu pārkārtošana rada lielākas aiztures, jo ar augstuma palielinājumu tīkla pārklājums kļūst nevienmabīgs, pārklājuma zonas no bāzes stacijām pārklājas savā starpā un rezultātā dod līdzīgu signāla līmeni, kas izraisa pastāvīgu *soft handover* funkcijas

iesaistīšanu. Savukārt *LTE* tīklos *soft handover* izmantošana nav iespējama *OFDMA* izmantošanas dēļ, kas neļauj vienlaikus strādāt ar vairākām bāzes stacijām. *LTE* tīklos izmantotajam *hard handover* ir neliela histerēze starp pārslēgšanu, kas šajā gadījumā daļēji palīdz izvairīties no iepriekš aprakstītajām problēmām, saistītām ar lēkāšanu starp bāzes stacijām (tā sauktais *ping-pong*). Jāatzīmē, ka sākotnējo eksperimentālo datu analīze liecina, ka lietotājiem gaisā ir jāpalielina histerēzes vērtība starp pārslēgšanu. Jāatzīmē, ka pilnīga šīs problēmas izpēte nav veikta. Esošie fragmentārie pētījumi tika vispārināti [29], bet iesniegtos pētījumus nevar saukt par visaptverošiem.

Tādējādi jāatzīst, ka pašlaik *3G/LTE* tīkli nav gatavi kļūt par uzticamu līdzekli *C2 link* realizācijai.

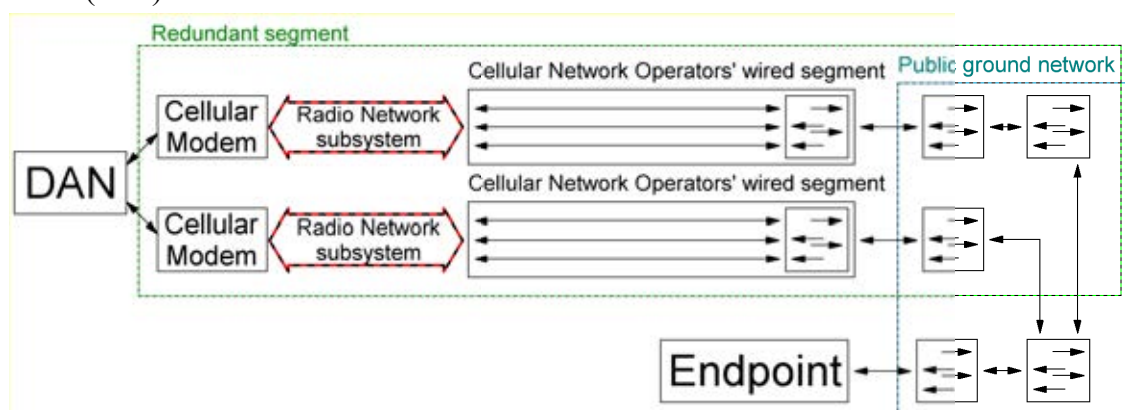
4. METODES, KĀ SAMAZINĀT NESTABILAS DATU PĀRSŪTĪŠANAS KVALITĀTES IETEKMI, KAD TIEK IZMANTOTS MOBILAIS SAKARU TĪKLS

3G/LTE tīklu nestabilās darbības efektu lietotājiem gaisā var samazināt, izmantojot paralēlu datu pārraides kanālu dublēšanu.

Šajā darbā tika veikti divi pētījumi par divu paralēlu datu pārraides kanālu risinājumu izmantošanu mobilajos tīklos. Šo risinājumui veikspēja iepriekš netika pārbaudīta mobilo sakaru tīklos, kaut vien darbība mobilajos tīklos atšķiras no darbības kabeļu tīklos ar lielu zaudēto pakešu skaitu un periodiski mainīgu aizturi.

Tiek pieņemts, ka GCS tiks savienots ar *Ethernet* vadu. *IEEE Std 802.3* definē, ka 100 Mbit *Ethernet BER* nedrīkst būt lielāks par 1^{-10} un 1000 Mbit *Ethernet BER* nedrīkst būt lielāks par 1^{-12} [30]. Tas padara *Ethernet* kanālu par ārkārtīgi drošu, salīdzinot ar mobilo datu pārraides pakalpojumu, kurām ir *BER* $1e-4$ [12].

Lai ieviestu paralēli rezervētu kanālu, datu terminālam jābūt savienotam ar diviem dažādiem tīkliem ar vienādiem protokoliem. Šī termināla nosaukums ir *Dual Attached Node (DAN)*. Abiem tīkliem joprojām var piekļūt ar citu aprīkojumu, ko sauc par *Single Attached Node (SAN)*. Vienkāršota tīkla struktūra redzama 4.1 attēlā.



4.11. att. Paralēli rezervēta struktūra, kuras pamatā ir divu dažādu mobilo operatoru tīkli.

Tika pārbaudīti divi paralēli datu pārraides kanālu risinājumi. Abi risinājumi mobilajos tīklos līdz šim nav ieviesti, tāpēc to darbība tika vērtēta eksperimentāli.

Pirmais bija *Parallel Redundancy Protocol (PRP)* [31], kas ir *IEC* standarts, ko izmanto, lai izveidotu drošus rūpnieciskos *Ethernet* risinājumus kritiskām lietojumprogrammām, kas nevar pieļaut pakešu zudumus un kurām ir nepieciešams drošs tīkls. Galvenās *PRP* priekšrocības ir spēja izmantot tīklus ar identisku protokolu. *PRP* darbība ir caurskatāma abiem tīkliem, tāpēc tīkla trafiks parasti netiek bloķēts tīkla komutatoru dēļ [32]. Šāds risinājums aizsargās jebkāda veida paketes, piemēram, *TCP*, *UDP*, *ICMP* utt. Eksperimentos tika izmantots *ZHAW* universitātes *Parallel Redundancy Protocol* programmas risinājums (*PRP* saskaņā ar *IEC 62439-3/2012*) [33]. Detalizēts eksperimenta apraksts, kā arī eksperimenta rezultāti ir publicēti [34].

Otrs risinājums bija *MultiPath TCP (MPTCP) Linux* kodola risinājums [35]. Šis risinājums var aizsargāt tikai *TCP* trafiku. Tomēr tas var darboties, izmantojot vienu no trim kontroles plānotājiem (*schedulers*). Visas plānotāju operācijas tika eksperimentāli izpētītas. Tika izpētīta

arī reakcija uz viena mezgla kļūmi. Detalizēts eksperimenta apraksts, kā arī eksperimenta rezultāti ir atrodami [36].

Mobilo tīklu pakalpojumu kombināciju izvēles pamatojums ir aprakstīts [37]. Elastīgā programmatūras platforma prototipa izstrādei ir aprakstīta [38].

Var secināt, ka *ZHAW PRP-1* programmatūru var izmantot kā efektīvu dublējošo risinājumu visa veida datu pārraidei, tomēr tā ieviešana ar vienu tīkla galapunktu ir problemātiska. *MPTCP* risinājumu ar *redundant* plānotāju var izmantot kā efektīvu dublējošo risinājumu *TCP* pārraidei, to var viegli ieviest ar vienu galapunktu, taču tā ieviešana *FPV* video kanālā ir bezjēdzīga.

Tika veikts arī pētījums par ieteikumiem izvēlēties pakalpojumu kombinācijas paralēla sakaru kanāla izveidošanai [37]. Patlaban var teikt, ka ieteicamais risinājums ir apvienot *LTE* pakalpojumus no diviem dažādiem operatoriem. Tomēr gadījumā, ja ir pieejams tikai viens operators, ieteicams izmantot vienu augstfrekvences joslu (parasti *B3*) un vienu liela attāluma joslu *B20*. 3G tīklu izmantošana ieteicama tikai tad, ja tiek novērota vietēja *LTE* tīkla pārslodze, kas Latvijā 2018. gada eksperimentu laikā netika novērota.

Jautājums par to, kādus uzlabojumus var panākt, ja tiek izmantota paralēla dublēšana, parasti tiek atrisināts, imitējot tīkla topoloģiju (piemēram, *OPNET* [39], [40], *OMNet ++* [41] utt.) vai izmantojot *ITU* ieteikumus, kas balstās uz Markova ķēdes izmantošanu [42]. Modelēšanu ar programmatūru, piemēram, *OPNET* mobilajos tīklos var sākt lietot tikai tad, ja turpmāk lietotājs paliks nekustīgs vai pārvietosies ierobežotā apgabalā. Savukārt, lai piemērotu Markova ķēdes, ir jāzina varbūtība pārejai no viena stāvokļa uz otru, kas parastam lietotājam nav zināms.

Promocijas darbā tiek piedāvāta cita metode. Tā ļauj prognozēt tīkla aiztures paralēlam rezervētam tīklam, izmantojot tikai statistiku no *ping* utilitārogrammas. Lai to izdarītu, pieņemsim, ka zaudētās paketes tiek izslēgtas, un katra kanāla aizturi z atlikušās reālās vērtības apraksta nosacītās varbūtības funkcija $F_n(z)$. Apzīmēsim pakešu zaudēšanas varbūtību katrā kā q_n , kur n ir paralēla kanāla numurs. Ja visi datu pārraides kanāli ir fiziski neatkarīgi, tad rezultējošo iegūto nosacīto (bez zaudētām paketēm) varbūtības funkciju n paralēlajiem kanāliem var aprakstīt ar formulu:

$$F_Z(z) = P(Z^* < z | Z^* < \infty) = \frac{P(Z^* < z)}{1 - P(T_1^* = \infty) \cdot P(T_2^* = \infty)} = \frac{P(Z^* < z)}{1 - q_1 q_2}. \quad (4.1)$$

Z^* varbūtību, kad $Z^* < \infty$, var izteikt, nosakot minimumu:

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= 1 - P(Z > z | Z < \infty) = P(Z^* < z | Z^* < \infty) = \\ &= \frac{P(Z^* < z)}{1 - P(Z_1^* < z) \cdot P(Z_2^* < z) \cdot \dots \cdot P(Z_n^* < z)} = \frac{P(Z^* < z)}{1 - \prod_{i=1}^n q_i} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Reālajā dzīvē parasti izmanto paralēlu $n = 2$ kanālu dublēšanu. Šajā gadījumā nosacītās varbūtības izteiksmei būs šāda forma:

$$\begin{aligned} F_Z(z) &= 1 - P(Z > z | Z < \infty) = \\ &= \frac{1 - \left((1 - F_1(z)) \cdot (1 - q_1) + q_1 \right) \cdot \left((1 - F_2(z)) \cdot (1 - q_2) + q_2 \right)}{(1 - q_1 q_2)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Turklāt, pieņemot hipotēzi, ka aiztures *LTE* tīklos pakļaujas logaritmiski normālā sadalījuma likumam, var aizstāt *CDF* funkciju $F_Z(z)$, kas ir izveidota no eksperimentāliem datiem, ar *CDF* funkciju, kas ir veidota pēc logaritmiski normālā sadalījuma likuma. Turklāt logaritmiski normāla sadalījuma parametrus var atrast, izmantojot zināmās minimālās un

vidējās aiztures vērtības, ko var iegūt no *ping* utilitārogrammas pārskata (vairāk informācijas 2.1.2. nodaļā). Turpmākos aprēķinus nebūs grūti īstenot.

Pēc autora domām, šāda pieeja ir ātrāka un ērtāka nekā universālās pieejas piemērošana, kas aprakstīta *ITU* ieteikumos [42].

SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis ir eksistējošo mobilo tīklu servisu lietošanas iespēju izpēte tālvadības gaisa kuģu bezvada vadības kanāla risinājumam. Pēc iegūtiem eksperimentāliem datiem vispārēji var secināt, ka ir iespējams izmantot eksistējošo *LTE* tīklu, lai izveidotu komunikācijas kanālu mazizmēra gaisa kuģu tālvadībai – ar nosacījumu, ka radiosignālam ir pietiekama kvalitāte. Eksistējoša mobilā tīkla pārklājums tika veidots un optimizēts lietotājiem, kas atrodas uz zemes, tāpēc darbā ir pievērsta īpaša uzmanība izpētes metodēm un eksperimentāliem rezultātiem, kas ir saistīti ar bezpilota lidaparāta lielu manevrēšanas spēju un to lidojuma augstumu. Sasniegto rezultātu nolūks ir pilnveidot bezpilota lidaparātu tālvadības teoriju un praksi, izmantojot mobilo sakaru tīklus. Par rezultātiem, kuriem ir pastāvīga nozīme, var nosaukt vairākus.

1. Prasības bezvada *C2 link* kanālam mazizmēra tālvadības gaisa kuģiem tika izstrādātas, pamatojoties uz pieejamās zinātniskās literatūras pārskatu. Eksperimentālais novērtējums definētiem *KPI* netika veikts.
 - a. Tika konstatēts, ka divu virzienu (*RTT*) rekomendētām aizturēm *RC* kanālā netrenētajām pilotam ir jābūt zemākiem par 150 ms un noteikti nav jāpārsniedz 200 ms; divu virzienu (*RTT*) rekomendētām aizturēm *RC* kanālā trenētam pilotam ir jābūt zemākiem par 310 ms un noteikti nav jāpārsniedz 400 ms.
 - b. Tika konstatēts, ka vienvirziena aizturēm (*latency*) *FPV* video kanālā ir jābūt zemākām par 150 ms.
2. Tika definēts *LTE* pakalpojuma divu virzienu aizturu (*RTT*) vērtību sadales likuma tips. Logaritmiski normāla sadalījuma likuma un to parametru ātras iegūšanas metodes piemērojamības tika pārbaudītas eksperimentāli. Īpaši jāatzīmē, ka dažādu šūnu aiztures vispārējā gadījumā var atšķirties, tādējādi analīzi ir nepieciešams veikt vienas un tās pašas šūnas ietvaros.
 - a. Tika pierādīts, ka reāli strādājošas *LTE* šūnas aiztures vērtības visvairāk atbilst logaritmiski normālam sadalījumam (salīdzinājumā ar gamma, normālo un Veibula sadalījumu). Tika eksperimentāli pierādīts, ka, izmantojot logaritmiski normālo sadalījumu, ar pietiekami zemu kļūdu var iegūt *LTE* šūnas aiztures vidējo vērtību un aiztures džittera vērtību, tādēļ šiem nolūkiem var pieņemt hipotēzi par logaritmiski normālo sadalījumu.
 - b. Papildus ir piedāvāta ātra metode logaritmiski normālā sadalījuma parametru noteikšanai. Šī metode izmanto zināmu minimālo un vidējo aiztures vērtību, kas ir uzreiz pieejamas no *ping* utilitārogrammas pārskata.
 - c. Prasības nepieciešamam *RTT* lielumu mērījumu skaitam ir dotas iepriekšminētā logaritmiskā normālā sadalījuma parametru noteikšanas metodei.
3. Aiztures vērtības novērtējumi tika iegūti *Tele2-LV* dažādām *LTE* šūnām. Salīdzinot ar esošām publikācijām, aiztures tika novērtētas katrai šūnai atsevišķi. Šāda pieeja dod iespēju veidot kumulatīvas sadalījuma funkcijas (*CDF*), nelietojot svāra koeficientus (lai ņemtu vērā laiku, kas tika pavadīts katrā šūnā), kā arī ar noteiktu varbūtību paredzēt aiztures tajās šūnās, kas netika novērtētas eksperimenta laikā.

- a. Pieņemot, ka aiztures lielumi *LTE* šūnā ir logaritmiski normāli sadalītie, aiztures katrā *LTE* šūnā varētu būt aprakstītas ar logaritmiski normāla sadalījuma parametru $\hat{\theta}_0 = \hat{\mu}$ un $\hat{\theta}_1 = \hat{\sigma}$ novērtējumiem.
 - b. Tika eksperimentāli pierādīts, ka aiztures viena mobilā tīkla operatora šūnās atšķiras bāzes staciju dažādo virszemes realizāciju dēļ. Tādēļ aizturu novērtējumus ir nepieciešams veikt katrā šūnā atsevišķi.
 - c. Ņemot vērā visu iepriekš minēto, var secināt, ka aiztures konkrēta mobilā operatora *LTE* tīklā var aprakstīt, izmantojot divu gadījuma lielumu sistēmu parametrs $\hat{\mu}$ un parametrs $\hat{\sigma}$ logaritmiski normālam sadalījumam katrai šūnai. Lai izslēgtu nepietiekami jaudīga signāla ietekmi, kas var rasties nepietiekama pārklājuma dēļ, tika analizēti tikai tie dati, kas tika iegūti ar signāla līmeni $RSSI \geq -80$ dBm (tika eksperimentāli pierādīts, ka izmantotam aprīkojumam nav ietekmes uz aizturi neliela izmēra paketēm, ja signāla līmenis ir $RSSI \geq -80$ dBm).
 - d. Veicot iepriekš minētās divu gadījuma lielumu $\hat{\mu}$ un $\hat{\sigma}$ sistēmas aproksimāciju pēc normāla sadalījuma un ņemot vērā, ka $\hat{\mu}$ un $\hat{\sigma}$ lielumi ir neatkarīgie, var iegūt nenobīdītus novērtējumus matemātiskām cerībām $\hat{m}_{\hat{\mu}}$ un $\hat{m}_{\hat{\sigma}}$, standarta novirzēm $\hat{\sigma}_{\hat{\mu}}$ un $\hat{\sigma}_{\hat{\sigma}}$, kā arī korelācijas koeficientam $\hat{r}_{\hat{\mu}\hat{\sigma}}$. Šo parametru skaitliskie lielumi savienojumiem *D2D* un *D2WAN* tika eksperimentāli iegūti un ir parādīti 2.3.1. apakšnodaļā.
4. *LTE* tīkla aizturu atbilstības analīze mazizmēra tālrunu vadības gaisa kuģu kontroles un vadības kanāla (*C2 link*) prasībām tika izpildīta. Salīdzinot ar eksperimentāliem datiem no pieejamiem zinātniskiem rakstiem, slēdziena pamatā ir individuālo *LTE* šūnu analīze. Eksperimentālie dati tika iegūti no *Tele2-LV LTE* servisa *B20* frekvenču joslā. Divvirzienu aizturu (*RTT*) lielumi tika definēti kā fraktāls no 0,999 varbūtības (ar nolūku parādīt, ka *RTT* nepārsniegs šos lielumus ar varbūtību 99,9 %). Šeit ir vērts atzīmēt, ka iegūtie lielumi būtu sasniedzami, ja signāla kvalitāte ir pietiekama, pēc [13] rekomendācijām.
- a. Tika konstatēts, ka tikai 25 % no visām *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % no *RTT* lielumiem būs zemāki par 150 ms, tikai 53 % no visām *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % no *RTT* lielumiem būs zemāki par 200 ms. No tā var secināt, ka aiztures *LTE* tīklā neatbilst tipiska pilota prasībām *RC* operācijām.
 - b. Tika konstatēts, ka 88 % no visām *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % no *RTT* lielumiem būs zemāki par 310 ms, 97 % no visām *LTE* šūnām garantē, ka vismaz 99,9 % no *RTT* lielumiem būs zemāki par 400 ms. Tādējādi var secināt, ka *LTE* tīklam ir pietiekami zemas aiztures, lai pieredzējis pilots varētu veikt tālrunu vadību (*RC*) (tomēr ir jāatzīmē, ka dažreiz pilotam nāksies pievērst lielāku uzmanību, kad *RTT* pārsniegs 310 ms vērtību).
 - c. Tika konstatēts, ka *FPV* video kanālā dedžitera bufera izmēram ir jābūt 310 ms, kas būtu pietiekams 99,9 % laikā (tādējādi nodrošinot 0,1 % pakešu zudumus *LTE* šūnās ar sliktāku ražotspēju); 210 ms dedžitera buferis būtu pietiekams 99 % laikā (tādējādi nodrošinot 1 % pakešu zudumus *LTE* šūnās ar sliktāku

ražotspēju). Var secināt, ka *LTE* tīkls nevar nodrošināt aiztures *FPV* kanālā zemākus par 150 ms gadījumā, ja dedžitera buferim ir nemainīgs izmērs.

- d. Tika konstatēts, ka, ja *FPV* video kanāla dedžitera bufera izmērs ir adaptīvs un vienāds ar *IPDV* vērtību, tad tikai 86 % *LTE* šūnu nodrošinātu aiztures, kas ir zemākas par 150 ms. Mūsdienīgie video kodeki var strādāt pie pakešu zudumiem 1 %, tāpēc augstāka robeža *IPDV* vērtības noteikšanai varētu būt noteikta pie varbūtības 0,99. Šajā gadījumā 98 % no *LTE* šūnām nodrošinātu pietiekami zemas aiztures *FPV* video kanālam.
5. Tika veikts eksperimentāls pētījums par virszemes lietotāju mobilitātes ietekmi uz mobilā tīkla ražotspēju. Tika konstatēts, ka 3G tīklos (*HSPA+* un augstāk) aiztures tiek palielinātas, ja notiek antenu leņķiskā rotācija telpā, kā arī varētu parādīties lokāli palielinātas aiztures ātro pagriezienu un augstuma izmaiņu laikā. Šie novērojumi pašlaik nav atrodami nevienā pieejamā zinātniskā rakstā. Tomēr *LTE* tīklos šīs problēmas netika novērotas. No tā var secināt, ka *LTE* tīkla (*LTE Cat. 4*) ražotspēja nav atkarīga no ātruma (pārbaudīts līdz 100 km/h), kā arī no mēreniem paātrinājumiem/bremzēšanām (ko var radīt ar automobili).
 6. Tika veikts eksperimentāls pētījums par lidojuma augstuma ietekmi uz mobilā tīkla ražotspēju. Tika konstatēts, ka:
 - a. Palielinoties lidojuma augstumam, interference palielinās tā, ka lietotāju aprīkojums iegūst tiešo redzamību ar vairākām bāzes stacijām. Liela interference izraisa lēnākas modulācijas un kodēšanas shēmas izvēli, vai sliktākajā gadījumā vispār var padarīt 3G/*LTE* servisu neizmantojamu lielā augstumā. Tomēr šobrīd šajā secinājumā zinātniskās novitātes nav, jo 2018. gadā ir parādījušās vairākas publikācijas šajā jomā.
 - b. Lielā augstumā efekts no straujām *PIFA* antenu pozīciju izmaiņām pasliktinās vēl vairāk, jo palielinās interference. Šajā gadījumā 3G/*LTE* serviss varētu būt pārtraukts pat tajos gadījumos, kad radio signāla parametri vēl atrodas pieļaujamās robežās.
 - c. Vairākas pārejas starp bāzes stacijām (*handovers*) tiek novērotas lidojuma laikā, kas tiek izraisītas ar sarežģīto šūnu pārklājumu gaisā. Šajā situācijā *soft handover* izmantošana izraisa daudzu pakešu pārmērīgu aizkavēšanu un pārkārtošanu. Šis novērojums pašlaik nav atrodams nevienā pieejamā zinātniskā rakstā.
 - d. *LTE* tīklos tiek lietotas tikai *hard handover*, līdz ar to rodas liels pazaudēto/pārkārtoto pakešu skaits, kas varētu parādīties sarežģītā pārklājumā *soft handover* dēļ, tomēr šeit neparādās, neskatoties uz to, vairākas lēkāšanas starp bāzes stacijām (*handovers*) tika novērotas arī *LTE* tīklā. Tamdēļ var rekomendēt pievērst vairāk uzmanības *handover* mehānismam gadījumā, ja ir plānots izmantot mobilo tīklu, lietotājiem atrodoties gaisā.

Tika piedāvāta pārklājuma gaisā detalizēta eksperimentāla pētījuma tehnoloģiska pieeja. Tas dod iespēju saņemt signālus no visām pieejamām bāzes stacijām un visiem mobilajiem operatoriem vienlaikus. Piedāvātās metodes pamatā ir iebūvēta meklēšanas funkcija, kas neprasa dārgu aprīkojumu. Šī metode šobrīd nav atrodama nevienā pieejamā zinātniskajā rakstā.

7. Tika īstenoti un eksperimentāli pārbaudīti paralēlu datu pārraides kanālu dublēšanas risinājumi, lai palielinātu *C2 link* kanāla drošumu un ražotspēju.

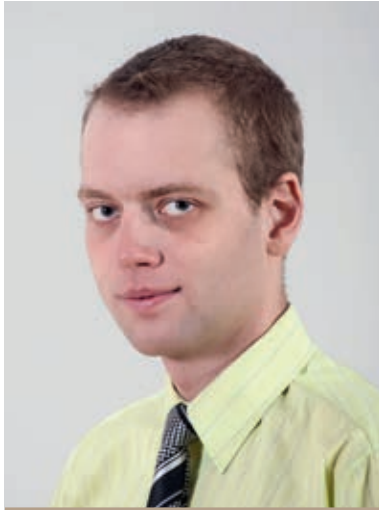
- a. Divi risinājumi (*PRP* un *MPTCP*), kas līdz šim brīdim netika lietoti mobilajos tīklos, tika eksperimentāli pārbaudīti. Tika secināts, ka *LTE* mobilajos tīklos var lietot *PRP* risinājumu, ka arī *MPTCP* risinājumu (ar *redundant* plānotāju).

Promocijas darbā ir piedāvāta aprēķinu metode, kas ļauj paredzēt aiztures paralēli dublētā kanālā, izmantojot zināmus aiztures un pakešu zudumus tīklos, no kuriem tiks veidots paralēli dublēts kanāls. Piedāvātā metode pašlaik nav atrodamā nevienā pieejamā zinātniskajā rakstā un literatūrā. Tā, salīdzinot ar eksistējošo *ITU* metodoloģiju, ir uzskatāmāka un prasa mazākus sākumdatos. Tomēr šī metode nav lietojama dublēto kanālu risinājumiem, kam ir sarežģīta struktūra.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Concept of Operations (CONOPS) for International IFR,” p. 22, 2014.
- [2] ITU, “ITU-T Y.1541 – Network performance objectives for IP-based services,” 2011.
- [3] N. Santos, A. Raimundo, D. Peres, P. Sebastião, and N. Souto, “Development of a software platform to control squads of unmanned vehicles in real-time,” in *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017*, 2017, pp. 1–5.
- [4] Ardupilot, “APSync.” [Online]. Available: <http://firmware.ap.ardupilot.org/Companion/apsync/>. [Accessed: 08-Jun-2018].
- [5] Minla-RC, “Minla HDW.” [Online]. Available: <http://minlarc.com/>. [Accessed: 08-Jun-2018].
- [6] Virt2real-ltd, “Virt2Real.” [Online]. Available: <http://virt2real.com/>. [Accessed: 08-Jun-2018].
- [7] Emlid, “Navio2.” [Online]. Available: <https://emlid.com/navio/>. [Accessed: 08-Jun-2018].
- [8] Y. Paramonov, M. Kleinhofs, and A. Kuznetsov, *Reliability of fatigue prone airframes and composite materials*. Riga: RTU Publishing House, 2011.
- [9] V. Paxson, J. Mahdavi, M. Mathis, and G. Almes, “RFC 2330: Framework for IP Performance Metrics.”
- [10] G. Almes, S. Kalidindi, and M. Zekauskas, “RFC 7679: A One-way Delay Metric for IPPM,” *Internet Eng. Task Force*, Sep. 1999.
- [11] IETF, “Request for Comments RFC3550 - RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications,” 2003.
- [12] R. Stuhlfauth, *High Speed Packet Access*, First Edit. Munchen: Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG2012, 2012.
- [13] Cisco and/or its affiliates, “LTE Antenna Guide. Cisco Integrated Services Router (ISR G2) and Connected Grid Router,” pp. 1–23, 2016.
- [14] D. Brodnevs and A. Kutins, “An Approach to Constructing a Model of Delays in Cells of a Cellular Network Based on Experimentally Obtained Data,” in *Proc. IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, 2020, pp. 206–211.
- [15] ITU, “ITU-T G.114 General Recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection,” 2003.
- [16] ITU, “ITU-T G.1010 - End-user multimedia QoS categories,” 2001.
- [17] M. Dusi, S. Napolitano, S. Niccolini, and S. Longo, “A closer look at thin-client connections: Statistical application identification for QoE detection,” *IEEE Commun. Mag.*, 2012.
- [18] E. Vinogradov, H. Sallouha, S. De Bast, M. M. Azari, and S. Pollin, “Tutorial on UAV: A Blue Sky View on Wireless Communication,” pp. 1–43, 2019.
- [19] M. Claypool and K. Claypool, “Latency and player actions in online games,” *Commun. ACM*, 2006.
- [20] M. Ries, P. Svoboda, and M. Rupp, “Empirical study of subjective quality for massive multiplayer games,” in *Proceedings of IWSSIP 2008 – 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, 2008.
- [21] F. Wang, S. Qi, and L. Jing, “An Analysis of Time-delay for Remote Piloted Vehicle,” 2017, pp. 1–6.
- [22] V. Casas and A. Mitschele-thiel, “On the impact of communication delays on UAVs flocking behavior,” in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2018, pp. 67–72.
- [23] M. Kottkamp, “HSPA + Technology Introduction,” *Rohde Schwarz White Pap.*, 2012.
- [24] N. Goddemeier, K. Daniel, and C. Wietfeld, “Coverage evaluation of wireless

- networks for unmanned aerial systems,” in *2010 IEEE Globecom Workshops, GC’10*, 2010, pp. 1760–1765.
- [25] J. A. Romo, G. Aranguren, J. Bilbao, I. Odriozola, J. Gómez, and L. Serrano, “GSM / GPRS Signal Strength Measurements in aircraft flights under 3,000 meters of altitude,” *WSEAS Trans. Signal Process.*, vol. 5, no. 6, pp. 219–228, 2009.
- [26] X. Lin *et al.*, “The Sky is Not the Limit: LTE for Unmanned Aerial Vehicles,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 4, pp. 204–210, 2018.
- [27] DOCOMO and Ericsson, “RP-170779: Study on Enhanced LTE support for Aerial Vehicles,” 2017. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/tsg_ran/TSGR_75/Docs/.
- [28] D. Brodnevs and A. Kutins, “Deterioration Causes Evaluation of Third Generation Cellular LTE Services for Moving Unmanned Terrestrial and Aerial Systems,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 141–148, 2018.
- [29] S. D. Muruganathan, X. Lin, H.-L. Maattanen, Z. Zou, W. A. Hapsari, and S. Yasukawa, “An Overview of 3GPP Release-15 Study on Enhanced LTE Support for Connected Drones,” pp. 1–7, 2018.
- [30] IEEE Computer Society, “IEEE Standard for Ethernet 802.3,” in *IEEE Standard for Ethernet*, vol. 2012, no. December, 2012, pp. 1–400.
- [31] IEC, “International Standard 62439-3:2016 Industrial communication networks – High availability automation networks,” 2016.
- [32] M. Rentschler and H. Heine, “The Parallel Redundancy Protocol for industrial IP networks,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2013, pp. 1404–1409.
- [33] ZHAW Institute of Embedded Systems InES, “PRP-1 Software Stack.” [Online]. Available: <https://www.zhaw.ch/en/engineering/institutes-centres/ines/products-and-services/high-availability/prp-1-software-stack/#%2Fc46689>. [Accessed: 15-Jan-2017].
- [34] D. Brodnevs and A. Bezdell, “High - Reliability low - Latency cellular network communication solution for static or moving ground equipment control,” in *Proc. IEEE 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2017, pp. 1–6.
- [35] C. Paasch and S. Barre, “Multipath TCP in the Linux Kernel,” 2018. [Online]. Available: multipath-tcp.org. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [36] D. Brodnevs and A. Kutins, “Reliable data communication link implementation via cellular LTE services for static or moving ground equipment control,” in *Proc. IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2018, pp. 1–6.
- [37] D. Brodnevs and A. Kutins, “Cellular networks selection for the remote control vehicles’ control channel setup with parallel redundancy,” *J. Mod. Technol. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 63–74, 2018.
- [38] D. Brodnevs, “Development of a Flexible Software Solution for Controlling Unmanned Air Vehicles via the Internet,” *Transp. Aerosp. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–43, 2018.
- [39] M. Rentschler *et al.*, “Simulation of parallel redundant WLAN with OPNET,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, pp. 1–8, 2013.
- [40] M. Hendawy *et al.*, “Application of parallel redundancy in a Wi-Fi-based WNCS using OPNET,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, vol. 1, pp. 1–6, 2014.
- [41] M. Rentschler *et al.*, “Simulative comparison of parallel redundant wireless systems with OMNet++,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2014.
- [42] ITU, “ITU-T G.911 Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems,” *ITU Telecommun. Stand. Sect.*, 1997.



Deniss Brodņevs dzimis 1987. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē 2011. gadā ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu aviācijas transportā, 2013. gadā ieguvis maģistra grādu aviācijas transportā. Kopš 2011. gada strādā Rīgas Tehniskajā universitātē Aeronautikas institūtā par lektoru un zinātnisko asistentu. Zinātniskās intereses ir saistītas ar gaisa kuģu, kā arī tāl vadības lidaparātu elektroapgādes un radio sakaru sistēmām, īpašu uzmanību pievēršot mobilo sakaru lietojumam tāl vadības lidaparātu navigācijā, kā arī gaisa kuģu elektrisko ģeneratoru izstrādei.