



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

**Laurynas Germanavičius**

**4G+ TECHNOLOGIJOS ŠEŠĖLIAVIMO POVEIKIO TYRIMAS**  
**UŽ PASTATŲ**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Saulius Japertas

**KAUNAS, 2017**

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

**4G+ TECHNOLOGIJOS ŠEŠĖLIAVIMO POVEIKIO TYRIMAS**  
**UŽ PASTATŲ**

Baigiamasis magistro projektas  
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

**Vadovas**

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

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Vitas Grimaila  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Laurynas Germanavičius  
(data)

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Laurynas Germanavičius

(Studento vardas,pavardė)

Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „4G+ technologijos šešėliavimo poveikio tyrimas už pastatų“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 26 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Lauryno Germanavičiaus** baigiamasis projektas tema „4G+ technologijos šešėliavimo poveikio tyrimas už pastatų“ 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)

Germanavičius, Laurynas. 4G+ technologijos šešėliavimo poveikio tyrimas už pastatų. Telekomunikacijų inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Telekomunikacijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: 4G+, šešėliavimo efektas, 5G, signalo nuostoliai, prognozavimo modelis.

Kaunas, 2017. 38 psl.

## **SANTRAUKA**

Darbe ištirta šešėliavimo efekto įtaka judriojo ryšio 4G+ technologijos signalams mikrocelėse už pastatų gyvenamajame mikrorajone. Eksperimentiškai nustatyta šešėliavimo efekto kitimo dėsningumai. Šešėliavimo efektas buvo analizuojamas panaudojant log-normalinį šešėliavimo modelį bei tikimybės tankio funkcijas. Nustatyta, kad negalima naudoti log-normalinio šešėliavimo modelio analizuojant šešėliavimo efektą už atskirų pastatų. Panaudojant stochastines diferencialines lygtis buvo pasiūlytas modelis vertinti signalo nuostolių kitimą už pastatų 4G+ judriojo ryšio technologijai. Parodyti šio modelio naudojimo apribojimai. Šis modelio gali būti naudingas vystant šešėliavimo efekto prognozavimo metodus 5G technologijos mikrocelėse.

Germanavičius, Laurynas. Investigation of Shadowing Effect Behind the Building for 4G Technology: Master's thesis in Telecommunications engineering master degree / supervisor assoc. prof. Saulius Japertas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: 4G+, shadowing effect, 5G, signal loss, prediction model.

Kaunas, 2017. 38 psl.

## **SUMMARY**

The influence of shadowing effect for the signal losses of 4G+ cellular technology in microcells behind the buildings in the residential district was investigated. The patterns of shadowing effect were observed from experiment results in this work. The analysis of shadowing effect was carried out by using log-normal shadowing model and probability density functions. It was found that log-normal shadowing model can not be used for the analysis of shadowing effect behind the buildings. A new model based on stochastic differential equations was proposed. This model can be used to evaluate signal path losses behind the buildings for 4G+ cellular technology. The limitations of the new model were presented. The proposed model can be useful for the development of the shadowing effect prediction models in microcells for 5G technology.

# Turinys

SUTRUMPINIMŲ SĄRAŠAS .....	7
ĮVADAS .....	8
1. PROBLEMOS (OBJEKTO) ANALIZĖ .....	10
1.1. Šešėliavimo efektą įtakojantys veiksniai .....	10
1.2. Šešėliavimo efekto analizės būdai .....	13
1.2.1 Logaritminis normalinis šešėliavimo modelis.....	13
1.2.2 Skirstiniai ir jų stochastinės lygtys.....	13
1.3. Šešėliavimo efekto tyrimas kituose darbuose.....	14
2. EKSPERIMENTO METODIKA .....	21
2.1. Tiriamasis objektas ir tyrimo metodika .....	21
2.2. Eksperimento vykdymui naudojama įranga .....	25
3. TYRIMO REZULTATAI IR ANALIZĖ .....	26
3.1. Eksperimentinių rezultatų palyginimas su log-normaliniu modeliu.....	26
3.2. Šešėliavimo efekto tyrimas stochastinėmis lygtimis .....	28
3.2.1. Tikimybės tankio funkcijų atitikimas eksperimentiniams rezultatams .....	28
3.2.2. Šešėliavimo efekto kitimas už pastatų.....	30
3.2.3. Modelio sudarymas panaudojant diferencialines stochastines lygtis .....	32
3.2.4. Eksperimentinių rezultatų ir modelio palyginimas .....	33
IŠVADOS.....	35
INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....	36
PRIEDAI .....	39
Priedas 1. Matavimų už 5 aukštų pastato rezultatai .....	39
Priedas 2. Matavimų už 9 aukštų pastato rezultatai .....	40

## SUTRUMPINIMŲ SĄRAŠAS

<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>4G</b>	Ketvirtos generacijos mobilaus ryšio tinklai (angl. <i>4th networks mobile networks</i> );
<b>5G</b>	Penktos generacijos mobilaus ryšio tinklai (angl. <i>5th networks mobile networks</i> );
<b>ITU-R</b>	Tarptautinė telekomunikacijų organizacija (angl. <i>International Telecommunications Union-Radio</i> );
<b>IMT-A</b>	4G ryšio technologijai nustatyti standartai (angl. <i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i> );
<b>LOS</b>	Tiesioginio matomumo sąlyga (angl. <i>line of sight</i> );
<b>NLOS</b>	Ne tiesioginio matomumo sąlyga (angl. <i>non line of sight</i> );
<b>OFDM</b>	Ortogonalusis dažnių sutankinimas (angl. <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> );
<b>MIMO</b>	Daugybino įėjimo, daugybino išėjimo metodas (angl. <i>Multiple - input and multiple - output</i> );
<b>BER</b>	Bitų klaidų skaičius (angl. <i>Bit Error Rate</i> );
<b>SNR</b>	Signalų ir triukšmo santykis (angl. <i>signal-to-noise</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>CDF</b>	Komutyvinė tankio funkcija (angl. <i>Cumulative distribution function</i> );
<b>PDF</b>	Tikimybės tankio funkcija (angl. <i>Probability density function</i> ).

## IVADAS

Mobilusis ryšys – tai viena iš labiausiai paplitusių, pažangiausių, bei sparčiausiai besivystančių ryšio technologijų. Kiekvienais metais atsiranda vis daugiau prietaisų, kurių sklandžiam veikimui užtikrinti yra reikalingas mobilusis ryšys. Maždaug kas 10 metų į rinką ateina vis nauja mobiliojo ryšio technologija. Šiuo metu 4G+ yra pati pažangiausia, plačiai naudojama, mobiliojo ryšio technologija.

Tarptautinė telekomunikacijų organizacija (ITU-R) 2008 metais nustatė standartus ketvirtosios generacijos (4G) mobiliojo ryšio technologijai. 2010 metais pradėta diegti ilgalaikės evoliucijos technologija (LTE) neatitiko šių standartų. ITU-R nustatyti standartai 4G ryšio technologijai buvo pavadinti (IMT-Advanced). Nors pirmosios LTE sistemos ir neatitiko šių standartų, tačiau dažnai mobiliojo ryšio operatoriai jas reklamavo kaip 4G. 2013 metais pradėtos diegti LTE-A sistemos pilnai atitiko 4G ryšio technologijai ITU-R taikomus reikalavimus. LTE-A dažnai vadinamas tikruoju 4G ryšiu, o mobiliojo ryšio bendrovės šią technologiją reklamuoja kaip 4G+ [1–2].

Penktosios generacijos (5G) technologija vartotojus turėtų pasiekti 2020 metais. ITU-R organizacija jau yra įpusėjusi kurti 5G standartą, kuris turėtų vadintis IMT-2020. Manoma, kad maksimalus duomenų perdavimo greitis sieks 10 ar daugiau gigabitų per sekundę. 5G technologija naudos labai aukštų dažnių diapazonus ir mažos galios celes duomenims perduoti. 2016 metų liepą Jungtinių Amerikos Valstijų valstybinė komunikacijos komisija (FCC) patvirtino 28 GHz, 37 GHz ir 39 GHz dažnių juostas 5G ryšiui. Nors mažųjų celių naudojimas stipriai palengvins infrastruktūros plėtrą ir naujos technologijos įėjimą į rinką, tačiau dėl itin aukštų dažnių gali iškilti problemų susijusių su ryšio kokybe, nesant tiesioginio matomumo sąlygoms [3–5].

Milimetrinių bangų panaudojimas duomenų perdavime atvers ne tik naujas galimybes, bet sukels ir naujų rūpesčių. Kuo trumpesnis bangos ilgis, tuo didesnę poveikį jam darys įvairūs aplinkos veiksniai. Taip pat aukšto dažnio bangoms bus daug sunkiau prasiskverbti per pastatų sienas, stiklą. Tankiai apgyvendintose vietovėse yra labai svarbu iširti ir įvertinti šešėliavimo efekto įtaką signalo lygiui, kadangi dažnai tarp bazinės stoties ir vartotojo nebus tiesioginio matomumo sąlygų. Šiame darbe, empirinio tyrimo metodu, bus tiriama šešėliavimo efekto įtaka signalo lygiui, 4G+ mobiliojo ryšio technologijai, ko pasekoje bus galima įvertinti signalo lygio nuostolius.



Šio darbo tikslas yra: **Ištirti šešėliavimo efektą 4G+ judriojo ryšio technologijoje.**

**Šio darbo uždaviniai yra:**

- Atlikti literatūros analizę ir išsiaiškinti kaip šešėliavimo efektas įtakoja signalo lygį;
- Parengti tyrimo metodiką, pagal kurią būtų galima ištirti šešėliavimo efekto įtaką signalo lygiui;
- Empirinio tyrimo metu įvertinti šešėliavimo efekto įtaką 4G+ ryšio technologijai;
- Pateikti matematinį modelį, pagal kurį būtų galima įvertinti šešėliavimo efekto įtaką, signalo lygiui, galutinio vartotojo įrenginyje.

## 1. PROBLEMOS (OBJEKTO) ANALIZĖ

Šešėliavimo efektas yra reiškiny, kuris atsiranda dėl radijo bangų sklidimo mechanizmų. Šiame skyriuje, remiantis moksline literatūra, bus analizuojami šešėliavimo faktorių įtakojantys veiksniai. Taip pat bus gilinamasi į kitų autorių, panašia tematika, parašytus darbus, bei matematinius modelius, naudojamus tirti šešėliavimo efekto įtaką 4G+ mobiliojo ryšio technologijoje.

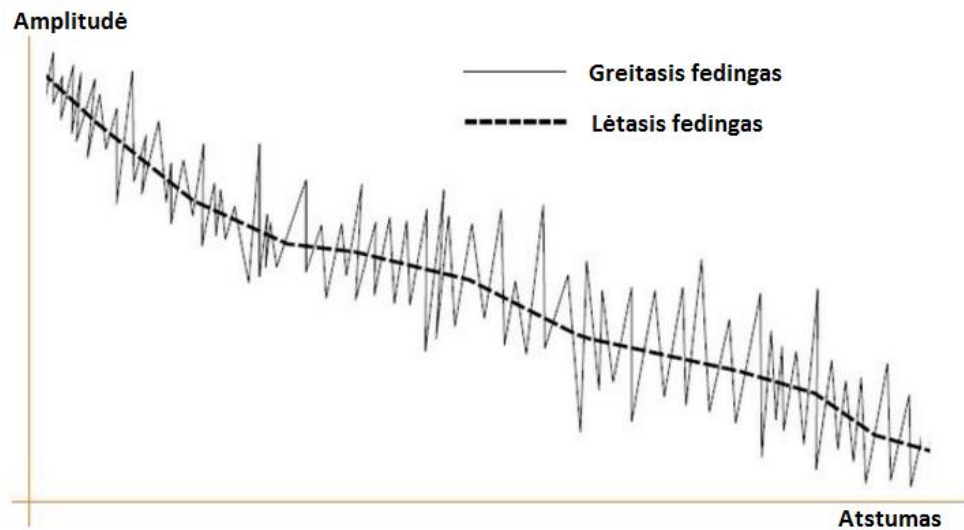
### 1.1. Šešėliavimo efektą įtakojantys veiksniai

Idealiomis sąlygomis, dviejuose vienodu atstumu nuo siųstuvo nutolusiuose imtuvuose, vidutinis signalo lygis būtų vienodas. Tačiau dėl radijo bangų sklidimo mechanizmų, kiekvienas tuo pačiu atstumu nuo siųstuvo nutolęs imtuvas, bus įtakojamas skirtingais radijo signalo nuostoliais. Taigi, vidutinis signalo lygis imtuvuose, vienodu atstumu nutolusiuose nuo to pačio siųstuvo, bus skirtingas.

Radijo signalas, sklisdamas erdvėje, praranda savo energiją, dėl signalo fedingo (angl. *fading*). Signalo fedingas, mobiliojo ryšio komunikacijose, yra suprantamas, kaip įvairialypis signalo slopinimas, susidedantis iš daugybės skirtingų kintamųjų. Yra išskiriamos dvi pagrindinės fedingo rūšys: greitasis fedingas (angl. *fast fading*) ir lėtasis fedingas (angl. *slow fading*) (1 pav.).

Greitasis fedingas atsiranda dėl tiesioginių ir netiesioginių trukdžių. Šio tipo fedingas pasireiškia staigaus signalo lygio kritimu, tiesioginio matomumo LOS (angl. *line of sight*) sąlygoms pasikeitus į netiesioginio matomumo NLOS (angl. *non line of sight*) sąlygas, arba pablogėjus NLOS sąlygoms. Dažniausiai su juo susiduria judantys imtuvai, dėl daugiakelio (angl. *multipath*) radijo bangų sklidimo, bei įvairių trumpalaikių trukdžių. Atspindys yra vienas iš pagrindinių faktorių lemiančių staigų signalo lygio kritimą.

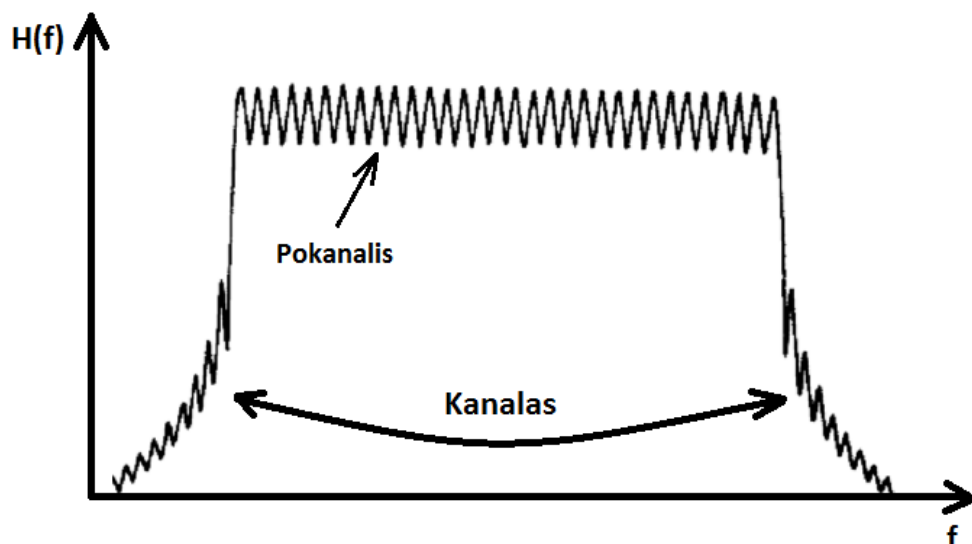
Lėtasis fedingas pasireiškia esant LOS ir NLOS sąlygoms. Radijo signalas yra slopinamas tarp siųstuvo ir imtuvo esančių kliūčių. Iš esmės šešėliavimo efektas yra pagrindinis lėtojo fedingo faktorius. Šešėliavimo efektą sudaro visi veiksniai įtakojantys signalo sklidimą erdvėje. Didelė kliūtis tarp signalo siuntėjo ir gavėjo nesukels staigaus signalo lygio kritimo ar laikino dingimo. Pagrindiniai veiksniai įtakojantys šešėliavimo efektą yra šie: difrakcija, refleksija, skverbti ir sklaida.



1 pav. Greitasis ir lėtasis fedingai

Šiuolaikinės telekomunikacijų infrastruktūros naudoja ortogonalųjį dažnių sutankinimą OFDM (angl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ir daugybinio įėjimo, daugybinio išėjimo MIMO (angl. *Multiple - input and multiple - output*) metodą. Šių metodų panaudojimas leidžia sumažinti greitojo fedingo daromą įtaką, staigaus signalo lygio kritimui, imtuvuose [6–7].

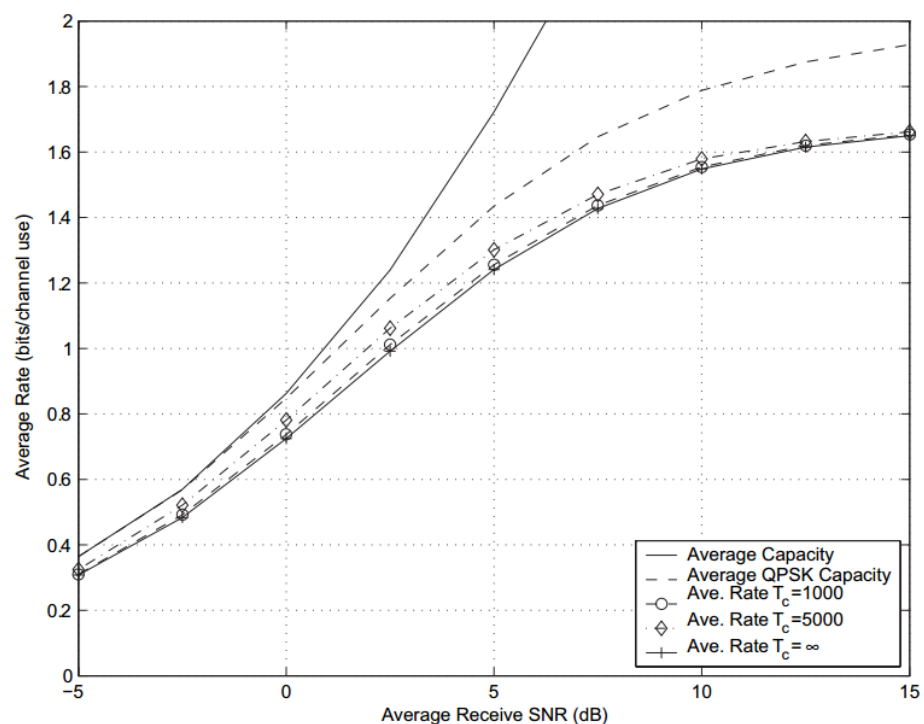
4G+ ryšio technologijoje naudojamas OFDM metodas padalina siunčiamų duomenų srautą į kelis dažnių pokanalus (angl. *sub-channel*) (2 pav.). Visais pokanalais duomenys yra siunčiami lygiagrečiai.



2 pav. Dažninis kanalas išskaidytas į pokanalius

Šis metodas yra labai efektyvus, kadangi padalinus duomenų į kelis nešamuosius signalus, sumažėja dėl refleksijos susidariusi signalo interferencijos tikimybė. Taip pat sumažėja bitų klaidų skaičius BER (angl. *Bit Error Rate*) [8–9].

Koheracijos laikas (angl. *coherence time*) yra laikas, kuris nusako kaip greitai, per tam tikrą laiko tarpą, gali pasikeisti dažninio kanalo impulsų kitimas. Greitojo fedingo atveju koheracijos laikas yra mažas. Mabiliojo ryšio komunikacijose jį apibūdina staigus signalo lygio kitimas (1 pav.). Lėtojo fedingo atveju koheracijos laikas yra didelis, todėl lėtuju fedingu galima vadinti visus veiksnius, kurių sukeliamas signalo lygio slopinimas nepasireiškia staigiai. Šaltiniuose [10–11] autoriai siūlo komunikavimui tarp šešėliuojančių dažninių kanalų naudoti fontaninį kodavimo algoritmą (angl. *fountain (rateless) codes*). Kanalų užimtumo priklausomybė nuo signalo ir triukšmo santykio (SNR, angl. *signal-to-noise*) matoma (3 pav.). Dydis  $T_c$  nusako koheracijos laiką. Galima pastebėti, kad esant didesniam koheracijos laikui kanalų užimtumas yra didesnis, nei esant mažesniai.



3 pav. Kanalų užimtumo priklausomybė nuo SNR [10]

Fontaninis kodavimo principas yra išskaidyti duomenų paketą į efektyvų kiekį užkoduotų mažų gabaliukų (lašelių (angl. *droplets*)) ir juos išsiųsti fontano principu. Duomenų gavėjas, surinkęs pakankamą lašelių kiekį, gali sėkmingai atkurti pradinį duomenų paketą, nepriklausomai nuo to kuriuos duomenų gabaliukus jis surinko, o kuriuos praleido. Šis duomenų perdavimo metodas nereikalauja patvirtinimo apie sėkmingai perduotus duomenų paketus ar užklausų apie prarastuosius [12–13]. Šis metodas galėtų būti labai efektyvus, esant prastam signalo lygiui, greitojo fedingo sąlygomis. Jį planuojama naudoti 5G mabiliojo ryšio technologijoje.

## 1.2. Šešėliavimo efekto analizės būdai

Šešėliavimo efektas gali būti tiriamas naudojant tikimybės tankio skirstinius (PDF, angl. *probability density functions*), komutyvines tankio funkcijas (CDF, angl. *cumulative distribution function*) arba logaritminį normalinį šešėliavimo modelį (angl. *log normal shadowing path loss model*).

### 1.2.1 Logaritminis normalinis šešėliavimo modelis

Logaritminis normalinis šešėliavimo modelis gali būti naudojamas norint ištirti kelio nuostolių priklausomybę nuo atstumo.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + c + X_\sigma, \quad (1)$$

čia  $PL(d)$  – bendra kelio nuostolių vidutinė vertė (dB);

$PL(d_0)$  – kelio nuostoliai tam tikru atskaitiniu atstumu nuo siųstuvo (dB);

$d$  – atstumas;

$d_0$  – atskaitinis atstumas;

$n$  – signalo sklidimo nuostolius nusąkanti eksponentė;

$c$  – kompensacijos faktorius, įvertinantis skirtumą tarp atskaitinio modelio ir matavimų;

$X_\sigma$  – šešėliavimo efektą įvertinantis faktorius;

$\sigma$  – standartinis nuokrypis, nusakantis šešėliavimo faktorių.

### 1.2.2 Skirstiniai ir jų stochastinės lygtys

- Gauso skirstinys:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

Diferencialinė stochastinė lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{b}{2\sigma^2} x \operatorname{sign}(x) + \sqrt{\frac{2b}{N_\xi}} \xi(t). \quad (3)$$

- Relėjau skirstinys:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x > 0, \quad \sigma^2 = -\frac{N_\xi}{2a}, \quad \xi - \text{baltasis triukšmas}; \quad (4)$$

Diferencialinė stochastinė lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = ax + \frac{N_\xi}{2x} + \xi(t). \quad (5)$$

- Nakagami skirstinys:

$$f(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{a}\right)^m x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{a} x^2\right), \quad (6)$$

$m$  – formos parametras (gali būti vidurkis),  $a$  – išplėtimo parametras;

čia  $\Gamma(m) = \frac{x^{2m}}{\sigma^m}$ ,  $\sigma = \frac{x^2}{m}$ ,  $x > 0$ ,  $a > 0$ ,  $m \geq 0.5$ ;

$$m = \frac{E^2[x^2]}{\text{Var}[x^2]}; \quad a = E[x^2].$$

Diferencialinė stochastinė lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = -N_\xi \left[ 2m \left( \frac{x^2}{a} + 1 \right) - 1 \right] x^{1-4m} + \sqrt{2} x^{1-2m} \xi(t). \quad (7)$$

- Logaritminis normalinis skirstinys:

$$f(x) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln^2\left(\frac{x}{\eta}\right)}{2\sigma^2}\right), \quad x > 0, \quad \sigma^2 = \frac{aN_\xi}{2}, \quad \mu = \ln(\eta), \quad \mu - \text{vidurkis}. \quad (8)$$

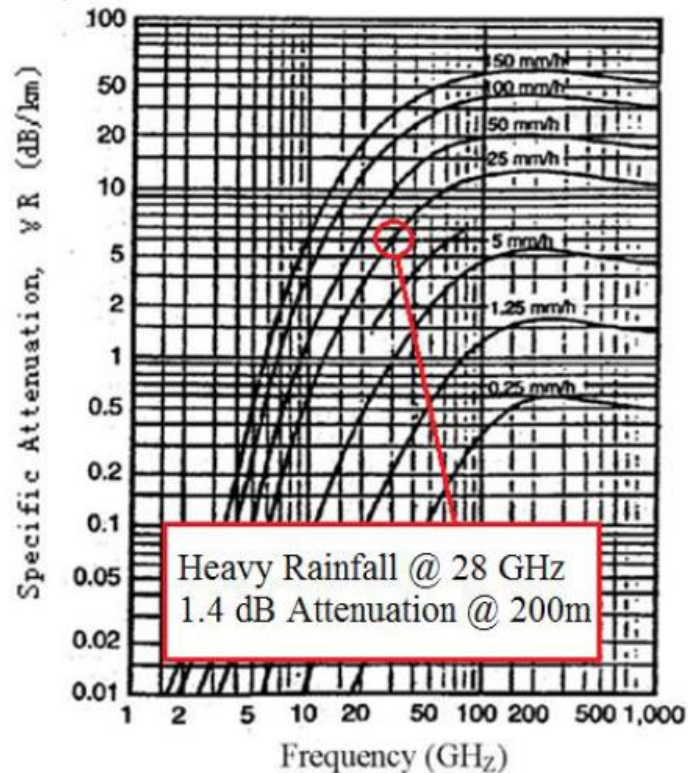
Diferencialinė stochastinė lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = -ax \left( \ln \frac{x}{\eta} - \sigma^2 \right) + ax \xi(t). \quad (9)$$

### 1.3. Šešėliavimo efekto tyrimas kituose darbuose

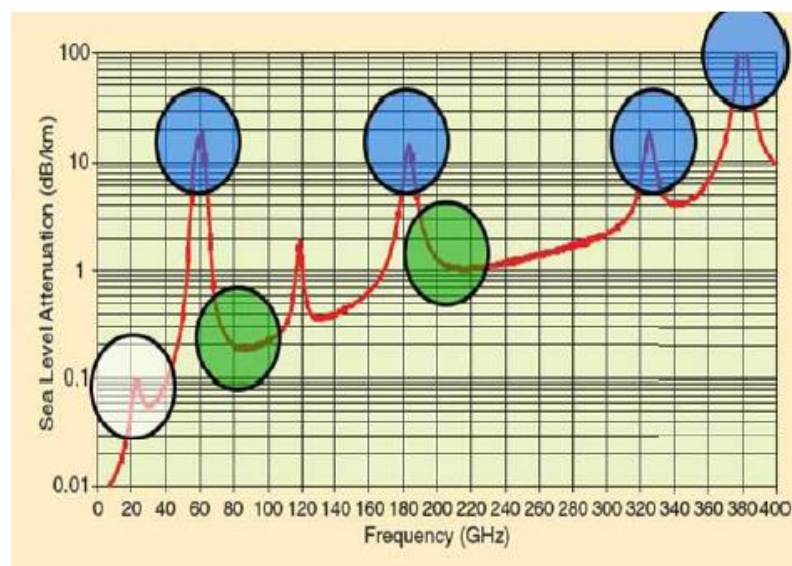
Šiuo metu yra nemažai publikacijų, kuriose tiriamas šešėliavimo efektas plačiame dažnių diapazone. Publikacijos [14–16] buvo orientuotos į artėjančią 5G technologiją. Jose buvo tiriamas pakankamai aukštų dažnių diapazonas.

Buvo išsiaiškinta, kad aukštuose dažnių diapazonuose stiprus lietus (25 mm/h) daro didelę įtaką signalo lygiui. Kai atstumas nuo bazinės stoties yra 1 km, arba didesnis, signalas slopinimas vidutiniškai 7 dB/km. Kai atstumas 200 m, arba mažesnis signalo slopinimas viso labo 1,4 dB (4 pav.).



4 pav. 25mm/h lietaus slopinamas signalas 28GHz dažnių diapazone [14]

Taip pat buvo aptartas dėl įvairių atmosferos sąlygų vykstantis signalo lygio slopinimas (5 pav.). Dažnių juostoms iki 40 GHz atmosferos sąlygos daro minimalią įtaką.



5 pav. Signalo slopinimas dėl atmosferos sąlygų [14]

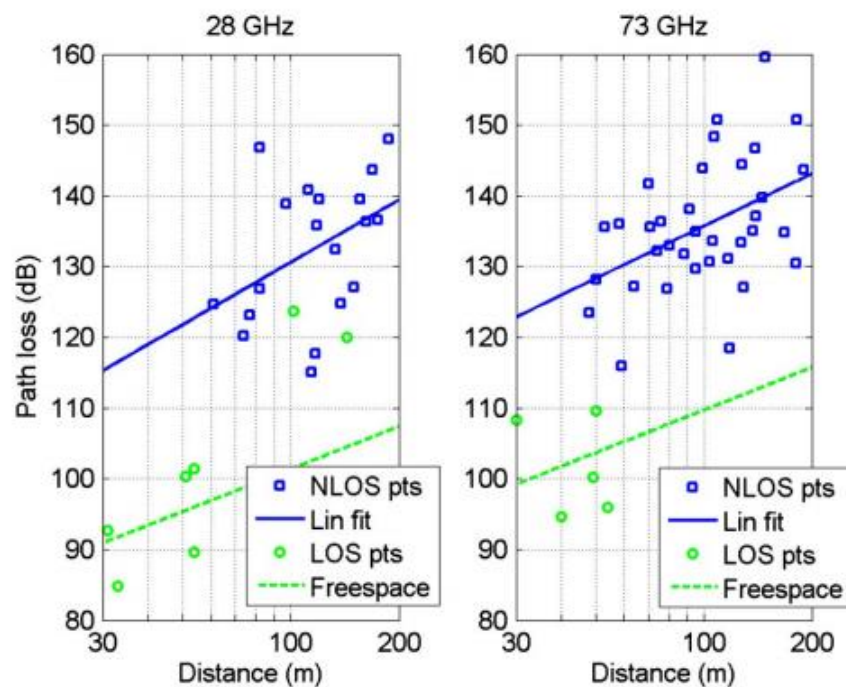
Buvo išsiaiškinta, kad šešėliavimo faktorių nusakantis standartinis nuokrypis  $\sigma$  ir signalo sklidimo nuostolius nusakanti eksponentė  $n$  priklauso ne tik nuo naudojamos dažnių juostos, bet ir nuo siųstuvo ir imtuvo antenų pakėlimo aukščių. Taip pat didelę įtaką turi tiesioginio matomumo sąlyga (6 pav.).

	25 dBi RX Ant.		13.3 dBi RX Ant.	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
<b>Path Loss Exponent <math>n</math></b>	2.20 (clear 1.92)	3.88 (best 3.13)	2.21 (clear 1.90)	3.18 (best 2.56)
<b>Path Loss <math>\sigma</math> (dB)</b>	10.3 (clear 5.1)	14.6 (best 10.7)	9.4 (clear 3.5)	11.0 (best 8.4)

6 pav.  $n$  ir  $\sigma$  priklausomybė nuo LOS sąlygų ir antenų stiprinimo [15]

38 GHz dažnių diapazone vykdytus matavimus, kai buvo naudojamos 25dBi ir 13,3 dBi stiprinimo antenos, geriausiai atitiko logaritminis normalinis šešėliavimo modelis, kai pasirinktas atskaitinis atstumas  $d_0 = 5$  m. Iš (6 pav.) galime matyti, kad naudojant skirtingo stiprinimo RX antenas LOS sąlygomis  $n$  ir  $\sigma$  kito nežymiai, tačiau NLOS sąlygomis pastebėtas didesnis dydžių skirtumas.

Tankiai apgyvendintose vietovėse, kur yra daug daugiaaukščių pastatų, LOS ir NLOS sąlygos gali turėti labai didelę reikšmę radijo signalo lygiui. Tai įpač aktualu aukštų dažnių milimetrinėms bangoms (7 pav.).



7 pav. Signalu nuostoliai 28 ir 73 GHz dažnių diapazone LOS ir NLOS sąlygomis [16]



Signalo lygiui miestuose didelę įtaka turi ne tik objektai sukuriantys NLOS sąlygas, bet ir medžiagos iš kurių jie pagaminti. Straipsnyje [17] autoriai tyrė 28 GHz milimetrinių bangų atspindį nuo tiriamos medžiagos 10 ir 45 laipsnių kampu, ir skverbti, kai tarp siųstuvo ir imtuvo yra kliūtis. Visais atvejais bangos sklidimo kelias buvo 5 m. Stipriausiai signalą atspindėjo storas parduotuvės vitrinės stiklas (8 pav.).

Material	Angle (°)	Reflection Coefficient ( $ \Gamma_{  }$ )
Tinted Glass	10	0.896
Concrete	10	0.815
	45	0.623
Clear Glass	10	0.740
Drywall	10	0.704
	45	0.628

8 pav. Įvairių medžiagų atspindžio koeficientai [17]

Atspindžio koeficientai buvo apskaičiuoti pagal formulę:

$$|\Gamma_{||}| = \frac{\sqrt{\frac{|E_r|^2}{120\pi} A_e}}{\sqrt{\frac{|E_i|^2}{120\pi} A_e}} = \frac{\sqrt{|E_r|^2}}{\sqrt{|E_i|^2}} = \frac{|E_r|}{|E_i|}, \quad (10)$$

čia  $E$  – atsispindėjusio elektrinio lauko dydis (V/m);

$A_e$  – antenos efektyvumas;

Signalo skverbtis buvo matuojama, tarp siųstuvo TX ir imtuvo RX esant tiriamam objektui. Gautoji galia, atsižvelgiant į atstumo nuokrypį, gali būti apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_R(d) = P_T + G_T + G_R - 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) - ECL[dB], \quad (11)$$

čia  $P_R$  – gauta galia (dBm);

$P_T$  – išsiųsta galia (dBm);

$G_T$  – siųstuvo stiprinimas (dBi);

$G_R$  – imtuvo stiprinimas (dBi);

$\lambda$  – bangos ilgis (28 GHz dažniui 10,71 mm);

$d_0$  – atskaitinis atstumas (šiuo atveju 5 m).

ECL – papildomi nuostoliai radijo kanale atstumu iki  $d_0$ , dB

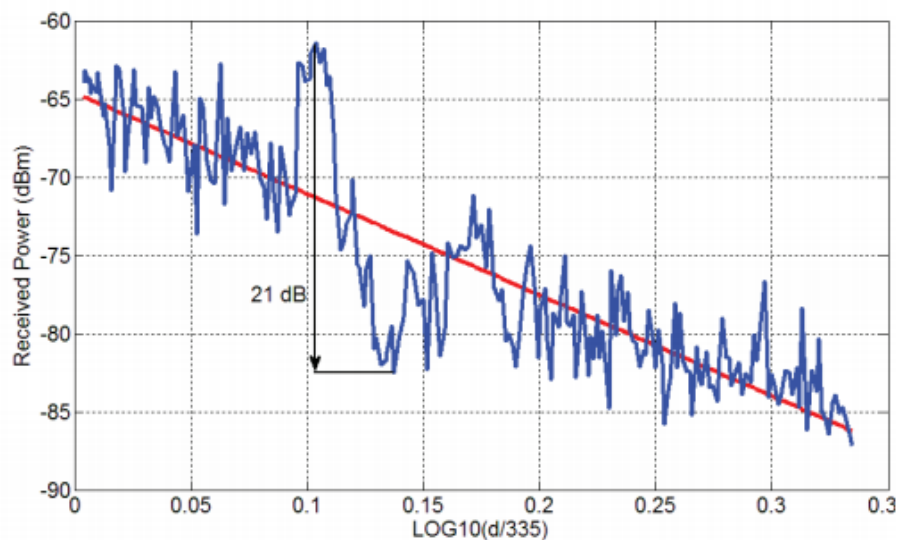
Matavimų rezultatai parodė, kad milimetrinės bangos linkusios atsispindėti ir sunkiai prasiskverbia per stiklą. Buvo išmatuota net 40 dB signalo lygio nuostolis, bandant prasiskverbti per storą 3,8 cm stiklą (9 pav.).

Environment	Material	Thickness (cm)	Received Power - Free Space (dBm)	Received Power - Material (dBm)	Penetration Loss (dB)
Outdoor	Tinted Glass	3.8	-34.9	-75.0	40.1
	Brick	185.4	-34.7	-63.1	28.3
Indoor	Clear Glass	<1.3	-35.0	-38.9	3.9
	Tinted Glass	<1.3	-34.7	-59.2	24.5
	Clear Glass	<1.3	-34.7	-38.3	3.6
	Wall	38.1	-34.0	-40.9	6.8

9 pav. Signalų gebėjimas prasiskverbti per įvairias medžiagas [17]

Galima pastebėti, kad pro 40 cm paprastą sieną milimetrinės bangos prasiskverbia 3 kartus geriau nei pro 1,3 cm spalvotą stiklą. Tai labai svarbus faktorius, kadangi stiklinės konstrukcijos yra plačiai paplitusios.

Straipsnyje [18] buvo tiriama 5,8 GHz dažnio jūrinis tinklas. Buvo pastebėta, kad kelių nuolydžių (angl. *multi-slope*) modelis, kai skirtingiems maršruto atstumams yra priskiriama skirtinga signalo nuostolius nusakanti eksponentė  $n$  yra tikslesnis, nei tradiciniai modeliai, kurie visoms NLOS sąlygoms naudoja tą pačią eksponentę. Taip pat buvo pastebėta, kad dviejų bangų modelis yra labai tikslus esant LOS sąlygoms. Signalų lygio kitimas, TX tolstant nuo RX pavaizduota (10 pav.).



10 pav. Signalų lygio kitimas TX tolstant nuo RX

Praplaukiantis laivas iššaukė 21 dB dydžio signalų lygio kitimą. Signalų nuostolius nusakanti eksponentė  $n$  kito nuo 0,76 iki 12,98. Šėšėliavimo faktorių nusakantis standartinis nuokrypis  $\sigma$  nuo 3,09 iki 3,95.

Straipnyje [19] autoriai tyrė stipriai apkrautų tinklų šėšėliavimo efektą, darydami prielaidą, kad daugialiu atvejų šėšėliavimo efekto galima nepaisyti, jeigu galutinio vartotojo įrenginys yra prisijungęs prie didžiausią galią spinduliuojančios bazinės stoties. Šiame darbe  $j$ -oji bazinė stotis spinduliuoja signalą su galia  $P_j$ , tai priimta, kad atstume  $r$  signalo galia  $p_{j,u}$  bus:

$$p_{j,u} = P_j K r_{j,u}^{-\eta} Y_{j,u}, \quad (12)$$

čia  $Y_{j,u} = 10^{\frac{\varepsilon_{j,u}}{10}}$  – narys, kuris nusako šėšėliavimo efektą;

$Y_{j,u}$  – logaritminis normalinis atsitiktinis dydis, kuris charakterizuoja priimto signalo atsitiktinę variaciją apie vidutinę vertę;

$\varepsilon_{j,u}$  – atsitiktinio kintamojo su vidutine verte, lygia 0, ir dispersija  $\sigma = 0$  iki 10 Db;

$P_j K r_{j,u}^{-\eta}$ , kur  $K$  yra konstanta, nusakanto vidutinę priimtą signalo vertę atstumu  $r_{j,u}$ ;

$\eta$  gali priimti vertes 2,8; 3; 3,6; 3,8;

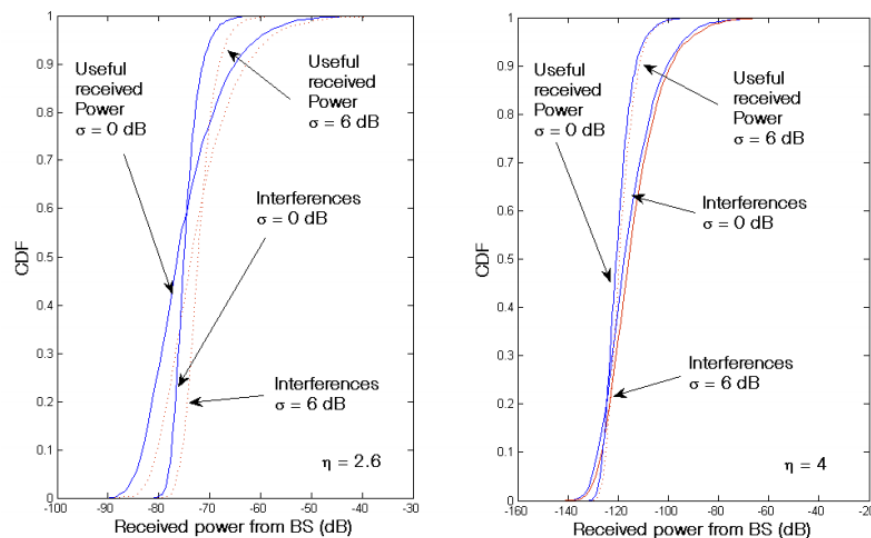
$j$  ir  $u$  reiškia  $j$ -ą BS ir  $u$ -tą vartotoją.

Tada PDF bus:

$$p_Y(s) = \frac{1}{\alpha \sigma \sqrt{\pi}} \exp \left[ - \left( \frac{\ln(s) - \alpha m}{\sqrt{2} \alpha m} \right)^2 \right], \quad (13)$$

čia  $\alpha = \frac{\ln 10}{10}$ ;  $m = \frac{1}{\alpha} \ln(K P_j r_{j,u}^{-\eta})$  – vidutinė priimta galia dBm.

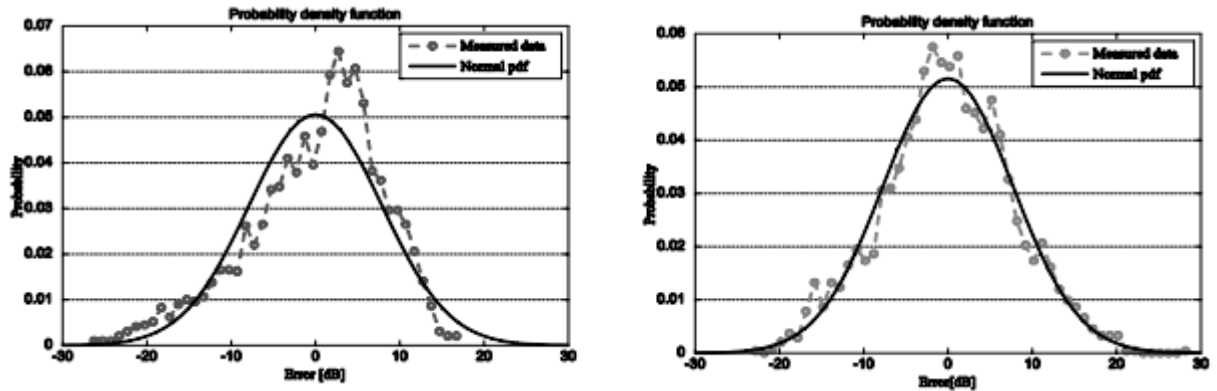
Šiame darbe šėšėliavimo efekto vertinimui autoriai naudojo komutyvines tankio funkcijas (CDF) (11 pav.).



11 pav. CDF priklausomybė nuo trukdžių [19]

Kairėje pusėje pateikiami rezultatai, kai signalo sklidimo nuostolius nusakanti eksponentė  $\eta = 2,6$ , dešinėje, kai  $\eta = 4$ . Nevertinant šėšėliavimo efekto, kai standartinis nuokrypis  $\sigma = 0$  dB (mėlyna linija), vertinant šėšėliavimo efektą  $\sigma = 6$  dB (raudona punktyrinė linija).

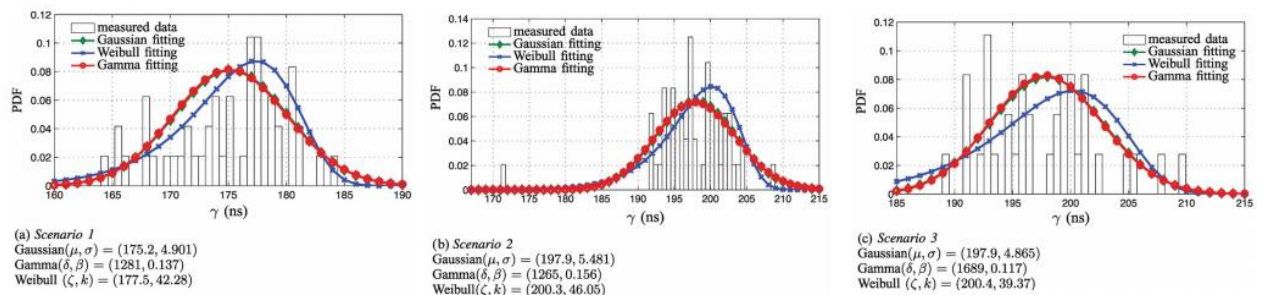
Darbe [21] tiriamas šėšėliavimo efektas gyvenamuosiuose rajonuose Tampere (Suomija) panaudojant tikimybės tankio funkcijas (12 pav.) esant 900 MHz dažniams.



12 pav. Tikimybės tankio funkcija (log-normalinis skirstinys) Kissanmaa (kairėje) ir Tammela (dešinėje) gyvenamuosiuose rajonuose [21]

Nustatyta, kad kompensacijos faktorius formulėje (1) stipriai priklauso nuo gyvenamojo rajono (pastatų tankio) ir kinta nuo 31,5 dB Kissanmaa rajone iki 6,8 dB Hervanta mikrorajone. Eksponentė  $n$ , priklausomai nuo mikrorajono, kito nuo 3,6 Kissanmaa rajone iki 5,1 Hervanta rajone.  $X_\sigma$  kito nuo 8,2 dB Kissanmaa mikrorajone iki 6,1 dB Hervanta mikrorajone. Tačiau šiame darbe buvo nagrinėjamas šėšėliavimo efektas ne už atskirų pastatų, bet bendrai visame mikrorajone.

Darbe [22] analizuojamas šėšėliavimo efektas kai signalo dažnis  $\sim 60$  GHz. Analizė atlikta naudojant Gauso, Gamma ir Weibull skirstinius (13 pav.). Priklausomai nuo eksperimentų scenarijaus, geriausiai šėšėliavimo efektą atitinko visi trys minėti skirstiniai. Todėl negalima griežtai nustatyti vieno ar kito skirstinio panaudojimo scenarijus.



13 pav. Eksperimentinių rezultatų atitikimas skirtingiems skirstiniams [22]

## 2. EKSPERIMENTO METODIKA

Šioje dalyje bus aprašoma tyrimo atlikimo metodika, naudojama įranga, bei tiriamasis objektas. Taip pat pateikiamas tyrimo vykdymo algoritmas. Šešėliavimo efekto tyrimui buvo panaudoti eksperimentiniai matavimų [22] rezultatai (šiam darbe nebuvo tiriamas šešėliavimo efektas) bei papildomi matavimai, atlikti kitoje vietovėje, su kita bazine stotimi.

### 2.1. Tiriamasis objektas ir tyrimo metodika

Matavimai buvo atlikti pagal 2 scenarijus. Visais atvejais buvo matuojamas signalo stiprumas (RSSI, angl. *Received Signal Strength Indicator*) už pastatų. Matavimai buvo atliekami NLOS sąlygomis už pastatų, tostant nuo jų. Pirmame scenarijuje nebuvo atsižvelgiama į teritorijos tinkamumą matavimams, todėl už kai kurių pastatų, matavimų atlikimo atstumas buvo labai ribotas. Pagal antrą scenarijų matavimai buvo atlikti atsižvelgiant į vietovės tinkamumą matavimams, todėl buvo išmatuotas žymiai didesnis atstumas už pastatų. BS parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Bazinių stočių parametrai

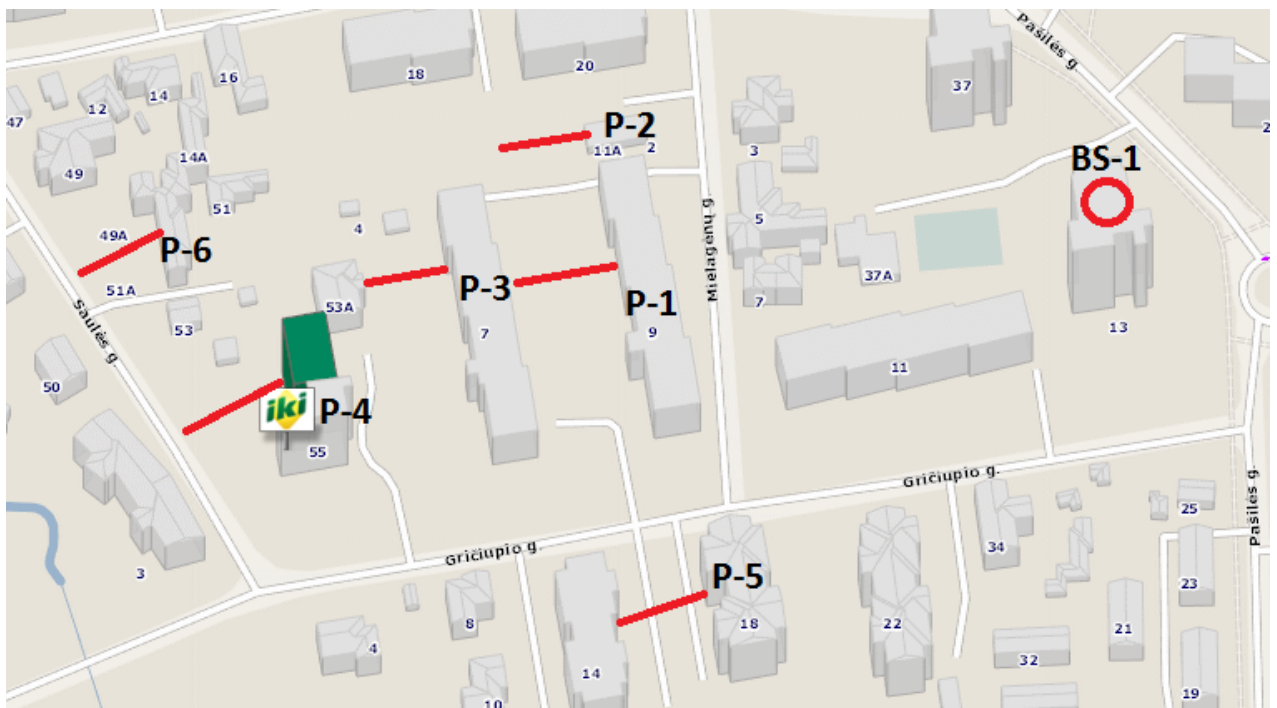
Parametrai	Scenarijus 1	Scenarijus 2
BS dažnis $f_{BS}$ , MHz	2115	1819
BS EIRP, dBm	61	63
Antenos stiprinimas, dBi	17,3	17,3
Nuostoliai, dB	0,9	0,9
BS Aukštis, m	43	43
UE Aukštis, m	1,5	1,5

Pastatų aukščiai ir atstumai iki bazinės stoties pateikti 2 lentelėje.

**1 scenarijus (14 pav.).** Bazinė stotis buvo parinkta ant 12 aukštų pastato, šalia žiedo esančio pašilės gatvėje. Matavimai buvo atlikti už 6 skirtingo aukščio pastatų. Žemiau esančiame paveiksle pateikiamas matavimų žemėlapis.

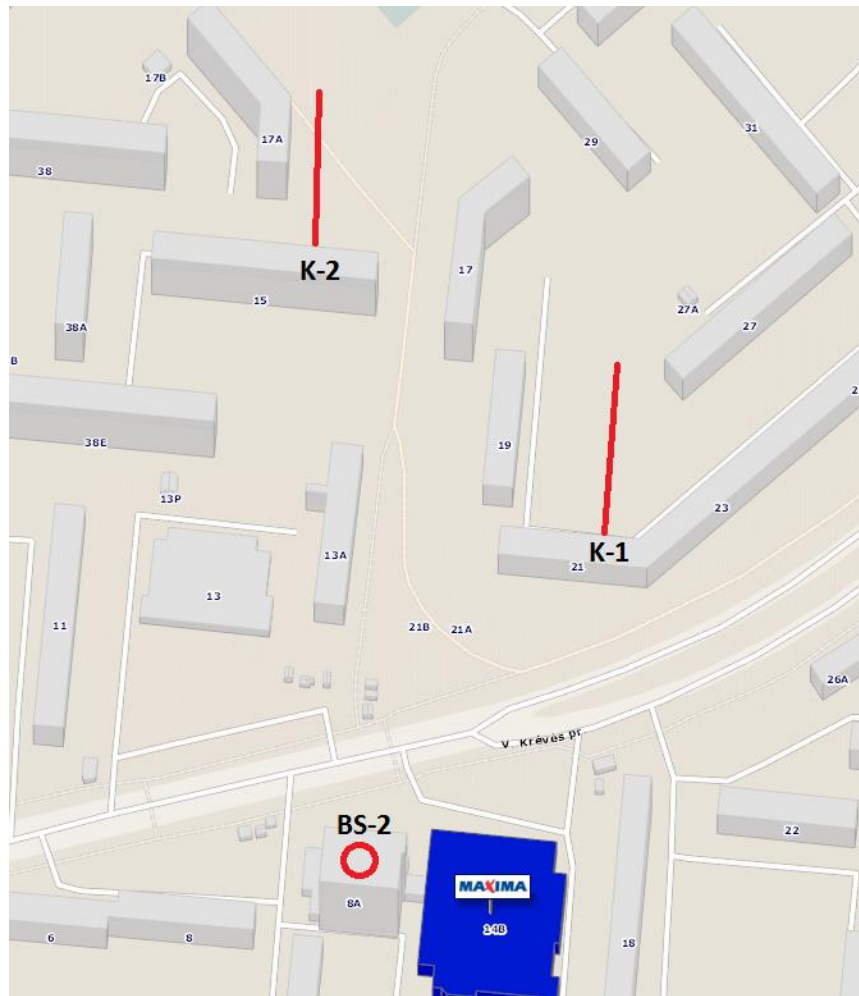
2 lentelė. Bazinių stočių parametrai

Pastatas	Atstumas iki BS, m	Namų aukštis, m
Pašilės 1	156	18
Pašilės 2	174	6
Pašilės 3	212	18
Pašilės 4	268	32
Pašilės 5	169	23
Pašilės 6	303	14
Krėvės 1	165	18
Krėvės 2	250	32



14 pav. Scenarijaus 1 matavimų žemėlapis

**2 Scenarijus (15 pav.).** Buvo pasirinkta bazinė stotis esanti ant 12 aukštų pastato, tankiai apgyvendintoje vietovėje, Vinco Krėvės prospekte. Matavimams atlikti buvo pasirinkti 2 skirtingų aukščių pastatai, horizontaliai pasisukę į bazinę stotį. Matavimai buvo atliekami maždaug per pastato vidurį, ten kur šėšliavimo efektas turėtų būti didžiausias. Buvo atlikta 12 matavimų, kas 5 metrus, tolstant nuo pastato. Žemiau esančiame paveikle pateikiamas matavimų žemėlapis.

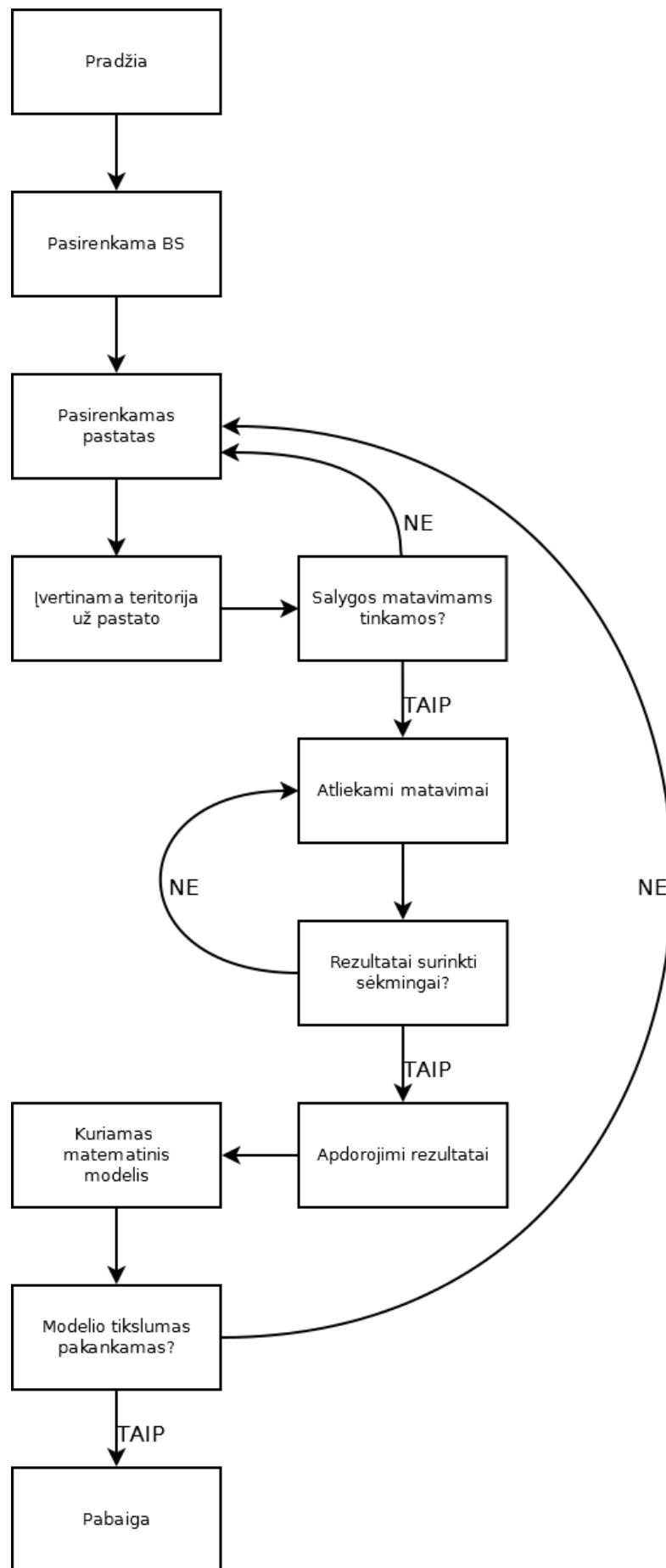


15 pav. Scenarijaus 2 matavimų žemėlapis

Siekiant padidinti matavimų tikslumą, bei sumažinti galimas paklaidas, kiekviename taške buvo atliekama po 10 matavimų. Matavimai buvo atliekami ne mažesniu nei 30 sekundžių intervalu. Prieuose pateikiamos, matavimų už 5 ir 9 aukštų pastatų, lentelės su dešimties matavimų aritmetiniu vidurkiu.

#### **Eksperto vykdomo algoritmas (16 pav.):**

- Pasirenkama bazinė stotis;
- Pasirenkamas pastatas, bazinės stoties celės ribose;
- Įvertinama, ar už pastato esanti teritorija tinka matavimams;
- Jei tinka, tai atliekami RSRP, RSRQ ir RSSI matavimai;
- Jei salygos matavimams netinkamos, pasirenkamas kitas pastatas;
- Gauti rezultatai apdorojami;
- Kuriamas matematinis modelis;
- Matematinis modelis lyginamas su matavimų rezultatai;
- Pateikiamos išvados.



16 pav. Eksperimento vykdymo algoritmas



## 2.2. Eksperimento vykdymui naudojama įranga

Matavimams atlikti buvo naudojamas 4G+ technologiją palaikantis HUAWEI E5186 maršrutizatorius palaikantis SIM kortelės sąsają (17 pav.).



17 pav. HUAWEI E5186 maršrutizatorius

### **Techninės charakteristikos [23]:**

Maršrutizatorius palaiko abu WiFi standartus: WiFi 2.4 GHz ir Wi-Fi 5 GHz.;

Dedasi microSIM dydžio SIM kortelės;

### **Maršrutizatoriaus sparta:**

4G+ (LTE cat6) - iki 300 Mbps gavimo ir iki 50 Mbps išsiuntimo;

4G (LTE cat4) - iki 150 Mbps gavimo ir iki 50 Mbps išsiuntimo;

3G - iki 43,3 Mbps gavimo ir iki 5,7 Mbps išsiuntimo.

### **Veikimo dažniai:**

4G LTE FDD DD800 / 900 / 1800 / 2100 / 2600 MHz, TDD 2600 MHz;

3G UMTS / WCDMA: 2100 / 900 MHz;

2G GPRS / GSM / EDGE: 850 / 900 / 1800 / 1900 MHz;

Maršrutizatoriuje yra RJ-11 jungtis (analoginiam telefono rageliui), 2 vnt.

### **Maršrutizatoriaus funkcijos:**

Firewall, CS Voice, VoIP, VoLTE, TR069 nuotolinis valdymas;

HTTP Online Upgrade, QoS, USB Share, UPnP;

IPV6, DLNA, Fax, Print, VPN.

**Išmatavimai:** 194 x 177 x 64 mm, svoris 450g;

Prie maršrutizatoriaus galite prijungti 2 išorines antenas ryšiui stiprinti (SMA jungtis).

### 3. TYRIMO REZULTATAI IR ANALIZĖ

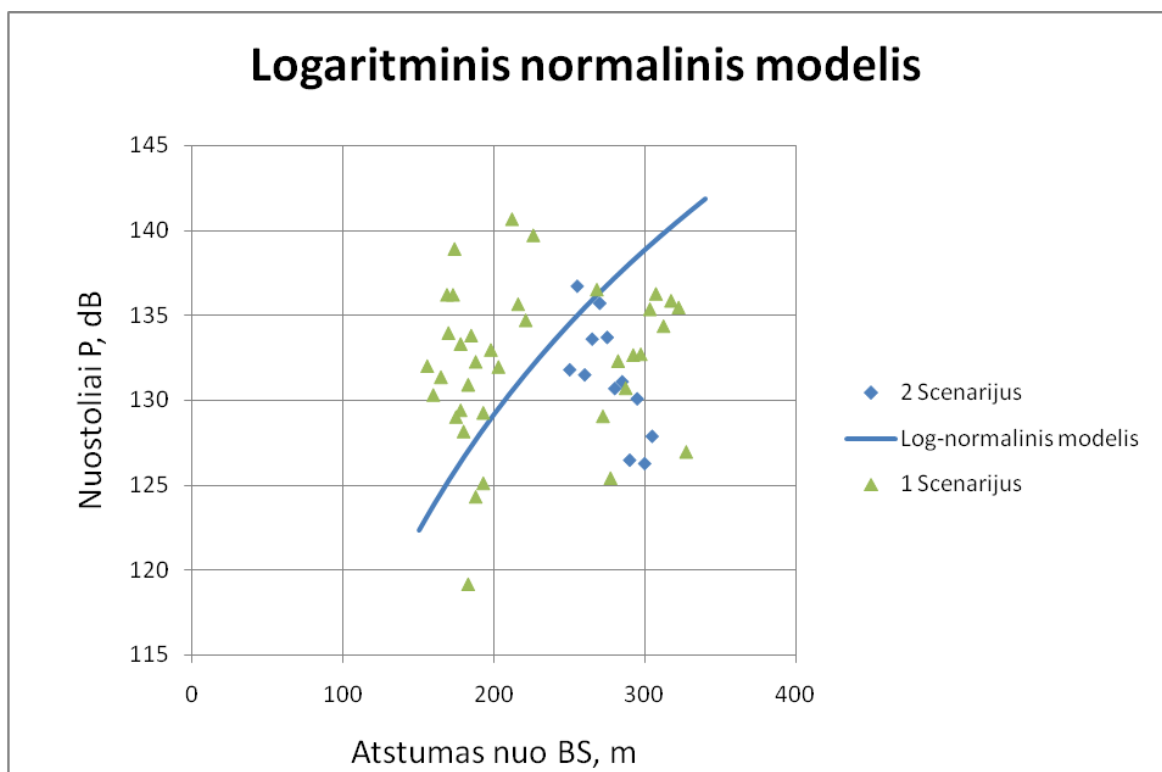
Šešėliavimo efekto įvertinimui buvo vykdomas tyrimas, kurio metu buvo matuojamas priimamo signalo stiprumas (RSSI), už pastatų. Tyrimo esmė buvo išsiaiškinti, kaip kinta signalo lygis, lėtojo fedingo sąlygomis, tolstant nuo pastato ir tuo pačių ir nuo jo sukuriama šešėlio. Buvo pastebėta, kad tolstant nuo pastato (tuo pačiu ir nuo bazinės stoties) signalas stiprėja. Signalų lygio kitimas, tolstant nuo aukštų pastatų, buvo žymesnis, nei tolstant nuo žemesnių.

#### 3.1. Eksperimentinių rezultatų palyginimas su log-normaliniu modeliu

Kaip buvo minėta aukščiau, vienas iš metodų tiriant šešėliavimo efektą yra eksperimentinių rezultatų palyginimas su logaritminiu normaliniu metodu. Šiuo atveju yra naudojamas paprastesnė (1) išraiška, neįvertinant  $c$  ir  $X_\sigma$ :

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (14)$$

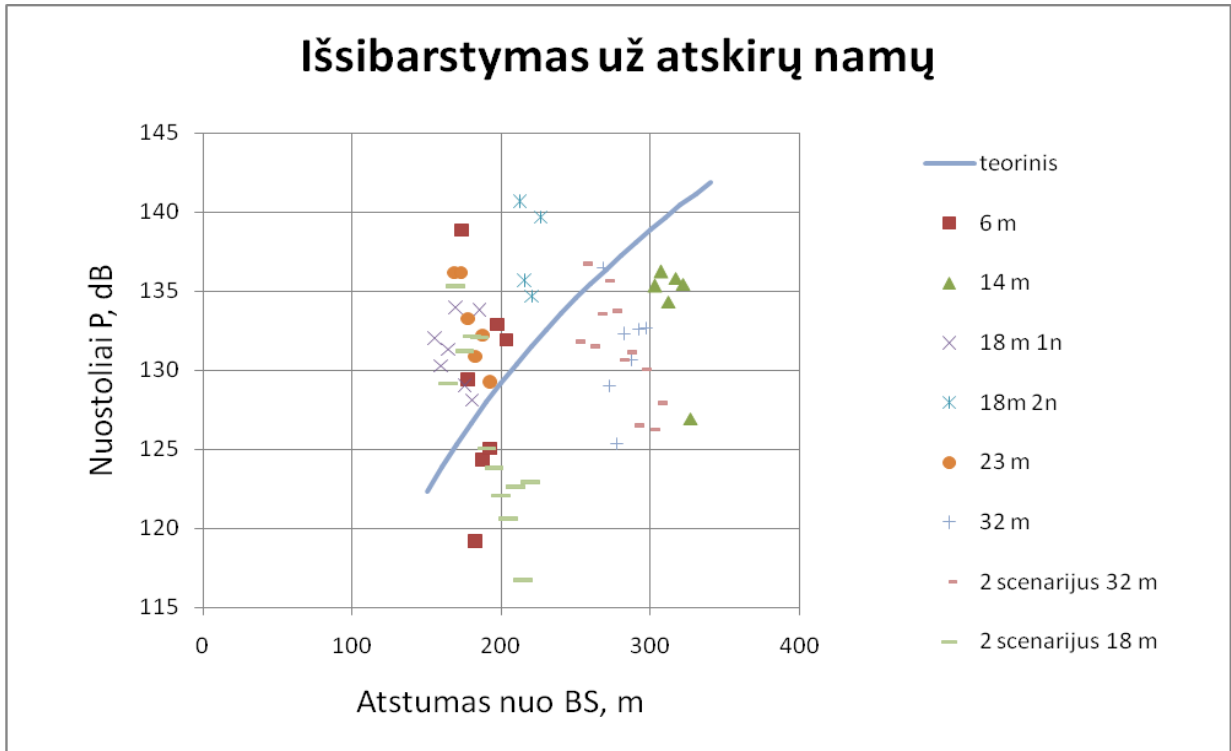
Šių rezultatų palyginimas pateiktas (18 pav.).



18 pav. Eksperimentinių rezultatų ir log-normalinio modelio palyginimas

Matome, kad iš esmės gauti rezultatai atitinka log-normalinį modelį, kai eksponentės rodiklis  $n = 5,5$ . Toks didelis  $n$  yra natūralus, kadangi eksperimentai atlikti teritorijose su daug kliūčių. Matomas didelis duomenų išsibarstymas apie log-normalinio modelio kreivę.

Tačiau panagrinėjus eksperimentinius rezultatus detaliau galima pamatyti, kad tokį išsibarstymą sąlygoja konkretūs pastatai (19 pav.).



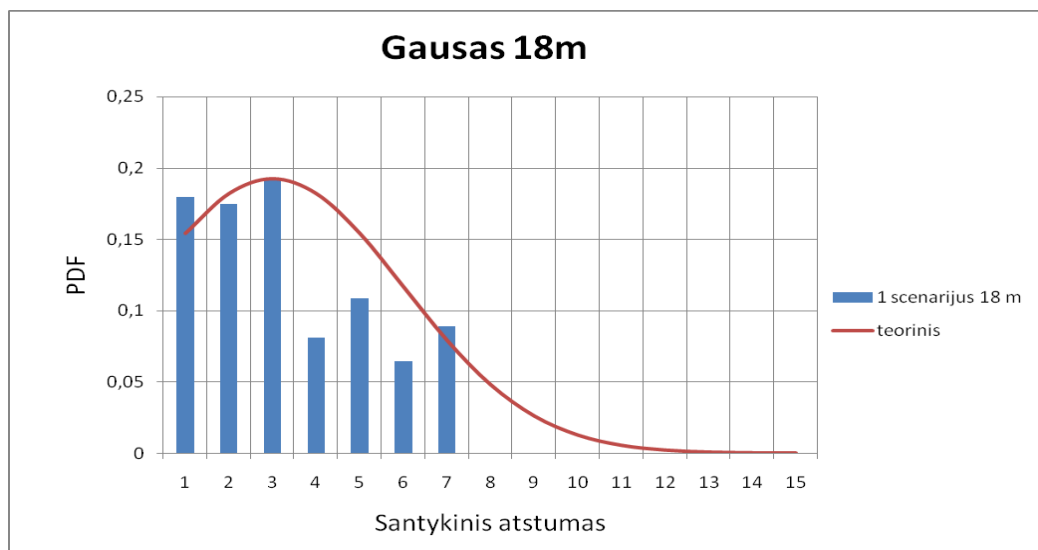
19 pav. Signalu nuostolių kitimas už atskirų pastatų

Aiškiai matosi, kad matuojant už kiekvieno namo atskirai, didinant atstumą nuo BS signalo nuostoliai mažėja. Tokį efektą galima paaiškinti šešėliavimo įtaka, kurią sąlygoja pastato geometrija. Tačiau signalo nuostolių mažėjimas didinant atstumą nuo BS reikšia, kad tokiu atveju mes negalima taikyti šešėliavimo efekto analizei log-normalinio modelio. Taip pat negalima būtų siūlyti savo modelio rezultatų aprašymui, kuris remtusi log-normaliniu dėsnium. Todėl netikslinga toliau analizuoti šešėliavimo efektą naudojant net ir išplėstinį log-normalinį modelį. Todėl tolimesnei šešėliavimo efekto analizei nauduosime stochastinius metodus.

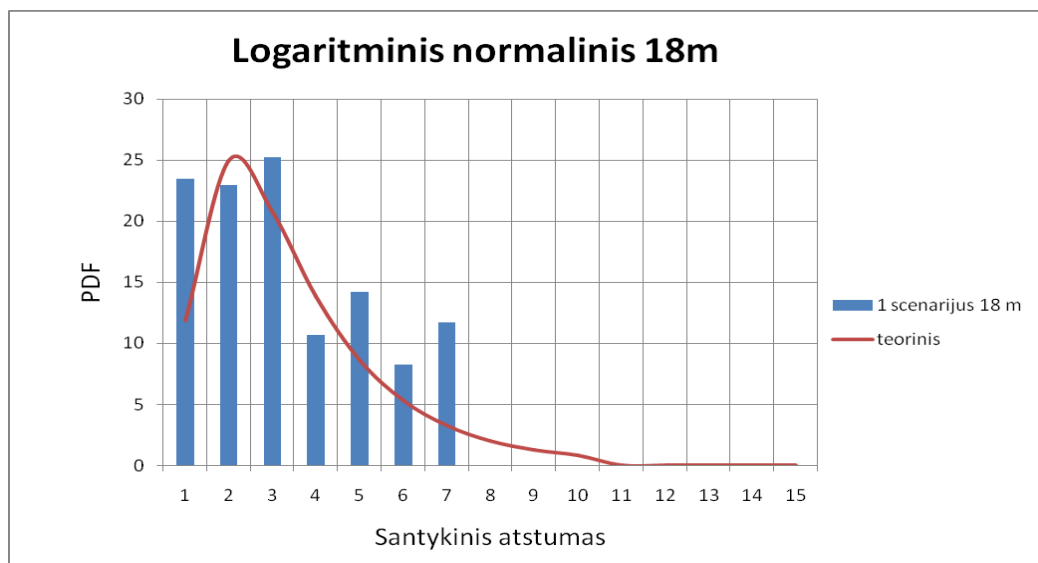
### 3.2. Šėšėliavimo efekto tyrimas stochastinėmis lygtimis

#### 3.2.1. Tikimybės tankio funkcijų atitikimas eksperimentiniams rezultatams

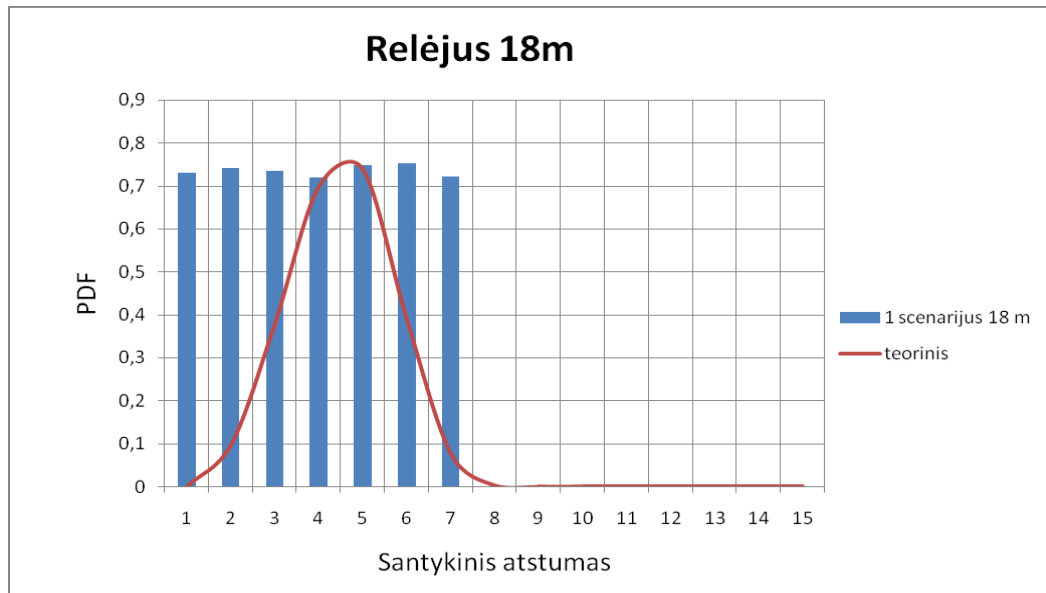
Kaip rodo literatūros analizė, geriausiai rezultatai aproksimuojami Gauso, logaritminio normalinio, Relėjaus ir Nakagami skirstiniais. Pirmi du skirstiniai aprašo situacija, kai yra vyraujantis lėtas fedingas, o du paskutiniai – kai greitas fedingas. Atlikus aproksimacijas buvo pastebėta, kad geriausiai (su mažiausiais nuokrypiais nuo stochastinių kreivių) rezultatus aprašo Gauso skirstinys. 20–23 paveiksluose pateikti rezultatai 1 scenarijui kai namo aukštis yra 18 m.



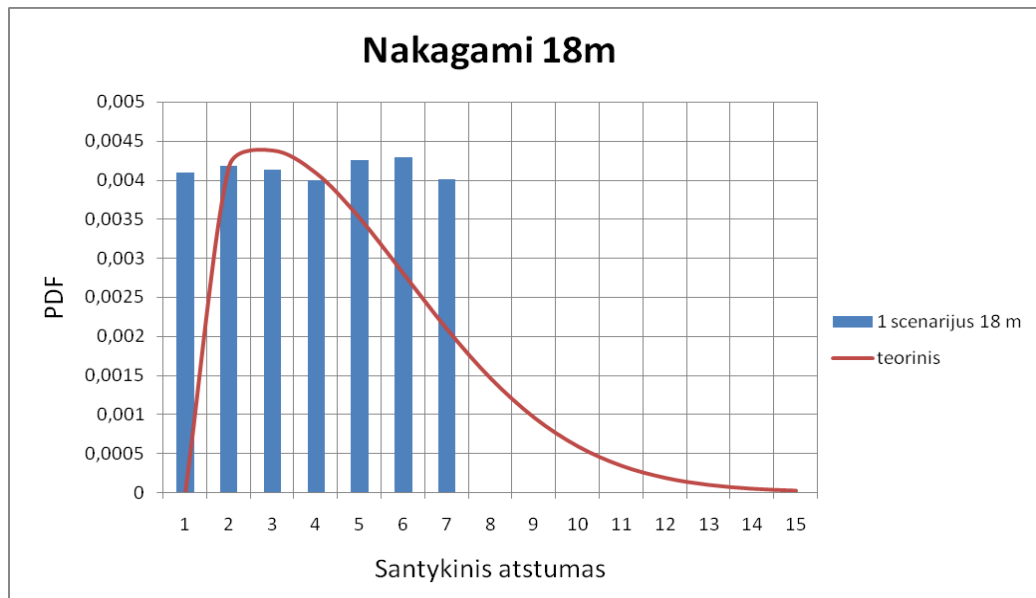
20 pav. Gauso skirstinys



21 pav. Logaritminis normalinis skirstinys



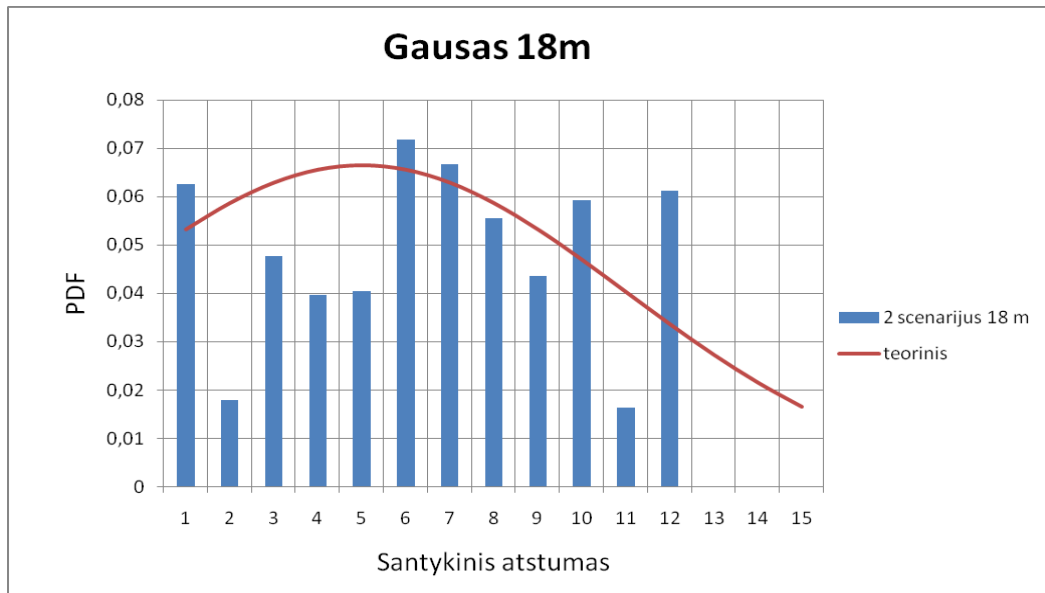
22 pav. Relėjus skirstinys



23 pav. Nakagami skirstinys

Kaip matome iš šių 4 pav., pirmais dviem atvejais (Gauso ir log-normalinio) signalo nuostolių kitimas yra akivaizdus, didinant atstumą nuo bazinės stoties. Tuo tarpu Relėjus ir Nakagami atvejais signalo kitimo tikimybės keičiant atstumą yra beveik pastovus dydis. Todėl galima manyti, kad mūsų atveju vyrauja lėtas fadingas. Be to galima daryti prielaidą, kad pagal signalo kitimo tikimybę galima nustatyti vyraujančio fadingo pobūdį.

2 scenarijaus atveju Gauso skirstinys 18 m pastatui pateiktas (24 pav.).

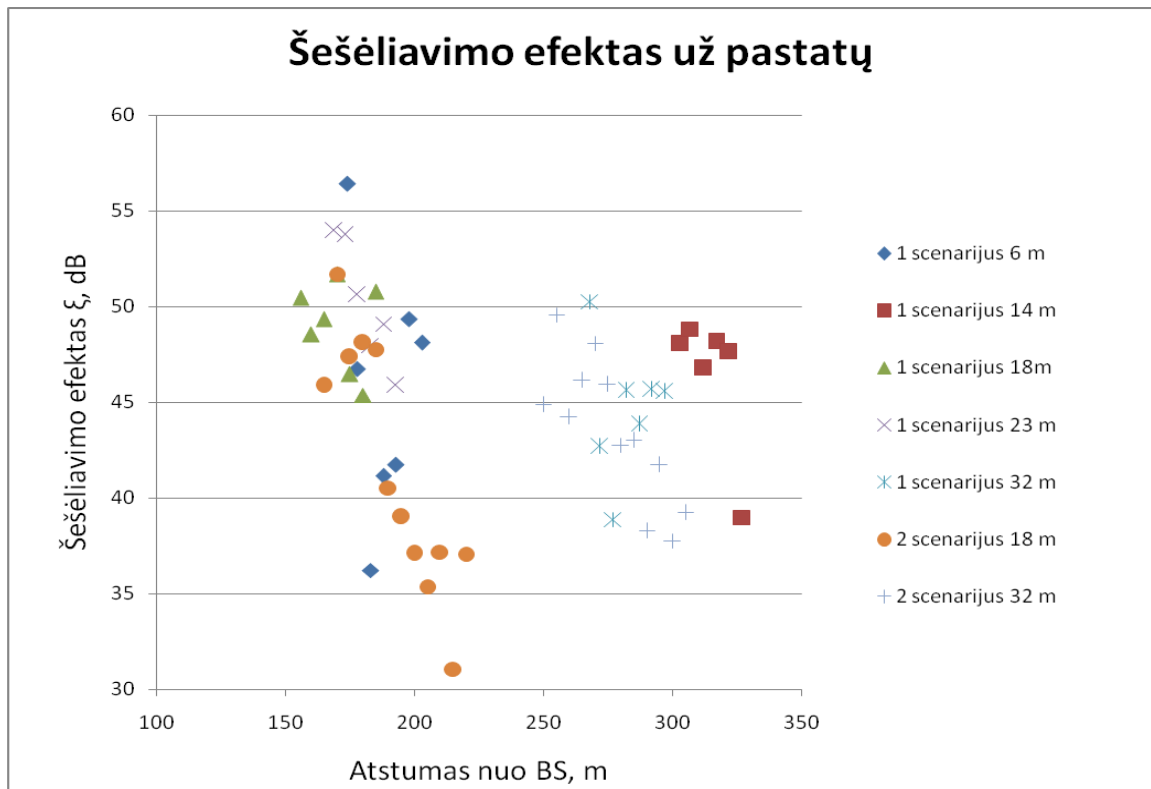


24 pav. Gauso skirstinys (antras scenarijus)

### 3.2.2. Šėšėliavimo efekto kitimas už pastatų

Kaip minėta aukščiau, šėšėliavimo efektas  $\xi$  vertinamas kaip signalo nuostolių matavimo taške  $P$  ir laisvos erdvės nuostolių tame taške  $P'$  skirtumas, t.y.  $\xi = P - P'$ .

Šėšėliavimo efekto įtaka, priklausomai nuo atstumo iki bazinės stoties bei pastatų aukščių, už atskirų pastatų yra pateikta (25 pav.).



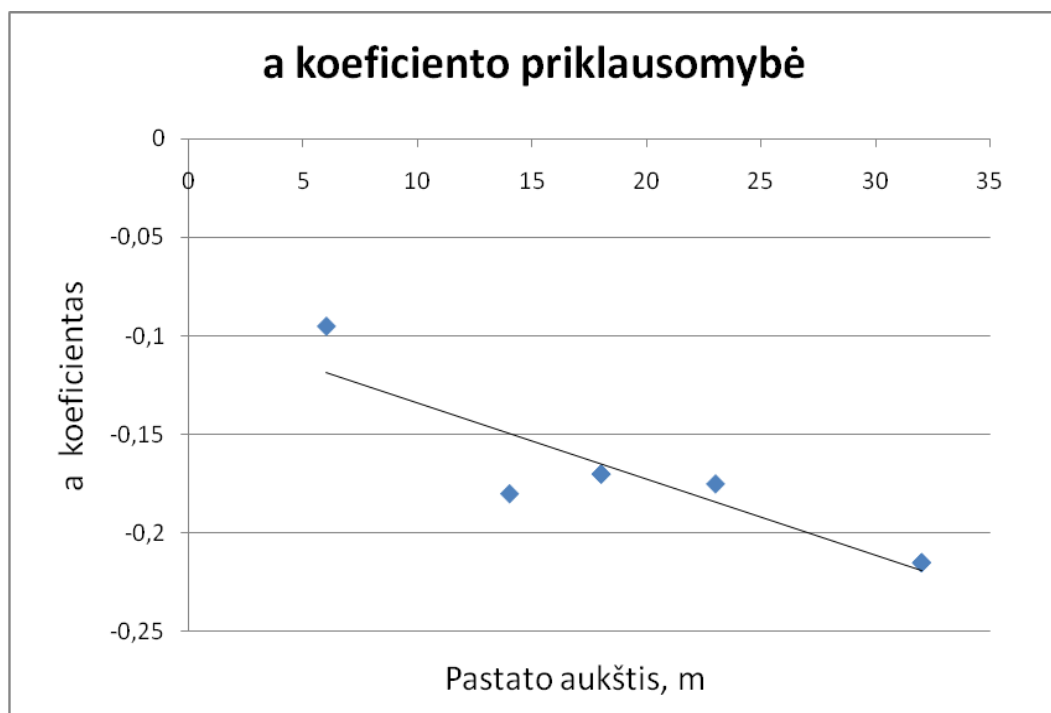
25 pav. Šėšėliavimo efektas  $\xi$  už pastatų

Kaip matome,  $\zeta$  kitimą už pastatų galime aproksimuoti tiesinėmis lygtimis  $y = ax+b$ , kur  $y$  atitiktų  $\zeta$ ,  $x$  – atstumą nuo bazinės stoties. Koeficientų  $a$  ir  $b$  reikšmės pateiktos lentelėje 3.

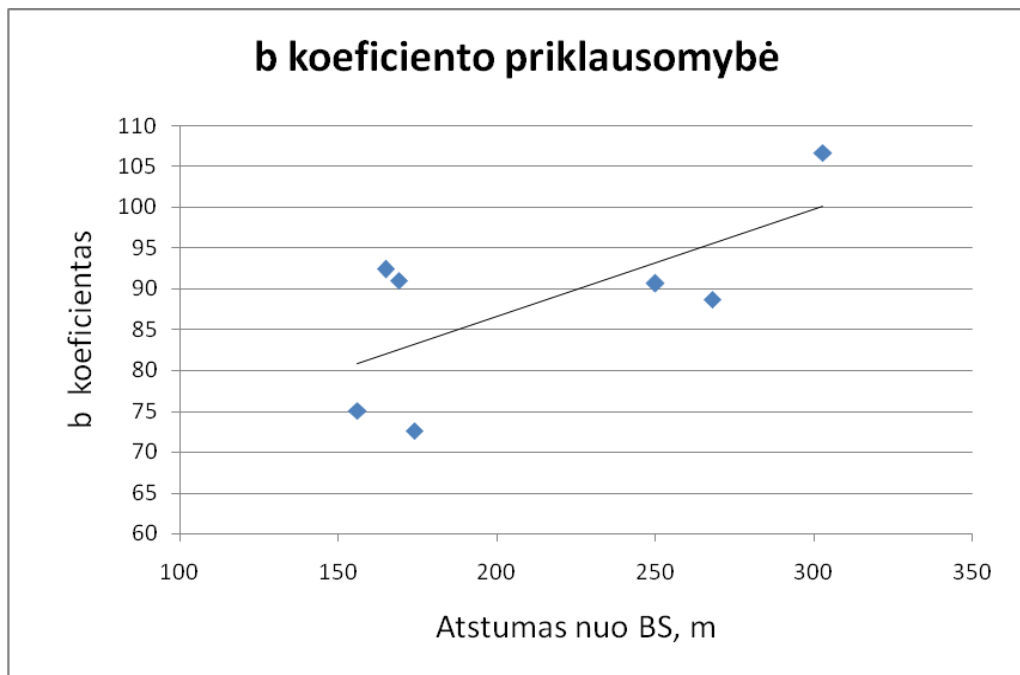
3 lentelė. Tiesinės lygties koeficientų  $a$  ir  $b$  kitimas

Namo aukštis, m	Atstumas nuo BS iki namo, m	Scenarijaus Nr.	Koeficientas $a$	Koeficientas $b$
6	174	1	-0,095	72,6
14	303	1	-0,18	106,7
18	156	1	-0,17	75,1
18	165	2	-0,17	92,4
23	169	1	-0,175	91
32	268	1	-0,215	88,7
32	250	2	-0,215	90,7

Kaip matome iš lentelėje pateiktų duomenų, koeficientas  $a$  priklauso tik nuo namo aukščio. Grafiškai tai pavaizduota (26 pav.).

26 pav. Koeficiento  $a$  priklausomybė nuo pastato aukščio

Tuo tarpu koeficientas  $b$  turi aiškiai priklausomybę nuo atstumo iki bazinės stoties (27 pav.).



27 pav. Koeficiento b priklausomybė nuo atstumo iki BS

Tam tikrus a ir b koeficientų rezultatų išsibarstymus įtakoja atstumas už namo, todėl tai taip pat turi būti įvertinta. Įvertinus šiuos koeficientus, galime išvesti šešėliavimo efekto priklausomybę nuo atstumo iki bazinės stoties ir pastato aukščio:

$$\xi = \{(-0,0047h_{namo} - 0,0796)d_{BS} + [0,2028(d_{BS} - d_{BS-n}) + 44]\} + 8 \quad (15)$$

čia:

$h_{namo}$  – namo aukštis, m;

$d_{BS}$  – atstumas iki bazinės stoties, m;

$d_{BS-n}$  – atstumas už namo, m.

### 3.2.3. Modelio sudarymas panaudojant diferencialines stochastines lygtis

Kaip minėta aukščiau, kiekvieną skirstinį atitinka stochastinė diferencialinė lygtis. Kadangi mūsų atveju geriausiai rezultatus aprašo Gauso skirstinys, tai modelio vystymui naudosime (3) lygtį:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{b}{2\sigma^2} x \text{sign}(x) + \sqrt{\frac{2b}{N_\xi}} \xi(t). \quad (16)$$

Šioje lygtyje:

$x$  – Signalo nuostoliai;

$t$  – Atstumas;



$\xi$  – Triukšmas, t.y. papildomi nuostoliai prie laisvos erdvės nuostolių, kuriuos sukelia šešėliavimas.

Pirmas narys dešinėje lygybės pusėje atitinka nuostolius laisvoje erdvėje, o antras narys – papildomus šešėliavimo nuostolius. Atlikus atitinkamus pakeitimus gauname:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{b}{2\sigma^2} \cdot P' \cdot \text{sign}(P') + \sqrt{\frac{2b}{N_x}} \xi(x), \quad (17)$$

čia

$P'$  – nuostoliai laisvoje erdvėje. Nuostoliai laisvoje erdvėje apskaičiuojami taip:

$$P' = 92,45 + 20 \lg d + 20 \lg f$$

Reikia turėti omeny, kad:

$$\sigma^2 = \frac{2 \cdot b}{N_\xi} \Rightarrow N_\xi = \frac{2 \cdot b}{\sigma^2}. \quad (18)$$

Lygtis (17) turi du nežinomuosius –  $\xi$  ir  $b$ , todėl neturi vienareikšmiško sprendimo, t.y. vienas nežinomasis turi būti pasirenkamas laisvai. Kadangi  $\xi$  galime nustatyti eksperimentiškai, tai laisvai pasirenkamam imame  $b$ .

Įstačius (15) lygtį į (17) bei atlikus integravimą, gauname:

$$PL = -92,45 \cdot \frac{b}{2\sigma^2} \cdot d_{BS} - 20 \cdot \frac{b}{2\sigma^2} \cdot d_{BS} \cdot \lg f - 10 \cdot \frac{b}{\sigma^2} \cdot \frac{d_{BS}}{1000} \lg \frac{d_{BS}}{1000} + \quad (19)$$

$$+ 10 \cdot \frac{b}{\sigma^2} + \frac{1}{\sigma} \cdot (0,047h_n - 0,0796) \cdot \frac{d_{BS}^2}{2} + 0,2028 \cdot (d_{BS} - d_{BS-n}) \cdot d_{BS} + 8$$

čia

$d_{BS}$  – atstumas nuo bazinės stoties iki matuojamos vietos, m;

$f$  – dažnis, GHz;

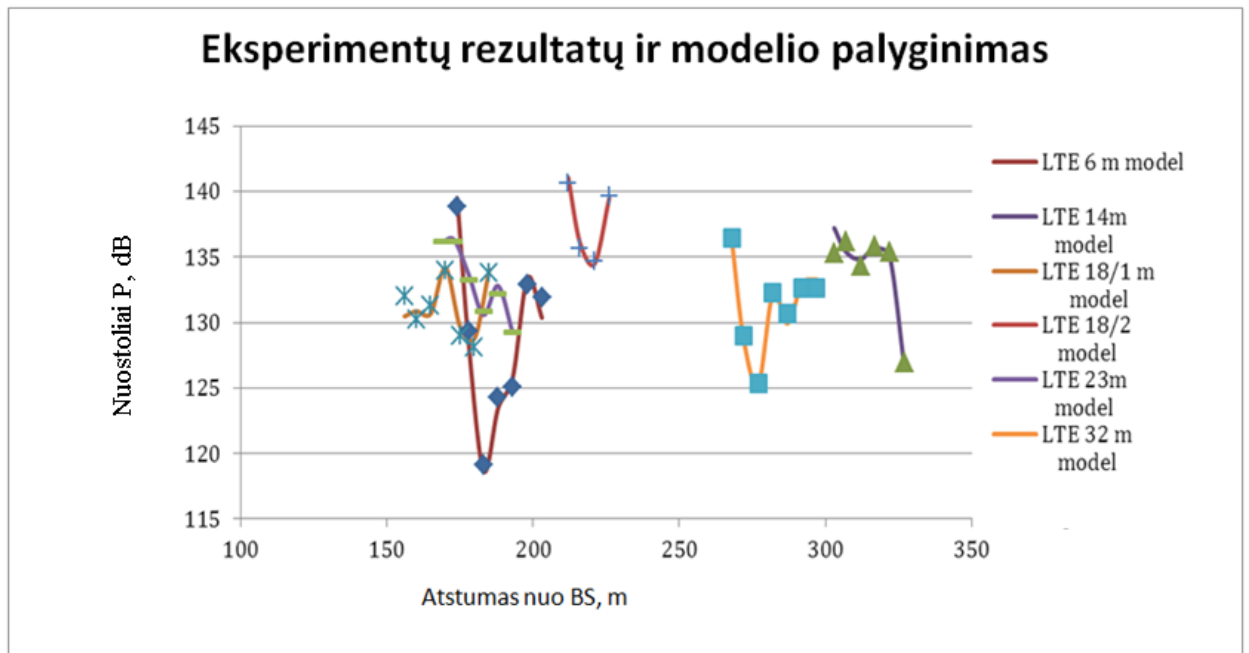
$\sigma^2$  – dispersija;

$h_n$  – pastato aukštis, m;

$d_{BS-n}$  – atstumas nuo namo iki matuojamos vietos, m.

### 3.2.4. Eksperimentinių rezultatų ir modelio palyginimas

28 pav. pavaizduotas eksperimentinių rezultatų ir gauto modelio palyginimas. Laisvai pasirenkant koeficientą  $b$ , galime labai tiksliai aprašyti eksperimentinius rezultatus.



28 pav. Eksperimentinių rezultatų ir modelio palyginimas

Tai parodo, kad iš esmės modelis (19) yra galiojantis, nes priešingu atveju rezultatai nebūtų aprašomi tiksliai. Koeficiento  $b$  kitimo ribos [21,9; -3.504].

Skaičiavimai rodo, kad egzistuoja labai stipri koreliacija  $CORR$  tarp koeficiento  $b$  ir dispersijos  $\sigma^2$ . Mūsų atveju,  $CORR \approx 0.956$ . Vadinasi, ateityje atlikus gilesnę tokios koreliacijos analizę, bus galima objektyviai apibrėžti koeficiento  $b$  kitimą.

## IŠVADOS

1. Nustatyta, kad bendru atveju signalo nuostolių kitimas miesto sąlygomis, neatsižvelgiant į atskirų pastatų įtaką, iš esmės atitinka logaritminį normalinį modelį su aukštu eksponentės rodikliu;
2. Nustatyta, kad signalo nuostolių kitimas už atskirų pastatų neatitinka logaritminio normalinio modelio aprašomo kitimo, todėl negali būti naudojamas šešėliavimo efekto analizei;
3. Pasiūlytas naujas modelis šešėliavimo efekto tyrimui už pastatų 4G+ technologijos atvejui, kuris remiasi gauso skirstinio stochastine diferencialine lygtimi;
4. Šio modelio didžiausias trūkumas – koeficiento  $b$  nustatymas. Nors nustatyta didelė koreliacija tarp  $b$  koeficiento ir dispersijos (t.y. matavimo tikslumo), tačiau detalesnei šio koeficiento analizei reikia atlikti papildomus tyrimus;
5. Šis modelis gali būti naudojamas tiriant šešėliavimo efektus už pastatų būsimai 5G technologijai.

## INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. REPORT ITU-R M.2134 Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). ITU-R. November 2008. Prieiga per internetą: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf)
2. LTE-Advanced – Evolving LTE towards IMT-Advanced. Vehicular Technology Conference Fall 2008. Ericsson Research. Stockholm. Prieiga per internetą: [https://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/journal\\_conference\\_papers/wireless\\_access/VTC08F\\_jading.pdf](https://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/journal_conference_papers/wireless_access/VTC08F_jading.pdf)
3. Draft new Report ITU-R M.[IMT-2020.TECH PERF REQ] - Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). February 2017. Prieiga per internetą: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en>
4. ITU agrees on key 5G performance requirements for IMT-2020. Geneva, 23 February 2017. Prieiga per internetą: <http://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2017-PR04.aspx>
5. Mike, Snider (July 14, 2016). FCC Approves Spectrum for 5G Advances. Prieiga per internetą: <https://www.usatoday.com/story/tech/news/2016/07/14/fcc-approves-spectrum-5g-advances/87081242/>
6. Kari Pietikäinen, Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Internet presentation, 2005. Prieiga per internetą: [http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004\\_2005\\_slides/ofdm\\_text.pdf](http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/ofdm_text.pdf)
7. Dragan Samardzija and Narayan Mandayam. Pilot-Assisted Estimation of MIMO Fading Channel Response and Achievable Data Rates. IEEE Transactions on Signal Processing (Volume: 51, Issue: 11, Nov 2003). Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1237416>
8. LEONARD J. CIMINI, JR. Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. COM-33, NO. 7, JULY-1985. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1096357>

9. Q.T. Zhang, X.Y. Zhao, Y.X. Zeng and S.H. Song. Efficient Estimation of Fast Fading OFDM Channels. Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on 11-15 June 2006. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4024763>
10. Jeff Castura and Yongyi Mao. Rateless Coding over Fading Channels. IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 10, NO. 1, JANUARY 2006. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1576565>
11. Yuanyuan Ma, Dongfeng Yuan, Haixia Zhang. Fountain Codes and Applications to Reliable Wireless Broadcast System. Information Theory Workshop, 2006. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4119256>
12. Hassan Hamdoun, Pavel Loskot, Timothy O'Farrell. Implementation Trade-Offs of Fountain Codes in LTE and LTE-A. 7th International ICST Conference on Communications and Networking, 2012. Prieiga per internetą:  
<https://www.computer.org/csdl/proceedings/chinacom/2012/2698/00/06417519.pdf>
13. AHASANUN NESSA, MICHEL KADOCH, AND BO RONG. Fountain Coded Cooperative Communications for LTE-A Connected Heterogeneous M2M Network. August 24, 2016. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7551214>
14. Theodore S. Rappaport, Shu Sun, Mimma Mayzus, Hang Zhao. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! IEEE 10 May 2013. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6515173/>
15. Theodore S. Rappaport, Felix Gutierrez, Eshar Ben-Dor. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications. 20 December 2012. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6387266>
16. Sundeep Rangan, Theodore S. Rappaport, Elza Erkip. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges. IEEE 05 February 2014. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6732923>

17. Hang Zhao, Rimma Mayzus, Shu Sun. 28 GHz Millimeter Wave Cellular Communication Measurements for Reflection and Penetration Loss in and around Buildings in New York City. IEEE 07 November 2013. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6655403>
18. J. C. Reyes-Guerrero, Gordan Sisul, Luis A. Measuring and Estimating the Propagation Path Loss and Shadowing Effects for Marine Wireless Sensor Networks at 5.8 GHz. IEEE 24 January 2013. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6419212>
19. Jean-Marc Kelif, Stephane Senecal, Marceau Coupechoux, Constant Bridon. Analytical Performance Model for Poisson Wireless Networks with Pathloss and Shadowing Propagation. IEEE 19 March 2015. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7063651>
20. J. Turkka, M. Renfors. Path Loss Measurements for a Non-Line-of-Sight Mobile-to-Mobile Environment. IEEE 06 January 2009. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4740270>
21. Seyran Khademi, Sundeep Prabhakar Chepuri, Zoubir Irahauten. Channel Measurements and Modeling for a 60 GHz Wireless Link Within a Metal Cabinet. IEEE 13 May 2015. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7106513>
22. Dilip Janarthanan, Investigate of Signal Path Losses in Microcells for UMTS and LTE – A Technologies, 2016.
23. HUAWEI E5186. Prieiga per internetą:  
[http://www.modemas.lt/4g\\_4g\\_3g-marsrutizatorius-e5186](http://www.modemas.lt/4g_4g_3g-marsrutizatorius-e5186)

## PRIEDAI

### Priedas 1. Matavimų už 5 aukštų pastato rezultatai:

NR	RSRP	RSRQ	RSSI
1	-83,1	-6,7	-68
2	-85,4	-6,3	-74,1
3	-84,5	-7,2	-70
4	-84,2	-6,8	-71
5	-84,8	-6,9	-70,9
6	-78,8	-6,7	-63,9
7	-76,7	-6,1	-62,6
8	-75,7	-7	-60,9
9	-74,9	-6,3	-59,4
10	-76	-7,2	-61,4
11	-68,8	-5,9	-55,5
12	-75,6	-6	-61,7

**Priedas 2. Matavimų už 9 aukštų pastato rezultatai:**

<b>NR</b>	<b>RSRP</b>	<b>RSRQ</b>	<b>RSSI</b>
<b>1</b>	-95,8	-19,3	-70,6
<b>2</b>	-96,4	-12,9	-75,5
<b>3</b>	-97	-15,2	-70,3
<b>4</b>	-94,3	-16,4	-72,4
<b>5</b>	-91,3	-11,2	-74,5
<b>6</b>	-91,7	-12,2	-72,5
<b>7</b>	-86,9	-12,2	-69,5
<b>8</b>	-90,3	-10,7	-69,9
<b>9</b>	-89,1	-14,4	-65,3
<b>10</b>	-87,1	-10,2	-68,9
<b>11</b>	-87,5	-12	-65,1
<b>12</b>	-90,7	-14,2	-66,7