



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Signalų sklaidimo BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje**  
**AVS-BO tyrimas**  
Baigiamasis magistro projektas

---

**Jaunius Judackas**  
Projekto autorius

**Doc. Dr. Saulius Japertas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2018**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Signalų sklaidimo BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje**  
**AVS-BO tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Aeronautikos inžinerija (621H40001)

---

**Jaunius Judackas**  
Projekto autorius

**Doc. Dr. Saulius Japertas**  
Vadovas

**Doc. Dr. Vitas Grimaila**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2018**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Jaunius Judackas

## **Signalų sklaidimo BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje**

### **AVS-BO tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Jauniaus Judacko, baigiamasis projektas tema „Signalų sklaidimo BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje AVS-BO tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Studijų programa Aeronautikos inžinerija (621H40001)

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO  
UŽDUOTIS**

Studentui(-ei)

1. Baigiamojo projekto tema:

Signalo sklidimo BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje AVS-BO tyrimas. Investigation of Signal Propagation in GCS-UAV Hop of UAV Repeater System

2. Projekto tikslas ir uždaviniai:

**Darbo tikslas** – ištirti signalo sklidimą BO retransliatoriaus sistemos AVS-BO atkarpoje. Tikslui pasiekti reikia įgyvendinti šiuos uždavinius: atlikti literatūros analizę, sudaryti signalo sklidimo matematinį modelį, atlikti eksperimentą su sukurtu matematinium modeliu, atnaujinti modelį, remiantis atlikto eksperimento rezultatais bei pateikti išvadas ir rekomendacijas.

3. Pradiniai Projekto duomenys: –

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos: –

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Įvadas. Ryšio užtikrinimo technologijos. Radijo signalo sklidimas. Radijo signalo retransliavimas. Matematinio modelio sudarymas. Signalo sklidimo tyrimas. Modelio koregavimas. Išvados.

6. Grafinės Projekto dalies sudėtis: –

7. Projekto konsultantai: –

Magistrantas: .....  
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas.....  
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas.....  
(vardas, pavardė, parašas, data)

## Turinys

<b>Terminų ir sąvokų žodynas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Ryšio užtikrinimo technologijos.....</b>	<b>13</b>
1.1. Licencijuoti dažniai.....	14
1.1.1. Palydovinis ryšys.....	14
1.1.2. Mobilusis ryšys.....	14
1.2. Nelicencijuoti dažniai .....	15
<b>2. Radijo signalo sklidimas .....</b>	<b>16</b>
2.1. Radijo signalo sklidimo mechanizmai.....	16
2.2. Signalo sklidimas laisvoje erdvėje.....	17
2.3. Fedingas .....	18
2.3.1. Šešėliavimo efektas .....	18
2.3.2. Log-atstumo formulė .....	19
2.3.3. Skirstiniai.....	19
2.4. Signalo sklidimo tyrimai.....	20
<b>3. Radijo signalo retransliavimas.....</b>	<b>22</b>
<b>4. Matematinio modelio sudarymas.....</b>	<b>24</b>
4.1. Log-normalinio skirstinio analizė.....	24
4.2. Modelių palyginimas .....	27
<b>5. Signalo sklidimo tyrimas .....</b>	<b>29</b>
5.1. Įranga .....	29
5.2. Atlikto tyrimo metodika.....	31
5.2.1. Paklaidos .....	33
5.3. Matavimų rezultatai .....	35
<b>6. Modelio koregavimas .....</b>	<b>37</b>
<b>Išvados.....</b>	<b>40</b>
<b>Literatūros sąrašas.....</b>	<b>41</b>
<b>Priedai .....</b>	<b>43</b>

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Komunikacijos AVS-BO-BO aiškinamoji schema .....	11
2 pav. LTE ryšio padengimo žemėlapis Lietuvos teritorijoje [6] .....	14
3 pav. Log-normalinio skirstinio PDF kai $\mu = 0$ [17] .....	20
4 pav. Tikimybinis paklaidos pasiskirstymas Tammela regione [11] .....	21
5 pav. Signalo retransliavimo schema [22] .....	22
6 pav. Plačiajuosčio retransliatoriaus schema [22] .....	23
7 pav. Šešėliavimo efekto priklausomybės nuo atstumo grafikas.....	25
8 pav. Siūlomo log-normalinio ir CI modelių palyginimas .....	28
9 pav. Kylantis BO .....	29
10 pav. Spektro analizatorius Rohde&Schwarz FSH8.....	30
11 pav. Ryšio modulis NRF24L01+PA+LNA su maitinimo plokšte .....	30
12 pav. Tyrimo aiškinamoji schema. Čia h – aukštis nuo žemės iki BO, d – atstumas tarp AVS ir spektro analizatoriaus RX, x – atstumas tarp BO ir spektro analizatoriaus RX. ....	32
13 pav. 1 km atkarpa Mokyklos g-vėje (Kauno raj.) .....	33
14 pav. Normalinio pasiskirstymo funkcija, kai atstumas tarp BO ir RX atitinkamai 50m ir 700m .....	35
15 pav. Signalo stiprumo priklausomybės nuo atstumo grafikas.....	36
16 pav. Apskaičiuotų pagal Log-normalinį modelį bei praktiškai gautų rezultatų palyginimas.....	36
17 pav. Apskaičiuotų ir praktiškai gautų rezultatų santykio grafikas, bei rezultatus aproksimuojanti kreivė.....	38
18 pav. Patikslinto log-normalinio modelio palyginimas su pirminiu modeliu ir praktiškai gautais rezultatais .....	38

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Šešėliavimo efekto priklausomybė nuo atstumo .....	25
2 lentelė. BO techninės charakteristikos .....	29
3 lentelė. Tyrimo aiškinamojoje schemoje naudojamų parametrų reikšmės .....	32
4 lentelė. Santykinės matavimų paklaidos kiekviename taške.....	34
5 lentelė. Standartinis nuokrypis kiekviename taške .....	34
6 lentelė. Atliktų matavimų rezultatai .....	35
7 lentelė. Praktiškai gautų ir apskaičiuotų rezultatų santykiai .....	37
8 lentelė. Teorinio modelio santykinės paklaidos lyginant su praktiniais rezultatais .....	39

Judackas Jaunius. Signalo sklaidimo BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje AVS-BO tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: BO, signalo, sklaidimas, retransliavimas, bepiločiai, orlaiviai, matematinis modelis.

Kaunas, 2018. 43 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe trumpai apžvelgiamos mažų BO pritaikymo galimybės civiliniame bei komerciniame sektoriuose. Vienas iš tokių būdų – radijo ryšio retransliavimas panaudojant BO. Darbe analizuojame situacija kai BO panaudojamas kaip retransliatorius, kad perduoti valdymo signalą kitam BO. Siekiant retransliavimą sėkmingai įgyvendinti praktikoje, reikalingi papildomi tyrimai bei matematiniai metodai, kurie padėtų nustatyti signalo sklaidimo charakteristikas tokioje sistemoje. Šiame darbe siūlomas matematinis modelis, kuriuo remiantis galima nustatyti signalo lygį BO retransliatoriaus sistemos atkarpoje AVS– BO. Atlikus signalo sklaidimo tyrimą, gauti rezultatai palyginti su siūlomu modeliu.



Judackas Jaunius. Investigation of Signal Propagation in GCS-UAV hop of UAV Repeater System. Master's Final Degree Project supervisor assoc. prof. dr. Saulius Japertas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: UAV, signal, propagation, repeater, system, UAS, unmanned, aerial, vehicle.

Kaunas, 2018. 43 pages.

### **Summary**

This research analyzes opportunities to utilize small UAVs to bring value to civil and commercial sector. One of the ways to achieve this is by using small UAVs as radio signal repeaters. This could greatly increase the number of situations in which small UAVs could be used. To allow practical implementation of such systems, more research is needed, as well as means to evaluate signal propagation in such systems. This work proposes mathematical model for signal propagation evaluation in GCS-UAV hop of UAV repeater system. Practical experiment results are compared to proposed model.

## Terminų ir sąvokų žodynas

BO – bepilotis orlaivis

AVS – antžeminė valdymo stotis

UHF – labai aukštas dažnis (angl. – *Ultra High Frequency*)

LOS – matymo laukas (angl. – *Line of Sight*)

NLOS – už matymo lauko (angl. – *Non Line of Sight*)

EIRP – ekvivalentinė izotropinė išspinduliuojama galia (angl. – *Equivalent Isotropic Radiated Power*)

PDF – tikimybės tankio funkcija (angl. – *Probability Density Function*)

CDF – sukaupta pasiskirstymo funkcija (angl. – *Cumulative Distribution Function*)

FSL – nuostoliai laisvoje erdvėje (angl. – *Free Space Loss*)

## Išvadas

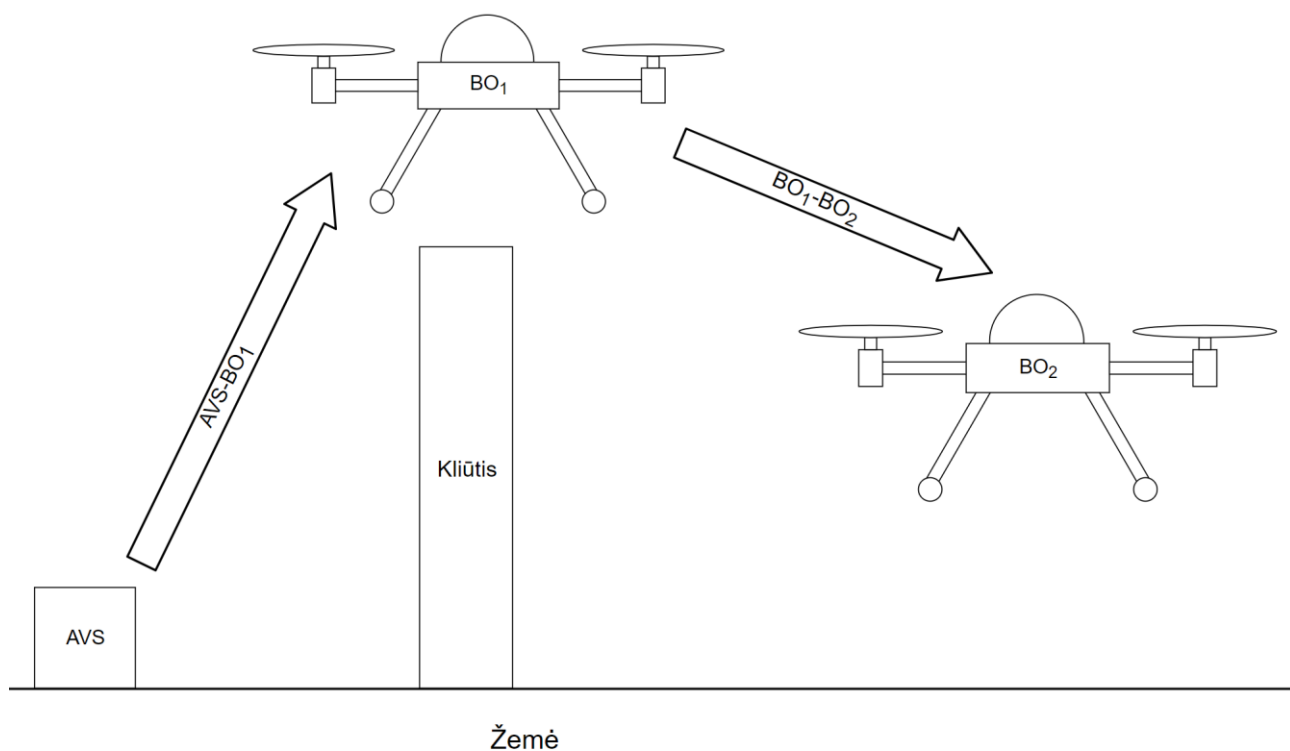
Bepilotis orlaivis (toliau – BO) – tai autonominis arba nuotoliniu būdu valdomas orlaivis, kuriame nėra įgulos. Šiuo metu bepiločiai orlaiviai daugiausiai naudojami karyboje, tačiau kuo toliau, tuo dažniau pritaikomi ir civiliniais tikslais. Civiliniai BO tampa vis labiau prieinami plačiai visuomenei ir gali būti panaudojami įvairiais tikslais. Didžiąją dalį civilinių BO rinkos sudaro mėgėjiški orlaiviai, skirti fotografavimui bei filmavimui. Tokius BO paprasta įsigyti technikos parduotuvėse, jų kainos svyruoja nuo 50 iki 5000 EUR. Tokiems BO įsigyti bei pilotuoti paprastai nereikalingi specialūs leidimai.

Vis dažniau BO atranda pritaikymą ir komerciniame sektoriuje. Kompanijos skiria dideles lėšas tyrimams, kurie padėtų panaudoti BO teikiamą naudą verslui. Pasaulinės kompanijos *Amazon*, *DHL*, *Google*, *Facebook*, atlieka tyrimus su įvairiais BO siekdamos pirmosios pasiūlyti siuntų pristatymo, internetinio ryšio tiekimo bei kitas paslaugas. Universitetuose atliekami tyrimai, kaip pritaikyti BO teikiant greitąją medicininę pagalbą. Tokie orlaiviai yra kur kas brangesni ir jų kainos gali siekti šimtus tūkstančių eurų. Šiems orlaiviams taikomi aukšti saugumo reikalavimai. Dauguma brangesnių BO palaiko ne tik rankinį valdymą, bet turi ir autonominius skrydžio režimus, kurių metu BO yra valdomas jame sumontuotais jutikliais.

Pagal komunikacijos tipą, BO gali būti skirstomi į tiesioginio matomumo (angl. – *Line of Sight*, LOS) ir netiesioginio matomumo (angl. – *Non Line of Sight*, NLOS). LOS tipo orlaiviais operacijos gali būti atliekamos tik tiesioginio matomumo zonoje. Tuo tarpu NLOS orlaiviai šio apribojimo neturi. NLOS komunikacijų tipas paplitęs kariniams tikslams taikomuose BO, kurie dažnai valdomi palydoviniu ryšiu. Mažuose civilinės paskirties BO ryšys dažniausiai užtikrinamas naudojant 2,4 GHz dažnį, pagal ITU (angl. – *International Telecommunication Union*) klasifikaciją priskiriamą UHF (angl. – *Ultra High Frequency*) diapazonui. Svarbu paminėti, kad šio dažnio naudojimui nereikalingi specialūs leidimai, t.y. šis dažnių diapazonas priskiriamas nelicencijuotiems dažniams. Šis dažnis taip pat patogus tuo, kad ryšiui užtikrinti nedideliu atstumu (~2 km) reikalingas iš dalies nedidelės galios (100 mW) siųstuvai, tai ir padaro civilinius BO tokius prieinamus. Tačiau aukštas dažnis taip pat turi ir savų trūkumų – jis labai jautrus trikdžiams bei kliūtims tarp imtuvo ir siųstuvo.

### Darbo problematika ir aktualumas

Dėl mėgėjiškuose BO komunikacijai naudojamo UHF signalo, mažų BO panaudojimas yra stipriai ribojamas aplinkos sąlygų. Kliūtys - medžiai, pastatai bei kalvos trukdo signalo sklidimui, o tai neleidžia pasiekti maksimalaus duomenų perdavimo atstumo arba stabilus ryšys išvis negali būti užtikrintas. Šią problemą galima spręsti panaudojant tarpinį BO, kuris veiktų kaip signalo retransliatorius tarp antžeminės valdymo stoties (toliau – AVS) ir valdomo BO (1 pav.).



**1 pav. Komunikacijos AVS-BO-BO aiškinamoji schema**

Signalas iš AVS pirmiausia priimamas pasirinktame aukštyje skrendančiame retransliatoriuje (BO<sub>1</sub>), o šis savo ruožtu retransliuoja signalą valdomam BO (BO<sub>2</sub>). Retransliavimas leidžia užtikrinti geresnę ryšio kokybę, nes ryšio kanalas AVS-BO<sub>1</sub>-BO<sub>2</sub> leidžia išvengti kliūtis, kuri slopina signalą.

Tokia valdymo schema atveria naujas mažų BO pritaikymo galimybes. BO gali būti valdomi naudojant mažos galios siųstuvus ir nedideles antenas, neprisijungiant prie mobilaus ar palydovinio ryšio. Taip pat išvengiama didžiosios dalies kliūčių signalo sklaidimo kelyje, todėl pagerėja BO panaudojimo potencialas kalvotose, miškingose bei urbanistinėse teritorijose.

### **Naujumas**

Šiuo metu Lietuvoje toks produktas nėra kuriamas, taip pat nėra atliekami tyrimai, detaliam nagrinėjantys signalo sklaidimą BO aplinkoje arba tokie tyrimai nėra viešai prieinami. Šios srities analizė bei atitinkamos technologijos sukūrimas galėtų būti naudingi įvairiuose sektoriuose.

## **Darbo tikslas ir uždaviniai**

**Darbo tikslas** – ištirti signalo sklidimą BO retransliatoriaus sistemos AVS-BO atkarpoje. Tikslui pasiekti reikia įgyvendinti šiuos uždavinius:

- atlikti literatūros analizę;
- sudaryti signalo sklidimo matematinį modelį;
- atlikti eksperimentą su sukurtu matematinium modeliu;
- atnaujinti modelį, remiantis atlikto eksperimento rezultatais;
- pateikti išvadas ir rekomendacijas.

## 1. RYŠIO UŽTIKRINIMO TECHNOLOGIJOS

Komunikacijos tarp BO ir AVS užtikrinimas yra labai svarbus. Šis ryšys yra ypač svarbus, jei BO nėra visiškai autonomiškas ir reikalauja tam tikro operatoriaus įsikišimo. BO gali reikalauti skirtingo lygio operatoriaus įsikišimo. Vienose sistemose operatorius gali koreguoti skrydžio planą, parinkdamas maršruto taškus, kitose – tiesiogiai valdyti orlaivį. Priklausomai nuo valdymo sudėtingumo, skiriasi ir reikalavimai, keliami komunikacijos posistemei. Paprastai, kuo sudėtingesnis yra orlaivio valdymas, tuo svarbesnė yra ryšio kokybė, stabilumas ir patikimumas. Tiesioginiam BO valdymui labai svarbu minimizuoti laiką, per kurį valdymo signalas pasiekia orlaivį.

Ryšio kanalas tarp AVS ir BO gali būti keleto tipų: dvipusiu ryšiu (angl. – *simplex*), kada signalai tuo pačiu metu arba tik priimami, arba tik perduodami, arba dvipusiu ryšiu (angl. – *duplex*), kada signalai vienu metu perduodami ir priimami ta pačia ryšio linija. Kadangi simplex kanalas vienu metu leidžia duomenis perduoti tik viena kryptimi, tai dažniausiai toks komunikacijos tipas naudojamas paprastuose BO, kai skrydis atliekamas LOS sąlygomis. Tokiu atveju operatorius tiesiogiai mato BO ir atgalinis ryšys nėra būtinas. Naudojant BO operacijoms atlikti NLOS sąlygomis, t. y. kai BO nėra tiesioginėje operatoriaus matomumo zonoje, naudojamas duplex ryšio kanalo tipas [1]. Šis komunikacijos tipas leidžia BO ne tik priimti valdymo komandas, tačiau tuo pačiu metu ir siųsti papildomus duomenis iš BO į AVS. Iš BO gali būti siunčiami telemetriniai duomenys (aukštis, greitis, geografinės koordinatės, baterijos įtampa ir pan.) arba kito tipo informacija: nuotraukos, vaizdo ir garso medžiaga ir pan. Telemetriniams duomenims perduoti paprastai užtenka mažesnės greitaiveikos (56 kbps) ryšio kanalo, nei norint perduoti kito tipo informaciją (ne mažiau 8 Mbps aukštos kokybės vaizdui transliuoti) [1]. Dėl šios priežasties valdymui ir telemetrijai naudojama viena ryšio technologija, o papildomai informacijai – kita.

Naudojamų ryšio technologijų pasirinkimas taip pat priklauso nuo BO paskirties. Dažniausiai naudojamos palydovinio, mobilaus bei belaidžio tinklo ryšio technologijos arba įvairių nelicencijuotų dažnių radijo bangos [1, 2]. Šių technologijų pasirinkimą taip pat lemia aplinka, kurioje bus naudojamas BO, reikalingas signalo pateikiamumas, skiriami kaštai, atstumas, per kurį bus valdomas BO.

Civiliniuose BO naudojami ICAO (angl. – *International Civil Aviation Organisation*) numatyti dažniai arba nelicencijuoti dažniai, kuriems nereikia specialių leidimų. Įvairūs reikalavimai keliami BO svarstomi forumų metu. 2006 metais organizacija EUROCAE (angl. – *European Organisation for Civil Aviation Equipment*) subūrė darbinę grupę WG-73 (angl. – *Working Group 73*), kad parengtų reikalavimus BO integravimui į bendrą oro erdvę [3, 4].

Toliau bus apžvelgti pagrindiniai ryšio tipai, jų privalumai bei trūkumai, aplinkybės, kuriomis šie ryšio užtikrinimo metodai dažniausiai naudojami.

## 1.1. Licencijuoti dažniai

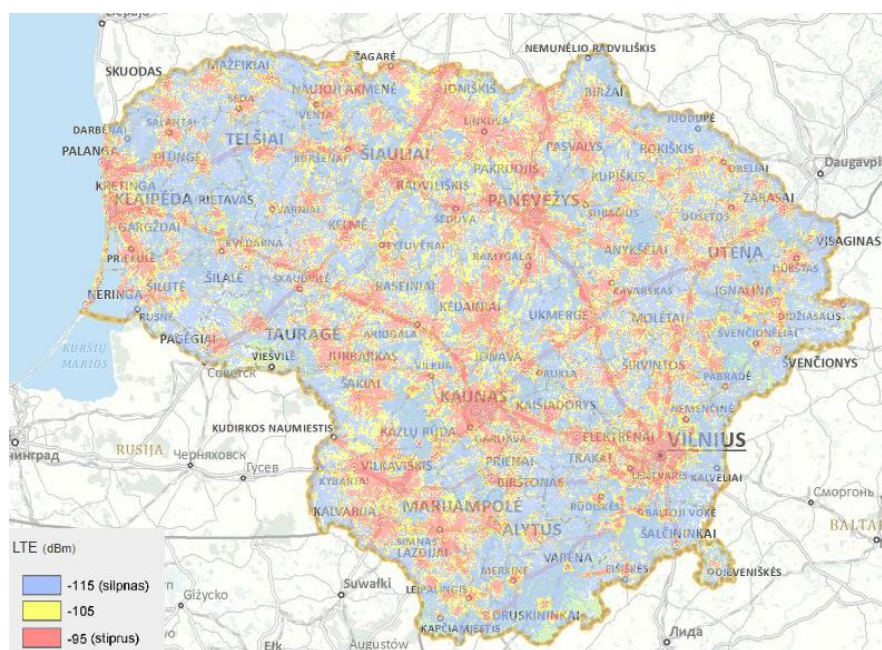
Šiame poskyryje trumpai aptariamos technologijos naudojančios licencijuotus radijo dažnius. Šios technologijos pritaikomos BO, tačiau kai kuriais atvejais nėra prieinamos visiems vartotojams arba tas prieinamumas priklauso nuo regiono.

### 1.1.1. Palydovinis ryšys

Palydovinis ryšys dažniausiai naudojamas tada, kai nėra galimybės užmegzti tiesioginį ryšį tarp BO ir AVS. Naudojantis palydovais galima užtikrinti kokybišką ryšį, tačiau jam būdingas yra signalo vėlinimas iki kelių sekundžių. Tai nesudaro didelės problemos, jei BO nėra valdomas tiesiogiai ir jei operatoriui nereikia priiminti staigių ir kritiškai svarbių sprendimų. Tačiau toks ryšys netinkamas, jei norima tiesiogiai valdyti BO skrydį. Naudojant palydovinį ryšį taip pat reikalingos pakankamai didelės antenos, kas stipriai apriboja šios technologijos pritaikymą mažuose BO [5].

### 1.1.2. Mobilusis ryšys

Mobilusis ryšys turi ganėtinai gerą padengimą tankiai apgyvendintose vietovėse, tačiau tolstant nuo didžiųjų miestų dažniausiai krenta ir signalo lygis. Didelės spartos LTE (angl. – *Long-Term Evolution*) ryšys kokybiškai dengia tik vietas, esančias aplink didesnius Lietuvos miestus (2 pav.).



2 pav. LTE ryšio padengimo žemėlapis Lietuvos teritorijoje [6]

GSM ryšio padengimas yra kur kas tankesnis, tačiau taip pat yra vietovių, kur visų operatorių teikiamas ryšys yra silpnas [6]. Be to, tokia technologija (2G) neužtikrina sparčios duomenų perdavimo greitaveikos.

Mobilaus ryšio kokybė ir sparta priklauso nuo to kaip arti yra bazinės stotys, bei nuo tinklo apkrovos. Dėl šios priežasties, šis komunikacijos metodas nėra labai efektyvus stengiantis sukurti BO, kurį būtų galima valdyti ir ten kur mobilusis ryšys yra silpnas arba neegzistuojantis. Naudojant šį metodą taip pat būtų prisirišama prie mobilaus tinklo operatoriaus, o tai įtrauktų ir papildomą mokestį už paslaugas. Šis tarifas taip pat skirtųsi priklausomai nuo to, kokioje šalyje būtų naudojamas BO.

Taip pat reikia turėti omenyje, kad mobilaus ryšio operatorius eiliniam vartotojui negarantuoja kanalo priskyrimo prioriteto. Tai reiškia, kad BO operatorius nėra užtikrintas pastoviai veikiančiu judriuoju ryšiu, kiuris gali nutrūkti dėl tinklo perkrovos.

## **1.2. Nelicencijuoti dažniai**

Vienas labiausiai paplitusių būdų ryšiui užtikrinti – naudoti tam tikro nelicencijuoto radijo dažnio imtuvus. Naujausias belaidžio ryšio standartas IEEE 802.11ac, veikiantis 5GHz dažnių juostoje, teoriškai leidžia pasiekti greičius iki 6,9 Gbps [7]. Tuo tarpu senesnė technologija IEEE 802.11n, taip pat veikianti ir žemesnėje 2,4GHz dažnių juostoje, palaiko teoriškai leidžia pasiekti greitį iki 600Mbps [7]. Dėl didelės perdavimo spartos šios technologijos puikiai tinka tiek BO valdymui, tiek tiesioginiam vaizdo transliavimui iš BO sumontuotų vaizdo kamerų.

Naudojant šias technologijas, ryšys gali būti užtikrinamas 1 – 2 km atstumu. Signalo stiprumas priklauso nuo montuojamo siųstuvo galios, antenos stiprinimo, siųstuvo ir imtuvo antenų suderinimo. Tokia įranga taip pat patraukli tuo, kad yra ganėtinai mažų gabaritų ir nesunki. Šios technologijos trūkumai – iš dalies nedidelis valdymo atstumas ir didelis jautrumas trikdžiams bei kliūtims.

Siekiant padaryti BO retransliatorių lengvai prieinamą, šis komunikacijos tipas yra patraukliausias, nes naudojant minėtus dažnius nereikalingi specialūs leidimai, taip pat neprisirišama prie paslaugų, kurios gali būti ne visur pasiekiamos bei reikalauja papildomų investicijų, siekiant jomis pasinaudoti.



## 2. RADIJO SIGNALO SKLIDIMAS

Radio signalas sklisdamas tam tikra terpe sąveikauja su aplinka. Kadangi signalas iš esmės yra elektromagnetinės bangos, tai jam galioja visos banginės savybės. Šiame skyriuje apžvelgiami radio signalo sklidimo mechanizmai [8, 9].

### 2.1. Radijo signalo sklidimo mechanizmai

Pagrindiniai procesai, darantys įtaką signalo sklidimui: sklaida, difrakcija, refrakcija, atspindys, absorbcija, interferencija ir poliarizacija.

**Sklaida** – tai, procesas, kurio metu bangos savo kelyje susiduria su smulkiomis dalelėmis (matmenys mažesni už bangos ilgį), o tai lemia bangų sklidimo krypties pokyčius.

**Difrakcija** – tai bet koks bangos nukrypimas nuo tiesiaieigio sklidimo, kuris nėra susijęs su lūžiu arba atspindžiu. Signalui susidūrus su kliūtimi, banga užlinksta už kliūties. Kaip teigia Hiuigenso-Frenelio principas – kiekvienas bangos fronto taškas yra antrinių sferinių bangų šaltinis. Tai reiškia, kad net už kliūties esanti šešėlio zona bus užpildoma antrinėmis bangomis. Ši bangų savybė labai svarbi, kai tarp siųstuvo ir imtuvo yra kliūčių. Taip pat svarbu paminėti, kad žemo dažnio bangoms difrakcija pasireiškia stipriau negu aukšto dažnio.

**Refrakcija** – tai, bangos savybė keisti sklidimo kryptį, pereinant iš vienos terpės į kitą, kai terpės turi skirtingą lūžio rodiklį  $n$ . Kritimo ir lūžio kampų santykis gali būti užrašomas formule:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = n,$$

čia  $n$  – antrosios aplinkos lūžio rodiklis, pirmosios aplinkos atžvilgiu;

$\alpha$  – kritimo kampas;

$\beta$  – lūžio kampas;

$n_1, n_2$  – aplinkos absoliutinis lūžio rodiklis;

$v_1, v_2$  – fazinis greitis aplinkoje.

**Atspindys** – tai bangos sklidimo krypties pakeitimas skirtingų medžiagų sandūroje. Atspindys – tai specifinis refrakcijos variantas, kai kritimo kampas didesnis už kritinį kampą. Kritinis kampas yra kritimo kampas, iki kurio banga kritus į terpių sandūrą dar gali pereiti į kitą terpę. Kai kritimo kampas didesnis už kritinį kampą – banga atsispindės. Atspindžio kampas bus visada lygus kritimo kampui. Atsispindėjus radijo bangai ji susilpnės, nes dalis bangos pereis į kitą aplinką arba bus absorbuota. Kalbant apie tolimos distancijos komunikacijas, dideli vandens telkiniai geriausiai atspindi bangas. Tuo tarpu nedidelių nuotolių komunikacijose, didžiausią įtaką daro atspindžiai nuo įvairių kliūčių.

**Absorbcija** – tai, reiškiny, kurio metu dalis bangos nešamos energijos yra sugerama tam tikrų medžiagų. Pagrindinės medžiagos absorbuojančios bangas atmosferoje yra vandens ir deguonies dalelės.

Absorbavus bangos energiją, ji virsta dalelės vidine energija. Taip toliau sklindanti banga netenka dalies savo energijos.

**Interferencija** – tai, reiškiny, kai kelios erdvėje sklindančios bangos susideda. Priklausomai nuo fazių skirtumo, bangos viena kitą stiprina arba silpnina. Pagal tai interferencija skirstoma į *konstruktyvią* bei *destruktyvią*. Konstruktyvios interferencijos atveju, vienodos fazės bangos viena kitą sustiprina, taip padidindamos bangos amplitudę. Tuo tarpu destruktyvios interferencijos atveju, skirtingų fazių bangos viena kitą silpnina ir amplitudė sumažėja.

**Poliarizacija** – poliarizacija nusako elektromagnetinės bangos elektrinio lauko padėtį bangos sklidimo krypties atžvilgiu. Elektromagnetinės bangos sudarytos iš elektrinio ir magnetinio laukų, kurie yra statmeni sklidimo kryptims.

Pagal elektrinio lauko padėtį, poliarizacija skirstoma į šiuos tipus:

- Vertikali;
- Horizontali;
- Spiralinė arba elipsinė
  - Kairinė;
  - Dešininė.

## 2.2. Signalo sklidimas laisvoje erdvėje

Elektromagnetinėms bangoms sklindant laisvoje erdvėje, signalo stiprumas slopsta priklausomai nuo nueito kelio. Laisva erdve vadinama terpė, kurioje tarp siųstuvo ir imtuvo nėra kliūčių bei pašalinių elektromagnetinių bangų spinduliavimo šaltinių. Signalo slopimą laisvoje erdvėje galima išreikšti iš bangų sklidimą erdvėje aprašančių Frenelio lygčių [8].

Tarkime, kad siųstuvas generuoja  $P_t$  galios signalą, o siųstuvo antenos stiprinimas yra  $G_t$ . Tokiu atveju ekvivalentinė izotropinė išspinduliuojama galia  $EIRP$  (angl. – *equivalent isotropic radiated power*) nusakoma formule:

$$EIRP = P_t \times G_t, \quad (1)$$

tada galios tankis  $S$  atstumu  $d$  nuo siųstuvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$S = \frac{EIRP}{4\pi d^2}. \quad (2)$$

Imtuvo antenos stiprinimas priklauso nuo jos efektyvios apertūros ploto  $A_e$ . Jei  $G_r$  yra imtuvo antenos stiprinimas, tada efektyvus apertūros plotas  $A_e$  išreiškiamas formule

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi}, \quad (3)$$

Čia  $\lambda$  - spinduliuojamo signalo bangos ilgis.

Iš to seka, kad imtuve priimamo signalo galia bus apskaičiuojama pagal formulę

$$P_r = EIRP \times A_e = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi d^2}. \quad (4)$$

Apskaičiavę priimto signalo galingumą galime išreikšti sklidimo laisvoje erdvėje nuostolius. Tai yra santykis tarp išspinduliuoto ir priimto signalo galios. Jei siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimas lygus 1 (t.y. turime visakryptes antenas), tuomet nuostoliai laisvoje erdvėje bus apskaičiuojami taip:

$$PL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi f d}{c}\right)^2, \quad (5)$$

čia  $f$  – elektromagnetinės bangos dažnis,  $c$  – šviesos greitis.

Formulės (1–5) pateiktos SI vienetų sistemoje, tačiau telekomunikacijose ir elektronikoje priimtina naudoti formules, kurios išreikštos nesisteminiais vienetais decibelais (dB). Tuo atveju nuostoliai apskaičiuojami pagal formulę:

$$PL_{[dB]} = 92,45 + 20\lg f_{[GHz]} + 20\lg d_{[km]}, \quad (6)$$

Čia  $PL$  išreikštas dB, dažnis  $f$  – GHz, o atstumas  $d$  – km.

### 2.3. Fedingas

Radio bangoms sklindant erdvėje, signalo stiprumas mažėja. Toks signalo silpnėjimas dėl įvairių priežasčių dar vadinamas **fedingu**. Fedingas gali būti dviejų tipų:

- Lėtas (ilgalaikis) fedingas,
- Greitas (trumpalaikis) fedingas.

Fedingui įtakos turi šie faktoriai [10]:

- skirtingais keliais keliaujančios ir destruktiviai interferuojančios bangos, arba daugiaspindulinis sklidimas (angl. – *multipath propagation*);
- vienas kito atžvilgiu judantys ryšio mazgai arba signalo sklidimo terpėje judantys objektai, dėl kurių atsiranda Doplerio poslinkis;
- siunčiamo signalo dažnio juostos ir koherentinės juostos skirtumas, kai siunčiama dažnio juosta kur kas didesnė už koherentinę juostą.

#### 2.3.1. Šešėliavimo efektas

Nagrinėjant BO retransliatoriaus atvejį tikimasi pagerinti signalo kokybę vietovėse, kur kliūtyse neleidžia efektyviai valdyti BO tiesioginiu ryšio kanalu. Tokiomis sąlygomis, kai tarp imtuvo ir siųstuvo yra kliūčių pasireiškia šešėliavimo efektas (angl. – *shadow fading*) [11]. Taip pat šešėliavimo efektas pasireiškia ir LOS sąlygomis, kadangi elektromagnetinės bangos imtuve priėmimas yra veikiamas aukščiau minėtų radijo signalo sklidimo mechanizmų (pvz., atspindžių nuo žemės paviršiaus, absorbcijos atmosferoje ir pan.). Siekiant sukurti kuo tikslesnį signalo sklidimo modelį, svarbu įvertinti šio reiškinio įtaką signalo kokybei. Uždaviniai, skirti įvertinti signalo slopinimą, gali būti sprendžiami keliais būdais:

- Pritaikant signalo slopimo nuo nueito kelio atstumo logaritmo (angl. – *log-distance path loss*) formulę,
- Pritaikant skirstinius.

Toliau bus aptarti abu šie atvejai.

### 2.3.2. Log-atstumo formulė

Uždavinys sprendžiamas naudojant formulę [11]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + c + X_\sigma, \quad (7)$$

Čia  $PL(d)$  – vidutinis signalo susilpnėjimas nuo kelio  $d$ , [dB];

$PL(d_0)$  – išmatuotas arba numatomas signalo susilpnėjimas atstumu  $d_0$  (paprastai 1 m) nuo siųstuvo, [dB];

$n$  – signalo slopimo eksponentė nusakanti kaip greitai signalas slopsta tam tikroje aplinkoje priklausomai nuo atstumo  $d$ ;

$c$  – pastovus skirtumas tarp modelio ir realiais matavimais gautų rezultatų;

$X_\sigma$  – atsitiktinis dydis nusakantis signalo slopimą (nuokrypį nuo vidutinės slopimo reikšmės) dėl šešėliavimo efekto, [dB].

Formulės (7) narys  $PL(d_0)$  gali būti nustatomas eksperimentiškai arba pasinaudojant sklidimo laisvoje erdvėje formule (6). Šešėliavimą įvertinantis narys  $X_\sigma$  reikalingas dėl to, kad skirtingose vietovėse, tarp tuo pačiu atstumu vienas nuo kito nutolusio siųstuvo ir imtuvo, signalas gali sklisti visiškai skirtingais keliais. Tai reiškia, kad lyginant numatomą signalo slopimą skirtingose vietovėse, rezultatai gali stipriai skirtis. Tyrėjų atlikti bandymai [11] rodo, kad rezultatai skiriasi priklausomai nuo aplinkos ir yra pasiskirstę pagal log-normalųjį skirstinį.

### 2.3.3. Skirstiniai

Lėtą fedingą paprastai apibūdina log-normalinis skirstinys, o greitą – Relėjaus skirstinys [12]. Tam tikrais atvejais fedingo analizei gali būti naudojami ir kiti skirstiniai: Nakagami [13], Gamma [14], Weibull [15], Rician [16] ir pan.

**Log-normalinis** skirstinys charakterizuojamas tokiomis funkcijomis:

$$\text{PDF} - f_x(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (8)$$

ir

$$\text{CDF} - F_x(x) = \Phi\left(\frac{(\ln x) - \mu}{\sigma}\right), \quad (9)$$

čia PDF – tikimybės tankio funkcija (angl. – *probability density function*),

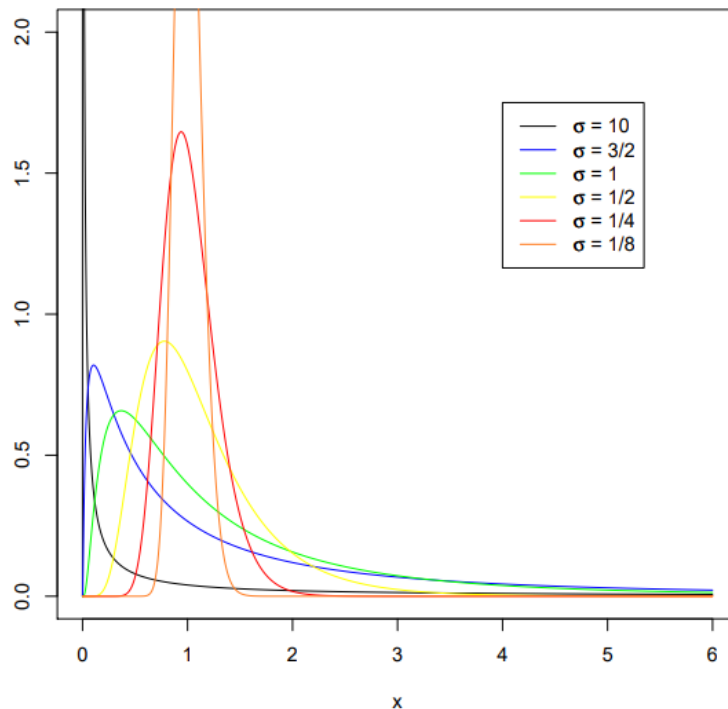
CDF – kumulatyvinė pasiskirstymo funkcija (angl. – *cumulative distribution function*),

$\mu$  – vidurkis,

$\sigma$  – standartinis nuokrypis.

Teigiamas atsitiktinės teigiamos reikšmės  $x$  yra log-normališkai pasiskirstęs jei  $\ln(x)$  yra normaliai pasiskirstęs:  $\ln(X) \sim N(\mu, \sigma^2)$ .

3 pav. pateiktas log-normalinio skirstinio grafinis kitimas, keičiant standartinį nuokrypį  $\sigma$ .



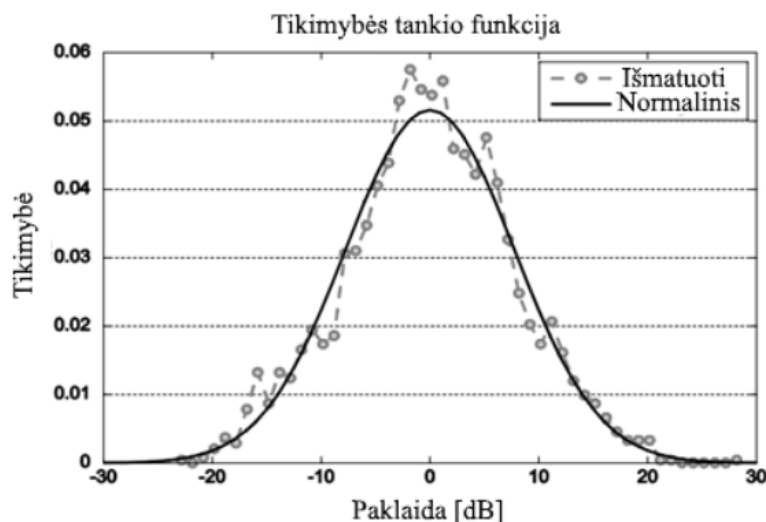
3 pav. Log-normalinio skirstinio PDF kai  $\mu = 0$  [17]

#### 2.4. Signalų sklaidimo tyrimai

Siekiant sudaryti kuo tikslesnius signalo sklaidimo modelius tam tikroje aplinkoje, atliekami įvairūs tyrimai naudojant skirtingas technologijas (skirtingus dažnius).

Vienas tokių tyrimų [11] analizuoja 900 MHz dažnio signalo sklaidimą tarp dviejų mobiliųjų įrenginių, keliuose skirtinguose Suomijos regionuose. Atlikus tyrimą pastebėta, kad paklaida atsiradusi dėl šešėliavimo efekto yra pasiskirsčiusi pagal log-normalinį skirstinį (4 pav.).

Panašūs tyrimai [18] buvo atlikti ir Bristolyje. Šiuo atveju buvo analizuojamas signalo sklaidimas oras-žemė terpėje. Modelis skyrėsi nuo standartinio nuostolių laisvoje erdvėje modelio tuo, kad fedingas buvo analizuojamas ne kaip atstumo, bet kaip pakilimo kampo funkcija. Ištirtas 200 MHz – 5 GHz dažnių diapazonas. Tyrimo rezultatai patvirtina, kad urbanistinėje vietovėje, oras-žemė tipo ryšio kanalas patiria mažiau nuostolių negu tipinis ryšio kanalas tarp dviejų antžeminių įrenginių. Šiame tyrime gauti eksperimentiniai duomenys geriausiai atitiko normalųjį skirstinį.



**4 pav. Tikimybinis paklaidos pasiskirstymas Tammela regione [11]**

Taip pat įdomu tai, kad signalo sklaidimo erdvėje nuostoliams įvertinti skirti modeliai sudarinėjame ir neuroninių tinklų pagalba. Viename tokių tyrimų [19] buvo bandoma nustatyti, ar neuroninių tinklų pagalba būtų galima patikslinti dabar egzistuojančius empirinius modelius. Tyrimo rezultatai parodė, kad neuroninių tinklų pagalba gauti rezultatai buvo tikslesni, ypač kai buvo naudojama hibridinė sistema apjungianti neuroninį tinklą, nuostolių apskaičiavimo algoritmus bei eksperimentiškai gautus rezultatus.

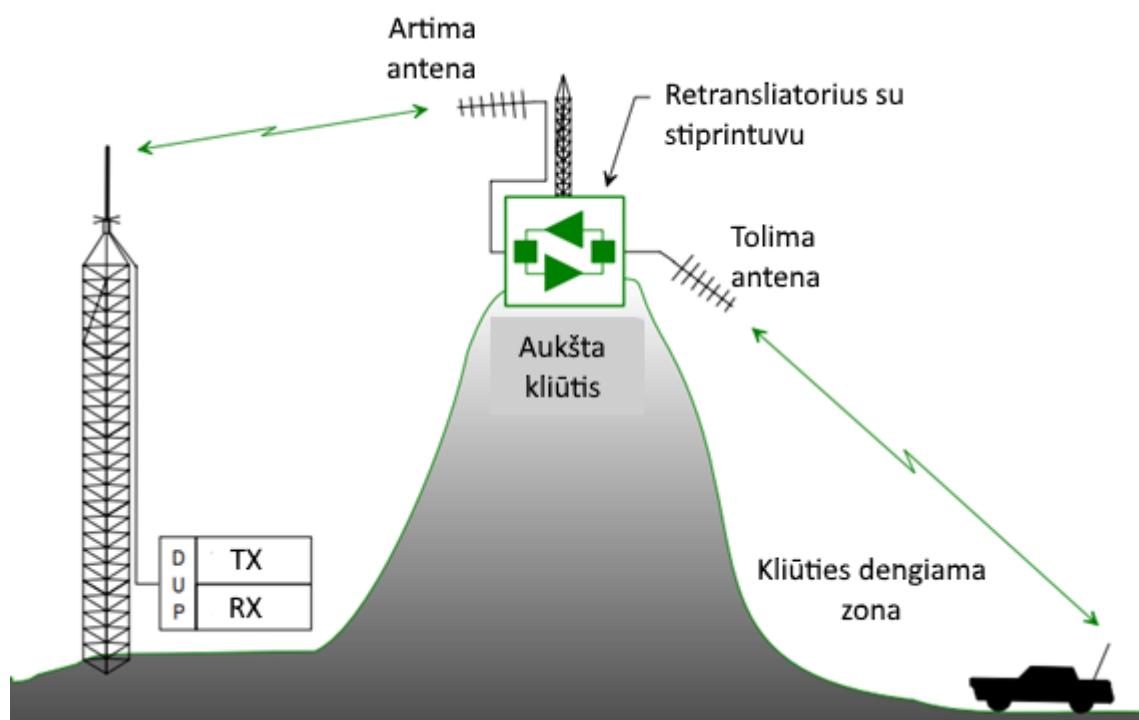
Taip pat yra tyrimų analizuojančių signalo sklaidimą tarp jūroje esančio laivo ir ant kranto esančios stoties [20] bei plataus dažnių diapazono signalų sklaidimą mobiliuose tinkluose [21].

Nors pavyko rasti tyrimų analizuojančių signalo sklaidimą įvairiose aplinkose, tačiau BO retransliatoriaus sistemoje signalo sklaidimas skiriasi. Signalas tarp AVS ir retransliatoriaus sklinda principu žemė-oras, o tarp retransliatoriaus ir valdomo BO – principu oras-oras. Iš išanalizuotų tyrimų galima numanyti, kad fedingas priklausys ne tik nuo atstumų tarp sistemos mazgų (AVS, retransliatoriaus ir valdomo BO), tačiau ir nuo retransliatoriaus bei valdomo BO skridimo aukščio, padėties vienas kito atžvilgiu. Toliau vystant tyrimą bus siekiama apjungti jau atliktuose tyrimuose surinktą informaciją bei užpildyti spragas, siekiant sukurti tikslų sistemos modelį ryšio kokybės įvertinimo aspektu.

### 3. RADIJO SIGNALO RETRANSLIAVIMAS

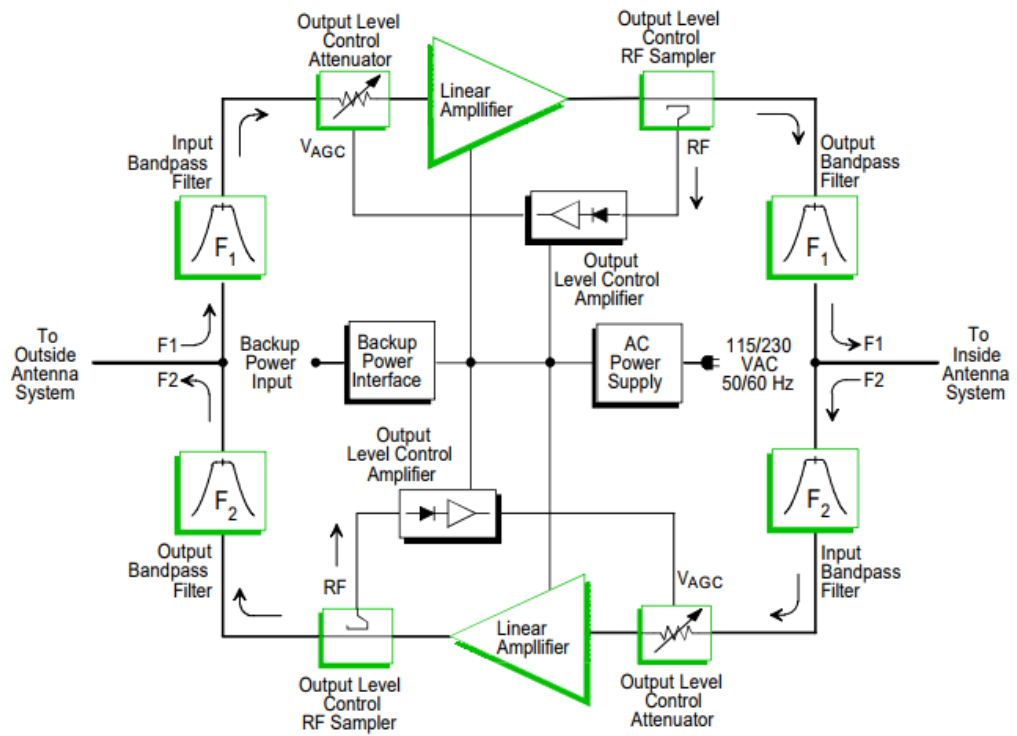
Siekiant efektyviai padidinti signalo kokybę arba aprėptį, dažnai yra pasitelkiamas signalo retransliavimas. Kadangi radijo bangos keliaudamos erdve slopsta, atstumas nuo siųstuvo, kuriame vis dar galima priimti kokybišką signalą, yra ribotas. Padidinti šį atstumą galima didinant spinduliavimo galią arba panaudojant retransliavimą.

Retransliavimo metu radijo signalas perduodamas ne tiesiogiai gavėjui, tačiau per tarpinį(-ius) tinklo mazgus, kurie atlieka tam tikrą signalo apdorojimą ir jį išspinduliuoja toliau [22]. Tokie įrenginiai vadinami radijo dažnio *retransliatoriais* arba *kartotuvais*. Retransliavimo schema pavaizduota 5 pav.:



5 pav. Signalu retransliavimo schema [22]

Signalas pasiekęs retransliatorių būna pakitęs, todėl priklausomai nuo retransliatoriaus tipo, su signalu gali būti atliekami įvairūs veiksmai: regeneracija, demoduliacija, stiprinimas ir pan. Toliau pateikiamas plačiajuosčio (ne heterodininio) retransliatoriaus schemos pavyzdys (6 pav.) [22]:



6 pav. Plačiajuosčio retransliatoriaus schema [22]

Tokių retransliatorių sudaro šie elementai:

- Linijiniai stiprintuvai, kurie sustiprina gautą signalą;
- Įėjimo ir išėjimo filtrai;
- Stiprinimo valdymo elementai;
- Energijos tiekimo elementai;
- Atsarginis energijos šaltinis (nebūtinai).



#### 4. MATEMATINIO MODELIO SUDARYMAS

1 – 3 skyriuose pateikta literatūros analizė leidžia padaryti kelias išvadas:

- Net ir LOS sąlygomis veikia šešėliavimo efektas, todėl radijo signalo sklidimo nuostoliai yra didesni, negu tie, kuriuos aprašo nuostolių laisvoje erdvėje modelis (6);
- Dauguma atvejų radijo signalo sklidimas LOS sąlygomis aprašomas log-normaline tikimybės tankio funkcija, nors kai kuriais atvejais, ypač jei radijo bangų sklidimas yra veikiamas greito fedingo efektais, tai gali būti ir kiti skirstiniai;
- PDF ar CDF funkcijų panaudojimas leidžia įvertinti eksperimentines sąlygas (standartinį nuokrypį, vidurkį), todėl, remiantis šiomis funkcijomis, tikslinga kurti matematinius modelius.

Remiantis atlikta literatūros analize, buvo nuspręsta sudaryti matematinį signalo sklidimo modelį pritaikant log-normalinį skirstinį. Toliau pateikiami atliktų skaičiavimų rezultatai.

##### 4.1. Log-normalinio skirstinio analizė

Tam, kad būtų galima sukurti modelį, pirmiausiai reikia suintegruoti skirstinio stochastinę lygtį, bei parinkti tinkamus parametrus. Kaip žinoma, log-normalinio skirstinio stochastinė lygtis [23] bendru atveju aprašoma formule:

$$\frac{dx}{dt} = -ax \left( \ln \left( \frac{x}{m} \right) - \sigma^2 \right) + ax \zeta(t) . \quad (10)$$

Šią formulę perrašome, pritaikydami ją mūsų atvejui:

$$\frac{dL}{dx} = -aFSL \left( \ln \left( \frac{FSL}{m} \right) - \sigma^2 \right) + aFSL \zeta(x) \quad (11)$$

Norėdami pritaikyti skirstinį signalo lygio apskaičiavimui, į skirstinio stochastinę lygtį įstatome atitinkamus parametrus:

$L$  – nuostoliai atstume  $x$ ;

$a$  – laisvai pasirenkamas parametras;

$FSL$  – nuostoliai laisvoje erdvėje;

$\zeta(x)$  – šešėliavimo efekto priklausomybė nuo atstumo  $x$ .

Nuostoliai laisvoje erdvėje (FSL) apskaičiuojami pagal formulę:

$$FSL = 92,45 + 20 \lg x + 20 \lg f \quad (12)$$

čia  $x$  – atstumas nuo siųstuvo, [km]

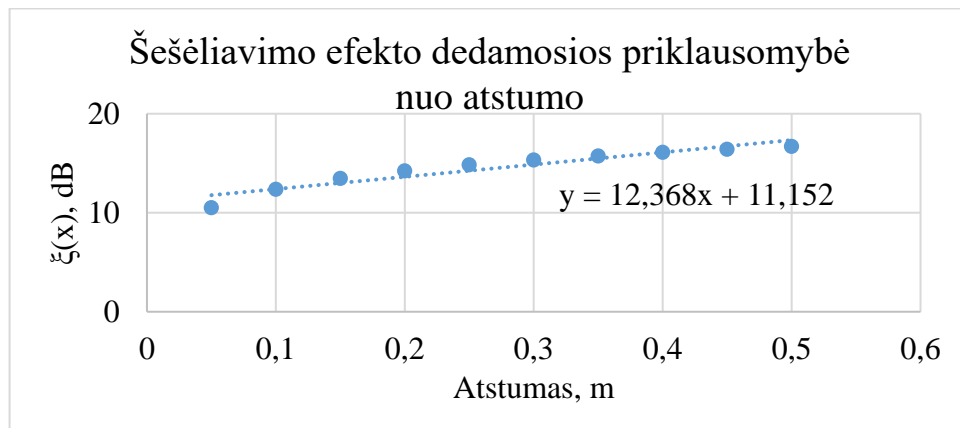
$f$  – transliuojamo signalo dažnis, [GHz].

Šešėliavimo efektas  $\xi(x)$  apskaičiuojamas remiantis belaidžio tinklo signalo sklidimo tyrimais [24]. Pirmiausiai apskaičiuojamas kelio nuostolių ( $PL$ ) ir laisvos erdvės nuostolių ( $FSL$ ) skirtumas atstumu  $x$  nuo siųstuvo (1 lentelė).

1 lentelė. Šešėliavimo efekto priklausomybė nuo atstumo

x, m	PL, dB	FSL, dB	$\xi(l)$ , dB
50	84,53303	74,03362	10,49941
100	92,414	80,05422	12,35978
150	97,02407	83,57605	13,44802
200	100,295	86,07482	14,22014
250	102,8321	88,01303	14,81904
300	104,905	89,59665	15,30838
350	106,6577	90,93559	15,72212
400	108,1759	92,09542	16,08051
450	109,5151	93,11848	16,39663
500	110,713	94,03362	16,67941

Remiantis šiais rezultatais, nubrėžiamas šešėliavimo efekto priklausomybės nuo atstumo grafikas (7 pav.).



7 pav. Šešėliavimo efekto priklausomybės nuo atstumo grafikas

Išvedus duomenis aproksimuojančią kreivę, gaunama formulė, aprašanti šešėliavimo efekto priklausomybę nuo atstumo  $x$ :

$$\xi(x) = 12,368x + 11,152. \quad (13)$$

Įstačius visus parametrus į log-normalinio skirstinio stochastinę lygtį (11) gaunama išraiška:

$$\frac{dL}{dx} = -a(92,45 + 20\lg x + 20\lg f) \left( \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg x + 20\lg f}{m} \right) - \sigma^2 \right) + a(92,45 + 20\lg x + 20\lg f)(12,368x + 11,152) \quad (14)$$

Gautas rezultatas integruojamas:

$$L = \int (-a(92,45 + 20\lg l + 20\lg f) \left( \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg l + 20\lg f}{m} \right) - \sigma^2 \right) + a(92,45 + 20\lg l + 20\lg f)(12,368l + 11,152)) dl$$

(15)

Atlikus atskliaudimą, gauta išraiška išreiškiama per integralų sumą:

$$\begin{aligned} L = & \int -92,45a \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg x + 20\lg f}{m} \right) dx + \int 92,45a\sigma^2 dx + \int -20a \lg x \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg x + 20\lg f}{m} \right) dx + \\ & + \int 20a\sigma^2 \lg x dx + \int -20a \lg f \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg x + 20\lg f}{m} \right) dx + \\ & + \int 20a\sigma^2 \lg f dx + \int 92,45a(12,368x + 11,152) dx + \\ & + \int 20a \lg x(12,368x + 11,152) dx + \int 20a \lg f(12,368x + 11,152) dx \end{aligned}$$

(16)

Suintegruojami visi integralai. Dėl didelio parametrų kiekio, skaičiavimai yra labai sudėtingi, todėl siekiant juos supaprastinti, priimame, kad  $f = 2,4$  GHz:

$$\int -92,45a \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(f)}{m} \right) dx = -92,45a \int \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(f)}{m} \right) dx \quad (17)$$

kadangi  $f = 2,4$  GHz, tai

$$\begin{aligned} -92,45a \int \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(2,4)}{m} \right) dx &= -92,45a \int \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) dx = \\ &= -92,45a \left( x \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) - 9,861 \cdot 10^{-6} \cdot Ei(\ln(x) + 11,53) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\int 92,45a\sigma^2 dx = 92,45a\sigma^2 x \quad (19)$$

$$\int -20a \lg(x) \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(f)}{m} \right) dx = -20a \int \lg(x) \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(f)}{m} \right) dx \quad (20)$$

kadangi  $f = 2,4$  GHz, tai

$$\begin{aligned} -20a \int \lg(x) \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(2,4)}{m} \right) dx &= -20 \cdot 0,4342a \int \ln(x) \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) dx = \\ &= -8,684a \int \ln(x) \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) dx = \\ &= -8,684a(123,5 \cdot 10^{-6} \cdot Ei(\ln(x) + 11,53) + x((\ln(x) - 1) \ln \left( \frac{\ln(x) + 11,53}{m} \right) + 2,161) - 1) \end{aligned}$$

(21)

$$\int 20a\sigma^2 \lg(x) dx = 20a\sigma^2 \int \lg(x) dx = 8,684a\sigma^2 \int \ln(x) dx = 8,684a\sigma^2 (x(\ln(x) - 1)) \quad (22)$$

$$\int -20a \lg(f) \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(f)}{m} \right) dx = -20a \lg(f) \int \ln \left( \frac{92,45 + 20\lg(x) + 20\lg(f)}{m} \right) dx \quad (23)$$

kadangi  $f = 2,4$  GHz, tai

$$\begin{aligned}
& -20a \lg(2,4) \int \ln \left( \frac{92,45 + 20 \lg(x) + 20 \lg(2,4)}{m} \right) dx = -20a \lg(2,4) \int \ln \left( \frac{100,1 + 8,684 \ln(x)}{m} \right) dx = \\
& = -7,604a \left( x \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) - 9,861 \cdot 10^{-6} \cdot Ei(\ln(x) + 11,53) \right)
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\int 20a \sigma^2 \lg(f) dx \tag{25}$$

kadangi  $f = 2,4$  GHz, tai

$$\int 20a \sigma^2 \lg(2,4) dx = 17,51 \cdot a \sigma^2 x \tag{26}$$

$$\int 92,45a(12,37x + 11,15) dx = a(571,7x^2 + 11,15) \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
& \int 20a \lg(x)(12,37x + 11,15) dx = 53,71ax^2 \ln(x) - 26,85ax^2 + 96,83ax \ln(x) - 96,83ax = \\
& = ax(53,71x \ln(x) - 26,85x + 96,83 \ln(x) - 96,83) = ax(53,71x \ln(x) - 26,85x + 96,83(\ln(x) - 1))
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\int 20a \lg(f)(12,37x + 11,15) dx$$

kadangi  $f = 2,4$  GHz, tai

$$20a \lg(2,4) \int 12,37x + 11,15 dx = ax(47,02x + 84,80) \tag{29}$$

Sudėjus integralų rezultatus ir suprastinus išraišką, gaunama formulė (30) atitinkanti pirminį siūlomą modelį:

$$\begin{aligned}
L(x) = & a(-100,1t - 8,684(k - \sigma^2 x(\ln(x) + 11,66)) + x(2,662x(\ln(x) + 1) + \\
& + 96,38(\ln(x) - 1) + 84,80) + 571,7x^2 + 11,15)
\end{aligned} \tag{30}$$

čia

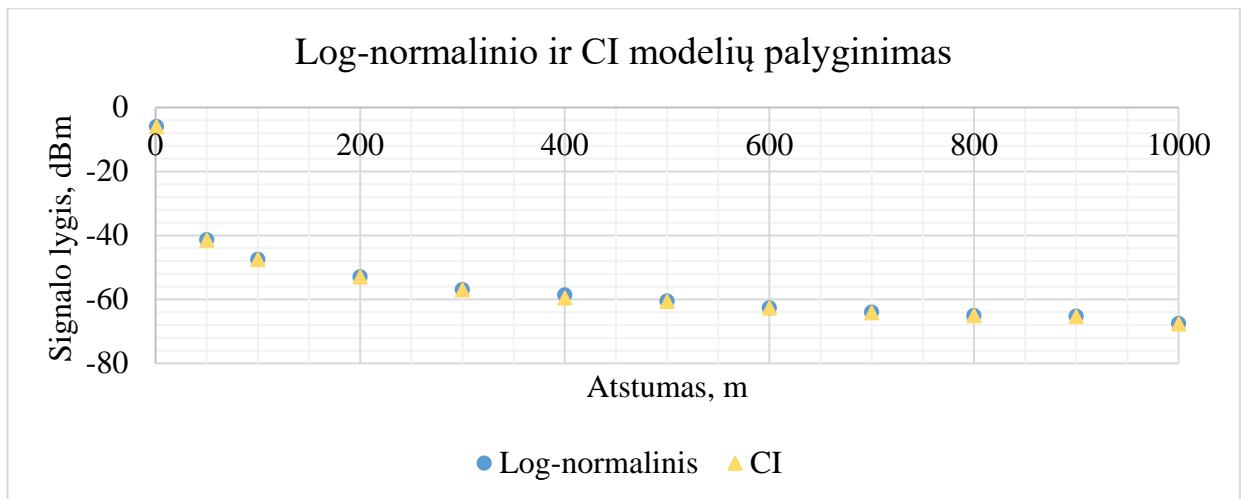
$$t = x \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) - 9,861 \cdot 10^{-6} \cdot Ei(\ln(x) + 11,53) \tag{31}$$

$$k = 123,5 \cdot 10^{-6} \cdot Ei(\ln(x) + 11,53) + x((\ln(x) - 1) \ln \left( \frac{8,684 \ln(x) + 100,1}{m} \right) - 1) \tag{32}$$

čia  $Ei$  – eksponentinė integralo funkcija.

## 4.2. Modelių palyginimas

Gautas formules palyginame su darbe [25] pateiktu modeliu signalo slopimui įvertinti (8 pav.). Kadangi mūsų modelis vertina signalo sklidimo nuostolius, o darbe [25] pateikta signalo lygio imtuve kitimo priklausomybė nuo atstumo, mums reikėjo atsižvelgti į šią sąlygą ir perskaičiuoti duomenis, įvertinant  $EIRP$ .



**8 pav. Siūlomo log-normalinio ir CI modelių palyginimas**

Kaip matoma, siūlomas modelis neblogai sutampa su darbe [25] pateiktais rezultatais. Todėl galima daryti išvadą, kad siūlomas teorinis modelis yra tinkamas tolimesniems tyrimams. Tačiau darbas [25] nagrinėja radijo signalų sklaidimą sąlygomis „žemė – žemė“, kurios gali skirtis nuo „žemė – oras“ sąlygų.

## 5. SIGNALO SKLIDIMO TYRIMAS

Siekiant patikrinti sukurto matematinio modelio efektyvumą bei tikslumą, buvo atliktas tyrimas, kurio metu iširtas signalo sklidimas tarp AVS ir BO. Šiame skyriuje aprašoma tyrimui naudota įranga, tyrimo metodika bei rezultatai.

### 5.1. Įranga

Atliekant tyrimą buvo naudojama ši įranga:

- Kvadrokopterio konstrukcijos BO (9 pav.);
- Rohde&Schwarz FSH8 spektro analizatorius (10 pav.);
- Arduino Nano;
- NRF24L01+PA+LNA ryšio modulis (11 pav.), sumontuotas BO;
- GPS imtuvas išmaniajame telefone.



9 pav. Kylantis BO

Toliau pateikiami naudoto BO parametrai (2 lentelė).

2 lentelė. BO techninės charakteristikos

Parametras	Reikšmė
Skrydžio laikas	35,9 min
Traukos ir masė santykis	3,5 : 1
Apytikslis svoris	2,412 kg
Maksimalus paviršiaus greitis	39 km/h
Maksimalus vertikalus greitis	8,2 m/s

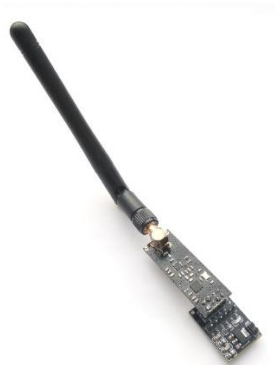
Maksimalus krovinio svoris	4,939 kg
Srovė reikalinga kyboti vietoje	11,92 A
Maksimali srovė	90,17 A



**10 pav. Spektro analizatorius Rohde&Schwarz FSH8**

Pagrindiniai spektro analizatoriaus FSH8 (žr. 10 pav.) parametrai:

- Dažnių diapazonas nuo 9 kHz iki 8 GHz;
- Aukštas jautrumas (< -141 dBm, su stiprintuvu < -161dBm);
- Dažnių juostos rezoliucija 1 Hz – 3 MHz;



**11 pav. Ryšio modulis NRF24L01+PA+LNA su maitinimo plokšte**

Pagrindiniai NRF24L01+PA+LNA ryšio modulio (žr. 11 pav.) parametrai:

- Maitinimo įtampa: 3-3,6V;
- Maksimali srovė siuntimo režime: 115mA;
- Maksimali spinduliavimo galia: +20dBm;
- Imtuvo jautrumas 2Mbps režime: -92dBm;
- Imtuvo jautrumas 1Mbps režime: -95dBm;

- Imtuvo jautrumas 250Kbps režime: -104dBm;
- Stiprintuvo stiprinimas: 20dB;
- Mažo triukšmo stiprintuvo stiprinimas (tik imtuvo režime): 10dB;
- Antenos stiprinimas: 2dBi.

Tam, kad atlikti signalo sklidimo tyrimą pirmiausiai reikėjo pasirūpinti siųstuvu. Šiam tikslui buvo pasirinkta naudoti *Arduino Nano* mikrovaldiklį bei su juo suderinamą ryšio modulį *NRF24L01+PA+LNA*. Valdiklis buvo suprogramuotas (programinis kodas pateikiamas 1-ame priede) taip, kad betarpiškai siųstų vieno baido duomenų paketus. Duomenų siuntimui buvo pasirinktas kanalas, kurio centrinis dažnis  $f = 2,4$  GHz. Siųstuvą siunčiantis duomenis buvo pritvirtintas prie BO, kuris tyrimo metu pakeltų siųstuvą į nurodytą aukštį.

BO prie kurio tvirtinamas siųstuvą palaiko atgalinį ryšį, kurio dėka operatorius gauna telemetrinius duomenis iš BO sumontuotų jutiklių. Naudodamasis šiais duomenimis, BO operatorius gali pasakyti kokiam aukštyje yra BO.

Signalą lygiui išmatuoti buvo naudojamas *Rohde&Schwarz FSH8* spektro analizatorius (10 pav.) su 2,4 GHz dažnių juostai pritaikyta antena. Spektro analizatoriaus rodmenų pavyzdys pateikiamas 2-ame priede.

## 5.2. Atlikto tyrimo metodika

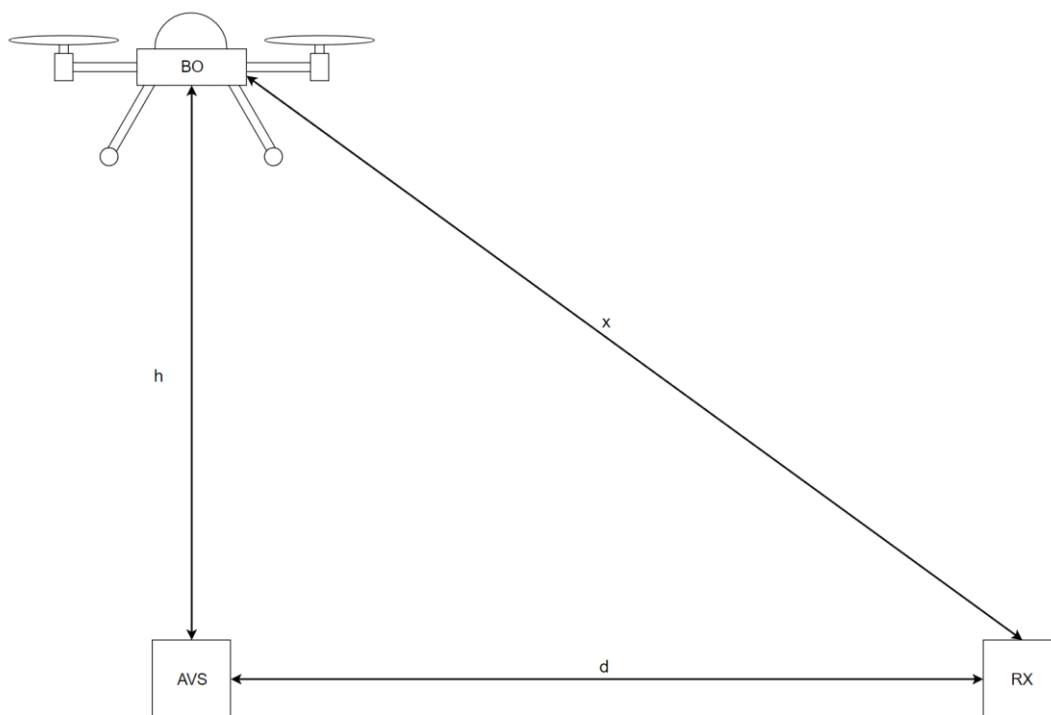
**Tyrimo tikslas** – išmatuoti signalo lygį skirtingais atstumais nuo siųstuvo sumontuoto BO. Tyrimo aiškinamoji schema pateikiama 12 pav.

Kaip matyti (žr. 12 pav.), BO skrenda aukštyje  $h$ , o signalo lygis matuojamas atstumu  $x$  nuo BO. Horizontalus atstumas tarp AVS ir RX ( $d$ ) paskaičiuojamas pagal Pitagoro teoremą (27) suapvalinant iki sveiko skaičiaus.

$$d = \sqrt{x^2 - h^2} \quad (27)$$

Toliau pateikiamos konkrečios šių parametų reikšmės (3 lentelė).





**12 pav. Tyrimo aiškinamoji schema. Čia  $h$  – aukštis nuo žemės iki BO,  $d$  – atstumas tarp AVS ir spektro analizatoriaus RX,  $x$  – atstumas tarp BO ir spektro analizatoriaus RX.**

Tyrimas atliekamas tokia tvarka:

1. Operatorius pilotuoja BO kol šis pasiekia nurodytą aukštį. Įjungiamas pozicijos palaikymo režimas ir BO autonomiškai kabo nurodytame aukštyje;
2. Asmuo atliekantis matavimus nuvažiuoja atstumu  $d$  nuo pradinio taško. Atstumo matavimui naudojamas telefone esantis GPS imtuvas;
3. Naudojant spektro analizatorių atliekami matavimai ir užrašomi matavimų rezultatai;
4. Atstumas  $d$  didinamas iki sekančio sekoje. Kartojami 2-4 žingsniai.
5. Operatorius nutupdo BO.

3 lentelė. Tyrimo aiškinamojoje schemoje naudojamų parametrų reikšmės

Matavimo Nr.	$d$ , m	$x$ , m	$h$ , m
1	0	-	1
2	0	-	50
3	87	100	50
4	194	200	50
5	296	300	50
6	397	400	50
7	497	500	50

8	598	600	50
9	698	700	50
10	798	800	50
11	899	900	50
12	999	1000	50

Tyrimui atlikti pasirinkta ~1 km atkarpa esanti netoli Šlienavos (Kauno raj.). Atkarpa pažymėta žemėlapyje pateikiama 13 pav.



**13 pav. 1 km atkarpa Mokyklos g-vėje (Kauno raj.)**

Ši atkarpa buvo (žr. 13 pav.) pasirinkta tyrimui, nes yra atviroje vietovėje, t.y. aplinkui nėra tankiai augančių medžių, pastatų ar kitų kliūčių kurios turėtų didelę įtaką signalo sklidimui. Prieš pasirenkant vietovę, spektro analizatoriumi buvo praskenuota dažnių juosta kurioje bus atliekamas tyrimas. Kadangi pašalinių signalų aptikta nebuvo, vieta pasirinkta kaip tinkama signalo sklidimo tyrimui atlikti.

### **5.2.1. Paklaidos**

Atlikus tyrimą buvo apskaičiuotos santykinės matavimų paklaidos (4 lentelė) bei standartiniai nuokrypiai (5 lentelė) kiekvienam taškui.

4 lentelė. Santykinės matavimų paklaidos kiekviename taške

Taško parametrai			Santykinė paklaida, %										Maksimali paklaida, %
d, m	x, m	h, m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	-	1	2,04	1,63	0,41								2,04
0	-	50	6,40	6,21	1,65	0,84	0,27	3,57	4,91	1,99	3,57	2,03	6,40
87	100	50	4,45	2,05	2,40								4,45
194	200	50	0,98	0,24	1,22								1,22
296	300	50	3,10	1,68	1,42								3,10
397	400	50	1,89	1,50	3,39								3,39
497	500	50	0,25	0,63	0,38								0,63
598	600	50	0,62	0,99	1,61								1,61
698	700	50	3,01	0,44	0,84	0,09	2,71	0,91	0,56	1,73	0,96	2,24	3,01
798	800	50	0,04	1,10	1,06								1,10
899	900	50	0,04	0,07	0,04								0,07
999	1000	50	2,35	2,99	0,64								2,99

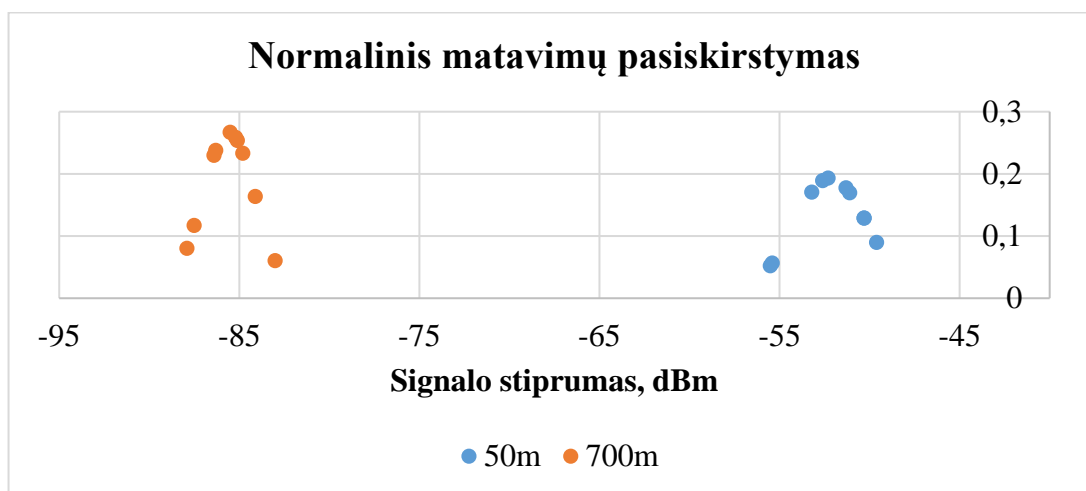
Iš rezultatų matyti, kad maksimali santykinė matavimų paklaida yra 6,4%. Taip pat apskaičiuojame standartinį nuokrypį kiekvienam taškui (5 lentelė).

5 lentelė. Standartinis nuokrypis kiekviename taške

d, m	x, m	h, m	Standartinis nuokrypis, dB
0	-	1	0,46
0	-	50	2,06
87	100	50	2,20
194	200	50	0,76
296	300	50	2,02
397	400	50	2,23
497	500	50	0,44
598	600	50	1,14
698	700	50	1,49
798	800	50	0,95
899	900	50	0,06

999	1000	50	2,55
-----	------	----	------

Taip pat iš taškuose, kur buvo daryta po 10 matavimų, gautų rezultatų nustatome kaip pasiskirstę matavimų rezultatai. Šis pasiskirstymas pavaizduotas žemiau pateiktame grafike (14 pav.):



14 pav. Normalinio pasiskirstymo funkcija, kai atstumas tarp BO ir RX atitinkamai 50m ir 700m

### 5.3. Matavimų rezultatai

Toliau pateikiami signalo stiprumo matavimų rezultatai (6 lentelė).

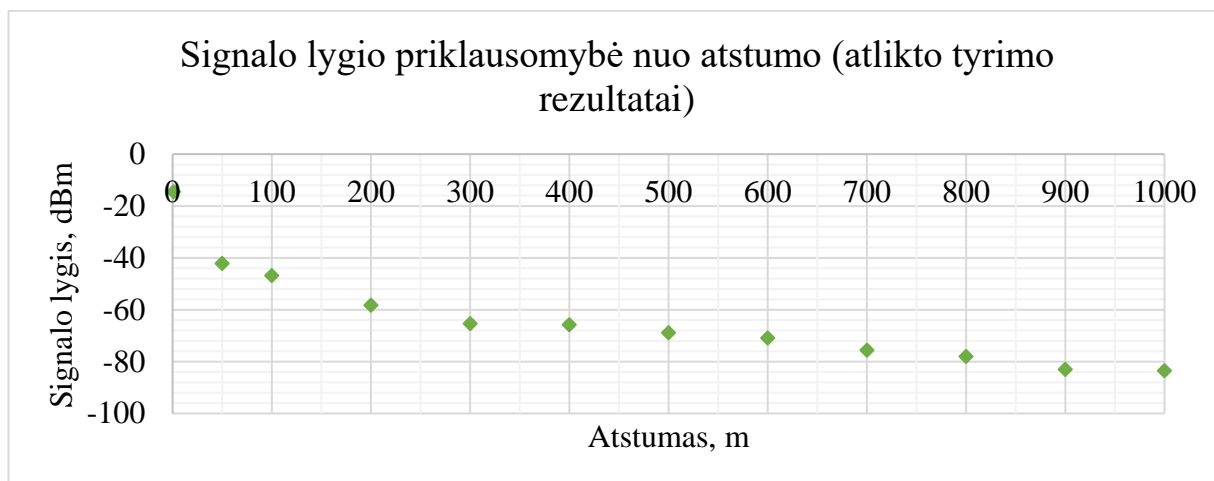
6 lentelė. Atliktų matavimų rezultatai

Taško parametrai			Signalų lygis, dBm										
d, m	x, m	h, m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Vidutinis
0	-	1	-24	-24,9	-24,6								-24,50
0	-	50	-55,5	-55,4	-51,3	-52,6	-52,3	-50,3	-49,6	-53,2	-50,3	-51,1	-52,16
87	100	50	-59,4	-55,7	-55,5								-56,87
194	200	50	-67,6	-68,1	-69,1								-68,27
296	300	50	-73	-76,6	-76,4								-75,33
397	400	50	-77,2	-76,9	-73,2								-75,77
497	500	50	-78,7	-79,4	-78,6								-78,90
598	600	50	-81,4	-81,7	-79,6								-80,90
698	700	50	-83	-85,2	-86,3	-85,5	-87,9	-84,8	-85,1	-84,1	-86,4	-87,5	-85,58
798	800	50	-88	-89	-87,1								-88,03
899	900	50	-93	-93,1	-93								-93,03
999	1000	50	-95,7	-90,7	-94,1								-93,50

Iš lentelėje (žr. 6 lentelė) pateiktų rezultatų matyti, kad daugumoje taškų buvo atlikta po 3 matavimus. Tokį matavimų skaičiaus pasirinkimą nulėmė skrydžio laiko apribojimas (~40 min), kylantis

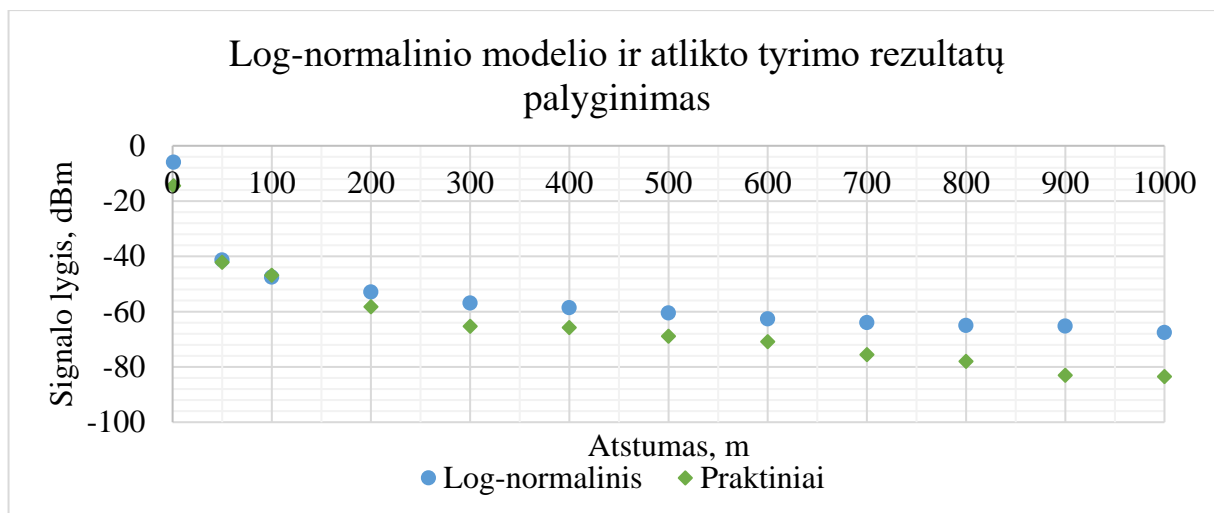
iš naudoto BO techninių charakteristikų. Tam, kad vėliau būtų galima įvertinti paklaidas, bei nustatyti statistinį pasiskirstymą, dviejuose taškuose buvo atlikta po 10 matavimų.

Signalų stiprumo priklausomybės nuo atstumo  $x$  grafikas pateikiamas 15 pav. Be signalo stiprumo vidurkio, grafike taip pat pateikiama rezultatus aproksimuojanti kreivė bei ją aprašanti lygtis. Matome, kad signalas kinta logaritminiu dėsniu, kas iš esmės atitinka log-atstumo modelį (6). Tik reikia įvertinti tai, kad grafike (žr. 15 pav.) pateiktas signalo lygio kitimas, o modelis (6) įvertina signalo nuostolių kitimą.



15 pav. Signalų stiprumo priklausomybės nuo atstumo grafikas

Iš grafiko matyti, kad tolstant nuo signalo šaltinio, signalo stiprumas krenta. Taip pat palyginame atlikto tyrimo rezultatus su rezultatais apskaičiuotais pagal siūlomą modelį (16 pav.)



16 pav. Apskaičiuotų pagal Log-normalinį modelį bei praktiškai gautų rezultatų palyginimas

Iš palyginimų matyti, kad didėjant atstumui, išmatuotas signalas slopsta greičiau nei nurodo siūlomas log-normalinis modelis.

## 6. MODELIO KOREGAVIMAS

Iš modelių palyginimo (žr. 16 pav.) matyti, kad praktikoje signalo stiprumas didinant atstumą mažėja greičiau, nei rodo siūlomas modelis. Remiantis atliktu eksperimentu galime pakoreguoti modelį taip, kad šis geriau atitiktų praktikoje stebimus rezultatus.

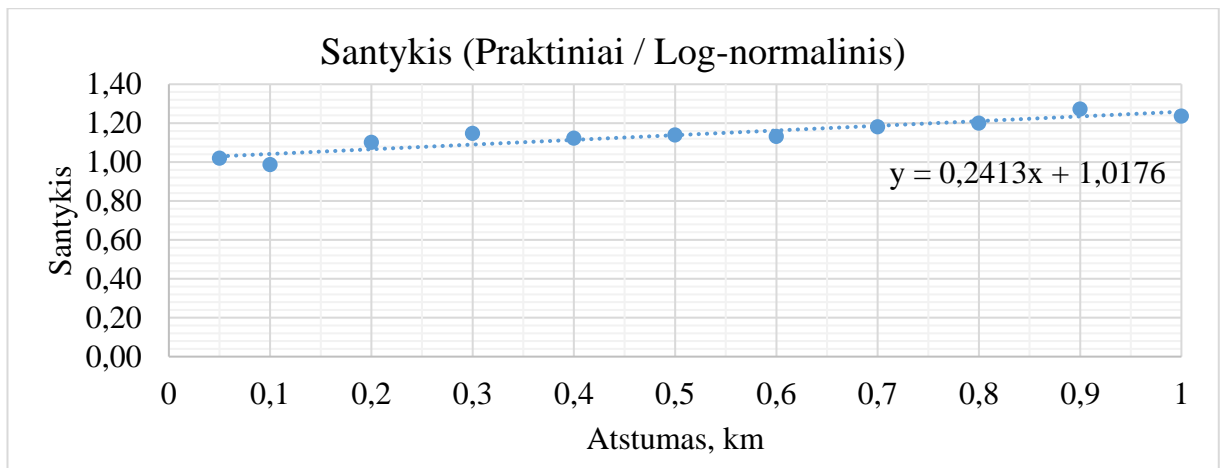
Tuo tikslu, pirmiausiai apskaičiuojame siūlomo modelio reikšmių bei praktinių reikšmių santykį kiekviename taške (7 lentelė).

7 lentelė. Praktiškai gautų ir apskaičiuotų rezultatų santykiai

<b>d, m</b>	<b>x, m</b>	<b>h, m</b>	<b>Praktinis / log-normalinis</b>
0	-	1	2,42
0	-	50	1,02
87	100	50	0,99
194	200	50	1,10
296	300	50	1,15
397	400	50	1,12
497	500	50	1,14
598	600	50	1,13
698	700	50	1,18
798	800	50	1,20
899	900	50	1,27
999	1000	50	1,24

Iš rezultatų (žr. 7 lentelę) matyti, kad 1m atstumu, rezultatai skiriasi 2,42 karto. Dėl šios priežasties ir dėl staigaus signalo lygio kritimo iki 50m, pirmas taškas nėra įtraukiamas į modelį patikslinančio koeficientų skaičiavimus. Šie atstumai yra palyginus nedideli ir nelabai aktualūs sprendžiant retransliavimo problemą.

Šiuos duomenis (žr. 7 lentelę) atvaizduojame grafiškai (17 pav.) ir nubrėžiame juos aproksimuojančią tiesę. Šiuo atveju atstumas pateikiamas kilometrais, kad gauti teisingą kreivės lygtį.



17 pav. Apskaičiuotų ir praktiškai gautų rezultatų santykio grafikas, bei rezultatus aproksimuojanti kreivė

Gauti rezultatai (santykis) aproksimuojami kreive, kuri aprašoma formule:

$$y = 0,2413x + 1,0176 \quad (33)$$

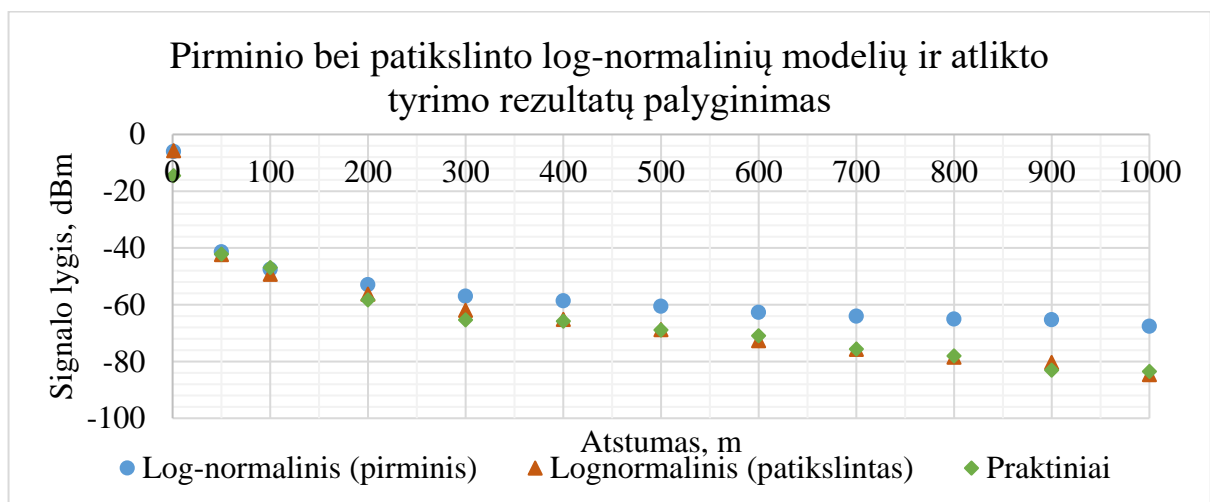
Šią funkciją pakoregavę rankiniu būdu (remiantis grafikais) gauname galutinę korekcijos koeficiento funkciją:

$$y = 0,16x + 1,0176 \quad (34)$$

Žinodami šios tiesės lygtį, galime savo modelio rezultatus priartinti prie praktiškai gautų. Tuo tikslu šiame darbe pasiūlytas modelis (30) pakoreguotas (padaugintas) iš koeficiento  $y$  (33) ir prie jo pridėta konstanta ( $C = 1$ ):

$$L(x) = a(-100,1t - 8,684(k - \sigma^2 x(\ln(x) + 11,66)) + x(2,662x(\ln(x) + 1) + 96,38(\ln(x) - 1) + 84,80) + 571,7x^2 + 11,15) \cdot (0,2413x + 1,0176) + 1 \quad (35)$$

Ši lygtis (35) ir atitinka galutinę siūlomo modelio matematinę išraišką. Apskaičiavę signalo lygį pagal šią formulę ir atvaizdavę rezultatus, gauname grafiką pavaizduotą 18 pav.



18 pav. Patikslinto log-normalinio modelio palyginimas su pirminiu modeliu ir praktiškai gautais rezultatais

Tam kad įvertinti atnaujinto modelio atitikimą tyrimo metu gautiems rezultatams, pagal formulę (35) paskaičiuojame santykinę paklaidą (8 lentelė).

$$\delta = \frac{|p-t|}{|p|} \times 100\% \quad (35)$$

Čia  $p$  – praktinė reikšmė, o  $t$  – teorinė reikšmė.

8 lentelė. Teorinio modelio santykinės paklaidos lyginant su praktiniais rezultatais

Atstumas, m	Praktinė reikšmė, dB	Teorinė reikšmė, dB	$\delta$ , %
1	-14,50	-5,71	60,61
50	-42,16	-42,30	0,33
100	-46,87	-49,26	5,11
200	-58,27	-56,24	3,47
300	-65,33	-61,92	5,23
400	-65,77	-65,18	0,90
500	-68,90	-68,76	0,20
600	-70,90	-72,65	2,47
700	-75,58	-75,71	0,18
800	-78,03	-78,46	0,55
900	-83,03	-80,32	3,27
1000	-83,50	-84,62	1,34

Iš rezultatų (žr. 8 lentelė) matyti, kad ties 1 m atstumu, paklaida labai didelė (60,61%) todėl siūlomas modelis (34) praktinius rezultatus geriausiai atitinka 50-1000m intervale. Šiame intervale maksimali santykinė paklaida  $\delta = 5,23\%$ .



## Išvados

1. Literatūros analizė rodo, kad darbų, skirtų BO retransliacijos signalų tyrimui yra nepakankamai. Dauguma viešai prieinamų darbų remiasi sklidimo modeliais ryšiui žemė-žemė;
2. Pasiūlyta tyrimo metodika bei atliktas signalo sklidimo AVS-BO terpėje tyrimas. Tyrimo matavimo rezultatų paklaidos: maksimali santykinė paklaida – 6,4 %, maksimalus standartinis nuokrypis – 2,55 dB;
3. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad didinant atstumą, signalas AVS-BO atkarpoje mažėja logaritminiu dėsnio.
4. Pasiūlytas matematinis modelis signalo sklidimo atkarpoje AVS-BO įvertinimui. Šešėliavimo efektui įvertinti modelyje panaudoti kai kurie eksperimentinio darbo [24] rezultatai. Palyginus šį modelį su kitame darbe [25] siūlomu CI modeliu nustatyta, kad rezultatai praktiškai sutampa;
5. Nustatyta, kad signalo sklidimo AVS-BO atkarpoje eksperimentinio tyrimo metu gauti rezultatai skiriasi nuo sukurto modelio rezultatų, nors kokybinis rezultatas yra panašus. Šis neatitikimas yra dėl to, kad šio eksperimento sąlygos skiriasi nuo darbų, kuriais buvo remiamasi kuriant modelį, sąlygų.
6. Pasiūlyti sukurto matematinio modelio korekcijos koeficientai, leidžiantys gana tiksliai (maksimali santykinė paklaida 5,23%) aprašyti signalo sklidimą AVS-BO atkarpoje.

## Literatūros sąrašas

- [1] J. Barnard, „Small UAV Command, Control and Communication Issues,“ 2007. [Tinkle]. Available: [http://www.barnardmicrosystems.com/media/presentations/IET\\_UAV\\_C2\\_Barnard\\_DEC\\_2007.pdf](http://www.barnardmicrosystems.com/media/presentations/IET_UAV_C2_Barnard_DEC_2007.pdf). [Kreiptasi 09 05 2017].
- [2] L. Sundqvist, „Cellular Controlled Drone Experiment: Evaluation of Network Requirements,“ 2015.
- [3] G. Amato, „EUROCAE WG-73 on Unmanned Aircraft Systems,“ [Tinkle]. Available: [http://media.aero.und.edu/uasresearch.org/documents/033\\_Contributing-Stakeholder\\_EUROCAE.pdf](http://media.aero.und.edu/uasresearch.org/documents/033_Contributing-Stakeholder_EUROCAE.pdf). [Kreiptasi 22 05 2017].
- [4] D. Donnithorne-Tait, „Responding to standardisation challenges of the future air transport system,“ 2007. [Tinkle]. Available: <http://www.icas.org/media/pdf/Workshops/2007/REF3%20Responding%20to%20standardisation%20challenges%20of%20the%20future%20air%20transport%20system.pdf>. [Kreiptasi 22 05 2017].
- [5] Y. Zeng, R. Zhang ir T. J. Lim, „Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges,“ *IEEE Communications Magazine*, t. 54, nr. 5, pp. 36 - 42, 2016.
- [6] „Ryšių Reguliavimo Tarnyba,“ [Tinkle]. Available: <http://epaslaugos.rrt.lt/apreptis/>. [Kreiptasi 09 05 2017].
- [7] „802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi (Technical White Paper),“ CISCO, [Tinkle]. Available: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white-paper-c11-713103.pdf>. [Kreiptasi 29 04 2018].
- [8] A. Ghasemi, F. Ghasemi ir A. Abedi, „Basic Principles in Radiowave Propagation,“ įtraukta *Propagation Engineering in Wireless Communications*, Springer, 2011, pp. 23-55.
- [9] R. Flickenger, „A Practical Introduction to Radio Physics,“ įtraukta *Wireless Networking in The Developing World*, 2007, pp. 9-26.
- [10] A. Mitra, *Lecture Notes on Mobile Communication*, 2012.
- [11] J. Turkka ir M. Renfors, „Path Loss Measurements for a Non-Line-of-Sight Mobile-to-Mobile,“ įtraukta *8th International Conference on ITS Telecommunications*, Phuket, 2008.
- [12] J. B. Andersen, „Statistical Distributions in Mobile Communications Using Multiple Scattering“.

- [13] J. Maurer, T. Fugen ir W. Wiesbeck, „Narrow-Band Measurement and Analysis of the Inter-Vehicle Transmission Channel at 5.2 GHz,“ įtraukta *Vehicular Technology Conference*, Birmingham, 2002.
- [14] A. Abdi ir M. Kaveh, „On The Utility of Gamma PDF in Modeling Shadow Fading (Slow Fading),“ *IEEE*.
- [15] N. H. Shepherd, „Radio Wave Loss Deviation and Shadow Loss at 900 MHz,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1977.
- [16] J.-E. Berg, R. Bownds ir F. Lotse, „Path Loss and Fading Models for Microcells at 900 MHz,“ įtraukta *Vehicular Technology Conference*, Denver, 1992.
- [17] B. F. Ginos, „Parameter Estimation for the Lognormal Distribution,“ 2009.
- [18] A. Al-Hourani, S. Kandeepan ir A. Jamalipour, „Modeling Air-to-Ground Path Loss for,“ įtraukta *Vehicular Technology Conference*, Melbourne, 2006.
- [19] I. Popescu, I. Nafornta, P. Constantinou, A. Kanatas ir N. Moraitis, „Prediction of Outdoor Propagation Path Loss With Neural Networks“.
- [20] J. C. Reyes-Guerrero, G. Sisul ir L. A. Mariscal, „Measuring and Estimating the Propagation Path Loss and Shadowing Effects for Marine Wireless Sensor Networks at 5.8 GHz,“ įtraukta *20th Telecommunications forum TELFOR*, Belgrade, 2012.
- [21] A. I. Sulyman, A. T. Nassar, M. K. Samimi ir G. R. J. MacCartney, „Radio Propagation Path Loss Models for 5G Cellular Networks in the 28 GHz and 38 GHz Millimeter-Wave Bands,“ *IEEE Communications Magazine*, 2014.
- [22] E. A. Alcivar, „Repeater Amplifier Systems: Principles and Applications“.
- [23] К. К. ВАСИЛЬЕВ ir М. Н. СЛУЖИВЫЙ, „МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ СВЯЗИ,“ Ульяновск, 2010.
- [24] L. C. Liechty, „Path Loss Measurements and Model Analysis of 2,4GHz,“ Rugpjūtis 2007.
- [25] Shu Sun, Theodore S. Rappaport, „Propagation Path Loss Models for 5G Urban Microand Macro-Cellular Scenarios,“ įtraukta *Vehicular Technology Conference (VTC2016-Spring)*, 2016.

## Arduino Nano programos kodas

Toliau pateikiamas programinis kodas, kuris buvo panaudotas tyrimo metu, duomenų paketų siuntimui iš BO.

```
1 #include <SPI.h>
2 #include "nRF24L01.h"
3 #include "RF24.h"
4 #include "printf.h"
5
6 // Nustatomi įvesčių adresai
7 RF24 radio(7, 8);
8 byte addresses[][6] = {"1Node", "2Node"};
9
10 // Baito dydžio duomenų paketas
11 byte counter = 1;
12
13
14 void setup() {
15     Serial.begin(9600);
16
17     // Nustatomi ryšio modulio parametrai
18     radio.begin();
19     radio.setAutoAck(false);
20     radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
21     radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
22     radio.setChannel(0x6f);
23
24     radio.setRetries(0, 1);
25     radio.setPayloadSize(1);
26     radio.openWritingPipe(addresses[0]);
27     radio.openReadingPipe(1, addresses[1]);
28     radio.startListening();
29     radio.powerUp();
30     radio.printDetails();
31 }
32
33
34 // Pagrindinė programos funkcija didinanti skaitliuko reikšmę
35 // ir ją išsiunčianti
36 void loop(void) {
37     radio.stopListening();
38     printf("Now sending %d as payload.\n ", counter);
39     radio.write(&counter, 1);
40     counter++;
41 }
```

## Matavimo spektro analizatoriumi FSH8 pavyzdys

