



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Karolis Pilipavičius**

**ŽEMYNKRYPČIO DUOMENŲ PERDAVIMO SPARTOS  
TYRIMAS LTE-A TINKLE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Saulius Japertas

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA**

**ŽEMYNKRYPČIO DUOMENŲ PERDAVIMO SPARTOS**  
**TYRIMAS LTE-A TINKLE**

Baigiamasis magistro projektas  
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Saulius Japertas  
(data)

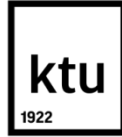
**Recenzentas**

(parašas) Doc. Dr. Paulius Tervydis  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Karolis Pilipavičius  
(data)

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir Elektronikos

(Fakultetas)

Karolis Pilipavičius

(Studento vardas, pavardė)

Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos tyrimas LTE-A tinkle“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. Gegužės 17 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Karolio Pilipavičiaus** baigiamasis projektas tema „Žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos tyrimas LTE-A tinkle“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Pilipavičius, K. Žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos tyrimas LTE-A tinkle. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, Telekomunikacijų katedra.

Kaunas, 2016. 48 psl.

## SANTRAUKA

Darbe išnagrinėti duomenų perdavimo spartos prognozavimo modeliai. Atlikti eksperimentiniai žemynkrypčio perdavimo spartos ir priimamo signalo lygio (RSSI) matavimai už pastatų LTE-A tinkle, mikrocelėse. Eksperimentiškai nustatyti duomenų spartos kitimo dėsningumai. Pateikiamas žemynkrypčio duomenų spartos prognozavimo modelis už pastatų. Modelio rezultatai palyginti su naujai atliktais eksperimentiniais rezultatais. Gautas prognozavimo modelis galės būti naudojamas prognozuojant žemynkrypčio duomenų perdavimo spartą 5G technologijos mikrocelėse.

**Reikšminiai žodžiai:** LTE-A, RSSI, 5G, žemynkryptė sparta, prognozavimo modelis.

**Darbo aprobacija.** Remiantis šio darbo rezultatais, buvo skaityti pranešimai 2 konferencijose (1 tarptautinėje), publikuoti 2 straipsniai (vienas su ISI Web of Science citavimo indeksu) bei pateiktas spausdinimui 1 straipsnis (su ISI Web of Science citavimo indeksu) (Priedas 2).

Pilipavičius, Karolis. Investigation of downlink throughput in LTE-A network. Final project of master / supervisor assoc. prof. dr. Saulius Japertas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications  
Kaunas, 2016. 48 p.

## **SUMMARY**

In this work throughput prediction models were analyzed. Measurements of downlink throughput and RSSI in LTE-A network were carried out behind the buildings in microcells. Throughput patterns were observed from experiment results. A new throughput prediction model for LTE-A behind the buildings is proposed. The results of this model were compared with the new experiments. The proposed model could be used for the prediction of downlink throughput for 5G technology in microcells.

**Keywords:** LTE-A, RSSI, 5G, downlink throughput, prediction model.

**Approbation of the work.** Results of this work were presented in 2 technical conferences (1 international), 2 articles were published (one with ISI Web of Science citation index) and 1 article is submitted for publishing (Priedas 2).

## Turinys

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....	7
ĮVADAS .....	9
1. DUOMENŲ PERDAVIMO LTE/LTE-A TINKLUOSE ANALIZĖ .....	11
1.1. Duomenų perdavimo kokybiniai parametrai .....	11
1.2. Duomenų perdavimo spartos prognozavimas LTE ir LTE-A tinkluose .....	14
1.3. Mokslinių darbų apibendrinimas ir uždavinių formulavimas.....	23
2. METODINĖ DALIS: ĮRANGA, METODIKA, TIRIAMASIS OBJEKTAS.....	24
3.3 Eksperimentų metodika ir tiriamasis objektas .....	24
3.4 Naudojama įranga .....	27
3.5 Paklaidų įvertinimas .....	29
3 MATAVIMŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ .....	31
3.1 Eksperimentų rezultatai .....	31
3.2 Eksperimentinių duomenų analizė.....	32
3.3 Matematinio modelio tikslumo įvertinimas.....	38
3.4 Paklaidų įvertinimas .....	40
IŠVADOS.....	42
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	43
PRIEDAI .....	47
Priedas 1. Programos scenarijus matavimų automatizavimui .....	47
Priedas 2. Magistrinio darbo aprobacijos .....	48

## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

<b>3GPP</b>	Trečiosios kartos partnerystės projektas (angl. <i>3rd Generation Partnership Project</i> )
<b>5G</b>	Penktosios generacijos mobilūs tinklai (angl. <i>5th generation mobile networks</i> )
<b>AM</b>	Aritmetinis vidurkis (angl. <i>Arithmetic Mean</i> )
<b>ARIMA</b>	Autoregresinis integruotas slankusis vidurkis (angl. <i>Autoregressive Integrated Moving Average</i> )
<b>BER</b>	Klaidingų bitų faktorius (angl. <i>Bit Error Ration</i> )
<b>BS</b>	Bazinė stotis (angl. <i>Base Station</i> )
<b>C/I</b>	Nešlio ir interferencijos santykis (angl. <i>Carrier Interference Ratio</i> )
<b>CDF</b>	Komuliatyvinė pasiskirstymo funkcija (angl. <i>Cumulative distribution function</i> )
<b>CQI</b>	Kanalo kokybės rodiklis (angl. <i>Channel Quality Indicator</i> )
<b>DL</b>	Žemynkryptis ryšys (angl. <i>Downlink</i> )
<b>eNB</b>	LTE tinklo bazinė stotis (angl. <i>Evolved Node B</i> )
<b>FDD</b>	Dažnių juostos dažninis atskyrimas (angl. <i>Frequency Division Duplex</i> )
<b>GBR</b>	Užtikrinta bitų sparta (angl. <i>Guaranteed Bit Rate</i> )
<b>GPS</b>	Globali padėties nustatymo sistema (angl. <i>Global Positioning System</i> )
<b>GSM</b>	Globalus standartas mobiliajai komunikacijai (angl. <i>Global Standart for Mobile Communications</i> )
<b>GUI</b>	Vartotojo grafinė sąsaja (angl. <i>Graphical User Interface</i> )
<b>IP</b>	Interneto protokolas (angl. <i>Internet Protocol</i> )
<b>ITU</b>	Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (angl. <i>International Telecommunication Union</i> )
<b>KPI</b>	Pagrindiniai veiklos rodikliai (angl. <i>Key Performance Indicators</i> )
<b>LOS</b>	Tiesioginio matomumo zona (angl. <i>Line of Sight</i> )
<b>LTE</b>	Ilgalaikės evoliucijos technologija (angl. <i>Long Term Evolution</i> )
<b>LTE-A</b>	Patobulintas LTE standartas (angl. <i>Long Term Evolution Advanced</i> )
<b>MA</b>	Slankusis vidurkis (angl. <i>Moving Average</i> )
<b>MAC</b>	Fizinis tinklo plokštės adresas (angl. <i>Media Access Protocol</i> )
<b>MCS</b>	Moduliacijos ir kodavimo schema (angl. <i>Modulation and Coding Scheme</i> )
<b>MIMO</b>	Dauginiai įėjimai, dauginiai išėjimai (angl. <i>Multiple Input Multiple Output</i> )
<b>MLP</b>	Daugialypė tiesinė regresija (angl. <i>Multiple Linear Regression</i> )
<b>mmW</b>	Milimetrinės bangos (angl. <i>Milimeter Waves</i> )
<b>NLOS</b>	Netiesioginio matomumo zona (angl. <i>Non Line of Sight</i> )
<b>NON-GBR</b>	Neužtikrinta bitų sparta (angl. <i>Non Guaranteed Bit Rate</i> )
<b>OWD</b>	Vienpusis vėlinimas (angl. <i>One Way Delay</i> )
<b>QCI</b>	QoS klasės identifikatorius (angl. <i>QoS Class Identifier</i> )

<b>QoS</b>	Paslaugų kokybė (angl. <i>Quality of Service</i> )
<b>RB</b>	Resursų blokas (angl. <i>Resource Block</i> )
<b>RSRP</b>	Lyginamojo signalo priimta galia (angl. <i>Reference Signal Received Power</i> )
<b>RSRQ</b>	Lyginamojo signalo priimta kokybė (angl. <i>Reference Signal Received Quality</i> )
<b>RSSI</b>	Priimto signalo galios indikatorius (angl. <i>Received Signal Strength Indicator</i> )
<b>RTD</b>	Žiedinis vėlinimas (angl. <i>Round Trip Delay</i> )
<b>SINR</b>	Signalų, interferencija ir triukšmo santykis (angl. <i>Signal-to-Interference plus Noise Ratio</i> )
<b>SVR</b>	Palaikanti vektorinė regresija (angl. <i>Support Vector Regression</i> )
<b>TCP</b>	Persiuntimo kontrolės protokolas (angl. <i>Transmission Control Protocol</i> )
<b>TDD</b>	Dažnių juostos laikinis atskyrimas (angl. <i>Time Division Duplex</i> )
<b>TTS</b>	Laiko eilučių analizė (angl. <i>Traffic Time Series</i> )
<b>UDP</b>	Vartotojo datagramų protokolas (angl. <i>User Datagram Protocol</i> )
<b>UE</b>	Vartotojo įranga (angl. <i>User Equipment</i> )
<b>UL</b>	Aukštynkryptis ryšys (angl. <i>Uplink</i> )
<b>UMTS</b>	Universalioji mobiliųjų telekomunikacijų sistema (angl. <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> )
<b>VOD</b>	Vaizdas pagal poreikį (angl. <i>Video On Demand</i> )
<b>VoIP</b>	IP telefonija (angl. <i>Voice over IP</i> )
<b>VoLTE</b>	Balso ryšys per LTE tinklą (angl. <i>Voice over Long-Term Evolution</i> )



## IVADAS

Didžiuliu tempu tobulėjant technologijoms vis daugiau kasdieninių darbų yra perkeliama į elektroninę erdvę. Kiekvienais metais duomenų sunaudojama vis daugiau. Pastebima itin didelė judriojo ryšio srauto naudojimo tendencija, tam įtakos turi atsiradusi išmaniųjų nešiojamųjų įrenginių rinka. Telekomunikacijų operatoriai norėdami prisitaikyti prie augančių vartotojų poreikių nuolat atnaujina naudojamą technologijas. Per pastarąjį dešimtmetį mobilių duomenų suvartojimas padidėjo 4000 kartų, o per ateinančius 4 metus tikimasi, kad šis duomenų suvartojimas išaugs kone 8 kartus [1].

Operatoriai nuolat modernizuoja ir plečia savo tinklus tam, kad padidintų aprėptį ir tinko talpą. Šiuo metu LTE Advanced yra pati naujausia technologija, dar tik diegiama operatorių. LTE-A galima vadinti tikruoju 4G ryšiu, remiantis IMT-Advanced reikalavimais, kuriuos suformulavo ITU organizacija. Pagrindinės šios technologijos naujovės, suteikiančios pranašumus, lyginant su LTE yra šios: didesnė sparta, nešlių agregacija, MIMO praplėtimas, pagerinta duomenų sparta celių pakraščiuose, mažų galių bazinių stočių naudojimas [2].

Jau yra kuriami 5G technologijos standartai. Tikimasi, kad apie 2020 metus rinką pasieks pirmieji įrenginiai, palaikantys 5G standartą. Numatoma, kad 5G bus naudojamos mažosios celės (angl. *Small Cells*) ir aukštesni dažnių diapazonai (dešimčių GHz ribose), dėl ko sumažės celės dydis. Nors duomenų spartos padidės, tačiau gali iškilti tam tikrų problemų su ryšio padengiamumu miestuose [3-4].

Prieš oficialiai paleidžiant naujas technologijas vartotojams, ryšio operatoriai turi atlikti planavimus ir testavimus, kurie susideda iš teorinių skaičiavimų bei praktinių matavimų. Jei nauja bazinė stotis bus pritaikyta naujam dažniui arba įdiegiama naujoje vietovėje, tuomet yra taikomi radijo bangų sklidimo modeliai signalo slopinimui įvertinti. Įdiegus naują sistemą, eksperimentiškai yra įvertinami duomenų perdavimo kokybės parametrai, taip užtikrinant patikimą paslaugų teikimą vartotojams. Projektavimo etapo pradžioje dar yra gana sunku prognozuoti kokie bus užtikrinami kokybės parametrai bet kuriame pasirinktos vietovės taške. Tokių parametrų prognozavimas yra gana sudėtingas ir priklauso tiek nuo pastovių sąlygų (pastatų tankumas, aukštis, gatvių pločiai, medžių tankumas ir kt.), tiek nuo kintančių sąlygų (krituliai, rūktas, saulės aktyvumas). Tikslus kokybinių parametrų prognozavimas ir nustatytos ryšio kokybės užtikrinimas realiomis sąlygomis mobiliuosiuose tinkluose yra nepaprastai laukiamas visų operatorių.

Šiame darbe yra tiriamas vienas iš duomenų perdavimo kokybės parametrų LTE-A tinkle: žemynkrypčio duomenų perdavimo sparta. Iki šiol yra paskelbta labai mažai mokslinių straipsnių, kuriuose bent iš dalies yra nagrinėjami duomenų kokybiniai parametrai LTE tinkle. Dar mažiau informacijos susijusios su LTE-A technologija bei duomenų perdavimo spartos prognozavimu. Galima būtų išskirti pagrindinius veiksnius, kurie lemia mažą mokslinių darbų minėta tema skaičių: LTE-A

technologija pradėta diegti tik 2014 metais, vis dar nedidelė mobiliųjų įrenginių dalis palaiko LTE-A, mažai yra atviro kodo programinių paketų LTE-A tinklo simuliacijai, gana sunku atlikti eksperimentinius matavimus, neturint specialios aparatinės ir programinės įrangos, kokybinių parametrų prognozavimo modelių kūrimas yra sudėtingas ir reikalauja nemažai laiko resursų.

Šio magistrinio **darbo naujumas** – atliktas LTE-A tinkle žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos tyrimas už pastatų ir pasiūlytas spartos prognozavimo modelis. Panašių darbų, kurie grindžiami eksperimentiniais rezultatais ir skirti LTE-A technologijai nebuvo rasta.

**Temos aktualumas** – duomenų spartos kitimo dėsningumai už pastatų jau dabar yra aktualūs LTE/LTE-A atveju, kadangi padės judriojo ryšio operatoriams prognozuoti žemynkrypčio duomenų perdavimo spartą mikrocelėse už pastatų. Tai ypač bus aktualu, kai pasirodys 5G technologija.

**Darbo tikslas:** Ištirti žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos kitimą už pastatų LTE-A mikrocelėse ir pasiūlyti duomenų perdavimo spartos prognozavimo matematinį modelį.

Tam, kad būtų pasiektas darbo tikslas, suformuluoti šie darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti duomenų perdavimo spartos prognozavimo modelius LTE-A tinkle;
2. Parengti duomenų spartos tyrimų už pastatų metodiką;
3. Eksperimentiškai įvertinti žemynkryptę duomenų perdavimo spartą už pastatų LTE-A mikrocelėse;
4. Pateikti duomenų perdavimo spartos prognozavimo matematinį modelį;
5. Įvertinti matematinio modelio tikslumą ir paklaidas.

# 1. DUOMENŲ PERDAVIMO LTE/LTE-A TINKLUOSE ANALIZĖ

Šiame skyriuje yra pateikiami dažniausiai naudojami kokybiniai parametrai. Remiantis moksline literatūra, analizuojami duomenų perdavimo spartos prognozavimo matematiniai modeliai LTE/LTE-A tinkle. Gilinamasi į tyrimo metodikas, matavimo rezultatus, pateiktus matematinius modelius ir problemas, su kuriomis buvo susidurta tyrimų metu.

## 1.1. Duomenų perdavimo kokybiniai parametrai

Norint įvertinti LTE-A judriojo ryšio tinkle teikiamų paslaugų kokybę būtina parinkti ir išanalizuoti bendrus IT tinkluose apibrėžiamus duomenų perdavimo kokybės parametrus. Šiame skyriuje pateikiami svarbiausi kokybiniai parametrai bei jų įvertinimas LTE tinkle.

Pateiktoje metodikoje [5] yra apibrėžti pagrindiniai paslaugų kokybiniai parametrai, skirti įvertinti interneto prieigos kokybę. Pagrindiniai parametrai yra šie:

- Duomenų perdavimo sparta;
- Vėlinimas;
- Vėlinimo fliuktuacijos (angl. *Jitter*);
- Paketų praradimas.

Duomenų perdavimo sparta nurodo koks kiekis informacijos gali būti persiustas per laiko vienetą. Sparta skirstoma į žemynkryptę (duomenys perduodami iš serverio vartotojui) ir aukštynkryptę (duomenys perduodami iš vartotojo į serverį) [6]. Žemynkryptė sparta dažniausiai būna pati svarbiausia, nes dauguma vartotojų naudoja paslaugas, kurios grindžiamos didelio duomenų kiekio perdavimu iš serverio vartotojui, pvz., vaizdas pagal poreikį VOD (angl. *Video On Demand*), failų atsisiuntimai iš serverių ir kt.

Vėlinimas parodo laiką, per kurį duomenų paketas nusiunčiamas iš siuntėjo tiesiai gavėjui [6]. Vėlinimas gali būti vienpusis (angl. *One Way Delay*) ir dvipusis (angl. *Round Trip Delay*). Kiekvienas naujas tinklo mazgas padidina paketo vėlinimą, nes atsiranda papildomi paketų laukimo, apdorojimo ir perdavimo vėlinimai. Viena iš vėlinimo priežasčių, kurios tikriausiai nebus galima visiškai panaikinti, yra paketo sklidimo vėlinimas, kuris priklauso nuo fizinės sklidimo terpės parametrų ir atstumo tarp siųstuvo ir imtuvo. Priimamų paketų vėlinimo kitimai vadinami vėlinimo fliuktuacijomis.

Paketų praradimų poveikis kiekvienam paslaugų tipui gali būti skirtingas. Dažniausiai naudojamas įvertinimo dydis yra prarastų paketų dalis (angl. *Packet Loss Ratio*), kuris parodo prarastų paketų procentinę dalį [6]. UDP protokolas neaptinka prarastų paketų, tačiau naudojant TCP protokolą, galima nustatyti paketų praradimus. TCP protokolas naudojamas paslaugoms, kurioms yra keliami aukšto patikimumo reikalavimai. Judriajame ryšyje didžiausią įtaką paketų praradimams gali daryti

visi veiksniai, esantys tarp vartotojo ir bazinės stoties (pastatai, oro sąlygos, automobiliai ir kt.).

Kokybės parametrų rodiklių vertės gali smarkiai skirtis, priklausomai nuo teikiamos paslaugos. LTE tinkle užtikrinti teikiamų paslaugų kokybei naudojami nešėjai (angl. *Bearers*) [7]. Nešėjai yra skirstomi į įprastinius nešėjus (angl. *Default Bearers*) ir dedikuotus nešėjus (angl. *Dedicated Bearers*). Įprastinis nešėjas kartu su IP adresu priskiriamas vartotojui tuo metu, kai jis prisijungia prie LTE tinklo. Visi kiti nešėjai, kurie yra priskiriami vartotojui po to, kai jis prisijungia prie tinklo yra vadinami dedikuotais. Nešėjai gali būti toliau skirstomi į turintys užtikrintą bitų spartą GBR (angl. *Guaranteed Bit Rate*) ir neužtikrintą bitų spartą NON-GBR (angl. *Non Guaranteed Bit Rate*). Įprastiniai nešėjai turi tik GBR ir užtikrina BE (angl. *Best Effort*) lygio paslaugų kokybę. Dedikuoti nešėjai gali būti tiek GBR, tiek NON-GBR. Dėl tokio skirstymo dedikuoti nešėjai, turintys GBR, užtikrina aukštesnį teikiamų paslaugų patikimumą, nes priskiriami resursai gali būti fiksuoti ir nepriklausomi nuo esamos tinklo būsenos.

3GPP TS 23.203 pateiktoje techninėje specifikacijoje [8] yra apibrėžiamos QCI (angl. *QoS Class Identifier*) vertės kiekvienam paslaugos tipui. QCI yra QoS klasės identifikatorius. Šis parametras naudojamas LTE tinkluose užtikrinti, kad nešėjų srautas būtų paskirstytas pagal QoS principus. QCI yra skirstomas į klases. Kiekviena QCI klasė turi savo prioritetą, paketo vėlinimo ir paketų praradimo normas bei priskiriamų paslaugų pavyzdžius. QCI charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. QCI charakteristikos.

QCI	Resurso tipas	Prioritetas	Paketų vėlinimas	Paketų praradimas	Paslaugų pavyzdžiai
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Balso pokalbiai
2	GBR	4	150 ms	$10^{-3}$	Vaizdo pokalbiai
3	GBR	3	50 ms	$10^{-3}$	Realaus laiko žaidimai
4	GBR	5	300 ms	$10^{-6}$	Nerealaus laiko vaizdo paslaugos
65	GBR	0,7	75 ms	$10^{-2}$	Didelio patikimumo pusiau duplexo bendravimo paslauga
66	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Vidutinio patikimumo pusiau duplexo bendravimo paslauga
5	non-GBR	1	100 ms	$10^{-6}$	IMS signalizacija
6	non-GBR	6	300 ms	$10^{-6}$	Vaizdo, TCP pagrindu veikiančios paslaugos (www, ftp, p2p ir kt.)
7	non-GBR	7	100 ms	$10^{-3}$	Realaus laiko audio ir vaizdo paslaugos, interaktyvūs žaidimai
8	non-GBR	8	300 ms	$10^{-6}$	Nerealaus laiko vaizdo, TCP pagrindu veikiančios paslaugos (www, ftp, p2p ir kt.)
9	non-GBR	9	300 ms	$10^{-6}$	Nerealaus laiko vaizdo, TCP pagrindu veikiančios paslaugos, naudojamos su įprastiniu nešėju

69	non-GBR	0,5	60 ms	$10^{-6}$	Didelio patikimumo ir vėlinimui jautrios signalizacijos.
70	non-GBR	5,5	200 ms	$10^{-6}$	Didelio patikimumo ir vėlinimui jautrios paslaugos.

Darbe [9] yra aprašomi pagrindiniai KPI rodikliai (angl. *Key Performance Indicators*). Remiantis KPI rodikliais galima nustatyti kokia yra radijo ryšio kokybė, numatyti kada bus perkeltis (angl. *Handover*), įvertinti ryšio kanalo kokybę ir interferencijos poveikį, paskirstyti radijo resursus vartotojams, numatyti paketų paskirstymo būdą mobiliems įrenginiams. Pagal KPI parametrus galima netiesiogiai spręsti kokios kokybės paslaugas gauna vartotojas. Pagrindiniai KPI rodikliai yra šie:

**RB** (angl. *Resource Block*) – Fiziniam sluoksnyje RB yra mažiausias vienetas, kuris nusitęsia per vieną simboli (OFDM) laiko ašyje arba per vieną subnešlį (angl. *subcarrier*) dažnių ašyje;

**RSRP** (angl. *Reference Signal Received Power*) - Tai vidutinė lyginamojo signalo (angl. *Reference Signal*) galia per visą paskirtą dažnių juostą. Tai yra pats svarbiausias parametras, pagal kurio vertes yra nustatoma kada atlikti perkeltį į kitą celę;

**RSSI** (angl. *Received Signal Strength Indicator*) - Suteikia informaciją apie visą priimtą plačiajuostę signalo galią, interferenciją ir šiluminį triukšmą. Šią reikšmę matuoja vartotojo mobilus įrenginys *UE* (angl. *User Equipment*);

**RSRQ** (angl. *Reference Signal Received Quality*) - Tai išvestinis dydis, sudarytas iš RSSI ir RSRP dydžių, pateiktas (1) formulėje. Šis dydis gali suteikti informacijos apie interferenciją ir signalo stiprumą. RSRQ vertės yra itin svarbios ties celių kraštais, nes yra numatoma kada daryti perkeltį (angl. *handover*) į kitą celę:

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}, \quad (1)$$

čia  $N$  yra *RB* skaičius, išmatuotas per visą juostos (angl. *bandwidth*) ilgį;

**SINR** (angl. *Signal-to-Interference plus Noise Ratio*) - dydis, kuris apibrėžiamas kaip santykis tarp norimo signalo galios, interferencijos ir triukšmo, pateiktas (2) formulėje:

$$SINR = \frac{P}{1 + N}, \quad (2)$$

čia  $P$  yra signalo galia,  $I$  – interferencijos galia,  $N$  – triukšmo galia;

**CQI** (angl. *Channel Quality Indicator*) - parodo informacinio kanalo kokybę. Kuo aukštesnis CQI, tuo geresnė kanalo kokybė ir naudojama aukštesnė moduliacija. CQI reikšmės tinklui perduoda UE.

## 1.2. Duomenų perdavimo spartos prognozavimas LTE ir LTE-A tinkluose

Labai mažai yra publikacijų, susijusių su kokybinių parametru prognozavimu LTE ir LTE-Advanced tinkluose. Dar mažiau galima rasti mokslinių straipsnių, susijusių su duomenų perdavimo spartos prognozavimu. Spartos prognozavimas yra itin svarbus įvairioms aplikacijoms, pvz., realaus laiko vaizdo transliavimui, kurio metu bitų sparta (angl. *bit rate*) galėtų būti atitinkamai pritaikoma, atsižvelgiant į prognozuojamą perdavimo spartą. Judriojo ryšio tinkluose nuolat susiduriama su duomenų spartos problemomis, kurios dažniausiai pasireiškia dėl tam tikrų geografinių vietos ypatybių, kintančių oro sąlygų, tinklo apkrautumo, staigaus vartotojų skaičiaus kitimo ir kt. Tikslus ir aiškus spartos prognozavimas yra itin sudėtingas, tačiau būtinas, norint teikti paslaugas su apibrėžta kokybę kiekvienam vartotojui.

Straipsnyje [10] yra pateikiami duomenų spartos prognozavimo modeliai, su galimybe juos pritaikyti LTE ir LTE-A technologijoms. Apibendrinus publikacijoje pateiktą informaciją, galima išskirti 3 tipų duomenų perdavimo spartos prognozavimo modelius:

1. Matematinėmis formulėmis pagrįsti prognozavimo modeliai. Naudojant šiuos modelius, dažniausiai yra prognozuojama TCP sparta, atsižvelgiant į tinklo kelio charakteristikas: TCP paketų praradimą, žiedinį vėlinimą RRT (angl. *Round Trip Delay*), vienpusį vėlinimą OWD (angl. *One Way Delay*) ir kt.;
2. Istoriniais duomenimis pagrįsti modeliai. Šio tipo modeliuose ateities sparta yra prognozuojama remiantis praeities matavimais. Šio tipo prognozavimas dažniausiai yra tikslesnis negu formulėmis paremtas prognozavimas;
3. Duomenų spartos prognozavimas, pasinaudojant save mokančiomis sistemomis (angl. *Machine learning*).

Toliau aptariamame šaltinyje yra patiekiami duomenų spartos prognozavimo algoritmai. Šie algoritmai suskirstyti į 4 grupes:

1. Algoritmai, kurių veikimas pagrįstas vidutine duomenų sparta. Naudojami praeities duomenys ateities spartos prognozavimui. Prognozuojama sparta  $\hat{C}_i$  gali būti išreikšta formulėmis 1-4. Formulės 1-4 išreiškia šiuos vidurkius: aritmetinį (3), harmoninį (4), geometrinį (5) ir eksponentinį slankųjį (6).

$$\hat{C}_i = \left( \sum_{k=1}^K C_{i,-k} \right) / K, \quad (3)$$

$$\hat{C}_i = K / \left( \sum_{k=1}^K \frac{1}{C_{i,-k}} \right), \quad (4)$$

$$\hat{C}_i = \sqrt[K]{\prod_{k=1}^K C_{i,-k}}, \quad (5)$$

$$\hat{C}_i = \alpha \sum_{k=1}^{K-1} (1-\alpha)^{k-1} \cdot C_{i-k} + \sum_{k=1}^K (1-\alpha)^K \cdot C_{i-K}, \quad (6)$$

čia  $\hat{C}_i$  prognozuojama duomenų sparta per visą  $i$  sesiją, kuri tęsiasi  $T$  sekundžių;  $C_{i-K}$  vidutinė perdavimo sparta  $k$ -tojoje  $\Delta$  sekundėje, prieš prasidedant  $i$  sesijai;  $K$  yra parametras, kuris kontroliuoja istorinių duomenų kiekį, pagal kurį bus prognozuojama sparta ateityje;  $\alpha$  yra istorinių duomenų svorinis koeficientas;

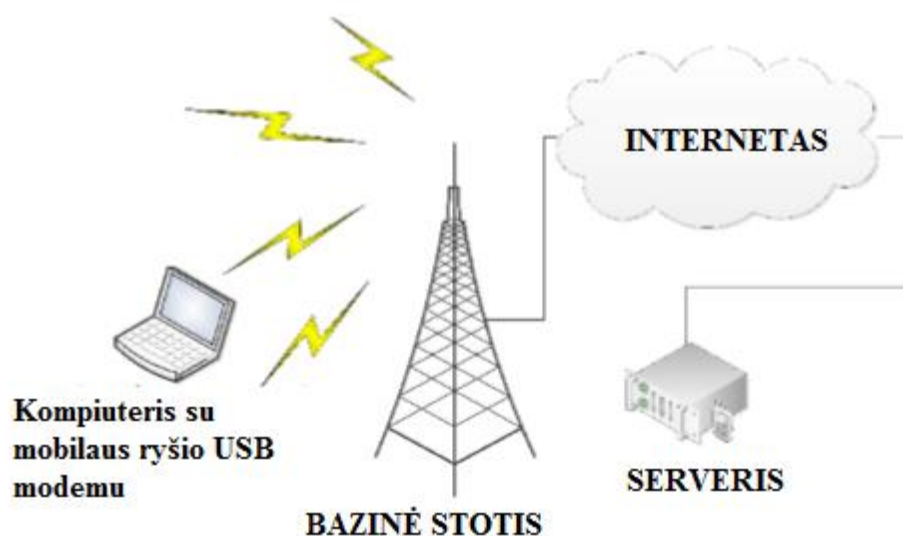
2. Algoritmas, kuriame sparta yra prognozuojama pasitelkus daugialypę tiesinę regresiją . Daugialypė tiesinė regresija pateikta (7) formulėje įvertina ryšį tarp įvesties ir išvesties parametrų.

$$\hat{C}_i = b_0 + b_1 C_{i-1} + b_2 C_{i-2} + \dots + b_k C_{i-k} + \dots + b_K C_{i-K}, \quad (7)$$

čia  $b_0, b_1, \dots, b_k$  yra svorio koeficientai;

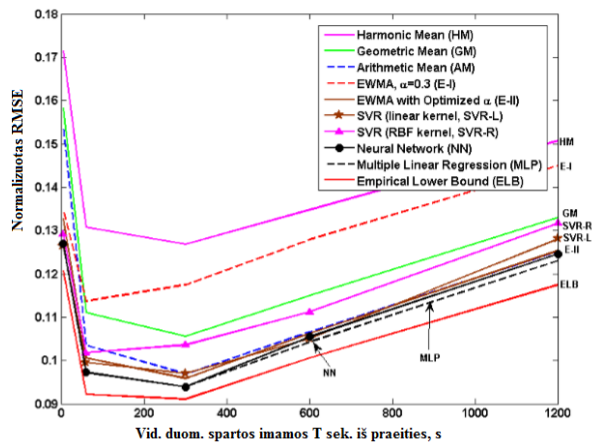
4. Algoritmas pagrįstas save mokančiomis sistemomis (angl. *Machine learning*). Tokios sistemos yra treniruojamos pasitelkus praeities duomenis. Straipsniuose [11-12] yra pateikiami spartos prognozavimo algoritmai tiek laidiniams, tiek belaidžiams tinklams, pasitelkiant SVR (angl. Support Vector Regression). SVR ir yra pagrįstas save mokančiomis sistemomis.

Šioje publikacijoje [10] kartu yra pateikiami ir įvairių tipų prognozavimo modelių palyginimai su realiais eksperimentiniais rezultatais UMTS tinkle. Užsiminta, kad esami modeliai gali būti pritaikomi ir LTE/LTE-A technologijoms. Rezultatai yra lyginami pagal normuotą paklaidą duomenų spartai NRMSE (angl. *Normalized Root Mean Square Error*). Eksperimento metu duomenys buvo surinkti iš 3 skirtingų miesto vietų. Eksperimento schema pateikta 1 pav.

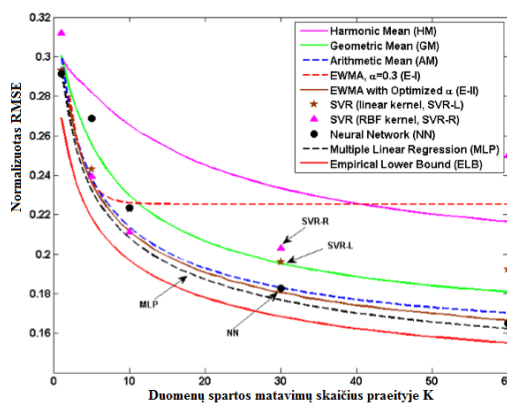


1 pav. Eksperimento vykdymo schema tinkle [10]

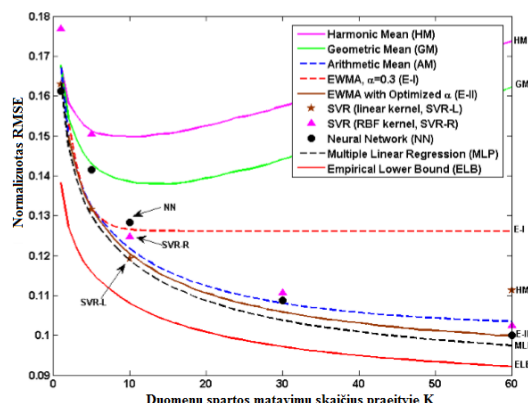
Duomenų spartos prognozavimo modelių palyginimas, atsižvelgiant kokio istorinio laikotarpio duomenys yra pateikiamo spartos prognozavimui, pateiktas 2 pav. Modelių palyginimas skirtingose geografinėse vietose, esant skirtingoms perdavimo spartoms pateiktas 3-4 pav.



2 pav. Modelių palyginimas, priklausomai nuo kaip toli iš praeities yra imami duomenys [10]



3 pav. Modelių palyginimas, 2 tyrimo vietai, kai perdavimo sparta 2,8 Mb/s [10]



4 pav. Modelių palyginimas, 3 tyrimo vietai, kai perdavimo sparta 5,3 Mb/s [10]

Rezultatai parodė, kad duomenų spartos prognozavimo modeliai, skirtingai nei kiti, kurie rėmėsi aritmetiniu vidurkiu (AM) ir daugialype tiesine regresija (MLP), buvo patys tiksliausi. Nustatyta, kad norint gauti tiksliausius prognozavimo rezultatus, reiktų imti praeities duomenis nuo 100 iki 300 sekundžių atgal. Jei naudojami praeities duomenys viršija 300 sekundžių atgal, tada modelių tikslumas staigiai sumažėja. Atsižvelgus į gautus rezultatus matyti, kad nebūtinai patys naujausi ir sudėtingiausi modeliai, kurie pagrįsti save mokančiomis sistemomis, yra ir patys tiksliausi. Šiuo atveju aritmetinio vidurkio modelis buvo pats paprasčiausias, greičiausiai pritaikomas ir parodė itin tikslus rezultatus.

Publikacijoje [13] minimi dviejų tipų prognozavimo modeliai:

1. Mobilumo prognozavimo modeliai. Naudojant šiuos modelius yra bandoma prognozuoti kitą galimą vartotojo buvimo vietą, remiantis vartotojo GPS koordinatėmis, WiFi ar judriojo ryšio teikiama informacija. Šių modelių pagalba



galima numatyti galima celės apkrautumą. Autorius mini, kad šio tipo modelių tikslumas yra gana mažas ir pabrėžia, kad nėra rasta mokslinių tyrimų, kurie susietų vartotojo vietos prognozavimą tikslumą su duomenų spartos prognozavimu tikslumu;

2. Duomenų spartos prognozavimo modeliai. Pabrėžiami modeliai, tokie kaip GARCH, ARMA, ARIMA, FARIMA, kurie grindžiami slankiųjų vidurkių MA (angl. *Moving Average*) analize ar autoregresiniu filtravimu (angl. *Autoregressive Filtering*). Dažniausiai šie modeliai naudoja tinklo informacijos praeities duomenis, kurių pagalba yra prognozuojami ateities rezultatai.

Toliau šiame straipsnyje yra siūlomas naujas stochastinis duomenų spartos prognozavimo modelis LTE tinkle. Modelis įvertina tokius atsitiktinius reiškinius, kaip greitasis fedingas (angl. *fast fading*), tinklo būseną ir vartotojo buvimo vietos parametrus. Šis modelis gali būti taikomas, kada nėra tiksliai žinomas vartotojų skaičius celėje arba kada nėra tiksliai žinomas vartotojų atstumas iki bazinės stoties. Pats prognozavimo modelis yra paremtas (8) formule.

$$T = q_T(\Gamma, N) = T_0 \eta / N, \quad (8)$$

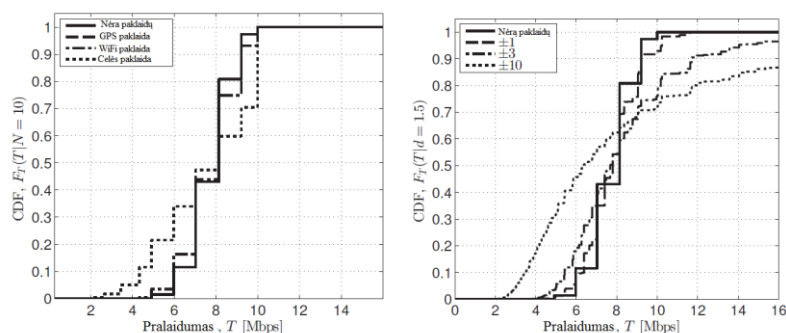
čia  $\Gamma = 10 \lg \gamma$  yra SINR (angl. *Signal to Interference plus Noise Ratio*) dB;  $T_0$  yra parametras, priklausantis nuo konkrečios judriojo ryšio sistemos;  $\eta = q_\eta(\Gamma)$  yra spektro efektyvumas duotajai SINR vertei;  $N$  – vartotojų skaičius.

SINR yra funkcija, išreiškiama (9) formule.

$$\gamma = q_\gamma(d, r) = \gamma_0 r / d^\alpha, \quad (9)$$

čia  $\gamma$  yra SINR,  $\gamma_0$  yra nuo judriojo ryšio technologijos priklausantis parametras,  $\alpha$  yra bangų slopimo eksponentė,  $r$  yra greitojo fedingo stiprinimas,  $d$  atstumas iki bazinės stoties.

Galutinio modelio rezultatai yra pateikti 5 pav.



5 pav. Modelio CDF funkcija: kairėje – tiksliai nėra žinomas atstumas iki BS, bet žinomas vartotojų skaičius celėje  $N=10$ , dešinėje –tiksliai nėra žinomas vartotojų skaičius celėje, bet žinomas atstumas iki bazinės stoties  $d=1,5$  km [13]

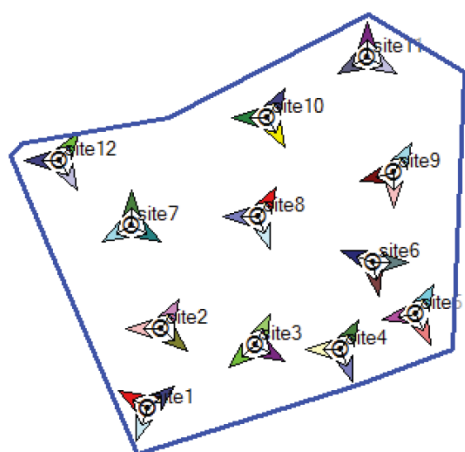
Remiantis 5 pav. aiškiai matoma, kad CDF funkcija plokštėja, kai padidėja neapibrėžtumai. Siūlomas modelis gali padėti prognozuoti duomenų spartos sumažėjimą iki nepageidaujamo lygio, taip pagerinant resursų valdymą celėse. Tokio modelio didžiausias trūkumas yra trūkstama verifikacija su realiais eksperimentiniais tyrimais.

LTE žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos prognozavimo algoritmas, paremtas moduliacijos ir kodavimo schema (angl. *Modulation and Coding Scheme*) yra pateikiamas [14] straipsnyje. Teigiama, kad šis algoritmas yra naudingas tinklo planavimo ir optimizacijos etapuose. Straipsnyje pateiktas prognozavimo modelis paremtas (10) formule.

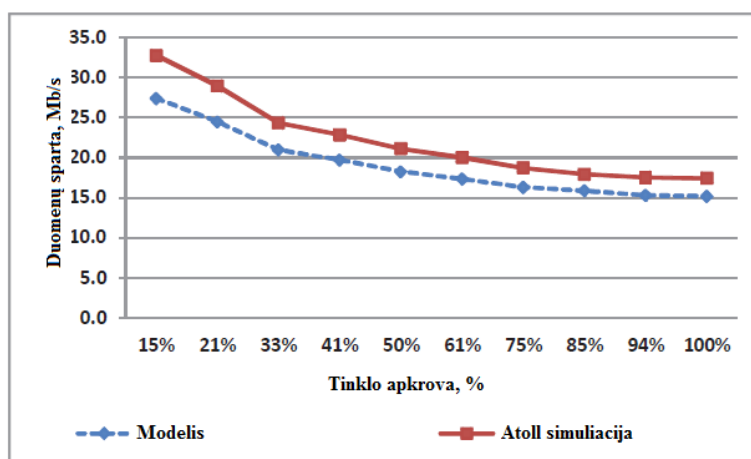
$$T_{Cell\_avg} = \sum_{i=1}^n P_i \times T_i, \quad (10)$$

čia  $T_{Cell\_avg}$  yra vidutinis pralaidumas celėje (Mb/s),  $P_i$  yra tikimybė surišta su SINR verte,  $T_i$  yra pralaidumas, kuris apskaičiuotas remiantis SINR (Mb/s).

Toliau šiame straipsnyje pateiktas pirminis modelis yra patobulinamas. Įvedamas pasiskirstymo santykio koeficientas, kuris paremtas moduliacijos ir kodavimo schemas MCS lentele. Šis modelis tinka prognozuoti duomenų perdavimo spartą MAC lygmenyje. Nėra pateikto galutinio matematinio modelio ir neaiškiai yra aprašomi duomenų spartos skaičiavimo etapai. Galutiniame etape pateikiami modelio ir LTE tinklo simuliacijos rezultatai miesto sąlygomis, esant skirtingoms tinklo apkrovoms (6-7 pav). Simuliacija buvo atlikta su Atoll programiniu paketu. Generuojamas srautas yra 4 tipų: VoIP, vaizdo konferencija, mobilus internetas, didelės spartos internetas.



6 pav. LTE Bazinių stočių pasiskirstymas miesto vietovėje [14]



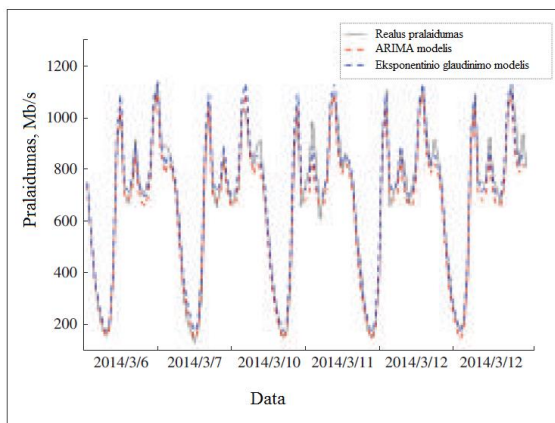
7 pav. Duomenų spartos modelio ir simuliacijos palyginimas [14]

Išvadose teigiama, kad modelio ir simuliacijos būdu gauti rezultatai yra labai artimi. Pačiame straipsnyje labai trūksta modelio aprašymo tikslumo. Kuriant simuliacijos scenarijų taip pat neaprašyta kokio tipo ir aukščio namai labiausiai vyrauja pasirinktoje vietovėje, kokie yra atstumai tarp bazinių

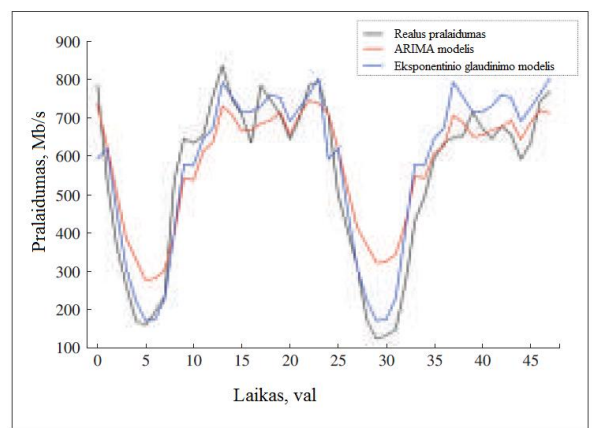
stočių, kokie bazinių stočių aukščiai, kiek vartotojų yra celėje. Šio modelio didžiausias trūkumas yra verifikacijos su eksperimentiniais rezultatais nebuvimas.

Darbe [15] yra pateikiami duomenų spartos prognozavimo modeliai, kurie grindžiami duomenų srauto laiko eilučių analize TTS (angl. *Traffic Time Series*). Dviejų tipų prognozavimo modeliai yra pateikiami: modelis, paremtas autoregresiniu integruotu slenkamųjų vidurkių metodu ARIMA (angl. *Autoregressive Integrated Moving Average*) ir modelis, paremtas paprastu eksponentiniu glaudinimo metodu (angl. *Exponential Smoothing*). Abu šie modeliai vienas nuo kito skiriasi tik svorių priskyrimo ankstesnėms reikšmėms metodika. Šie modeliai naudoja praeities duomenų spartos informaciją, kad galėtų prognozuoti spartą ateityje.

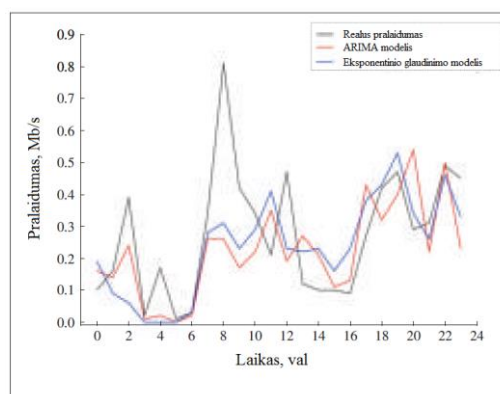
Modelių tikslumui įvertinti buvo atlikti eksperimentiniai duomenų spartos matavimai Honkonge, LTE tinkle. Duomenys buvo renkami 21 dieną iš 1352 bazinių stočių. Kiekvieną kartą atlikus duomenų spartos matavimus buvo fiksuojamas konkretus laikas ir bazinės stoties identifikacijos numeris bei GPS koordinatės. Gauti rezultatai pateikti 8-10 pav.



8 pav. Duomenų spartos prognozavimas darbo dienomis visame regione [15]



9 pav. Duomenų spartos prognozavimas savaitgaliais visame regione [15]



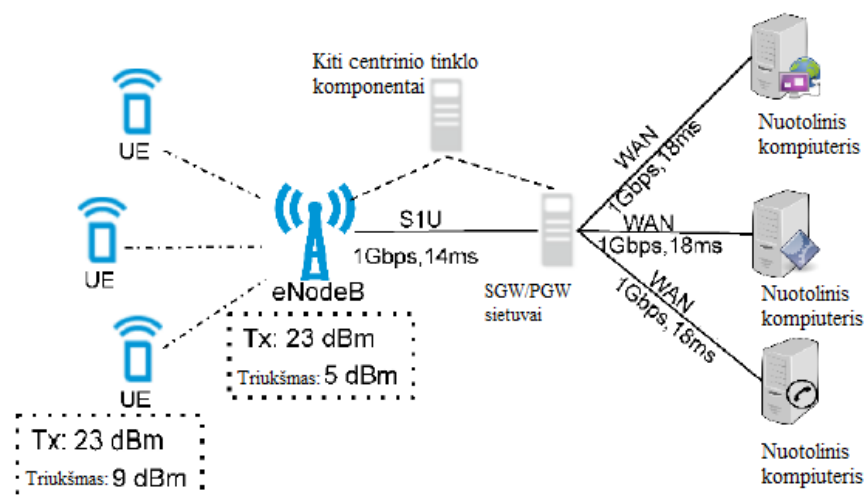
10 pav. Duomenų perdavimo spartos prognozavimas vienoje celėje [15]

Remiantis 8-10 pav. pateiktais rezultatais pateikta išvada, kad ARIMA modelis tiksliausiai prognozavo duomenų spartą savaitgaliais visam regionui, o eksponentinio glaudinimo modelis tiksliausiai prognozavo spartą darbo dienomis visam regionui ir spartą vienos celės ribose. Deja, bet ir šiuo atveju prognozavimui buvo naudojami tipiniai modeliai, kurie grindžiami tik spartos matavimų istoriniais duomenimis. Nėra įvertinami jokie tinklo parametrai ar geografinės vietovės ypatybės. Toks modelis būtų sunkiai pritaikomas mobilaus tinklo projektavimo stadijoje, kuomet būtų poreikis įvertinti duomenų spartas kritinėse vietose.

Straipsnyje [16] pateikiamas duomenų spartos prognozavimo modelis PULSAR (angl. *Per-user LTE Share of Resources*), skirtas LTE mažosioms celėms (angl. *Small Cells*). PULSAR kartu yra ir sprendimas, kuris diegiamas mobilių paslaugų tiekėjo tinklo pusėje. Šis modelis prognozavimui naudoja surinktą tinklo informaciją (CQI ir kt. parametrus) bei surinktas aplikacijų srauto charakteristikas. PULSAR modelio veikimo tikslumas yra įvertinamas naudojant NS-3 simuliacijos programą. Tinklo topologija pateikta 11 pav. Nustatyta sąlyga, kad vienas vartotojas yra fiksuotas ir vienu metu naudoja tik vieno tipo duomenų srautą. Modelio matematinė išraiška pateikta (11) formulėje.

$$T_i = \begin{cases} C_1^{hr} \cdot SF_i \cdot \min(TBS_i, P_i) + C_0^{hr}, & \text{jei } UE_i \in HR \\ C_1^{lr} \cdot SF_i \cdot \min(TBS_i, P_i) + C_0^{lr}, & \text{jei } UE_i \in LR \end{cases} \quad (11)$$

čia  $T_i$  - prognozuojama duomenų sparta;  $SF_i$  - subkadro dalis (angl. *subframe share*);  $P_i$  - vidutinis aplikacijų paketų dydis, kuris siunčiamas iš *eNB* į *UE* (angl. *User Equipment*);  $TBS_i$  - transportinio bloko dydis priskirtas vartotojo įrangai *UE*; *HR* – aukšta duomenų sparta; *LR* – žema duomenų sparta;  $C_1^{hr}$ ,  $C_1^{lr}$ ,  $C_0^{hr}$ ,  $C_0^{lr}$ , yra konstantos.



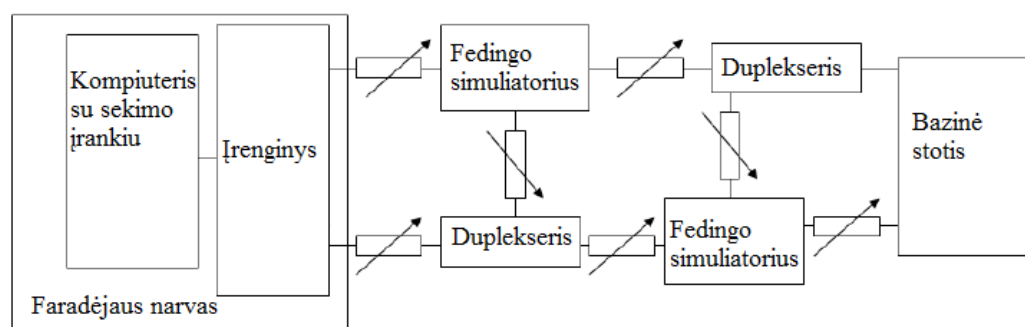
11 pav. LTE tinklo topologija modelio tikslumo įvertinimui NS-3 aplinkoje [16]

Rezultatai parodė, kad PULSAR modelis gana tiksliai prognozuoja duomenų spartą, kai naudojamas tinklas iš LTE mažųjų celių. PULSAR modelio prognozavimo paklaida 92% mažesnė, negu panašiu principu veikiančio ATOM modelio. Nors teoriniai rezultatai yra gana tikslūs, tačiau atliekant simuliaciją nebuvo galimybės vienam vartotojui tuo pačiu metu naudoti skirtingų tipų paslaugas. Taip pat nėra įvertinama geografinė padėtis bei mažųjų celių padėties geografiniai ypatumai (ant pastato stogo, pastato šoninės sienos ir kt.).

Publikacijoje [17] yra pateikiami LTE spartos, RSSI ir SINR matavimų rezultatai tiek pastatų viduje, tiek lauke. Naudojamas dažnių ruožas yra 700 MHz. Matavimai buvo atliekami LOS ir NLOS sąlygomis. Nors straipsnyje ir nepateikiamas joks prognozavimo modelis, tačiau atlikus rezultatų analizę matyti tam tikri dėsningumai tarp duomenų spartos, RSSI ir SINR. Didėjant SINR, matomas aiškus duomenų spartos didėjimas. Toks pat kitimas pastebimas su RSSI. Didėjant RSSI vertėms, sparta duomenų taip pat didėja. Tyrimai buvo atlikti skirtingose vietose, todėl esant panašioms RSSI ir SINR vertėms duomenų sparta buvo kiek skirtinga. Tam galimai įtakos turėjo pasikeitusi moduliacija.

Dar vienas duomenų spartos prognozavimo būdas pateikiamas [18] straipsnyje. Visų pirma yra atliekama LTE tinklo simuliacija, kurios metu stebima kaip keičiasi C/I (gretimo kanalo interferencijos), RSRP, RSSI ir SINR vertės bei kokią įtaką jos turi duomenų spartai. Sudaroma kitimų lentelė. Simuliacijai naudojama įrangos schema pateikta 12 pav. Naudojant skirtingų gamintojų įrangą laboratorijoje duomenų spartų rezultatai nežymiai skyrėsi. Eksperimentiniai matavimai atliekami mieste su automobiliu (angl. *Test Drive*) 2,6 GHz dažnių ruože veikiančiame LTE tinkle. Iš surinktų RSSI, RSRP duomenų yra išskaičiuojamos SINR vertės. Pasinaudojus lentele, kuri buvo sudaryta simuliacijos metu, eksperimentinėms SINR vertėms parenkamos duomenų spartos.

Palyginus prognozuojamas ir eksperimentiškai gautas duomenų spartas pastebėta, kad didžiausi netikslumai gauti netoli celių kraštų. Toks spartos prognozavimo būdas yra nesudėtingas, tačiau įvertina tik spartos kitimą miesto keliuose arba šalia jų. Dažnai atsiranda spartos sutrikimų pačiuose namų kiemuose dėl pastatų, medžių, automobilių ir kt. Norint visa tai įvertinti, simuliacija būtų kur kas sudėtingesnė, galimai eksperimentiniai ir modelio rezultatai smarkiai skirtingi. Pasiūlytas prognozavimo būdas skirtas tik LTE tinklui, tačiau gali būti ateityje pritaikoma LTE-Advanced ir 5G.



12 pav. Simuliacijai naudojama įrangos schema [18]

Straipsniuose [19-21] yra detaliau nagrinėjamas paketų paskirstymas (angl. *Packet Scheduling*). Pateikiami algoritmai, kurie pagerina paketų paskirstymo efektyvumą. LTE bazinė stotis (eNB) turi nuspręsti, kuriai vartotojo mobilieji stočiai suteikti esamus resursus duomenų siuntimui ar priėmimui. Straipsniuose pateikiami algoritmų patobulinimai daro tiesioginę įtaką ir duomenų spartai. Atliekama simuliacija, kurios metu bandoma prognozuoti duomenų spartas ir paketų praradimus. Nors ir nėra pateikiami prognozavimo modeliai, tačiau yra atliekamas tam tikras spartos prognozavimas.

Tyrime [22] yra pateikiamas tikslesnis CQI parametro prognozavimo būdas. CQI parametras identifikuoja kanalo kokybę. Kuo aukštesnis CQI indeksas, tuo aukštesnė moduliacija yra naudojama, o kartu ir didėja duomenų perdavimo sparta. CQI daro tiesioginę įtaką perdavimo spartai. Spartos prognozavimui taip pat naudojamas SINR parametras, tačiau pabrėžiama, kad šį parametą galima išmatuoti tik vartotojo įrangoje, todėl ir spartos prognozavimas gali būti atliekamas tik iš vartotojo pusės. Rezultatai taip pat buvo gauti simuliacijos būdu. Pateiktas modelis neįvertina sklidimo aplinkos.

Šaltinyje [23] yra pateikiamas energijos suvartojimo ir duomenų spartos įvertinimo tyrimas LTE tinkle. Operatoriai, norėdami padidinti tam tikrose vietose pralaidumą, aprėptį ir celės talpą, naudoja mažąsias celes dėl mažesnės savikainos. Pateiktas algoritmas optimizuoja resursų priskyrimą vartotojams, taip sumažinant energijos suvartojimą mažosiose celėse. Algoritmas įvertina šiuos parametrus: vartotojo atstumą iki bazinių stočių ir mažųjų celių, bazinių stočių ir mažųjų celių apkrovimą, QoS reikalavimus, mažųjų celių suvartojamą energijos dydį. Deja, tačiau stengiantis mažinti energijos sąnaudas resursų paskirstymo algoritmo optimizavimu, kartu sumažėja duomenų perdavimo sparta.

Toliau straipsnyje pateiktas energijos suvartojimo mažinimo sprendimas, kuris kiek galima mažiau daro neigiamą įtaką duomenų perdavimo spartai. Remiantis nauju algoritmu yra pateikiamas ir prognozuojamos duomenų perdavimo spartos vertės. Prognozavimas buvo atliktas pasinaudojus MATLAB programinio paketo simuliacija. Gauti simuliaciniai rezultatai nebuvo palyginti su eksperimentiniais duomenimis.

Straipsnyje [24] pateikiamas kanalo parametrų ir duomenų spartos įvertinimas milimetrinėms (mmW) ir mikrobangoms. Naudojamas 3D spindulių sekimo modelis (angl. *3D Ray Tracking*). Lyginama duomenų perdavimo sparta esant skirtingiems LTE-A dažnių diapazonams ir antenų konfigūracijoms. Spartos prognozavimas yra atliekamas su simuliacijos programa, kuri taip pat neįvertina daugybės išorinių parametrų lauke.

Šiame straipsnyje didelis dėmesys kreipiamas milimetrinėms bangoms dėl to, kad ateityje pasirodys 5G technologija, kuri galima naudoti milimetrinių bangų diapazoną (30-300 GHz). 5G atveju bus naudojamos ir mažosios celės, todėl dėl sumažėjusios celių aprėpties padidėja tikimybė, kad teikiamų paslaugų kokybė suprastės tam tikrose tankiai apgyvendintų rajonų vietose.

### 1.3 Mokslinių darbų apibendrinimas ir uždavinių formulavimas

Išanalizavus mokslinius straipsnius nustatyta, kad duomenų perdavimo sparta yra kaip niekada svarbi judriajame ryšyje. Daugumoje straipsnių pateikiami modeliai grindžiami tik istoriniais spartos tyrimų duomenimis, tačiau neįvertina nei aplinkos poveikio, nei kokybės parametrų. Didžioji dalis modelių verifikuojama naudojant simuliaciją, tik maža dalis tyrėjų pasitelkia eksperimentinių matavimų rezultatus. Nebuvo rasta matematinių modelių, kurie prognozuotų duomenų perdavimo spartą už pastatų, remiantis eksperimentiniais signalo lygio ir duomenų spartos matavimais. Spartos prognozavimo klausimas taps dar svarbesnis 5G technologijos atveju dėl naudojamų aukštesnių dažnių ir mažųjų celių.

**Darbo tikslas:** Ištirti žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos kitimą už pastatų LTE-A mikrocelėse ir pasiūlyti duomenų perdavimo spartos prognozavimo matematinį modelį.

Tam, kad būtų pasiektas darbo tikslas, suformuluoti šie darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti duomenų perdavimo spartos prognozavimo modelius LTE-A tinkle;
2. Parengti duomenų spartos tyrimų už pastatų metodiką;
3. Eksperimentiškai įvertinti žemynkryptę duomenų perdavimo spartą už pastatų LTE-A mikrocelėse;
4. Pateikti duomenų perdavimo spartos prognozavimo matematinį modelį;
5. Įvertinti matematinio modelio tikslumą ir paklaidas.

## 2. METODINĖ DALIS: ĮRANGA, METODIKA, TIRIAMASIS OBJEKTAS

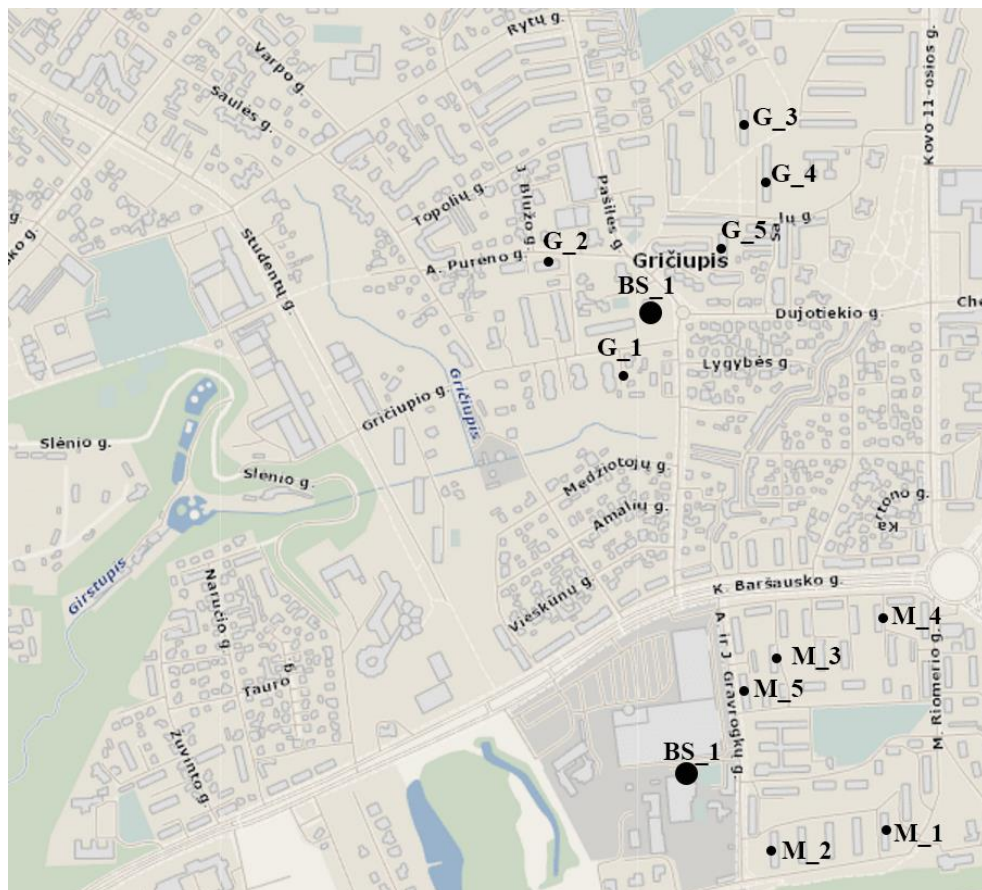
Šioje dalyje apžvelgiama tyrimui naudojama aparatinė ir programinė įranga. Detalizuojamas tiriamasis objektas ir pateikiamas tyrimo vykdymo algoritmas.

### 3.3 Eksperimentų metodika ir tiriamasis objektas

Žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos matavimams pasirinkta tankiai apgyvendinta vietovė Kaune, esanti netoli KTU studentų miestelio. Pasirinktos 2 šalia esančios bazinės stotys. Bazinių stočių parametrai pateikti 2 lentelėje. Iš viso numatyta mikrocelėse išmatuoti LTE duomenų perdavimo spartas ir signalo lygius už 10 pastatų. Eksperimentui pasirinktų pastatų charakteristikos pateiktos 3 lentelėje. Matavimo spindulys neviršija 500 m nuo bazinės stoties. Matavimų žemėlapis su pasirinktomis bazinėmis stotimis ir pastatais pateiktas 13 pav.

2 lentelė. Bazinių stočių parametrai

	BS_1 (Gričiupis)	BS_2 (Molas)
Naudojamas dažnių ruožas $f$ , MHz	1800	1800
Bazinės stoties $EIRP$ , dBm	62,82	64,32
Siųstuvo antenos aukštis $h_b$ , m	43	32
Imtuvo antenos aukštis $h_m$ , m	1,4	1,4



13 Pav. Matavimų žemėlapis

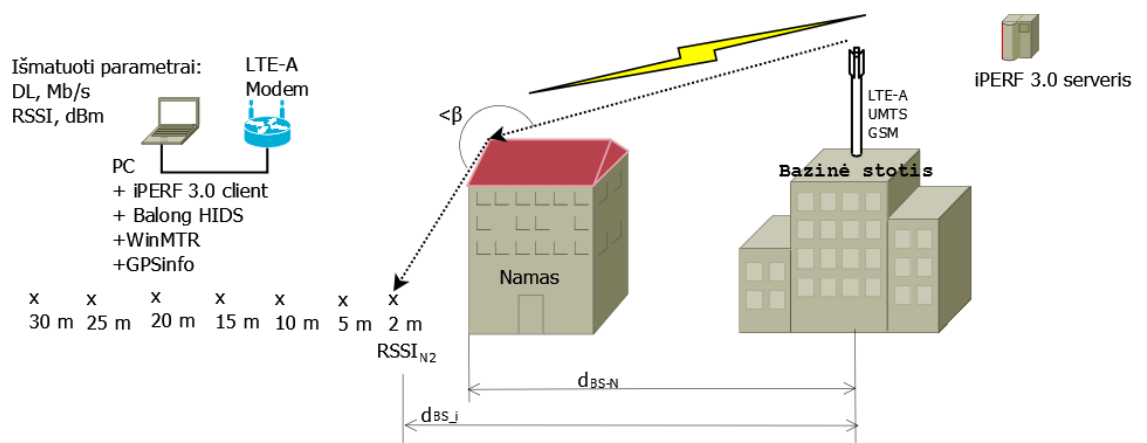


3 lentelė. Pastatų charakteristikos

Pastatas	Pastato aukštis, m	Atstumas iki BS, m
Gričiupis_1	17	143
Gričiupis_2	17	198
Gričiupis_3	17	353
Gričiupis_4	17	283
Gričiupis_5	17	118
Molas_1	17	378
Molas_2	17	163
Molas_3	14	248
Molas_4	14 <td 388	
Molas_5	14	138

Eksperimentai buvo atlikti ryte, debesuotu oru ir be rūko ar kritulių. Tokios oro sąlygos pasirinktos tam, kad būtų sumažinta signalo interferencijos tikimybė dėl kritulių ar didelio saulės aktyvumo. Visų eksperimentų metu buvo NLOS (angl. *Non Line Of Sight*) sąlygos tarp bazinės stoties ir modemo (mobilios stoties).

Eksperimento atlikimo schema pateikta 14 pav. Iš viso pasirinkta 10 namų, kurių aukščiai siekia nuo 14 m iki 17 m. Už kiekvieno namo atliekami signalo lygio ir duomenų perdavimo spartos matavimai. Kadangi atstumai už pastatų yra gana riboti, todėl matavimo atstumas neviršija 30 m už kiekvieno namo. Pirmasis matavimo taškas pasirenkamas 2 m nuo namo, kad būtų sumažinta radijo bangų atspindžių ir išsklaidymo nuo namo sienų tikimybė. Norint sumažinti matavimo paklaidas, signalo lygio matavimai buvo atliekami po 10 kartų kiekviename taške. Duomenų spartos matavimai buvo atliekami po 5 kartus kiekviename taške, siunčiant duomenis 30 sekundžių intervalais.

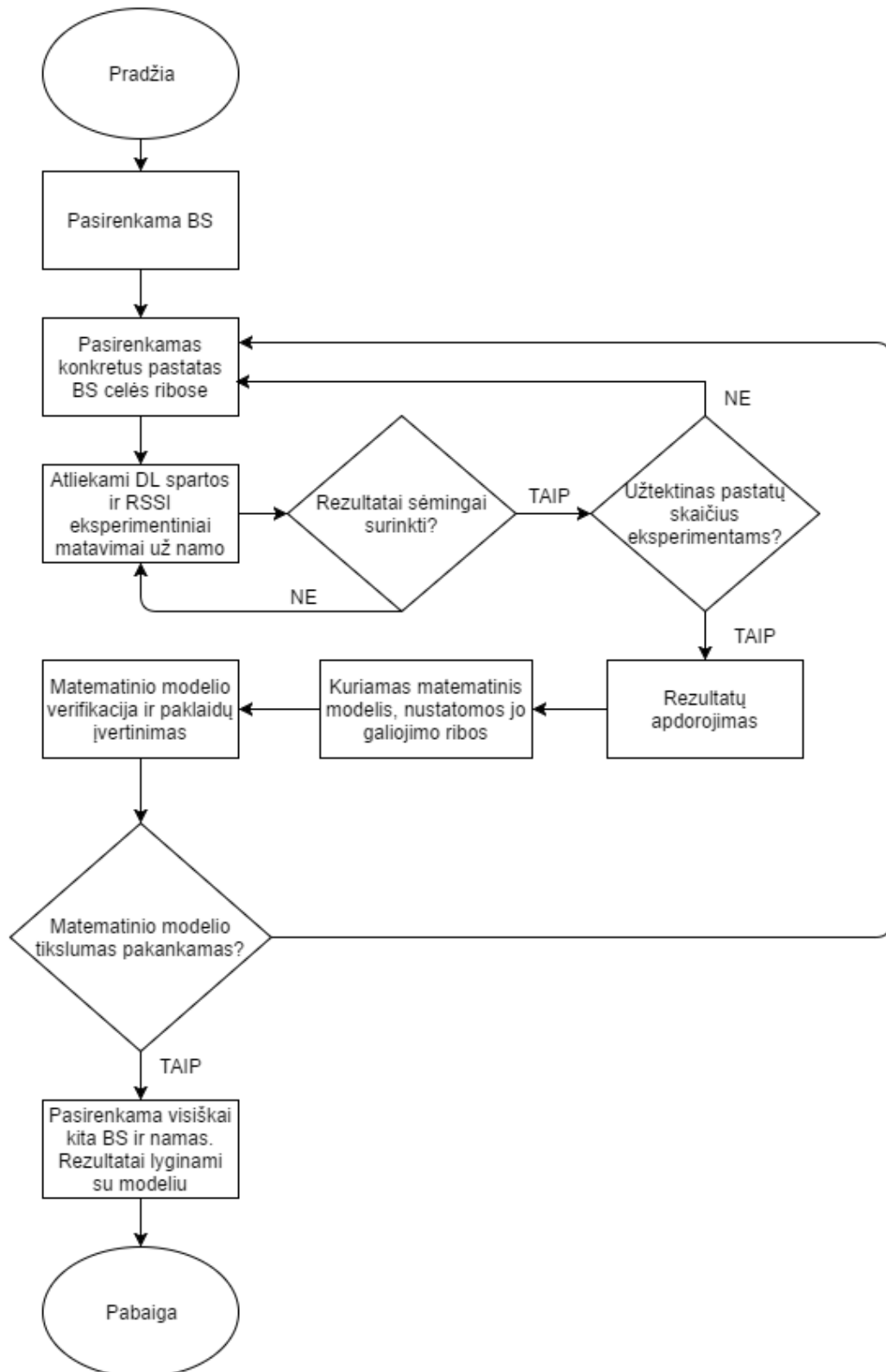


14 pav. Žemynkrypčio duomenų perdavimo tyrimo schema

LTE-A tinkle tiriami šie parametrai:

- Žemynkrypčio duomenų perdavimo sparta;
- RSSI.

Eksperto vykdymo **algoritmas** pateiktas 15 pav.



15 pav. Tyrimo algoritmas

Algoritmo aprašymas:

1. Pasirenkama konkreti bazinė stotis;
2. Pasirenkamas pastatas mieste, esantis mažesniu negu 500 m spinduliu iki BS;
3. Atliekami RSSI ir žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos matavimai LTE-A tinkle už pastato;
4. Patikrinami gauti rezultatai ir įvertinama ar užtenka pasirinktų pastatų eksperimentiniams matavimams;
5. Jei neužtenka pastatų, tada pasirenkamas naujas pastatas ir kartojami 3-4 punktai;
6. Gauti rezultatai apdorojami. Remiantis gautais rezultatais yra braižomi duomenų spartos kitimo grafikai;
7. Remianti gautais eksperimentinių rezultatų dėsningumais, kuriamas duomenų spartos prognozavimo matematinis modelis, nustatomos jo galiojimo ribos;
8. Matematinis modelis lyginamas su eksperimentiniais rezultatais, įvertinamos modelio paklaidos;
9. Pasirenkama visiškai nauja BS ir namas, atliekami eksperimentiniai matavimai ir gauti rezultatai palyginami su matematiniu modeliu.

### 3.4 Naudojama įranga

Eksperimentui atlikti buvo naudojama sąlyginai nebrangi ir visiems laisvai prieinama aparatūrinė įranga:

- **HUAWEI E5186 modemas** – LTE-A ryšio palaikymui;
- **GPS BU-353 modulis** – matuojamos vietos koordinačių nustatymui;
- **Nešiojamas kompiuteris DELL Inspiron N7000** – kompiuteryje įdiegta visa programinė įranga, reikalinga realaus laiko duomenų surinkimui ir apdorojimui.

HUAWEI E5186 modemas (16 pav.) palaiko GSM/UMTS/LTE/LTE-A standartus bei VoLTE. LTE nurodomi dažnių ruožai: LTE 2600 MHz / 2100 MHz / 1800 MHz / 900 MHz / 800 MHz (FDD) + LTE 2600 MHz TDD. Žemynkrypčio perdavimo sparta siekia 300 Mbit/s, aukštykrypčio 50 Mbit/s. Palaikomas MIMO 2x2, yra galimybė prie modemo prijungti 2 išorines antenas. Nurodomi Wi-Fi standartai - 802.11b/g/n/ac.

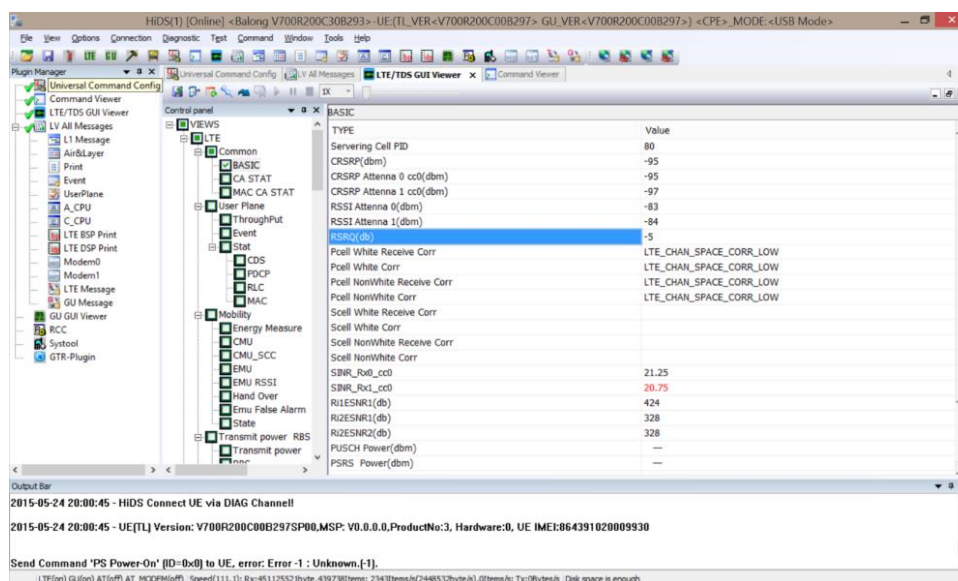


16 pav. HUAWEI E5186 modemas su LTE-A palaikymu

### Programinė įranga:

- **Balong HIDS** – UMTS/LTE/LTE-A tinklo parametrų surinkimui ir analizei skirta programinė įranga;
- **WinMTR** – Nustatyti, ar kelias nuo vartotojo iki serverio kiekvieno matavimo metu kinta, ar yra pastovus;
- **iPerf 3.0** – tinklo kokybinių parametrų įvertinimui (spartai, vėlinimui, paketų praradimams, vėlinimo netolygumams ir kt.) skirta programinė įranga;
- **GPS Information** – Programinė įranga, skirta nustatyti tikslias GPS koordinates, pasinaudojant aparatinio BU-353 GPS moduliu.

Naudojama HiSicilon įmonės Balong HIDS programinė įranga (17 pav.). Šis programų paketas leidžia testuoti UMTS/LTE/LTE-A technologijų judriojo ryšio tinklus bei atlikti jų diagnostiką. Funkcionalumas užtikrinamas naudojant modulinius komponentus, pvz., žurnalo (angl. *log*) komponentas, vartotojo grafinės sąsajos (angl. *GUI*) komponentas, universali komandų konfigūracija, registracijos ir kontrolės komandos.



17 pav. HIDS programinės įrangos GUI

HIDS programa užtikrina šias funkcijas:

- Prisijungia prie vartotojo įrangos (angl. *User Equipment*);
- Pateikia visus žurnalo įrašus ir apdorotus duomenis iš UE;
- Atvaizduoja grafiškai apdorotus rezultatus;
- Gali siųsti diagnostikos užklausas;
- Pateikia diagnostikos informaciją;
- Surenka duomenis iš LTE modulio ir sugeneruoja atitinkamus failus;
- Palaiko automatinius testus visai sistemai;
- Pateikia UE prievado informaciją ir duomenų perdavimo spartą.

HIDS programoje pagrindiniai GUI lange pateikiami parametrai yra šie: RSSI, RSRP, RSRQ, CQI, SNR, BER, momentinė DL/UL sparta.

Kartu su HIDS paketu naudojama ir iPerf 3.0 programinė įranga, skirta tinklo testavimui. Su iPerf 3.0 galima tinkle testuoti UDP, TCP perdavimo spartas, vėlinimo netolygumus, paketų praradimus. Šio paketo didžiulis privalumas yra sąsajos paprastumas. Yra galimybė visą tinklo testavimą lengvai automatizuoti pagal pasirinktus kriterijus.

Balong HIDS programinė įranga turi labai ribotas galimybes eksportuoti duomenų spartos matavimus, todėl spartos matavimui naudojama iPerf 3.0 programa. Paruoštas iPerf serveris su 100 Mb/s pralaidumo linija. Parašytas automatizuotas programos scenarijus (Priedas 1) (angl. *Script*), kurio pagrindu automatiškai įrašomi 10 ekrano vaizdų kas 1 sekundę ir į tekstinį failą yra pateikiami matavimų rezultatai.

### 3.5 Paklaidų įvertinimas

Gautų eksperimentinių rezultatų tikslumui įvertinti buvo skaičiuojamos įvairaus tipo paklaidos: vidutinė santykinė paklaida  $\delta$  (12), vidutinė kvadratinė paklaida  $RMSE$  (13). Modelio tikslumui įvertinti skaičiuojama vidutinė kvadratinė paklaida  $RMSE_M$  (14). Be to, apskaičiuojama kumuliatyvinė pasiskirstymo funkcijos (CDF) priklausomybė nuo duomenų perdavimo spartos, modeliui ir eksperimentiniams rezultatams.

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \times 100\% , \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (13)$$

$$RMSE_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}, \quad (14)$$

čia  $x_i$  - atskira i-ojo matavimo vertė,  $y_i$  - atskira i-ojo modelio rezultato vertė,  $\bar{x}$  - matavimo vidurkis,  $n$  - matavimų skaičius.

Formules (12-13) galime pritaikyti tiek signalo lygio, tiek duomenų spartos matavimų rezultatų tikslumui įvertinti. Pasinaudojus (14) formule galima įvertinti matematinio modelio tikslumą.

Asimetrijos koeficientas, pateiktas (15) formulėje, leidžia įvertinti, koks yra eksperimentinių rezultatų nuokrypis nuo vidurkio.

$$\gamma = \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3. \quad (15)$$

Remiantis 12-14 formulėmis įvertintos eksperimentinių duomenų paklaidos:

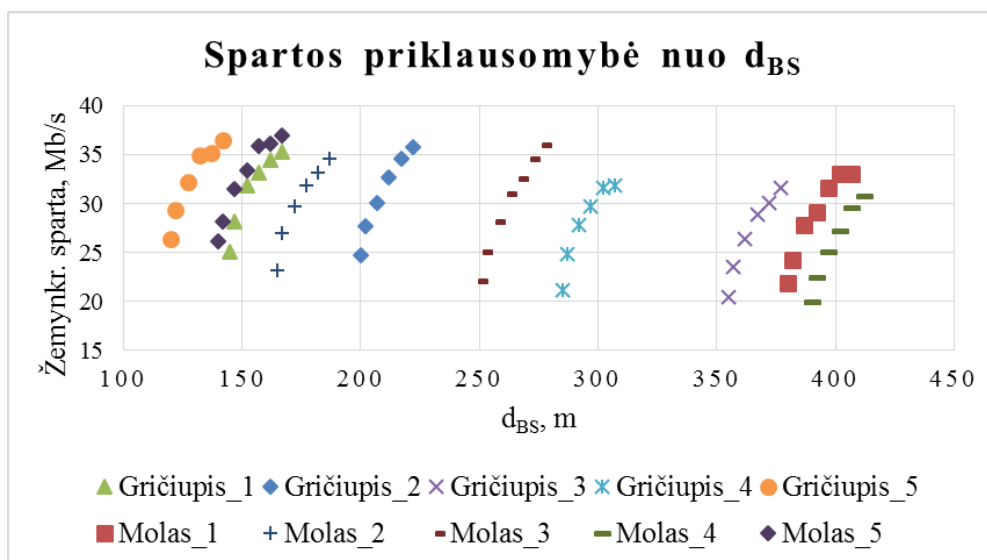
- Vidutinė santykinė paklaida neviršija  $\delta_{RSSI} = 3,55\%$  ir  $\delta_{DL} = 5,47\%$ ;
- Vidutinė kvadratinė paklaida neviršija  $RMSE_{RSSI} = 3,00$  dBm ir  $RMSE_{DL} = 1,53$  Mb/s;

Pasinaudojus 4 formule apskaičiuotas asimetrijos koeficientas, kuris rodo, kad eksperimentinių rezultatų nuokrypis nuo vidurkio yra mažas,  $\gamma < 1,18 \cdot 10^{-2}$  ir artėja link 0.

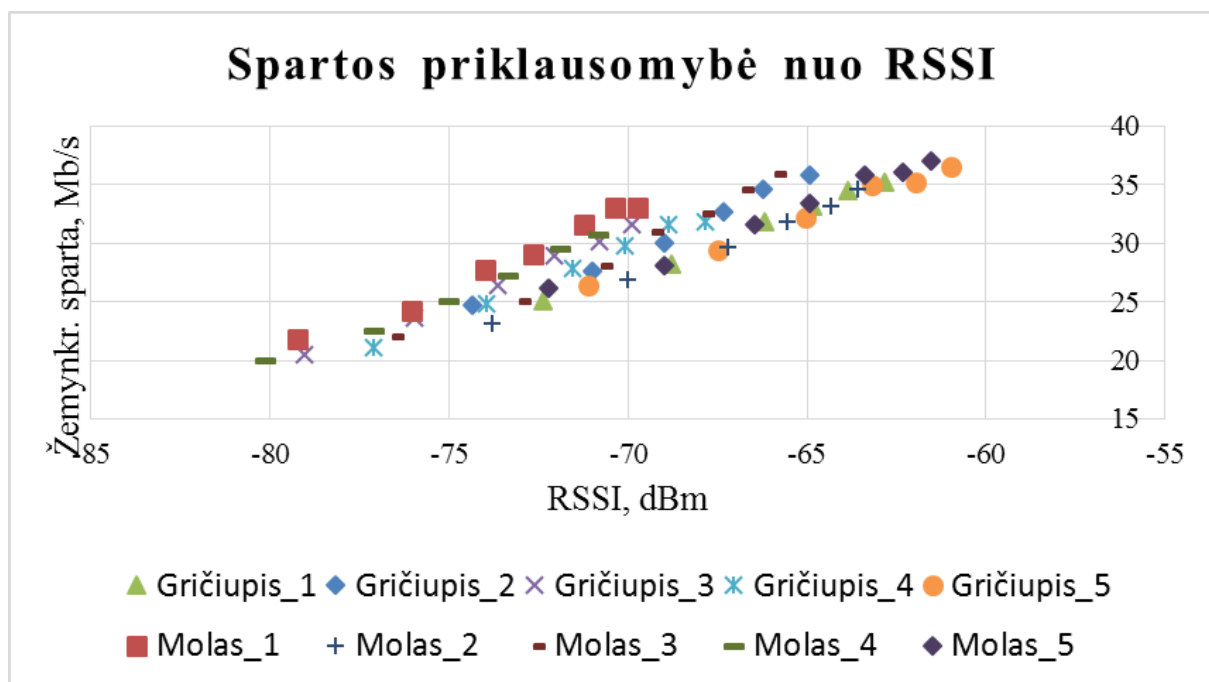
### 3 MATAVIMŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ

#### 3.1 Eksperimentų rezultatai

Eksperimento metu buvo matuojama, kaip kinta duomenų perdavimo sparta už namų, priklausomai nuo atstumo iki bazinės stoties, bazinės stoties ir namo aukščių, priimamo signalo lygio. Dėl difrakcijos efekto radijo bangos turėtų užlinkti už namų. Tai galėtų daryti įtaką duomenų perdavimo spartai už namo. Gauti eksperimento rezultatai pateikti 18-20 pav.



Galimai difrakcijai įvertinti buvo įvestas kampas  $\beta$  (14 pav.). Iš gautų rezultatų (19 pav.) galime teigti, kad didėjant  $\beta$  kartu mažėja ir perdavimo sparta. Aiškų spartos sumažėjimas matomas visiškai šalia namo, kaip  $\beta$  siekia  $\sim 4,5$  radianus (arba  $\sim 260^\circ$ ), tai tik patvirtina, kad rezultatams daro įtaką difrakcijos efektas. Taip pat kampas  $\beta$  įvertina ir namo aukščio įtaką.



20 pav. Duomenų perdavimo spartos priklausomybė nuo *RSSI*

Duomenų perdavimo sparta tiesiogiai proporcinga *RSSI* (20 pav.). Signalu lygiui kintant nuo -80 dBm iki -70 dBm pastebimas pats didžiausias spartos sumažėjimas. Aiškiai matoma, kad signalo lygiui padidėjus 20 dBm duomenų sparta padidėja nuo 1,5 iki 2 kartų.

### 3.2 Eksperimentinių duomenų analizė

Iš gautų duomenų perdavimo spartos kitimų (18-20 pav.) matyti, kad žemynkrypčio duomenų perdavimo sparta (*DL*) tiesiogiai proporcinga priimamo signalo lygiui (*RSSI*) ir atvirkščiai proporcinga atstumui nuo bazinės stoties ( $d_{BS}$ ) ir kampui  $\beta$ . Atsižvelgiant į tai, sąryšis tarp duomenų perdavimo spartos, priimamo signalo stiprumo, atstumo iki bazinės stoties ir kampo beta  $\beta$  gali būti aprašytas (16) lygtimi, panaudojant proporcingumo koeficientą  $k$ :

$$DL = k \frac{RSSI}{d_{BS} \cdot \beta}, \quad (16)$$

čia *DL* - žemynkrypčio perdavimo sparta (b/s), *RSSI* - priimamo signalo lygis (W),  $\beta$  - radijo bangos difrakcijos kampas (14 pav) (rad),  $k$  - proporcingumo koeficientas.

Iš (16) formulės galima išreikšti koeficientą  $k$  (17).



$$k = \frac{DL \cdot d_{BS} \cdot \beta}{RSSI}, \quad (17)$$

Kadangi skaičiuojant viską SI sistemos vienetais gautūsi itin dideli skaičiai, kad būtų patogiau, logaritmuojame kintamuosius, esančius formulėje (16):

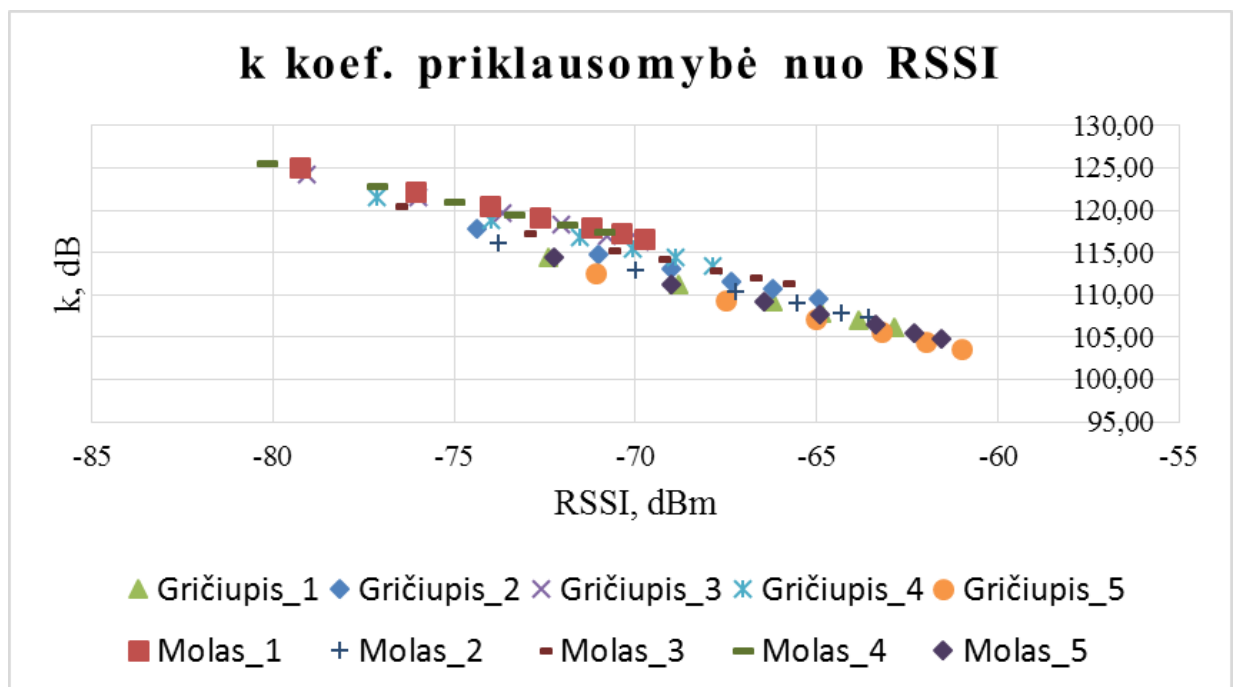
$$10\lg(DL) = k_{[dB]} + RSSI - 10\lg(d_{BS}) - 10\lg(\beta), \quad (18)$$

$$k = 10\lg(DL) - RSSI + 10\lg(d_{BS}) + 10\lg(\beta), \quad (19)$$

Tuomet duomenų perdavimo sparta, išreikšta Mb/s, bus įvertinama taip:

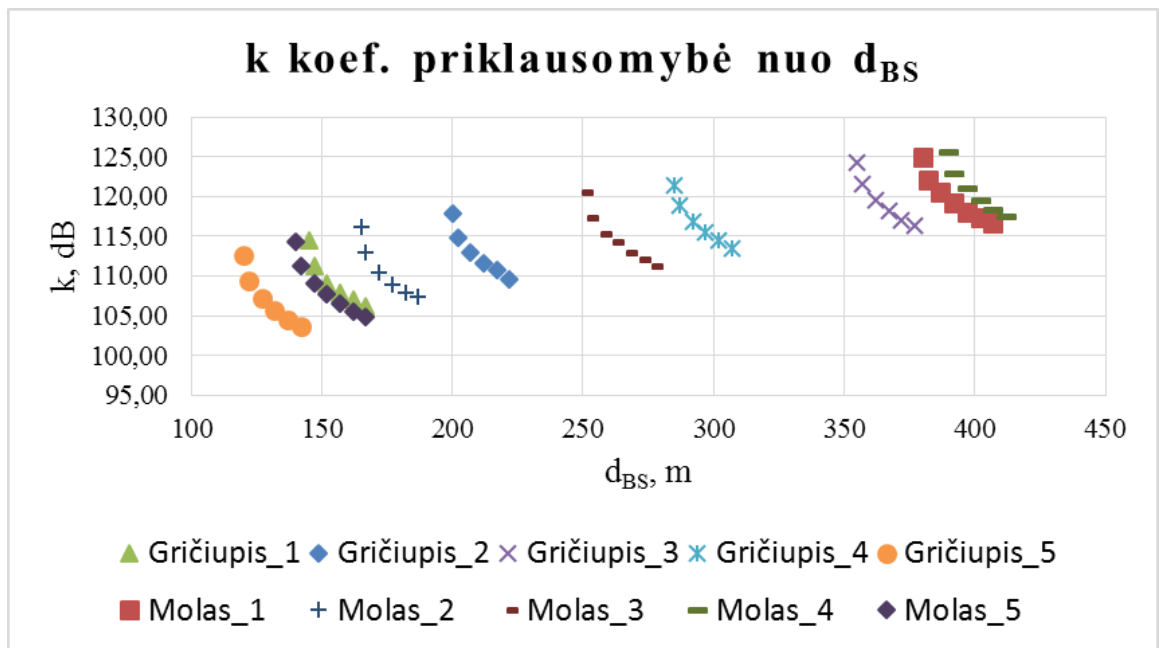
$$DL_{[Mb/s]} = 10^{\frac{k_{[dB]} + RSSI - 10\lg(d_{BS}) - 10\lg(\beta)}{10}}. \quad (20)$$

Pasinaudojant (19) formule, apskaičiuojamas  $k$  koeficientas kiekviename matuotame taške. Koeficiento  $k$  kitimai už kiekvieno namo, priklausomai nuo atstumo iki BS,  $RSSI$  ir kampo  $\beta$  pateikti 21-24 pav.



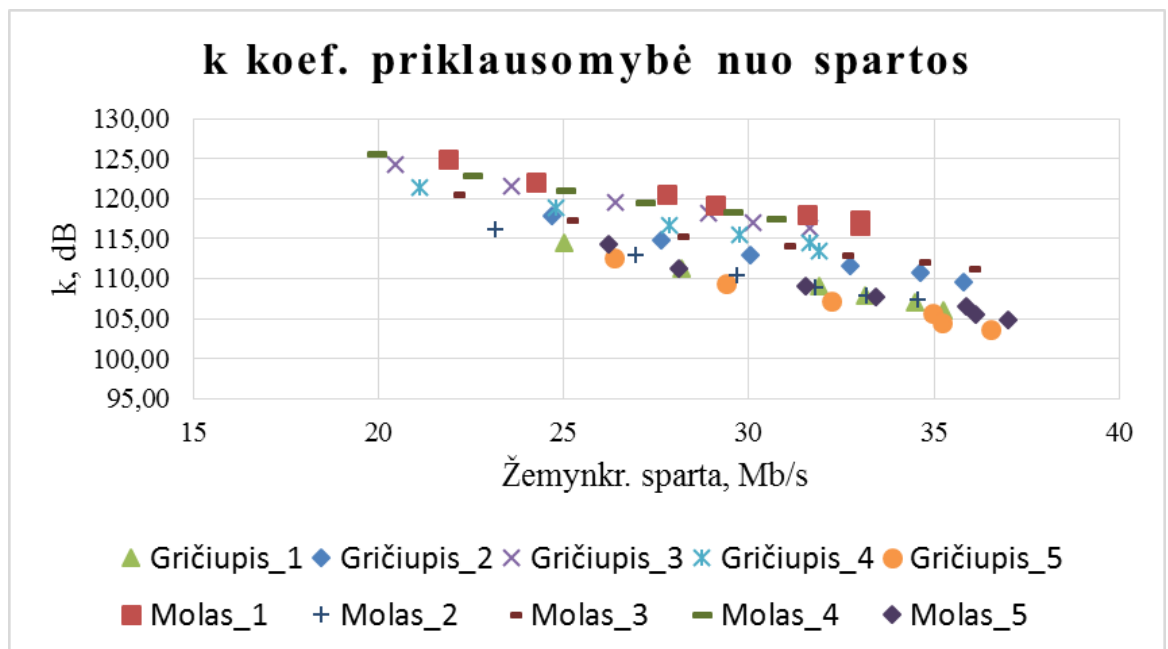
21 pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo  $RSSI$

Iš pateiktos priklausomybės 21 pav. matoma, kad  $k$  koeficientas yra atvirkščiai proporcingas  $RSSI$ . Kuo  $RSSI$  reikšmės didesnės, tuo  $k$  mažesnis. Priklausomybės nėra visiškai tiesinės. Rezultatų sklaida yra sąlyginai nedidelė, tačiau reikia įvertinti, kad  $k$  koeficientas yra pateiktas dB vienetais, tai reiškia, kad  $k$  koeficientui SI sistemoje padidėjus 10 kartų,  $k$  reikšmė decibelų sistemoje padidėtų tik 10 dB.



22 pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo iki  $BS$

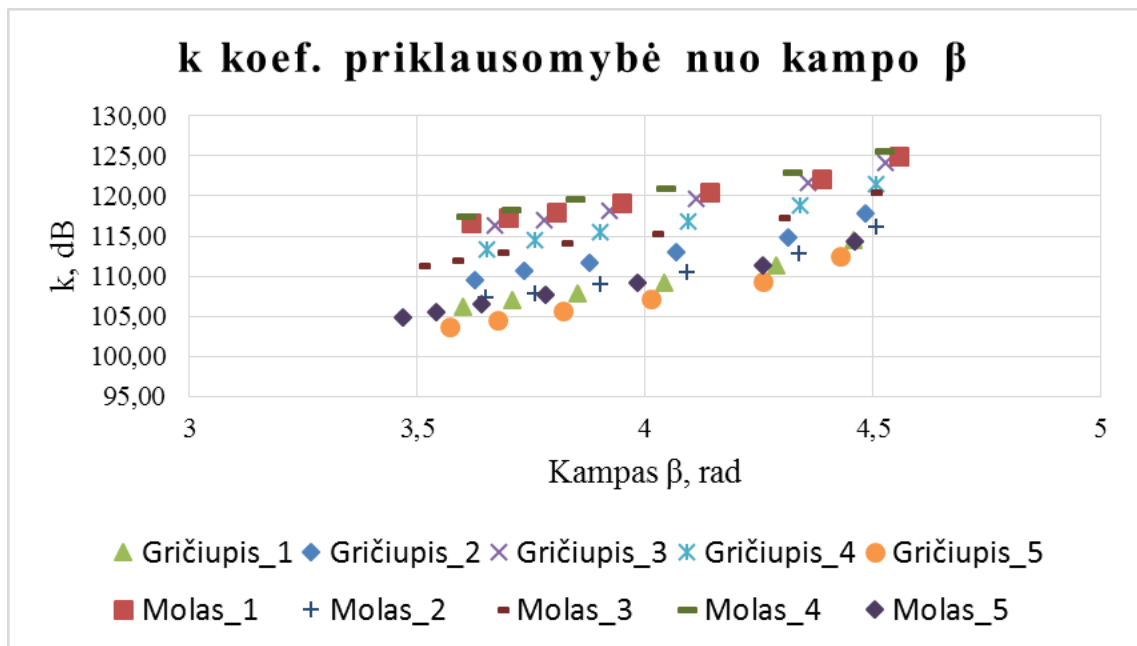
Koeficientas  $k$  už kiekvieno namo mažėja, tačiau įvertinus bendrą tendenciją matyti, kad didėjant atstumui iki  $BS$ ,  $k$  koeficientas didėja (22 pav.). Žiūrint į kitimus pastebėta, kad už kiekvieno namo pirmoje ir antroje matavimo vietose  $k$  reikšmės yra toliau viena nuo kitos, negu lyginant su tolimesnėmis matavimo vietomis. Taip yra todėl, kad stipriausia difrakcijos įtaka signalui ir duomenų spartai pasireiškia visiškai šalia namo.



23 pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo už namo

Iš 23 pav. pateiktų kitimų galime spręsti, kad  $k$  mažėja, jei duomenų spartą didėja. Nors atsižvelgiant į 6 formulę atrodytų, kad  $k$  turėtų didėti, kai sparta didėja, tačiau 8 formulėje esantys

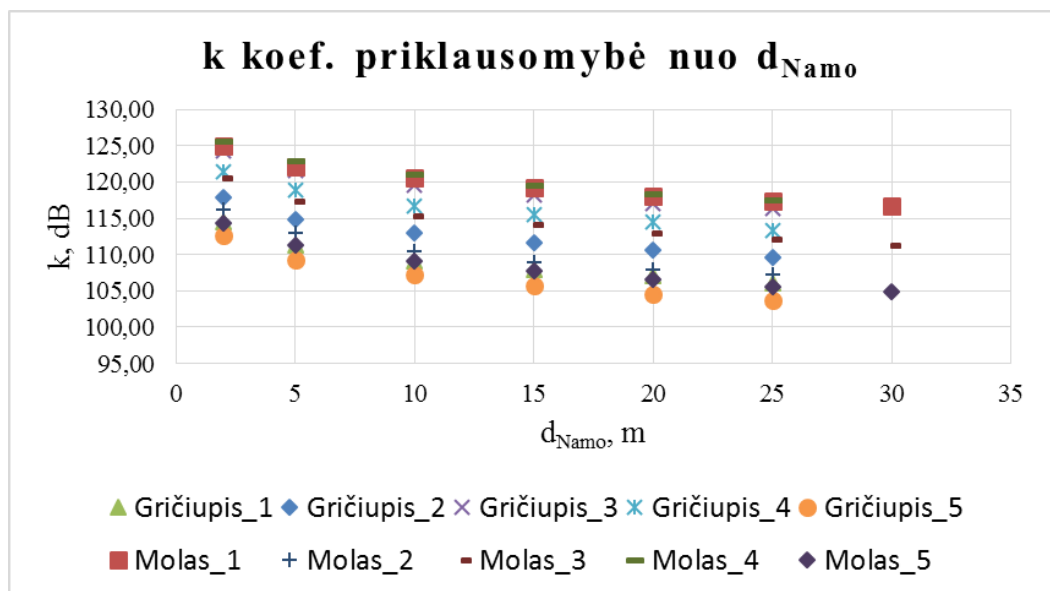
kampo  $\beta$  ir  $RSSI$  kintamieji daro didesnę įtaką  $k$  koeficientui formulėje, dėl to didinant atstumą nuo namo, didėja duomenų sparta ir mažėja  $k$ .



24 pav. pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo kampo  $\beta$

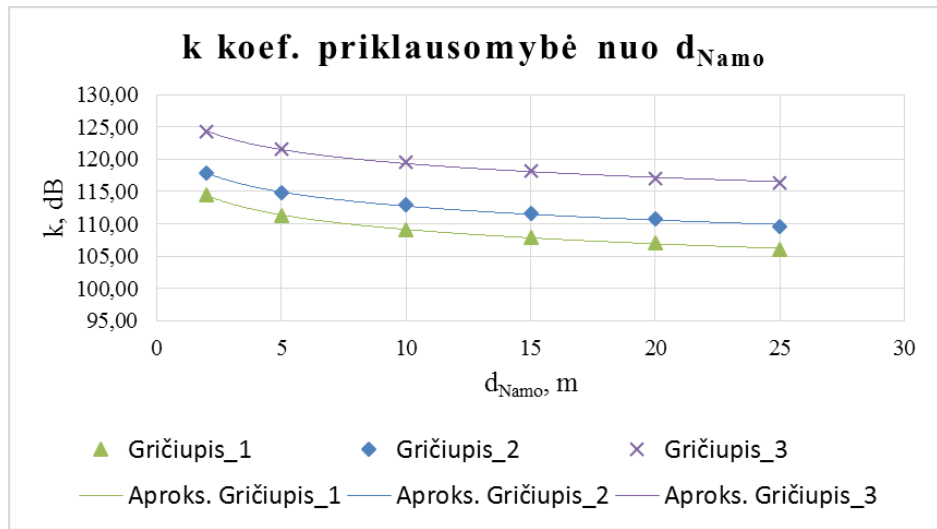
Iš 24 pav. taip pat matyti, kad didėjant kampui  $\beta$ , o kartui ir atstumui už namo, koeficientas  $k$  didėja, tačiau pats didėjimas nėra visiškai tiesinis. Pasikeitus kampui apytiksliai 1 radianu,  $k$  reikšmė keičiasi apytiksliai 17 dB.

Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo už kiekvieno namo pateikta 25-28 pav.

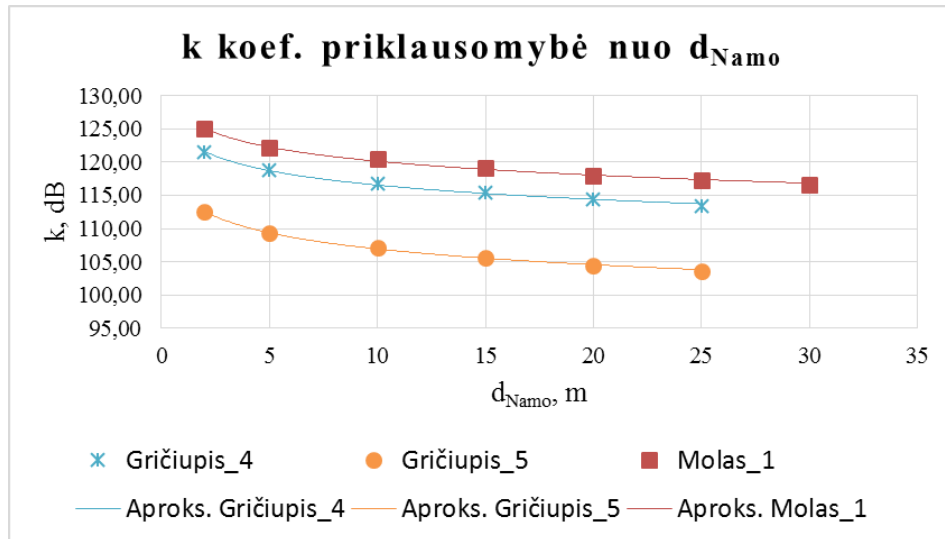


25 Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo už namo

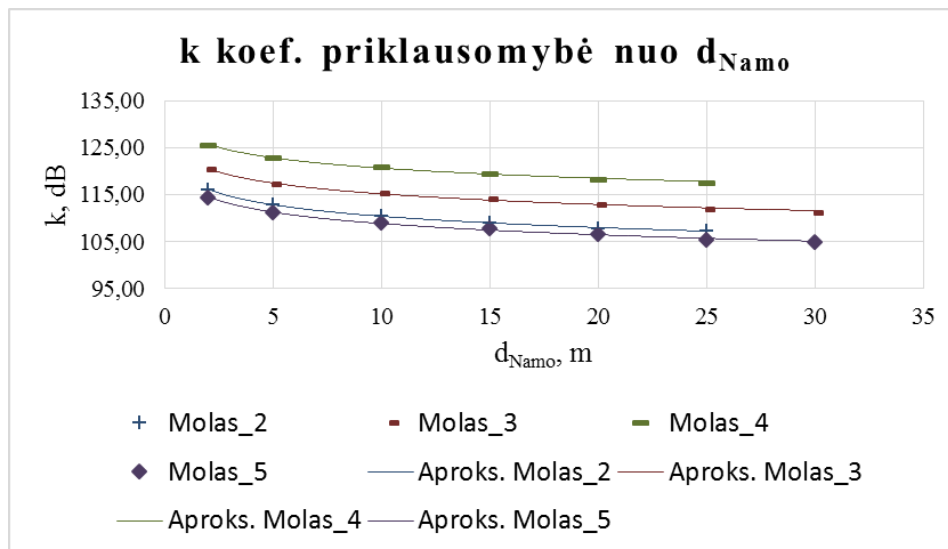
Didėjant atstumui už kiekvieno namo,  $k$  mažėja (25 pav.). Matyti, kad kiekvienam namui mažėjimas turi aiškia tendenciją. Koeficiento  $k$  kitimą galima būtų aproksimuoti  $y = ax^b$  rodikline lygtimi (26-28 pav).



26 pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo už namų ir kitimų aproksimacijos

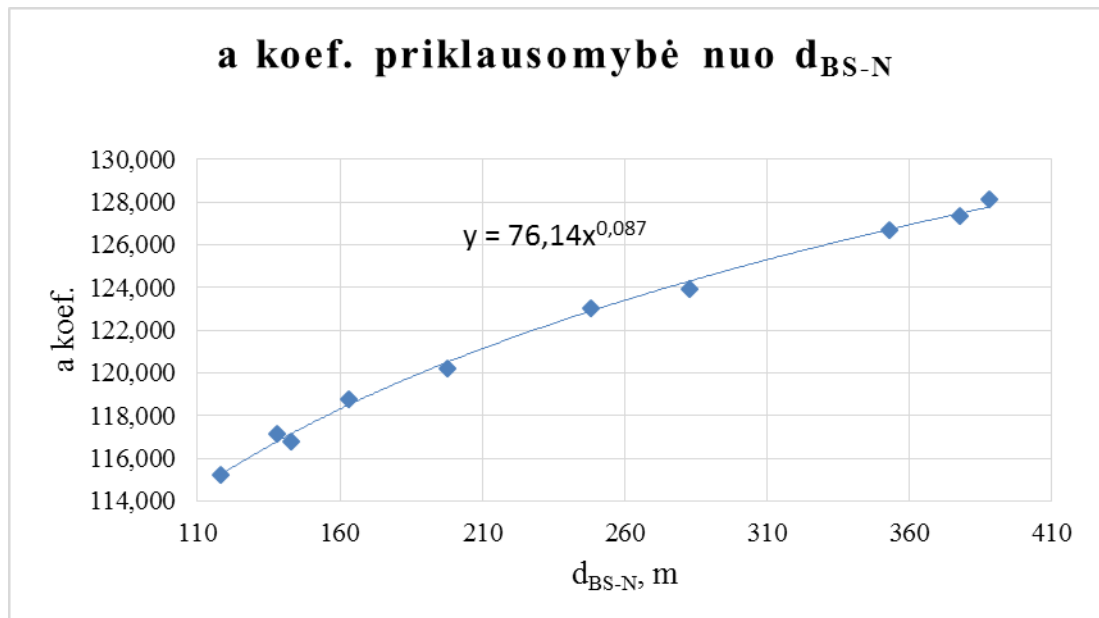


27 pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo už namų ir kitimų aproksimacijos

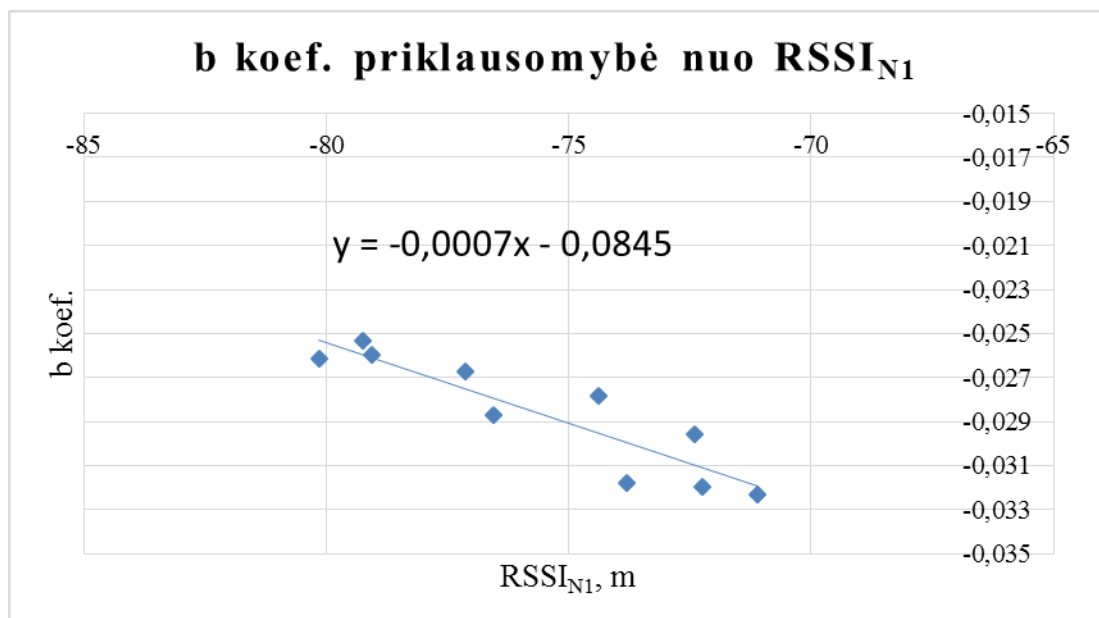


28 pav. Koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo už namų ir kitimų aproksimacijos

Remiantis 26-28 pav. pateiktomis priklausomybėmis galima tik patvirtinti, kad  $k$  koeficiento kitimas už kiekvieno namo gali būti aprašomas rodikline lygtimi. Kiekvienam namui rodiklinė lygties išraiška išlieka ta pati, tačiau  $a$  ir  $b$  koeficientai skiriasi. Norint pateikti bendrą formulę, kuria būtų galima nusakyti koeficiento  $k$  kitimus, priklausomai nuo atstumo, reikia visų pirma rasti nuo ko priklauso  $a$  ir  $b$  koeficientų kitimai kiekvienam namui. Koeficientų  $a$  ir  $b$  priklausomybės pateiktos 29-30 pav.



29 pav. Koeficiento  $a$  priklausomybė nuo atstumo nuo BS iki kiekvieno namo tolimesnės sienos



30 pav. Koeficiento  $b$  priklausomybė nuo už kiekvieno namo pirmame matavimo taške išmatuotu signalo lygiu

Atlikus analizę paaiškėjo, kad  $a$  koeficientą kiekvienam namui galima aprašyti taip pat rodikline lygtimi. Koeficientas  $a$  priklauso nuo atstumo nuo bazinės stoties iki kiekvieno matuojamo namo tolimesnės sienos  $d_{BS-N}$  (14 pav.).

Koeficientas  $b$  nagrinėjamu atveju priklauso nuo priimamo signalo lygio pirmame matavimo taške už kiekvieno namo ( $RSSI_{N1}$ ). Priklausomybė yra tiesinė su nedideliu išsibarstymu.

Koeficientų  $a$  ir  $b$  matematinės išraiškos pateiktos (21-22) formulėse.

$$a = 76,14 \cdot d_{BS-N}^{0,087}, \quad (21)$$

$$b = -0,0007 \cdot RSSI_{N1} - 0,0845, \quad (22)$$

čia  $d_{BS-N}$  yra atstumo nuo bazinės stoties iki kiekvieno matuojamo namo tolimesnės sienos (m),  $RSSI_{N1}$  yra priimamo signalo lygis pirmame matavimo taške už kiekvieno namo (dBm).

Remiantis (20) formule, galutinis žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos prognozavimo matematinis modelis gali būti išreikštas (23) formule:

$$DL = 10 \frac{76,14 \cdot d_{BS-N} \cdot d_{Namo}^{(-0,0007 \cdot RSSI_{N1} - 0,0845)} + RSSI - 101g(d_{BS}) - 101g(\beta)}{10}, \quad (23)$$

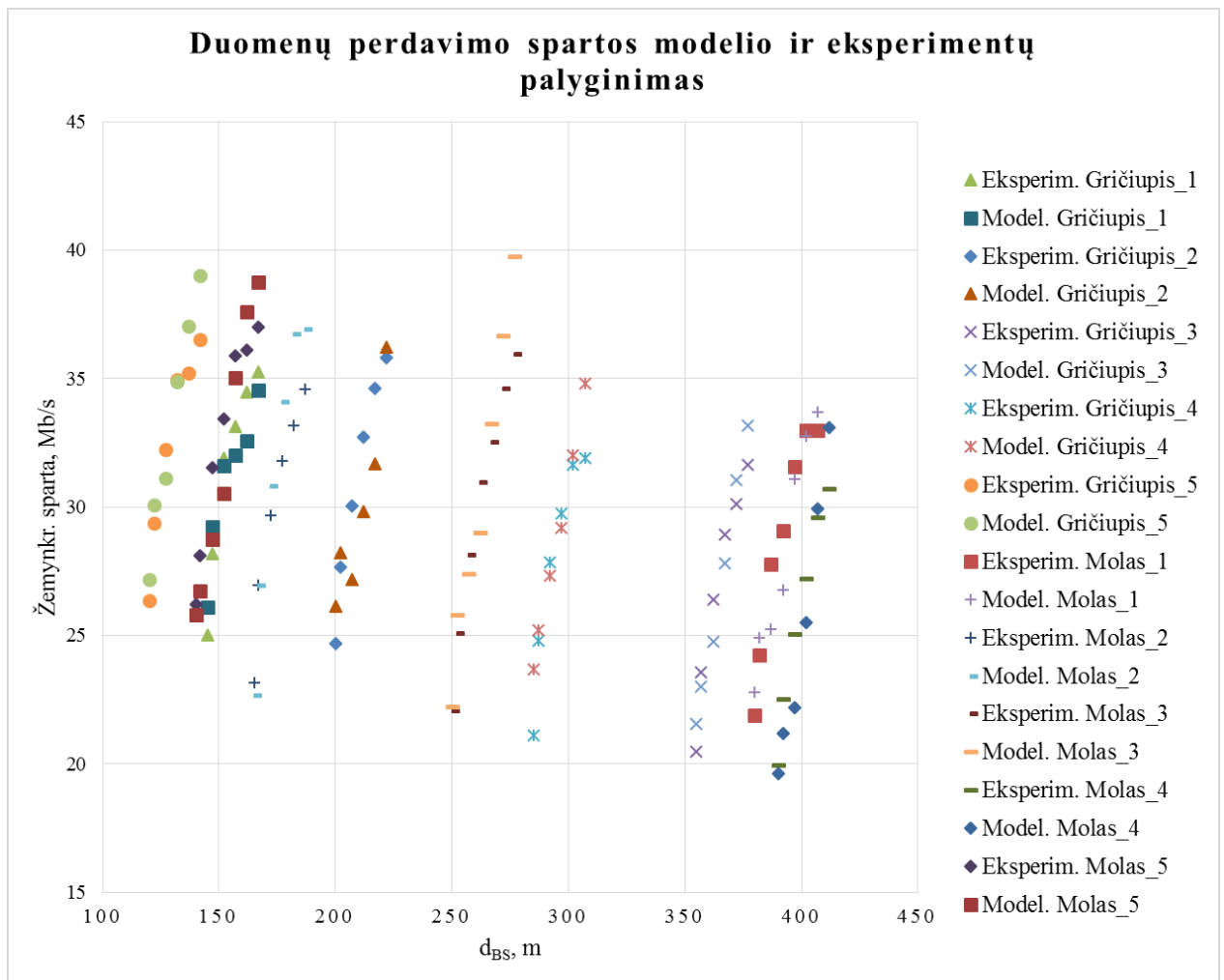
čia  $DL$  - žemynkrypčio perdavimo sparta (Mb/s),  $RSSI$  - priimamo signalo lygis (dBm),  $RSSI_{N1}$  - signalo lygis pirmame matavimo taške už namo (dBm),  $\beta$  - radijo bangos difrakcijos kampas (rad),  $d_{BS}$  yra atstumas nuo bazinės stoties iki matuojamo taško (m),  $d_{BS-N}$  atstumas nuo BS iki tolimesnės pastato sienos (m),  $d_{Namo}$  yra taško, kuriame atliekami matavimai atstumas iki namo sienos (m).

Šis modelis galioja, kai yra tenkinamos šios sąlygos:

- NLOS sąlygos tarp siųstuvo ir imtuvo;
- LTE-A mikrocelės;
- Geros oro sąlygos – nėra kritulių, sniego, rūko ar per didelio saulės aktyvumo;
- Eksperimentams parinkti pastatai yra 14 - 17 m aukščio;
- Namų sienos nėra ištiesiai padengtos stiklu ar metalo lakštais;
- LTE dažnių ruožas 1850 - 2000 MHz.

### 3.3 Matematinio modelio tikslumo įvertinimas

Sukūrus duomenų spartos prognozavimo modelį yra svarbu patikrinti jo tikslumą. Matematinio modelio rezultatai bus lyginami su eksperimentiniais duomenimis. Kadangi eksperimentams buvo pasirinkta geografinė vieta, kurioje daugiausiai vyrauja 14-17 m aukščio namai, todėl modelis ir yra pritaikytas 4-5 aukštų namams. Tokio tipo geografinių vietovių yra itin daug Lietuvos didmiesčiuose, todėl toks modelis yra būtinas. Modelio apribojimas apibrėžto aukščio namams padidina jo tikslumą. Galima daryti prielaidą, kad dėl kampo  $\beta$  modelis galioja ir kitiems pastatų aukščiams, tačiau reiktų papildomų tyrimų tai patvirtinti.

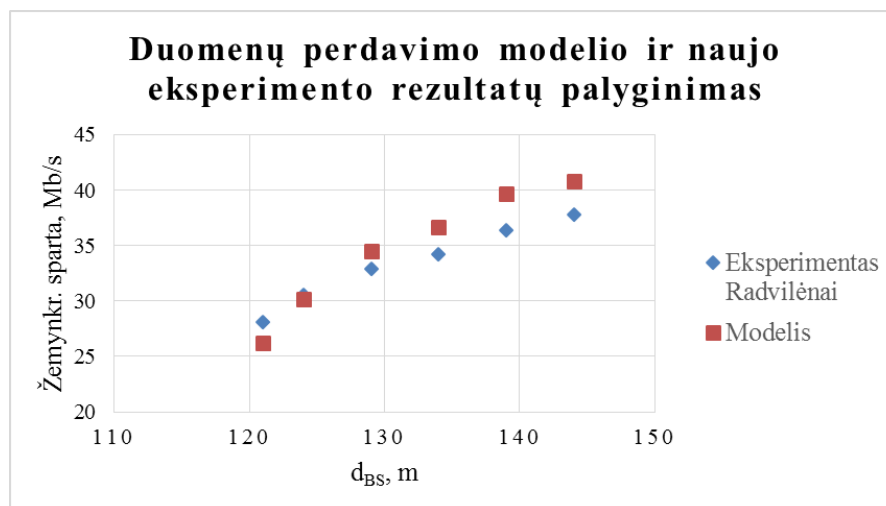


31 pav. Duomenų spartos prognozavimo matematinio modelio rezultatų palyginimas su eksperimentais

Pasitelkus 31 pav. pateiktus kitimus, labai aiškiai matoma, kad modelio rezultatai yra itin artimi eksperimentiniams rezultatams. Už daugelio namų šiam modeliui būdinga beveik identiška sparta visiškai šalia namo ir šiek tiek didesnė sparta paskutiniuose matavimo taškuose.

Modelis gana tiksliai parodo duomenų spartos kitimo tendenciją. Nors kai kurie namai buvo pasirinkti identiško aukščio ir esantys panašiu atstumu iki BS, tačiau rezultatai kiek skyrėsi. Tam matomai turėjo įtakos aplinkos faktoriai (oro sąlygos, medžiai, įvairios konstrukcijos šalia namo, stovintys automobiliai), bazinės stoties ir tinklo apkrautumas.

Modelio tikslumui verifikuoti atliktas papildomas matavimas už 5 aukštų (17 m) pastato, netoli KTU chemijos fakulteto. Bazinės stoties aukštis 25 m,  $EIRP = 63,32$  dBm. Eksperimento rezultatų ir modelio palyginimas pateiktas 32 pav.

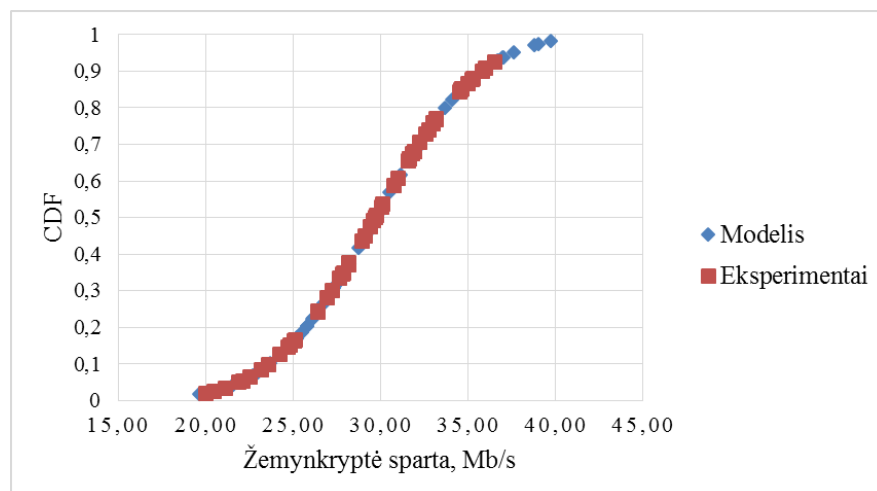


32 pav. Matematinio modelio tikslumo įvertinimas, kai atlikti eksperimentiniai matavimai už naujo namo su kita BS

Remiantis 32 pav. gautais rezultatais galima teigti, kad nors eksperimentui buvo pasirinkta žemesnė bazinė stotis ir visiškai kitas namas, tačiau matematinio modelio rezultatai yra gana artimi eksperimentiniams. Modelio vidutinė kvadratinė paklaida neviršija  $RMSE_M = 3,42$  Mb/s.

### 3.4 Paklaidų įvertinimas

Modelio tikslumui įvertinti naudojama komuliatyvinė pasiskirstymo funkcija CDF. CDF parodo, kokia tikimybė, kad atsitiktinai pasirinktas duomenų perdavimo spartos dydis iš nustatyti diapazono bus lygus arba mažesnis už pasirinktą spartą. Pvz., esant 30 Mb/s CDF rodo tikimybę 0,5. Tai reiškia, kad jei iš duomenų spartos intervalo bus paimtas atsitiktinis dydis, tikimybė, kad jis bus lygus 30 Mb/s ar mažesnis, yra 0,5 arba 50%. Komuliatyvinės pasiskirstymo funkcijos priklausomybė nuo duomenų perdavimo spartos esant eksperimentiniams rezultatams ir rezultatams, gautais iš modelio, pateikta 33 pav.



33 pav. Komuliatyvinė pasiskirstymo funkcijos priklausomybė nuo spartos, esant eksperimentų ir modelio rezultatams



Iš 33 pav. galima teigti, kad tiek modelio, tiek eksperimentiniai rezultatai yra labai artimi, tačiau matomi nedideli skirtumai, esant aukštai duomenų perdavimo spartai. Taip yra todėl, kad modelis rodo kiek didesnes matavimo spartas 20-30 m už namo.

Taip pat remiantis 13 formule matematinio modelio vidutinė kvadratinė paklaida neviršija  $RSME_M = 1,67$  Mb/s. Pagal šią vertę galima daryti išvadą, kad modelio tikslumas yra aukštas.

## IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę galima teigti, kad darbų, skirtų eksperimentiniam LTE-A žemynkrypčiam duomenų kitimo įvertinimui mikrocelėse už pastatų, praktiškai nėra. Dauguma modelių grindžiami tik matematine simuliacija, todėl verifikacija realiomis sąlygomis yra neapibrėžta.
2. Darbe nustatyti duomenų perdavimo spartos ( $DL$ ) proporcingumo ryšiai su priimamu signalo lygiu ( $RSSI$ ), atstumu iki bazinės stoties ( $d_{BS}$ ) ir kampo  $\beta$ . Proporcingumui įvertinti šiame darbe siūlomas koeficientas  $k$ .
3. Nustatyti duomenų spartos kitimo dėsningumai, kuriems įtaką matomai daro difrakcijos reiškiniai: didėjant atstumui iki bazinės stoties ( $d_{BS}$ ), didėja duomenų perdavimo sparta ( $DL$ ) ir priimamo signalo lygis ( $RSSI$ ).
4. Pasiūlytas žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos prognozavimo modelis, aprašomas (23) lygtimi, su apibrėžtomis galiojimo ribomis. Rezultatai rodo, kad modelis atitinka eksperimentinius duomenis su vidutine kvadratine paklaida  $RMSE_M = 1,67$  Mb/s.
5. Šis modelis gali būti naudojamas prognozuojant žemynkrypčio duomenų perdavimo spartos kitimą mikrocelėse už pastatų. Modelis skirtas LTE-A, bet gali būti pritaikomas ir būsimai 5G technologijai. Tikslinga atlikti papildomus eksperimentus, verifikuojant modelio pritaikomumą kitų aukščių pastatams.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020. From Cisco [interaktyvus]. [žiūrėta 2015-07-18]. Prieiga per internetą:  
<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
2. SRAVANTHI K, SHUBHRIKA S, DEESHA B, ADWAIT P, MAYUR G. Overview Of LTE-A Technology. From IJSTR [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2015-08-03]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ijstr.org/final-print/nov2013/Overview-Of-Lte-a-Technology.pdf>.
3. BARTENYI B. 3GPP system standards heading into the 5G era. From 3GPP [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2015-08-03]. Prieiga per internetą:  
[http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1614-sa\\_5g](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1614-sa_5g).
4. NEIRA E. The latest update on 5g from iee communications society. From ComSoc [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2015-09-01]. Prieiga per internetą:  
<http://www.comsoc.org/print/blog/latest-update-5g-ieee-communications-society>.
5. Interneto prieigos paslaugų kokybės rodiklių įvertinimo metodikos. Iš RRT. 2009 [žiūrėta 2015-09-03]. Prieiga per internetą:  
<http://www.rrt.lt/download/16109/internetometodika2009-03-19d-1405printpasirasytas.pdf>.
6. WINARNO S, JAZI I, KHABIB M, AHMAD A. The Impact of QoS Changes towards Network Performance. From IJCNCs [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2015-10-10]. Prieiga per internetą:  
[http://www.ijcncs.org/published/volume3/issue2/p5\\_3-2.pdf](http://www.ijcncs.org/published/volume3/issue2/p5_3-2.pdf).
7. CHADCHAN S.M, AKKI C.B. 3GPP LTE/SAE: An Overview. From IJCEE [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2015-11-11]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ijcee.org/papers/232-E271.pdf>.
8. 3GPP TS 203 version 13.7.0 Release 13 technical specification. From ETSI [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2015-11-21]. Prieiga per internetą:  
[http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/123200\\_123299/123203/13.07.00\\_60/ts\\_123203v13070\\_0p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123203/13.07.00_60/ts_123203v13070_0p.pdf)
9. FARHANA A, RAMPRASAD S, ROSHANAK H, KUMBESAN S, SOLAIMAN A. SINR, RSRP, RSSI and RSRQ measurements in Long Term Evolution networks. From Aircce [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2015-12-31]. Prieiga per internetą:  
<http://airccse.org/journal/jwmn/7415jwmn09.pdf>.

10. LIU Y, LEE Y. B. J. An Empirical Study of Throughput Prediction in Mobile Data Networks. From IEEE [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-01-01]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7417858&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F7414714%2F7416057%2F07417858.pdf%3Farnumber%3D7417858>.
11. MARIYAM M. On The Accuracy of TCP Throughput Prediction for Opportunistic Wireless Networks. From IEEE [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta 2016-01-02]. Prieiga per internetą: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5168952&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5168952](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5168952&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5168952).
12. MARIYAM M. A Machine Learning Approach to TCP Throughput Prediction. From IEEE [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2016-01-27]. Prieiga per internetą: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5378489&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5378489](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5378489&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5378489).
13. BUI N, MICHELINAKIS F, MICHELINAKIS F, WIDMER J. A Model for Throughput Prediction for Mobile Users. From IEEE [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2016-02-28]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6843210&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6843047%2F6843048%2F06843210.pdf%3Farnumber%3D6843210>.
14. JING W, JIE F. An algorithm of DL cell throughput based on MCS level in LTE network. From IEEE [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-03-17]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7338908&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F7324296%2F7338753%2F07338908.pdf%3Farnumber%3D7338908>.
15. DONG X, FAN W, GU J. Predicting LTE Throughput Using Traffic Time Series. From ZTE [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-03-21]. Prieiga per internetą: <http://wwwen.zte.com.cn/endata/magazine/ztecommunications/2015/4/articles/201512/P020151222314374147525.pdf>.
16. MORAVAPALLE U.P, SANADHYA S, PARATE A, KIM K.H. Pulsar: Improving Throughput Estimation in Enterprise LTE Small Cells. From Gatech [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-03-27]. Prieiga per internetą: [http://www2.ece.gatech.edu/research/GNAN/archive/Uma\\_Pulsar.pdf](http://www2.ece.gatech.edu/research/GNAN/archive/Uma_Pulsar.pdf).

17. WU C.P, BAKER K. R. Comparison of LTE Performance Indicators and Throughput in Indoor and Outdoor Scenarios at 700 MHz. From IEEE [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2016-04-10]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6399246&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6391320%2F6398863%2F06399246.pdf%3Farnumber%3D6399246>.
18. LANDRE J. B, RAWAS Z. E, VISOZ R. LTE performance assessment Prediction versus field measurements. From IEEE [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2016-04-09]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6666636&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6666636](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6666636&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6666636).
19. HENDAOU S, ZANGAR N, TABBANE S. Highway and rate prediction downlink scheduler (HRPDS) for LTE-A real time applications. From IEEE [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2016-04-20]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7444927&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F7435634%2F7440162%2F07444927.pdf%3Farnumber%3D7444927>.
20. DU J, S, ZHAO J. RRM strategy based on throughput and fairness in LTE-A relay system. From IEEE [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6779121&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F6767438%2F6778899%2F06779121.pdf%3Farnumber%3D6779121>.
21. CHEN Y.F, DING W. S, WANG L. C. Hybrid Protected Subframes Resource Allocation and Throughput Estimation in LTE-A HetNet. From IEEE [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2016-05-07]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7059723&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D7059723](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7059723&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D7059723).
22. XU. X, NI M, MATHAR R. Improving QoS by predictive channel quality feedback for LTE. From IEEE [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2016-05-09]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6671880&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6671880](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6671880&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6671880).
23. MIHOVSKA A, PRASAD R, SEMOV P, POULKOV V. Energy efficiency vs. throughput trade-off in an LTE-A scenario. From IEEE [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2016-05-09]. Prieiga per internetą:

[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6934496&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6934496](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6934496&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6934496).

24. BERRAKI D, AMEEN A, ARMOUR S, DOUFEXI A, NIX A, BEACH M. Channel Parameters and Throughput Predictions for mmWave and LTE-A Networks in Urban Environments. From IEEE [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per internetą: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7145737&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D7145737](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7145737&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D7145737).

# PRIEDAI

## Priedas 1. Programos scenarijus matavimų automatizavimui

```
@echo on
if not "%minimized%"==" goto :minimized
set minimized=true
start /min cmd /C "%~dpnx0"
goto :EOF
:minimized

REM *Set time stamps on file
FOR /f %a IN ('WMIC OS GET LocalDateTime ^| FIND ".") DO SET DTS=%a
SET DateTime=%DTS:~0,4%-DTS:~4,2%-DTS:~6,2%_DTS:~8,2%-DTS:~10,2%-DTS:~12,2%

C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_1.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_2.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_3.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_4.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_5.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_6.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_7.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_8.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_9.png
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\nirscmd\nircmd.exe cmdwait 1000 savescreenshot screen_%DateTime%_10.png

REM *Read server ip from file
SET /P SERVER_1= < C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\SERVERS\SERVER_1.txt
taskkill /pid %SERVER_1% /f

REM *Execute iperf and write to file
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\iperf-3.1.2-win64\iperf3.exe -c %SERVER_1% -R -t30 > TCP_DL_%SERVER_1%_%DateTime%_1.txt
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\iperf-3.1.2-win64\iperf3.exe -c %SERVER_1% -R -t30 > TCP_DL_%SERVER_1%_%DateTime%_2.txt
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\iperf-3.1.2-win64\iperf3.exe -c %SERVER_1% -R -t30 > TCP_DL_%SERVER_1%_%DateTime%_3.txt
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\iperf-3.1.2-win64\iperf3.exe -c %SERVER_1% -R -t30 > TCP_DL_%SERVER_1%_%DateTime%_4.txt
C:\Users\KTU\Desktop\Eksperimentas\iperf-3.1.2-win64\iperf3.exe -c %SERVER_1% -R -t30 > TCP_DL_%SERVER_1%_%DateTime%_5.txt
```

**Konferencijos:**

1. 19-oji tarptautinė ELECTRONICS 2015 konferencija;
2. 12-oji studentų mokslinė konferencija E2TA.

**Publikacijos:**

1. Japertas, Saulius; Pilipavičius, Karolis; Janarthanan, Dilip. Signal propagation model for microcells at 900 MHz frequency range // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and electrical engineering. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1215. 2015, vol. 21, iss. 4, p. 65-68. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Inspec; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source];
2. K. Pilipavičius, D. Janarthanan, P. Dapkus. Diffraction Effect on 2.4 GHz Frequency//E2TA-2015. Kaunas:KTU. ISSN 2335–7878. 2015. p. 9-11.

**Pateikta spaudai:**

1. Saulius JAPERTAS, Karolis PILIPAVICIUS, Paulius DAPKUS. Signal propagation models for UMTS and LTE technologies in urban environment// Turkish Journal of ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES.