



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**NUOTOLINIŲ BŪDU VALDOMŲ ORLAIVIŲ SKRYDŽIO
ATSTUMO PADIDINIMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Karolis Jasas
Projekto autorius

Doc. dr. Vitas Grimaila
Vadovas

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

NUOTOLINIŲ BŪDU VALDOMŲ ORLAIVIŲ SKRYDŽIO
ATSTUMO PADIDINIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (kodas 621H40001)

Projekto autorius Karolis Jasas

(parašas)

(data)

Vadovas Doc. dr. Vitas Grimaila

(parašas)

(data)

Recenzentas Doc. dr. Saulius Japertas

(parašas)

(data)

KAUNAS, 2018



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

Karolis Jasas

**NUOTOLINIU BŪDU VALDOMŲ ORLAIVIŲ
SKRYDŽIO ATSTUMO PADIDINIMO TYRIMAS**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, **Karolio Jasas**, baigiamasis projektas tema „Nuotoliniu būdu valdomų orlaivių skrydžio atstumo padidinimo 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 (kodas 621H40001)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO
UŽDUOTIS

Studentui (-ei)

Karoliui Jasui

1. Baigiamojo projekto tema

„Nuotoliniu būdu valdomų orlaivių skrydžio atstumo padidinimo tyrimas“

„Investigation of the flight distance increasing for remotely controlled aircraft”

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Nuotoliniu būdu valdomų bepiločių orlaivių, veikiančių nelicencijuotame dažnių ruože, valdymo atstumo padidinimo tyrimas.

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

- išanalizuoti BO ryšio sistemos parametrų įtaką skrydžio nuotoliui, pasitelkiant specializuotą modeliavimo programinę įrangą „EDX Signal ProTM“;
- parinkti radijo bangų sklaidimo modelius ir pateikti maksimalaus skrydžio atstumo skaičiavimo išraiškas;
- nustatyti ir optimizuoti radijo ryšio sistemos parametrus maksimalaus skrydžio atstumui užtikrinti;
- sudaryti maksimalaus skrydžio atstumo pasiekimo algoritmą;
- atlikti matavimus ir įvertinti valdymo signalų sklaidimo ypatumus lauko sąlygomis;
- pateikti rekomendacijas bei išvadas dėl ryšio atstumo padidinimo galimybių.

3. Pradiniai Projekto duomenys

Civilinės paskirties nuotoliniu būdu valdomų orlaivių pagrindinės charakteristikos ir ryšio valdymo parametrai.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Geografinės vietovės sąlygų ir ryšio antenų įvertinimas.

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra

Nuotoliniu būdu valdomų orlaivių skrydžio atstumo padidinimo analizė;

Skrydžio atstumo padidinimo projektavimo etapai;

Radio bangų sklidimo skaičiavimo modelių įvertinimas, bei nuotoliniu būdu valdomų orlaivių valdymo signalų sklidimo tyrimas su specializuota programine įranga;

Nuotoliniu būdu valdomų orlaivių signalų sklidimo tyrimas lauko sąlygomis;

Apibendrinimas, išvados.

6. Grafinės Projekto dalies sudėtis

Algoritmo, modeliavimo ir eksperimentinių matavimų schemos, bei grafikai.

7. Projekto konsultantai

Doc. dr. Saulius Japertas

Magistrantas:

(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas.....

(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas

(vardas, pavardė, parašas, data)

Turinys

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas.....	7
Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	10
Santrauka	11
Summary.....	12
Įvadas.....	13
1. BO skrydžio atstumo padidinimo analizė.....	16
1.1. BO valdymo signalų analizė.....	16
1.2. Radijo bangų sklidimo prognozavimas	22
1.3. BO valdymas naudojant „Ad-hoc“ ryšio sistemą	25
1.4. Antžeminės valdymo sistemos parametrai	26
1.5. Populiariausių BO prametrų palyginimas.....	29
1.6. Mokslinių darbų apibendrinimas	29
2. Projektinė dalis	30
2.1. Eksperimentų metodika ir tiriamasis objektas.....	30
2.2. Maksimalaus skrydžio atstumo ryšio projektavimo etapai ir algoritmas	31
2.3. Radijo bangų sklidimo skaičiavimo modeliai.....	33
2.4. Antenos nesuderinamumo nuostoliai.....	34
2.5. Galios biudžeto skaičiavimas	35
2.6. Signalų sklidimo skaičiavimas	35
2.6.1. Signalų sklidimo tyrimas EDX Signal Pro™ programa.....	36
2.6.1.1. Signalų lygio priklausomybės nuo atstumo tyrimas.....	36
2.6.1.2. Ryšio sistemos tarp BO ir AVS tyrimas	40
2.6.2. BO signalų sklidimo tyrimas lauko sąlygomis	46
2.6.2.1. Naudojama įranga.....	46
2.6.2.2. Tyrimo eiga.....	49
2.6.2.3. Tyrimo rezultatai	50
Išvados.....	52
Informacijos šaltinių sąrašas.....	53
Priedai.....	55
1 priedas. RSL priklausomybės nuo atstumo matavimų rezultatai.....	55
2 priedas. Priimto signalo galios matavimų rezultatai.....	60
3 priedas. Signalų lygio priklausomybės nuo atstumo tyrimo rezultatai.....	67
4 priedas. Tyrimo lauko sąlygomis atvaizdavimas.....	71

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas

WI-FI	Belaidžio ryšio technologijos prekinis ženklas
LAN	Vietinis tinklas (angl. <i>Local area network</i>)
WLAN	Bevielis vietinis tinklas (angl. <i>Wireless local area network</i>)
IEEE	Elektros ir elektronikos inžinerijos institutas (angl. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
WIMAX	Belaidžio ryšio technologija (angl. <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>)
OFDM	Ortogonalaus dažnio tankinimo moduliacija (angl. <i>orthogonal frequency division multiplexing</i>)
CBW	Kanalo pralaidumas (angl. <i>channel bandwidth</i>)
E.R.P.	Skleidžiamos spinduliuotės galia (angl. <i>emitted radiated power</i>)
FMCW	Dažninės moduliacijos testinė banga (angl. <i>Frequency modulated continuous wave</i>)
RTD	Žiedinis vėlinimas (angl. <i>Round Trip Delay</i>)
OWD	Vienpusis vėlinimas (angl. <i>One Way Delay</i>)
GCS	Antžeminė valdymo stotis, AVS (angl. <i>ground control system</i>)
Tx	Bazinė stotis, siųstuvas (angl. <i>Transceiver</i>)
Rx	Imtuvas (angl. <i>Receiver</i>)
FFD	Viso funkcionalumo įrenginys (angl. <i>full-function device</i>)
LOS	Tiesioginio matomumo zona (angl. <i>Line of Sight</i>)
RSSI	Priimto signalo stiprumo indikatorius (angl. <i>Received signal strength indicator</i>)
CPU	Centrinis apdorojimo blokas (angl. <i>central processing unit</i>)
UDP	Neapibrėžtas paskirties paketas (angl. <i>Undefined Destination Packet</i>)
BS	Bazinė stotis (angl. <i>base station</i>)
RSL	Radio signalo lygis (angl. <i>radio signal level</i>)
RFID	Radio dažnio identifikavimas (angl. <i>Radio frequency identification</i>)
GSM	Globalus standartas mobiliajai komunikacijai (angl. <i>Global Standart for Mobile Communications</i>)
BO	Bepilotis orlaivis
BPSK	Dvejetainė fazės poslinkio moduliacija (angl. <i>Binary Phase Shift Keying</i>)
QPSK	Kvadratinė fazės poslinkio moduliacija (angl. <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>)
PSK	Fazės poslinkio moduliacija (angl. <i>Phase Shift Keying</i>)

Paveikslų sąrašas

1 pav. <i>Wi-Fi</i> tinklo topologijos a) žvaigždinė, b) iš mazgo į mazgą	15
2 pav. Frenelio zonos.....	16
3 pav. Kryptinės antenos spinduliavimo diagrama: a) vertikalus poliškumas, b) horizontalus poliškumas.....	17
4 pav. Visakryptės antenos spinduliavimo diagrama: a) vertikalus poliškumas, b) horizontalus poliškumas.....	17
5 pav. Walfish-Ikegami (WI) modelio parametrai.....	20
6 pav. BO orlaivių spiečius.....	24
7 pav. BO spiečius valdomas didelio bepiločio orlaivio.....	24
8 pav. Antenų sekimo sistema.....	25
9 pav. Vieno impulso orlaivio sekimas.....	26
10 pav. Spinduolio keičiančio padėtį atvaizdavimas.....	27
11 pav. Eksperimentinio tyrimo vizualizacija.....	28
12 pav. Ilgo skrydžio nuotolio bepiločio orlaivio projektavimo algoritmas.....	30
13 pav. LMDS 90hb antenos kryptiškumas.....	34
14 pav. Nustatomi imtuvo antenos parametrai.....	35
15 pav. Nustatomi siųstuvo antenos parametrai.....	35
16 pav. Atstumo tarp AVS ir BO priklausomybė su antenos stiprinimu.....	36
17 pav. Atstumo tarp AVS ir BO priklausomybė su radijo signalo lygiu.....	37
18 pav. Atstumo tarp AVS ir BO priklausomybė su ryšio patikimumu.....	37
19 pav. Ryšio sistema tarp AVS ir BO.....	39
20 pav. Signalų lygio priklausomybė kai BO yra 7 km nuo AVS.....	39
21 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 7 km nuo AVS.....	40
22 pav. Signalų lygio priklausomybė, kai BO yra 14 km nuo AVS.....	40
23 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 14 km nuo AVS.....	41
24 pav. Signalų lygio priklausomybė, kai BO yra 20 km nuo AVS.....	41
25 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 20 km nuo AVS.....	42
26 pav. Signalų lygio priklausomybė, kai BO yra 13 km nuo AVS.....	42
27 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 13 km nuo AVS.....	43
28 pav. BO SYMA X56W.....	45
29 pav. Valdymo pultas.....	45
30 pav. Patobulintas valdymo pultas su 9 dBi antena.....	46
31 pav. Patobulintas valdymo pultas su 12 dBi antena.....	46

32 pav. Tyrimo lygumų teritorijoje atvaizdavimas.....	47
33 pav. Tyrimo Miškingoje teritorijoje atvaizdavimas.....	47
34 pav. Tyrimo rezultatai.....	49

Lentelių sąrašas

1 lentelė. IEEE 802.11ah charakteristikos.....	17
2 lentelė. IEEE 802.11 ir IEEE 808.15 standartų palyginimas.....	18
3 lentelė. Dažniausiai rinkoje sutinkami ilgo skrydžio nuotolio bepiločiai orlaiviai.....	22
4 lentelė. Radijo bangų sklaidimo modeliai.....	30
5 lentelė. Pagrindiniai nuostoliai radijo ryšio sistemos.....	32
6 lentelė. Apibendrinti modeliavimo rezultatai.....	39
7 lentelė. Tyrimo rezultatai.....	48

Jasas, Karolis. „Nuotoliniu būdu valdomų orlaivių skrydžio atstumo padidinimo tyrimas“. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vitas Grimaila; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Bepilotis orlaivis, Wi-Fi, WLAN.

Kaunas, 2018. 72 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriama nuotoliniu būdu valdomų orlaivių skrydžio atstumo padidinimo atvejai. Šiuo metu sparčiai tobulėja bepiločiai orlaiviai, jie plačiai naudojami ne tik kariniame, bet ir civiliniame sektoriuje, tačiau jų naudojimą riboja trumpi valdymo atstumai, kuriuos įtakoja gamtos ir aplinkos sąlygos bei netinkamai parinkti belaidės sistemos parametrai. Dėl minėtų priežasčių čia susiduriame su radijo ryšio perdavimo problematika.

Tyrimo metu analizuojama kaip būtų galima padidinti skrydžio atstumą patobulinus antžeminę valdymo stotį, bet nepakeitus nuotoliniu būdu valdomo orlaivio parametrų. Sukurtas maksimalaus skrydžio atstumo padidinimo algoritmas. Pasitelkus specializuotą modeliavimo programinę įrangą „EDX Signal Pro™“ atlikti priimamo signalo lygio ir ryšio pateikiamumo skaičiavimai. Taip pat atliktas realus tyrimas lauko sąlygomis – matuojant nuotoliniu būdu valdomo orlaivio nuskrendamą atstumą nuo antžeminės valdymo stoties, patikrintas sudaryto algoritmo veikimas. Eksperimentiniai tyrimai patvirtino algoritmo veikimą. Taip pat buvo patikrinti gamintojo pateikti oficialūs bepiločio orlaivio ir antžeminės valdymo stoties parametrai.

Atlikus civilinės nuotoliniu būdu valdomo orlaivio sistemos patobulinimą nustatyta, kad be didesnių papildomų investicijų, juos galima pritaikyti karinėms žvalgybos reikmėms, kurios nereikalauja didelių orlaivio funkcinių galimybių, taikymosi sistemų, papildomų signalų kodavimo algoritmų ir kitų saugumo parametrų.

Jasas, Karolis. "Investigation of the flight distance increasing for remotely controlled aircraft". Final Degree Project. Master's Final Degree Project supervisor doc. dr. Vitas Grimaila; 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, Wi-Fi, WLAN.

Kaunas, 2018. 72 pages.

Summary

In this master thesis examines of the flight distance increasing cases for remotely controlled aircraft. Unmanned aerial vehicles are currently undergoing rapid development, they are widely used not only in the military tasks but also in the civilian sector, but their uses are limited by short control distances affected by natural and environmental conditions and inadequately selected wireless parameters. We are faced with radio transmission issues for the aforementioned reasons.

During the investigation analyzes how to increase the flight distance by upgrading the ground control station without changing the parameters of the remotely controlled aircraft. By the research has been developed the algorithm for the maximizing flight distance. With specialized radio frequency planning software, "EDX Signal ProTM", has been performed experimental measurements which calculates the received signal level and link availability. For the verify of the algorithm operational has been made a real field investigation which calculate the distances between ground control station and remotely controlled aircraft. Experimental studies confirmed the operation of the algorithm. For the verification of the official manufacturer parameters of the remotely controlled aircraft and ground control station parameters have been also checked.

After the improvement of the civilian remotely controlled aircraft system, has been established that without additional investment, can be them adapted for military intelligence purposes which does not require large operational capabilities of the aircraft, application systems, additional signal coding algorithms and other security parameters.

Ivadas

Šiuolaikiniai nuotoliniu būdu valdomi orlaiviai plačiai naudoja tokias paplitusias belaidžio ryšio technologijas, kaip *Wi-Fi*, judrusis ryšys bei tam tikrais atvejais *RFID* ar *WiMax*. Belaidis tinklas (*Wi-Fi*), ko gero, šiuo metu plačiausiai nuotoliniu būdu valdomuose orlaiviuose naudojama belaidžio ryšio technologija. Didžioji dalis komercinių artimo nuotolio orlaivių naudoja šią technologiją valdymui bei vaizdo informacijos gavimui.

Nuotoliniu būdu valdomuose orlaiviuose plačiausiai naudojama belaidžio ryšio nelicencijuota radijo dažnių juosta, kadangi ją galima naudoti be atskiro radijo spektrą prižiūrinčių tarnybų leidimo. Didžiuliu tempu tobulėjant bepiločiams orlaiviams, didėja ir jų pritaikymo galimybės. Šiuo metu projektuojant bepiločius orlaivius susiduriama su ryšio perdavimo problemomis. Siekiant kontroliuoti bepilotį orlaivį, labai svarbu, kad radijo ryšys tarp jo valdytojo ir orlaivio būtų kuo geresnis. Norint tuo pačiu metu valdyti orlaivį bei gauti aukštos raiškos tiesioginius vaizdo duomenis, reikia, kad radijo ryšys būtų kuo geresnės kokybės. Radijo ryšio sudarymui tarp antžeminės valdymo stoties ir bepiločio orlaivio dažniausiai naudojami 2,4 GHz ir 5,8 GHz dažniai. 2,4 GHz dažnis turi keletą labai didelių trūkumų, pirmas – jis yra labai plačiai naudojamas namų belaidžio interneto duomenų perdavimui, todėl orlaivis, skrendantis arti namų, dėl ryšio trukdžių gali būti prarastas. Kitas trūkumas – dviejų siųstuvų naudojimas – vienas siųstuvus naudojamas tiesioginio vaizdo duomenims perduoti, o kitas – orlaiviui valdyti. Bandant ištaisyti 2,4 GHz dažnio problemas, bepiločiuose orlaiviuose naudojamas 5,8 GHz radijo dažnis. Šis radijo dažnis plačiai naudojamas vienuose iš patikimiausių civilių bepiločių orlaivių „DJI Phantom“ modeliuose [1].

Belaidžio ryšio (*wi-fi*) technologija, plačiausiai naudojama civiliniuose bepiločiuose orlaiviuose, todėl siekiant patobulinti ryšio kokybę, keletas interneto tiekėjų pasiūlė plačias belaidžio LAN tinklo (*angl. WLAN*) IEEE 802.11ah protokolo panaudojimo galimybes lauko sąlygomis. IEEE 802.11ah protokolas leidžia pasiekti ilgesnį perdavimo atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo iki keliolikos kilometrų, naudojant 900 MHz dažnį. Dėl palankių sklidimo sąlygų ir žemo dažnio spektro, 802.11ah gali užtikrinti didesnę veikimo atstumą, lyginant su įprastais 802.11 belaidžiais tinklais, veikiančiais 2,4 GHz ir 5 GHz dažnių juostose. Vis dėlto ši sistema taip pat turi trūkumų, tokių kaip prastas vaizdo perdavimas tiesioginiu būdu bei interferencija – tarp BO ir GSM vartotojų galimi trikdžiai, nes šis standartas dirba artimoje dažnių juostoje [2].

Wi-Fi technologija užtikrina greitą, saugų bei patikimą ryšį. Ši technologija su visakrypte antena veikia 50-100 metrų atstumu ir 800-1000 metrų – su didelio stiprinimo kryptinėmis antenomis. Tačiau tai negali užtikrinti veikimo iki keleto kilometrų [3].

Bepiločiai orlaiviai ne tik naudojami civiliniame sektoriuje, be ir karinėms reikmėms. Plačiausiai BO naudojami žvalgybai bei kovinėse užduotyse. Šiandien karinėms reikmėms naudojami

bepiločiai orlaiviai yra labai brangūs. Siekiant išvengti didelių nuostolių mūšio metu dėl karinių bepiločių orlaivių praradimo arba sugadinimo, siūloma patobulinti jau esamus civilinius BO ir juos panaudoti ne itin atsakingoms karinėms užduotims. Tuo atveju praradus bepilotį orlaivį nebus patiriami dideli nuostoliai, ir vienu metu vietoj vieno brangaus karinio, bus galima panaudoti keliolika daug kartų pigesnių civilinių BO.

Mažą nuotoliniu būdu valdomo orlaivio panaudojimo galimybes riboja tokie faktoriai, kaip maža naudingoji apkrova, trumpas baterijos veikimo laikas bei ribotas belaidžio ryšio stiprumas. Šie apribojimai gali būti kompensuojami panaudojant kelis BO ar kelis radijo mazgus, apjungtus į grupę. Reikia atkreipti dėmesį, kad BO yra ribojami savo dydžiu, todėl norint padidinti atstumą, reiktų keisti siųstuvo antenos parametrus.

Ryšio atstumas tarp BO ir antžeminės stoties gali būti didinamas keičiant antžeminės stoties parametrus. Ribota perdavimo galia ir fiksuotos dažnių juostos yra pagrindiniai ribojantys veiksniai, norint pasiekti didelį atstumą tarp BO ir AVS. Dar viena galimybė – 900 MHz arba 2,4 GHz dažnių juostoje signalų perdavimui naudoti keletą BO, kurie tarnautų kaip ryšio signalo kartotuvai. Ši nauja komunikavimo sistema pagrįsta „*Ad-Hoc*“ tinklo koncepcija. Tai yra judančių įrenginių rinkinys, sujungtas tarpusavyje belaidžio ryšio jungtimis, šie tinklai dar vadinami „*Multihop Ad-Hoc*“ tinklais, kurie gali komunikuoti panaudojus kitus tarpinius mazgus. Šiais tinklais pasiekiamas atstumas priklauso nuo naudojamų „*ad-hoc*“ protokolų, el. maitinimo, valdymo konfigūracijos ir antenų tipų. Taip pat yra siūloma panaudoti palydovinio ryšio įrangą. Palydovai, naudojami kaip relinės stotys, kuriomis duomenys perduodami tarp BO ir AVS. Bet tai yra per brangi sistema ir dažniausiai naudojama itin brangių ilgo skrydžio nuotolio kovinių BO ryšiui su valdymo stotimi užtikrinti. [3]

Šiame darbe yra tiriamos bepiločių orlaivių valdymo duomenų belaidžio perdavimo sistemos. Iki šiol yra paskelbta nemažai mokslinių straipsnių, kuriuose yra nagrinėjami duomenų kokybiniai parametrai belaidžiam tinkle. Galima būtų išskirti pagrindinius veiksnius, kurie lemia didelį mokslinių darbų minėta tema skaičių: šiuo metu sparčiai tobulėja bepiločiai orlaiviai, jie plačiai naudojami ne tik kariniame, bet ir civiliniame sektoriuje, tačiau jų naudojimą riboja trumpi valdymo atstumai, kuriuos įtakoja gamtos ir aplinkos sąlygos bei netinkamai parinkti belaidės sistemos parametrai. Dėl minėtų priežasčių čia susiduriame su radijo ryšio perdavimo problematika.

Šio **darbo naujumas** – pateikiama priemonių visuma aprašyta sudarytame algoritme kaip pasiekti didžiausią galimą skrydžio atstumą su ribotais civilinių BO valdymo sistemų belaidžio ryšio parametrais bei papildomomis priemonėmis, pritaikant minėtus BO karo reikmėms. Atliekant darbą buvo rasta panašių darbų bei mokslinių straipsnių, kuriuose sprendžiami belaidžio ryšio, veikiančio nelicencijuotame dažnių ruože valdymo atstumo padidinimo probleminiai klausimai. Mokslinių darbų, kuriuose bandoma civilinius bepiločius orlaivius pritaikyti karinėms reikmėms bei padidinti jų veikimo atstumą, nebuvo rasta.

Temos aktualumas – šiandien karinėms reikmėms naudojami orlaiviai yra labai brangūs. Karo metu praradus orlaivį, naudotojui tenka labai dideli kaštai, todėl šiuo projektu bandoma pritaikyti pigius civilinius BO karinėms reikmėms bei padidinti jų veikimo atstumą.

Darbo tikslas: Nuotoliniu būdu valdomų bepiločių orlaivių, veikiančių nelicencijuotame dažnių ruože, valdymo atstumo padidinimo tyrimas.

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

- išanalizuoti BO ryšio sistemos parametrų įtaką skrydžio nuotoliui, pasitelkiant specializuotą modeliavimo programinę įrangą „EDX Signal ProTM“;
- parinkti radijo bangų sklidimo modelius ir pateikti maksimalaus skrydžio atstumo skaičiavimo išraiškas;
- nustatyti ir optimizuoti radijo ryšio sistemos parametrus maksimalaus skrydžio atstumui užtikrinti;
- sudaryti maksimalaus skrydžio atstumo pasiekimo algoritmą;
- atlikti matavimus ir įvertinti valdymo signalų sklidimo ypatumus lauko sąlygomis;
- pateikti rekomendacijas bei išvadas dėl ryšio atstumo padidinimo galimybių.

1. BO skrydžio atstumo padidinimo analizė

Nuotoliniu būdu valdomuose orlaiviuose plačiausiai naudojama belaidžio ryšio nelicencijuota radijo dažnių juosta, kadangi ją galima naudoti be atskiro radijo spektrą prižiūrinčių tarnybų leidimo. Šiame skyriuje yra analizuojamos belaidžio ryšio sistemos, kurios plačiausiai naudojamos civiliniuose bepiločiuose orlaiviuose. Remiantis moksline literatūra, analizuojami signalų sklidimo spartos prognozavimo matematiniai modeliai WLAN tinkle. Gilinamasi į tyrimo metodikas, matavimo rezultatus, pateiktus matematinius modelius ir problemas, su kuriomis susiduriama tyrimų metu.

1.1. BO valdymo signalų analizė

Galima rasti nemažai publikacijų, susijusių su BO valdymo signalų tyrimais, kuriais siekiama optimizuoti signalų perdavimo spartą tarp BO ir AVS WLAN tinkluose, tai rodo, kad mokslininkai deda dideles pastangas naujoms technologijoms, kuriomis bandoma išplėsti WLAN duomenų tinklo perdavimo spindulį. Duomenų perdavimui labai didelę įtaką turi spartos prognozavimas. Belaidžio ryšio tinkluose nuolat yra susiduriama su duomenų spartos problemomis, kurios dažniausiai atsiranda dėl tam tikrų geografinių vietos ypatybių, oro sąlygų, interferencijos ir kt.

Norint užtikrinti tinkamą belaidžio ryšio kokybę, būtina parinkti ir išanalizuoti bendrus duomenų perdavimo kokybės parametrus. Šiame skyriuje pateikiami kokybės įvertinimo parametrai WLAN tinkluose, kuriuos taip pat galime pritaikyti projektuojant bepiločių orlaivių valdymo sistemą.

Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnybos pateiktoje metodikoje [4] apibrėžti pagrindiniai paslaugų kokybės parametrai, skirti įvertinti kokybę. Pagrindiniai parametrai yra šie:

- duomenų perdavimo sparta;
- vėlinimas.

Duomenų perdavimo sparta nurodo perduodamų duomenų kiekį per tam tikrą laikotarpį, reikalingą šiems duomenims pilnai ir be klaidų perduoti tarp operatoriaus ir orlaivio išreikštas kilobitais per sekundę [4].

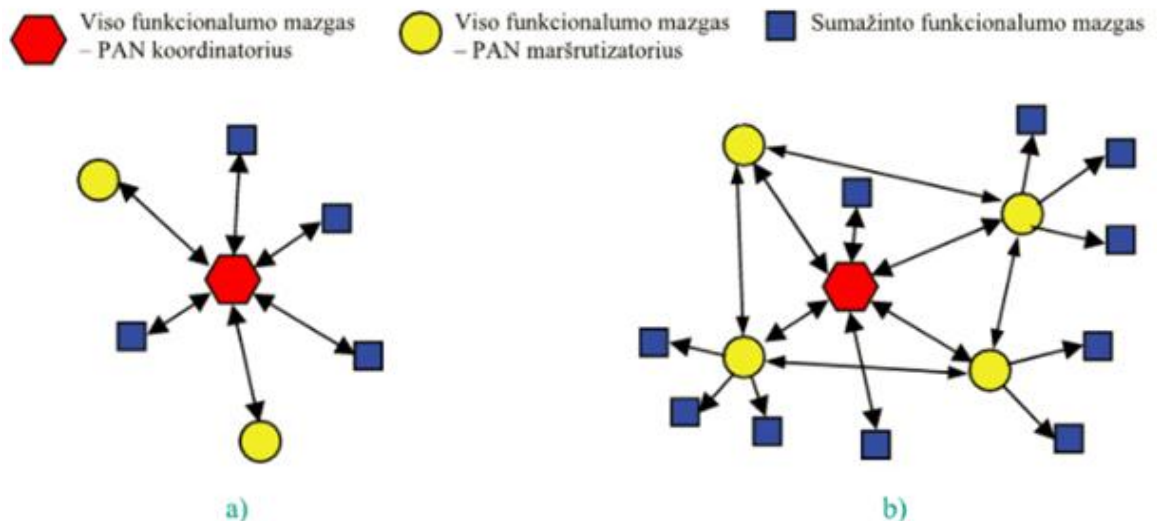
Vėlinimas – tai pusė laikotarpio, per kurį išsiunčiama ir gaunamas atsakymas į užklausą. Vėlinimas gali būti vienpusis (angl. *One Way Delay*) ir dvipusis (angl. *Round Trip Delay*). Vėlinimas labai svarbus parametras, nes orlaivio operatoriui reikia žinoti tikslią orlaivio buvimo vietą, bet atsiradus vėlinimui, tai nustatyti tampa sudėtinga. Vėlinimas labai priklauso nuo signalo sklidimo terpės ir atstumo tarp siųstuvo ir imtuvo. Šiam kokybės rodikliui įvertinti pateikiama apskaičiuota aritmetinė vėlinimo vertė milisekundėmis ir visų bandymų skaičius [4].

$$L = \frac{1}{2}(t_2 - t_1), \quad (1)$$

čia L – vėlinimas, t_1 – momentas, kai išsiunčiama ryšio patikrinimo (*angl. ping*) užklausa, t_2 – momentas, kai gaunamas atsakas į ryšio patikrinimo užklausą.

Darbe [9] aprašomi pagrindiniai duomenų perdavimo sistemos kokybės užtikrinimo parametrai, kurie labai svarbūs atliekant bepiločių orlaivių antenų projektavimo darbus. Šiuolaikiniai orlaiviai yra ganėtinai brangūs ir dėl netinkamo ryšio galima labai lengvai juos prarasti. Todėl projektuojant antenas labai svarbu atkreipti dėmesį į signalų perdavimo kokybinius parametrus:

- **Tinklo topologija** – *Wi-Fi* standartas numato dvi tinklo topologijas: Žvaigždinę (*angl. star*) ir iš mazgo į mazgą (*angl. peer-peer*). Abi topologijos pavaizduotos 1 pav. Žvaigždinės topologijos tinkle mazgai komunikuoja tiesiogiai su koordinatoriumi, todėl jame nenaudojami maršrutizatoriai. Jeigu tinkle yra daugiau nei vienas FFD mazgas, tai, išskyrus koordinatorių, kiti mazgai yra paprasti mazgai. Topologijos iš mazgo į mazgą tinkle naudojami maršrutizatoriai. Jie yra komunikavimo tarpininkai, galintys persiųsti vienų mazgų pranešimus kitiems mazgams [5].



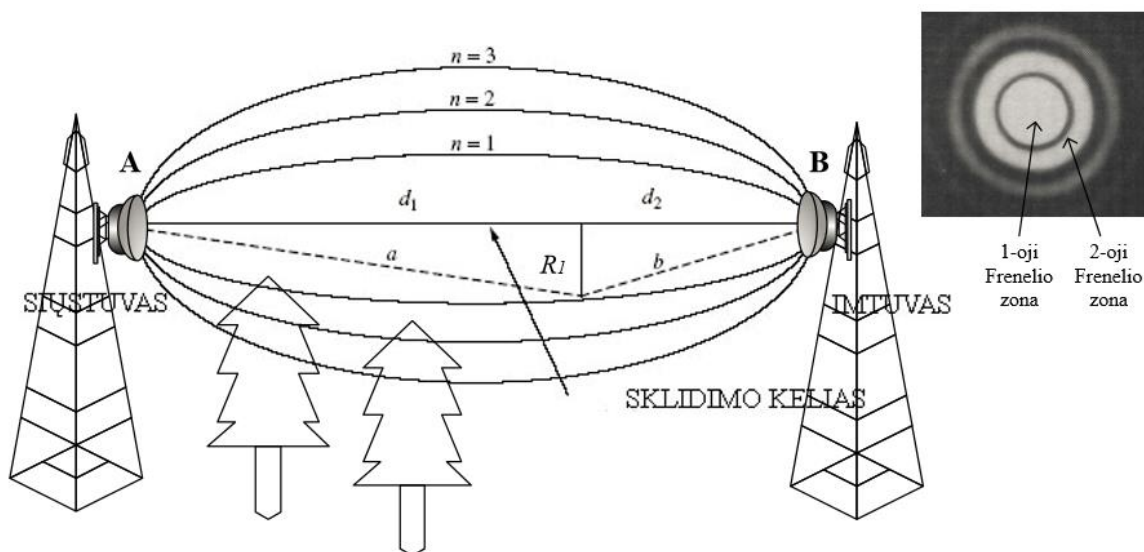
1 pav. *Wi-Fi* tinklo topologijos a) žvaigždinė, b) iš mazgo į mazgą [5]

- **Antenos aukštis** – teisingas antenos aukščio parinkimas priklauso nuo 3 pagrindinių faktorių [6]:

1. Atstumo tarp siųstuvo ir imtuvo, t. y., kuo didesnis atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo, tuo turi būti didesnė antena, dėl žemės kreivumo;

2. Projektuojant radijo ryšio linijas, būtina įvertinti ne tik tiesioginio matomumo liniją tarp imtuvo ir siųstuvo antenų, bet ir Frenelio (*angl. Fresnel*) zoną bei jos dydį. 2 pav. matome pavaizduotas Frenelio zonas, kurios yra elipsoido formos ir jos apgaubia tiesioginį radijo bangų sklidimo kelią tarp dviejų antenų. Pagrindinė elektromagnetinės energijos dalis iš siųstuvo į imtuvą

sklinda minimalios (pirmosios) Frenelio zonos viduje, kuri yra sukimosi elipsoidas su fokusavimo taškais A ir B imtuvo ir siųstuvo antenose.



2 pav. Frenelio zonos [6]

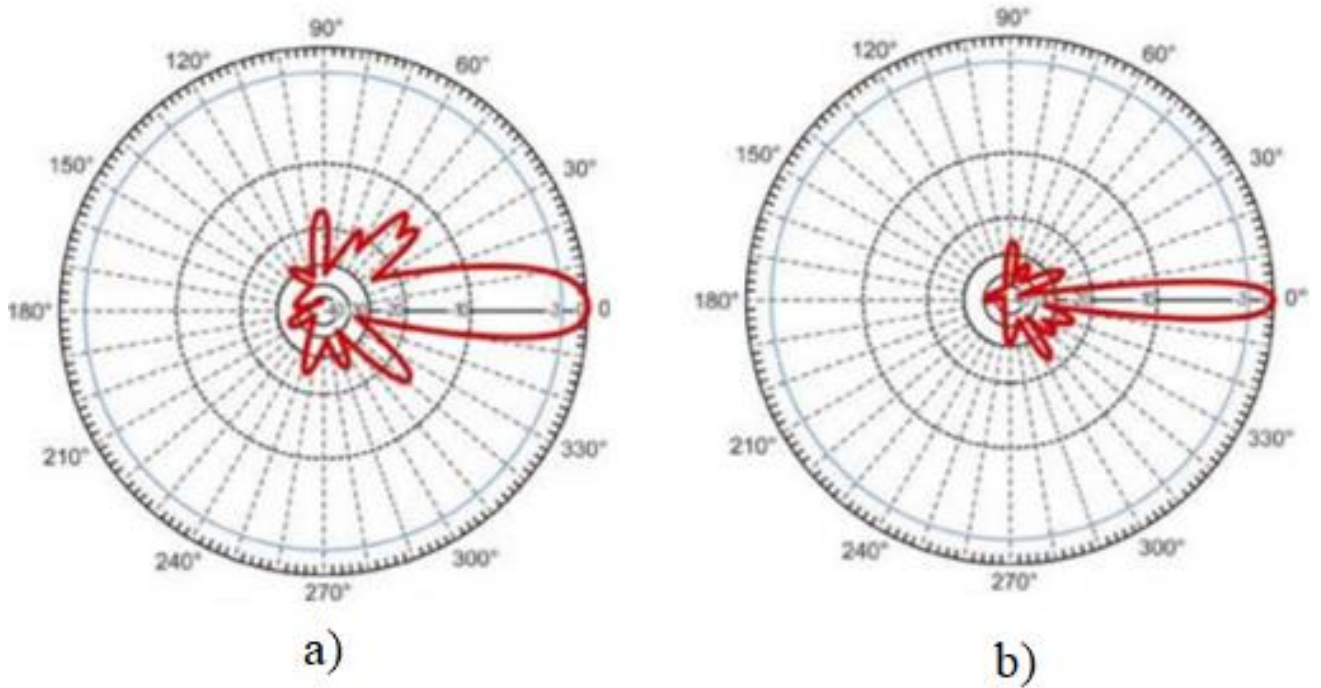
Frenelio zonoje neturi būti jokių kliūčių (medžių, kalvų, pastatų), kad nuo jų atsiradę atspindžiai nesukeltų to paties signalo interferencijos. Taip pat kliūtys gali sugerti (absorbuoti) arba išsklaidyti pagrindinį radijo signalą, sukeldamos žymų signalo lygio sumažėjimą arba visiškai jį nuslopinti. Tiesioginio matomumo sąlygomis priimto signalo galia imtuve kinta nežymiai. Praktikoje laikoma, kad radijo bangos sklinda tiesia linija su nežymia difrakcija, jeigu nėra kliūčių pirmosios Frenelio zonos elipsoide. N-toji Frenelio zona (n-tasis elipsoidas) bet kuriame taške tarp siųstuvo ir imtuvo skaičiuojama pagal tokią išraišką [7]:

$$R_n \cong \sqrt{n\lambda * \frac{d_1 * d_2}{d_1 + d_2}}, m ; \quad (2)$$

čia λ – bangos ilgis, m; d_1 ir d_2 – atstumas nuo siųstuvo ir imtuvo antenų iki skaičiuojamo Frenelio zonos pjūvio, m.

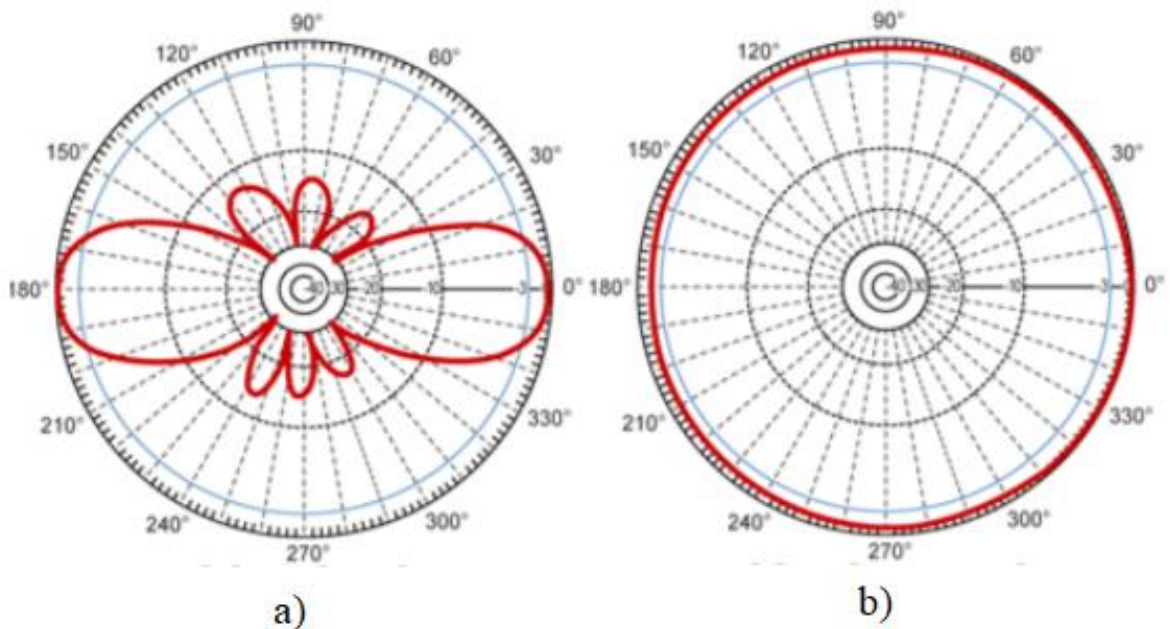
3. Objektai, pasitaikantys kelyje, yra dar vienas svarbus faktorius. Projektuojant 2.4 GHz dažniu antenas reikia aiškios matymo vietos (LOS). Medžių, kalnų, pastatų viršūnės sugeria kai kuriuos signalus. Todėl projektuojant anteną tai reikia įsivertinti [6].

- **Antenos tipas** – dažniausiai WLAN tinkluose naudojami du pagrindiniai antenų tipai [6]:
 1. Kryptinė antena – sukonzentruoja visą energiją tam tikra kryptimi. 3 pav. Pateikta kryptinės antenos spinduliavimo diagrama



3 pav. Kryptinės antenos spinduliavimo diagrama: a) vertikalus poliškumas, b) horizontalus poliškumas [6]

2. Visakryptė antena – antena užtikrina kryptingumą 360°, ji padengia didelį plotą, bet dėl to nukenčia stiprinimo koeficientas. Tokios antenos spinduliavimo diagrama pateikta 4 pav.



4 pav. Visakryptės antenos spinduliavimo diagrama: a) vertikalus poliškumas, b) horizontalus poliškumas [6]

- **Antenos stiprinimas** – tai santykinis antenų gebėjimas nukreipti arba sutelkti radijo dažnių energiją tam tikra kryptimi. Antenos stiprinimas matuojamas decibelais, pagal izotropinį spindulį, dBi. Šis dydis parodo kaip antena efektyviai siunčia ir priima elektromagnetinius virpesius tam tikra kryptimi [6].

Šiuo metu belaidžio ryšio perdavimui plačiausiai naudojami IEEE 802.11a/g protokolai, bet jie turi nemažai trūkumų, susiduriama su trikdžiais, kurie smarkiai sulėtina duomenų perdavimą ar visiškai nutraukia ryšį.

Kaip matome iš pirmos lentelės, kur pateikiamos IEEE 802.11ah standarto charakteristikos, kurios išskirstytos pagal dažnio juostos prieinamumą toje valstybėje, Kinijoje šiam standartui leidžiama dažnių juosta yra žemiausia. Ortogonalus dažnio tankinimo moduliacija leidžia pasiekti 1 GHz dažnių juostą. Pirmoje lentelėje pateikti IEEE 802.11ah tikslinės dažnių juostos ir maksimalios skleidžiamos spinduliuotės galia (e.r.p.) ir kanalo pralaidumas (CWB). Vertės apibrėžiamos pagal kiekvienos šalies spektro naudojimo standartus [1].

1 lentelė. IEEE 802.11ah charakteristikos [1]

Geografinė teritorija	Dažnis, MHz	e.r.p., mW	CWB, MHz
Kinija	614-787; 779-787;	5; 10	1
Europa	863-868.6;	10	1, 2
Japonija	915.9-929.7;	1, 20, 250	1
Singapūras	866-869; 920;-925;	500	1, 2, 4
Pietų Korėja	917-923.5;	3; 10	1, 2, 4
JAV	902-928;	1000	1-20

Antroje lentelėje lyginami atitinkami IEEE 802.11 ir 802.15 standartai. Kaip matome iš lentelės, didžiausias belaidžio ryšio atstumas lauko sąlygomis bus 1 km. Žinoma, norint tai pasiekti, reikia atitikti nemažai sąlygų. Be to, IEEE 802.11ah protokolas vis dar nėra standartizuotas, todėl šiuo metu norint pasiekti didesnę duomenų perdavimo atstumą naudojamais WLAN protokolais, reikia įvykdyti šiuos kriterijus:

- sumodeliuoti kanalų modelius, kurie apima tiek vidaus ir lauko režimus;
- padidinti duomenų perdavimo spartą;
- sumažinti energijos suvartojimą;
- sumodeliuoti antenas ir jų stiprinimus;
- sumažinti lauko trukdžius.

2 lentelė. IEEE 802.11 ir IEEE 808.15 standartų palyginimas [1]

Pavadinimas	802.11a/g	802.11ac	802.11ah	802.15.4g
Dažnis	5 GHz/2.4 GHz	5 GHz	< 1GHz	< 1GHz
Maksimalus duomenų greitis	54 Mbps	6.93 Gbps	78 Mbps	800 kbps
Tankinimas	OFDM	OFDM	OFDM	-
Moduliacija	BPSK, QSPK, 64QAM	BPSK, QPSK, 64QAM, 256QAM	BPSK, QPSK, 64QAM, 256QAM	FSK
Kanalo plotis, MHz	20	20, 40, 80, 160	1, 2, 4, 8, 16	0,2, 0,4, 0,6
Srautų kiekis	1	8	4	1
Ponešlių skaičius	48	52	24	-
Atstumas	>100 m	>100 m	>1 km	>500 m

Straipsnyje [2] yra pateikiami spartos prognozavimo modeliai, bei signalų efektyvumo tyrimas WLAN belaidžio ryšio tinkle. Apibendrinus publikacijoje pateiktą informaciją, galima išskirti 10 pagrindinių problemų su kuriomis susiduriama projektuojant ilgo atstumo WLAN sistemas:

1. Teoriškai ir eksperimentiškai išmatuoti sklidimo kelio nuostoliai (angl. *Path loss*) veikimo nuotolį apriboja ties ≥ 300 m. Atlikus analizę galime teigti, kad tai atsitinka dėl mažos signalo galios imtuve. Todėl siūloma pakeisti IEEE 802.11 įrangą arba padidinti siųstuvo galią (P_{tx});

2. Dėl kryptinės antenos specifikos RSSI svyravimai sudaro apie 6 dB (0-135°). Tai atsitinka dėl to kad kryptinė antena turi siaurą spinduolį. Tokiu atveju siekiant platesnės teritorijos aprėpties siūloma naudoti visakryptinę anteną;

3. RSSI riboja aprėpties diapazoną. Visa tai atsitinka dėl žemės atspindžių ir slopinimo (ribota Frenelio zona). Šio atveju siūloma aukščiau pakelti siųstuvo anteną. Pavyzdžiui, pakėlus anteną 2,8 m atstumas padidėja iki 240 m, kai siųstuvo galia $P_{tx} = 0$ dB;

4. Pilkųjų zonų egzistavimas. Destruktyvi interferencija tarp LOS signalo ir jo atspindžių nuo žemės. Norint tai sumažinti siūloma padidinti antenos aukštį;

5. Interferencija tarp borto ir kitų radijo prietaisų. Tai atsitinka dėl įrangos, kuri skleidžia radijo spinduliuotę, kuria prietaisai gali slopinti vienas kito signalus. Visa įranga sumontuota į orlaivį turi būti suderinta su kitais prietaisais, arba turi būti išlaikytas tam tikras atstumas tarp prietaisų. Siūloma padidinti atstumą tarp įrenginių, taip pat papildomai ekranuoti kontrolerius;

6. Belaidės sąsajos priklausomybė nuo judančių objektų. Tai įvyksta kai spindulys nėra nukreiptas į tikslą. Reikia maksimaliai tiksliai nukreipti antenos spindulį judančio objekto kryptimi;

7. Maksimalus UDP pralaidumas 3D (trimačiuose) BO tinkluose. Pralaidumo priklausomybė nuo antenos aukščio ir padėties;

8. Antenos konfigūracija siaurai arba plačiai aprėpties zonai pasiekti. Tai svarbu dėl to, kad antenos pagrindinio lapelio kryptis įtakoja ryšio našumą. Siaurai aprėpties zonai pasiekti siūloma naudoti horizontalią anteną, plačiai - siūloma naudoti vertikalią anteną;

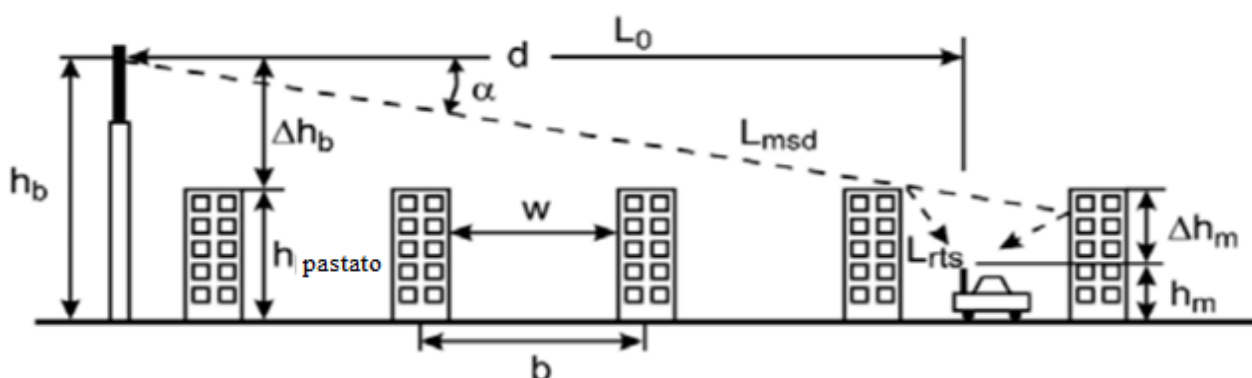
9. Pagrindiniai kanalų modeliai tampa netikslūs didesniuose aukščiuose nei 50 m. Apatinis šešėliavimas ir antenos viršutinis lapelis padidina signalo priėmimą didesniuose aukščiuose. Taigi rekomenduojami nauji kanalų modeliai dideliuose aukščiuose.

Empirinis 802.11 efektyvumo vertinimas dideliais atstumais yra ne trivialus uždavinys, nes jis apima keletą kintamųjų, tokių kaip tinklo topologija, bokštų aukštis, naudojamų antenų tipai ir jų orientacijos bei radijo perdavimo galios. Šią užduotį dar labiau apsunkina tinklo veikimo apribojimai ir kintamųjų tarpusavio priklausomybė.

1.2. Radijo bangų sklidimo prognozavimas

Straipsnyje [2] yra siūlomi dviejų tipų empiriniai matematinėmis formulėmis grįsti prognozavimo modeliai:

1. Walfish-Ikegami (WI) modelis – šis modelis daugiausiai naudojamas tipinėse priemiesčių ir miesto aplinkose, kur pastatų aukštis yra beveik vienodas. Šis modelis įvertina nuostolius laisvojoje erdvėje, nuostolius dėl difrakcijos gatvėse. Šio modelio tikslumas priklauso nuo antenos aukščio. Kuo BS antenos aukštis didesnis už šalia esančius pastatus tuo tikslumas didesnis. Šis modelis sukurtas nuo 800 MHz iki 2 GHz, kur bazinės stoties aukštis nuo 4 iki 50 m. Atstumas iki bazinės stoties nuo 20 m iki 5 km.



5 pav. Walfish-Ikegami (WI) modelio parametrai [8]

5 pav. naudojami žymėjimai: $H_{pastato}$ – pastato ant kurio statoma antena aukštis; Δh_b – antenos aukštis virš pastato; h_b – aukštis pastato su antena; w – gatvės plotis; b – atstumas tarp pastatų.

WI modelio matematinė išraiška

$$L_{WI} = 42,6 + 26\log d_{LOS} + 20\log f_c ; \quad (3)$$

čia f_c – veikimo dažnis, MHz.

$$d_{LOS} = \sqrt{d^2 + h_{rx}^2} . \quad (4)$$

čia d – atstumas tarp bazinės stoties ir abonentinės stoties, m; h_{rx} – abonentinės stoties aukštis, m.

2. COST-HATA modelis – šis modelis taikomas pradinėse radijo tinklo projektavimo stadijose, kadangi šis modelis neįvertina konkrečių vietos objektų įtakos. Apskaičiuotas signalo lygis yra vienodas atstumu d visais azimutinis, nepriklausomai nuo to kokias kliūtis radijo banga sutinka savo kelyje.

$$L_{HATA} = (46,3 + 33, \log f_c - 13,82 \log h_{tx} - a + (44,9 - 6,55 \log h_{tx}) \log d_{LOS}) + C ; \quad (5)$$

$$a = (1,1 \log f_c - 0,7) h_{rx} - 1,56 \log f_c - 0,8 . \quad (6)$$

Priemiestyje – $C = 0$ dB;

Mieste – $C = 3$ dB;

Straipsnyje [9] buvo atliktas laisvos erdvės kelio kitimo su atstumu empiriniai ir eksperimentiniai matavimai naudojant IEEE 802.11g sertifikato ryšio sistemą. Eksperimento metu buvo atliktas tyrimas kaip padidinti atstumą tarp bazinės stoties ir imtuvo. Atlikus eksperimentinius matavimus buvo pasiūlytos kelio praradimui apskaičiuoti formulės:

$$L_{open} = L_{miesto} - 4,78(\log f_c)^2 - 18,733(\log f_c) - 40,98 ; \quad (7)$$

$$L_{miesto} = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_t) + (44,9 - 6,55 \log(h_t)) \log(d) ; \quad (8)$$

čia f_c – veikimo dažnis, MHz; h_t – perdavimo antenos aukštis, m; h_r – priėmimo antenos aukštis, m; d – atstumas tarp antenų, m.

Straipsnyje [10] siūlomas SUI (angl. *Stanford University Interim*) – Stanfordo universiteto preliminarusis prognozavimo modelis, kuris naudojamas netiesioginio matomumo radijo bangų sklaidimo sąlygų įvertinimui. Pradinis modelis buvo sudarytas remiantis JAV atliktais eksperimentiniais matavimais ir apėmė Okumura – Hata signalo slopinimo priemiesčiuose modelį bei praplėtė modelio galiojimo ribas (vietovės tipo, bazinės stoties aukščio). SUI modelis buvo kurtas

radijo sistemoms, dirbančioms 2,5 – 2,7 GHz dažnių juostoje, vėliau pritaikytas 3,4 – 3,6 GHz veikiančioms WiMAX sistemoms ir gali būti naudojamas iki 6 GHz.

SUI modelis prognozuoja radijo bangų sklidimą trijų tipų vietovėse A, B ir C. Vietovių charakteristikos:

* A vietovė charakterizuojama kaip kalnuota ir miškinga (tankus miškas). Šioje vietovėje radijo bangos slopinamos labiausiai.

* B yra vidutinio tipo vietovė. Ji yra arba kalnuota ir mažai miškinga, arba lygi, tačiau miškinga.

* C vietovėje radijo signalas slopinamas mažiausiai, nes ji charakterizuojama kaip lyguma su keliais medžiais. Radijo bangų sklidimo nuostoliai erdvėje skaičiuojami pagal tokią išraišką:

$$L = L_{fs0} + 10\gamma * \log * \left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s ; \quad (9)$$

čia L_{fs0} – nuostoliai laisvoje erdvėje atstumu d_0 , dB; X_f – dažnio korekcijos koeficientas, dB; X_h – abonentinės stoties aukščio korekcijos koeficientas, dB; s – šešėlinį signalo nykimą įvertinanti eksponentė, kintanti nuo 8,2 iki 13,6 dB; d_0 – atstumo etalonas; d – atstumas tarp bazinės ir abonentinės stočių, m; γ – slopinimo nuostolių koeficientas.

Pateikta išraiška tinka kuomet išpildoma sąlyga: $d > d_0$. Paprastai $d_0 = 100$ metrų. s įvertina nuostolius dėl šešėlinio efekto. Paprastai ši reikšmė kinta nuo 8,2 iki 13,6 dB ir priklauso nuo teritorijos tipo. Nuostoliai laisvoje erdvėje atstumu d_0 randami pagal Friis išraišką.

$$L_{fs0} = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right); \quad (10)$$

čia, λ – bangos ilgis, m. γ nuostolių koeficientas kinta nuo 2 (esant tiesioginio matomumo sąlygai) iki 5 (esant visiškai užstotai pirmai Frenelio zonai). Skaičiavimuose naudojama bedimensinė šio koeficiento reikšmė. Slopinimo nuostolių koeficientas didele dalimi priklauso nuo eksperimento metu skirtingoms vietovėms nustatytų a , b , c parametrų (žr. 3 lentelę), o taip pat nuo bazinės stoties (BS) antenos aukščio. Koeficientas mažėja didėjant BS aukščiui. γ skaičiavimo išraiška:

$$\gamma = \left(a - b * h_b + \frac{c}{h_b} \right); \quad (11)$$

čia h_b – bazinės stoties aukštis, m; a , b , c – γ koeficiento parametrai priklausantys nuo vietovės. Bazinės stoties aukštis gali būti nuo 10 m iki 80 m. Abonentinės stoties – nuo 2 m iki 10 m.

Kadangi modelis buvo naudotas dažniuose iki 2 GHz ir taikomas mobilaus ryšio tinklui, yra įvedami dažnio X_f ir abonentinės stoties antenos aukščio X_h korekcijos koeficientai.

$$X_f = 6.0 * \log\left(\frac{f}{2000}\right); \quad (12)$$

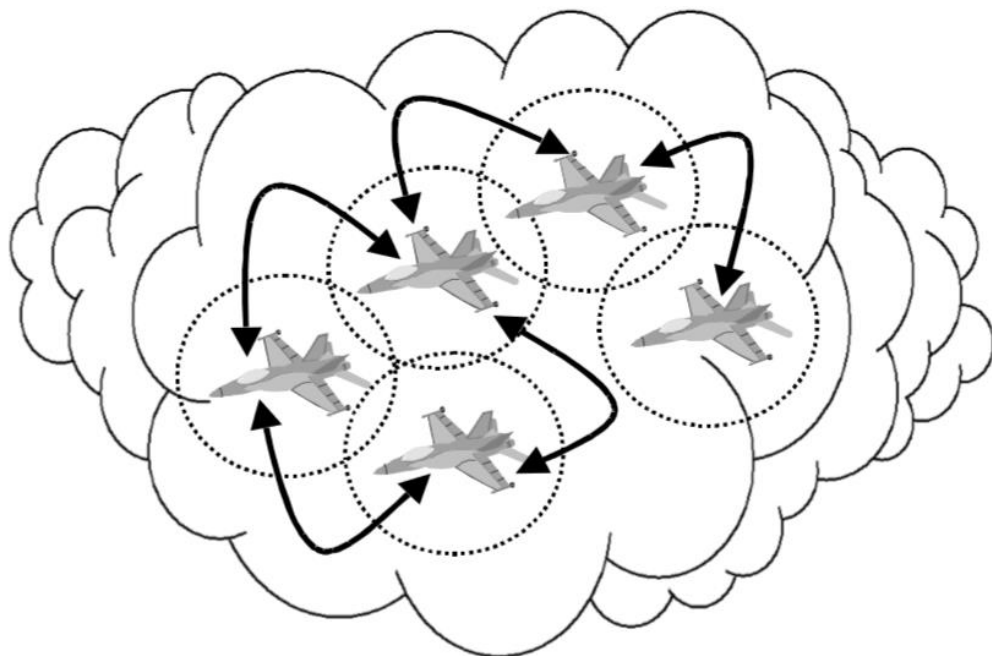
čia f – dažnis, MHz.

C vietovei:

$$X_h = -20.0 * \log\left(\frac{hm}{2}\right); \quad (13)$$

1.3. BO valdymas naudojant „Ad-hoc“ ryšio sistemą

BO veikimo nuotolį galima padidinti naudojant „Ad-hoc“ ryšio sistemą pritaikytą BO valdymui ir informacijos perdavimui. Straipsnyje [11] aprašoma belaidžio ryšio sistema „Ad-hoc“ – judančių įrenginių rinkinys, sujungtų tarpusavyje belaidžio ryšio jungtimi. Kariniai BO žvalgybinę informaciją perduoda į bazinę stotį/štabus iš fronto linijos nutolusios už keleto kilometrų. Šios sistemos dažniausiai naudojamos tokiose vietose kur yra mažai infrastruktūros, t. y. užmiesčio rajonuose, ar miškinguose vietovėse. Straipsnyje siūloma panaudoti „Ad-hoc“ tinklo struktūrą, t. y. panaudoti keletą BO (spiečių) informacijai perduoti. 7 pav. pavaizduotas BO spiečius, kaip matome orlaiviai surinkta informacija vienas su kitu dalinasi, tokiu būdu galima labiau išanalizuoti priešų pozicijas, jų turimą techniką.



6 pav. BO orlaivių spiečius [11]

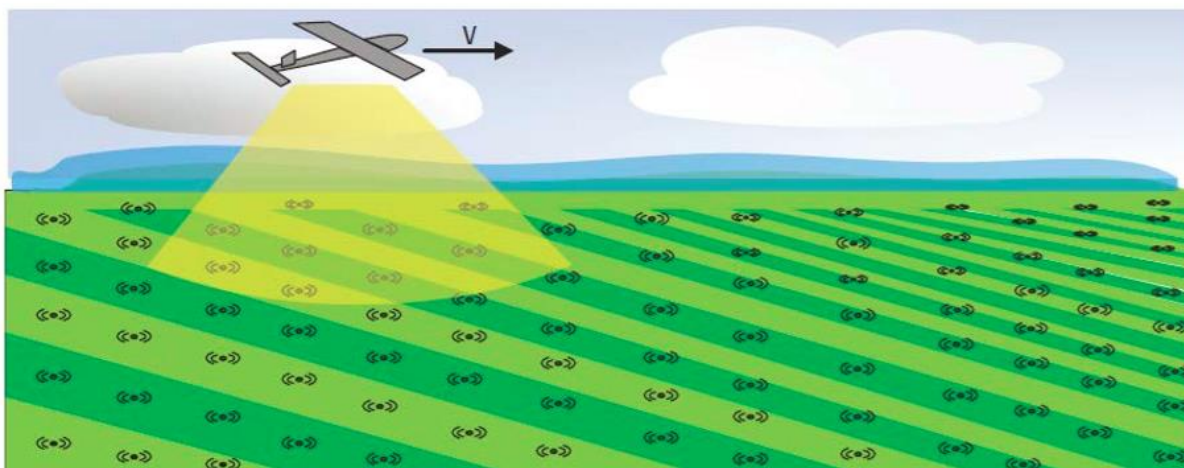
Taip pat straipsnyje pateikiama „ad-hoc“ tinklo architektūra panaudojant didelius BO kaip retransliatorius, kuriuo yra valdomas mažų orlaivių spiečius. Iškritus vienam orlaiviui iš spiečiaus jį

pakeičia kitas ir taip yra uždengiama išskirtusio orlaivio teritorija. Ši sistema pavaizduota 6 pav. „Ad-hoc“ sistema turi ir trūkumų:

1. „Ad-hoc“ tinklai yra riboto dydžio, nes daugelio įrenginių atveju labai padidėja kontrolinių paketų srautas;

2. Yra keliatas neišspręstų saugumo problemų, tokių kaip:

- ✓ Sudėtingas valdymo signalų kodavimas, nes naudojama daug skirtingų orlaivių;
- ✓ Nėra sudėtinga žemai skraidančius orlaivius perimti, ar numušti.

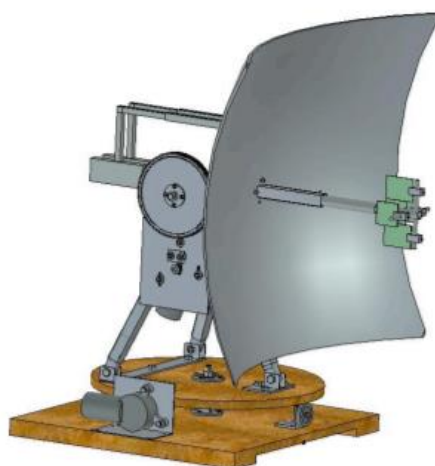


7 pav. BO spiečius valdomas didelio bepiločio orlaivio [12]

1.4. Antžeminės valdymo sistemos parametrai

Straipsnyje [17] aprašoma nešiojama antenų sekimo sistema (*angl. antenna tracking system*), kuri yra naudojama ryšių linijomis su BO. Parabolinė antena, kuri mechaniškai sukasi aplink savo ašį reaguodama į stebėjimo signalus gautus iš BO. Antenos sistema išdėstyta taip, kad vienu dažniu yra valdomas orlaivis, o kitas dažnis skirtas tiesioginio vaizdo perdavimui iš BO į antžeminę valdymo stotį.

Norint išlaikyti bepilotį orlaivį sekimo antenos matomumo zonoje, antena turi išlaikyti savo pagrindinį spindulį orlaivio antenos kryptimi. Antena turi sugebėti keisti savo spindulį, t. y. mechaniškai arba elektriniu būdu sukis aplink savo ašį. Mechaniškai sukant anteną ji gali būti pasukama 360° laipsnių kampu horizontalėje ir 180° laipsnių kampu vertikalėje. Orlaivio sekimo sistema nepaisant nuolatinio orlaivio judėjimo, palaiko antenos spindulio pagrindinę spinduliavimo ašį orlaivio kryptimi. Sekimo sistemos pagrindinis tikslas sumažinti antenos nesuderinamumo nuostolius ir taip išlaikyti pakankamą radijo signalo lygį. Kampinis antenos spindulio plotis tiesiogiai lemia sekimo sistemos pasirinkimą, šis plotis priklauso nuo naudojamo dažnio ir jam didėjant mažėja. BO naudojama 2,45 GHz vaizdo siųstuvus kurio visakryptė antena turi 10 dBi stiprinimą.



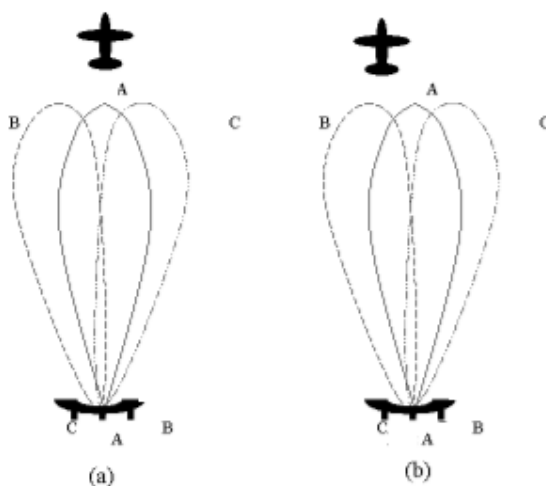
8 pav. Antenų sekimo sistema [17]

Norint stebėti BO ir palaikyti aukštą vaizdo duomenų perdavimo spartą, bei sumažinti triukšmus naudojama antenų sekimo sistema. Straipsnyje siūloma atsižvelgti į siųstuvo ir imtuvo charakteristikas ir dažnių diapazono reikalavimus, taip pasirenkant tinkamo stiprinimo ir tipo antenas.

Norint surasti stebėjimo antenos reikiamą stiprinimą pagal [17] straipsnyje pateiktas rekomendacijas siūloma apskaičiuoti laisvos erdvės sklidimo nuotolį pasitelkiant Friis išraiškos formulę:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (14)$$

Jeigu orlaivis nukrypsta nuo savo kurso, antžeminė antena pasisuka tuo kampu kuriuo orlaivis nukrypo nuo savo kurso. Taip naudojant antenos sekimo sistemą BO gali būti valdomas gana dideliais atstumais nuo antžeminės stoties. Šis principas atvaizduotas 10 pav.



9 pav. Vieno impulso orlaivio sekimas [17]

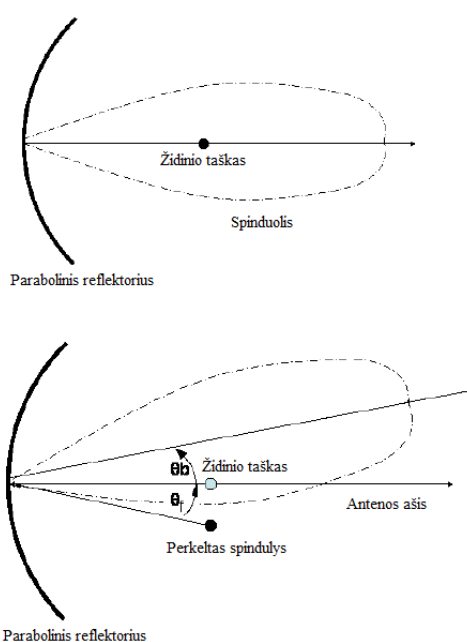
Projektuojant orlaivio sekimo anteną būti suprojektuoti penkis atskirus spinduolius:

- Pagrindinės „ašies“ spinduolis skirtas priimti vaizdo duomenis;
- Du spinduoliai skirti aukščio parametrui;
- Du spinduoliai skirti azimuto parametrui;

Šis spinduolis suprojektuotas taip, kad perneštų informaciją iš centrinės ašies reflektoriaus ir kartu išlaikytų orlaivį ašies centre. 10 pav. matome, kad orlaiviui keičiant kryptį antena sukasi orlaivio judėjimo kryptimi. Nenaudojant sekimo sistemos orlaivis išskristų iš matomumo zonos ir nutrūkus valdymo ryšiui būtų prarandamas. Straipsnyje aprašyta sistema bandymų metu puikiai veikė orlaiviui keičiant skrydžio kryptį.

Straipsnyje [17] taip pat aprašoma sekimo antenos mechaninio pasukimo sistema. Norint kuo tiksliau ir mobiliau valdyti orlaivį, siūloma naudoti lengvai išardomą mechaninę sistemą, kuri susidėtų iš keturių dalių: sukimosi apie horizontalią ašį posūkio stalo, sukimosi apie vertikalią ašį posūkio stalo, parabolinio reflektoriaus, atsvaro, kuriuo subalansuojamas antenos skenavimo kampas.

Kiekviena iš keturių stebėjimo antenos spinduolių iš keramikinio dažnių filtro į logaritminį detektorių gauna signalus. Logaritminis detektorius signalus pakeičia į nuolatinės srovės signalą, kurio įtampa proporcinga radijo dažnio signalo lygiui decibelais (dB). Tada įtampos „signalas“ 10 milisekundžių intervalu patenka į mikroprocesoriaus plokštę, kur yra apdorojamas. Mikroprocesorius išanalizuoja visus keturis spinduolių priimtus signalus, tada palygina įtampos skirtumus tarp abiejų azimuto ir abiejų aukščio spinduolių ir generuoja impulsų skirtumą. Jeigu dviejų priimtų signalų, spinduolių galia nesiskiria, tada azimuto ašyje antena nesisuka. Taip pat įrenginys gali būti perjungtas ir į rankinį valdymą.



10 pav. Spinduolio keičiančio padėtį atvaizdavimas [17]

1.5. Populiariausių BO prametrų palyginimas

Atliekant skrydžio atstumo padidinimo tyrimą būtina išanalizuoti populiariausių bepiločių orlaivių sistemos parametrus. Analizuojant parametrus reikia išanalizuoti BO rinką, t.y. kokie orlaiviai šiuo metu plačiausiai sutinkami rinkoje, taip pat koks jų patikimumas. Atliekant šiuo metu esančių BO palyginimą (pateiktas 3 lentelėje), matome kad vieni brangiausių orlaivių maksimaliai gali nusukti iki 3,5 km. naudojant 2.4 GHz dažnį. Norint nusukti toliau reikia patobulinti antenas. Projektuojant antenas būtina atsakyti į šiuos klausimus:

1. Koks yra didžiausias bazinės stoties diapazonas?
2. Kaip gaunamas signalo stipris skiriasi priklausomai nuo mechaninio antenos pakreipimo?
3. Koks ryšys tarp kanalo pralaidumo ir signalo stiprio?
4. Kaip belaidžio ryšio kokybė skiriasi nuo atstumo?
5. Koks yra $T_x - R_x$ duomenų perdavimo spartos skirtumas su atstumu?

3 lentelė. Dažniausiai rinkoje sutinkami ilgo skrydžio nuotolio bepiločiai orlaiviai [13-16]

	PHANTOM 4	PHANTOM 4 PRO	Karma Drone	DJI Inspire 2
Veikimo dažnis	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Maksimalus perdavimo atstumas	3.5 km	3.5 km	3 km	3.5 km
Siųstuvo galia	17 dBm	17 dBm	17 dBm	17 dBm

1.6. Mokslinių darbų apibendrinimas

Išanalizavus mokslinius straipsnius galima teigti, kad duomenų perdavimo atstumas yra kaip niekada svarbus bepiločiuose orlaiviuose. Padidinti orlaivio skrydžio atstumą galime keliais būdais: pasitelkti labai galingas antenas, bet taip padidėtų energijos nuostoliai, bei didinat atstumą naudojant kryptinę anteną spinduolis yra lašo formos, todėl dideliais atstumais padidėja tikimybė prarasti orlaivį, nes jis gali išskristi iš matomumo zonos. Tokiu būdu yra siūloma panaudoti „*multihop*“ principu paremtą retransliavimo sistemą, bet kadangi ši sistema yra gana brangi, todėl siūloma panaudoti antenų sekimo sistemą. Taip pat straipsniuose nagrinėjamos tinklo topologijos savybės, pateikiami empiriniai radijo bangų sklaidimo prognozavimo matematiniai modeliai, kurie leidžia nustatyti didžiausius galimus skrydžio atstumus esant skirtingiems vietovių tipams.

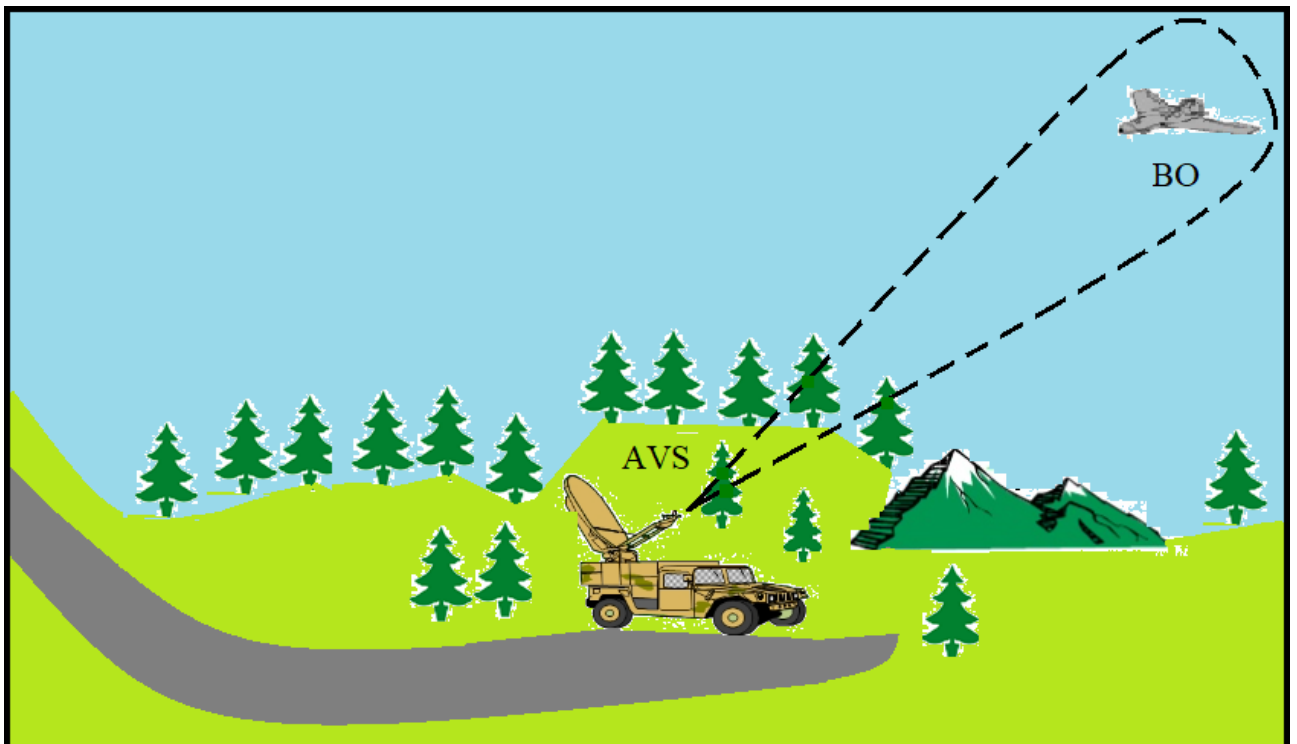
2. Projektinė dalis

Šioje dalyje suprojektuojama radijo ryšio sistema, kuria padidinamas bepiločio orlaivio skrydžio atstumas, parenkami tinkamiausi radijo bangų sklidimo modeliai, bei atliekama sistemos analizė. Atsižvelgiant į BO valdymo tinklo veikimui reikalingus resursus, parenkama antžeminės valdymo stoties įranga ir parametrai.

2.1. Eksperimentų metodika ir tiriamasis objektas

Eksperimento metu naudojamas hipotetinis bepilotis orlaivis, kadangi eksperimentą bandoma pritaikyti visiems BO. Atliekamas tyrimas keičiant antžeminės stoties siųstuvo antenos parametrus, o bepiločio orlaivio antenos parametru nekeičiame. 11 pav. pavaizduota eksperimentinio tyrimo vizualizacija. Kaip matome iš vizualizacijos, tyrimas atliekamas AVS ir BO matomumo zonoje, t. y. antena nukreipta tiesiai į bepilotį orlaivį. Siekiant sumažinti tikimybę, kad orlaivio valdymas gali būti prarastas dėl signalų sklidimo charakteristikų, naudojame antžeminę orlaivio sekimo sistemą, kuri orlaiviui pakeitus skrydžio kryptį pasisuka į orlaivį.

Tyrimo metu nėra vertinamos orlaivio skrydžio charakteristikos tokios kaip aerodinamika bei baterijų veikimo laikas. Tyrimo metu analizuojami orlaivio ir antžeminės valdymo sistemos antenų parametrai.



11 pav. Eksperimentinio tyrimo vizualizacija

Norint pasiekti didžiausią BO skrydžio nuotolį reikia kokybiškos kryptinės antenos ir galingo siųstuvo, o didesniuose (> 2 km) būtina naudoti antenos sekimo ir jos krypties paderinimo sistemą. Naudojant visakryptę anteną ir norint pasiekti tą patį atstumą, kaip su kryptine antena, reikia naudoti ekvivalentinio arba didesnio stiprinimo visakryptę anteną. Tačiau didinant antenos stiprinimą, didėja ir skirtingomis kryptimis priimamų triukšmų lygis, be to, visakryptės antenos yra riboto stiprinimo (iki 18 dBi), todėl su jomis nėra galimybės pasiekti didžiausią atstumą.

Reziumuojant, ko reikia norint turėti maksimalų atstumą:

- kokybiškos antenos dažniausiai yra kur kas geriau, nei galingas siųstuvas;
- būtina išlaikyti atstumą tarp “triukšmaujančių” komponentų;
- pageidautina naudoti vienodo tipo antenas ir jas atitinkamai pozicionuoti;
- jei įranga pati nesugeba filtruoti pašalinių trukdžių – reikia naudoti filtrus.

2.2. Maksimalaus skrydžio atstumo ryšio projektavimo etapai ir algoritmas

Bepilotis orlaivis ir antžeminė valdymo stotis susideda iš daugybės skirtingų komponentų, kurie tiesiogiai įtakoja vienas kito veikimą. Norint pasiekti kuo didesnę skrydžio atstumą yra sudaromas algoritmas, kuris padalijamas į keletą etapų. Kiekvieną etapą reikia tiksliai išanalizuoti ir aprašyti, nes tik tinkamai išanalizavus ir parinkus AVS ir BO parametrus pasieksime didžiausią galimą skrydžio nuotolį.

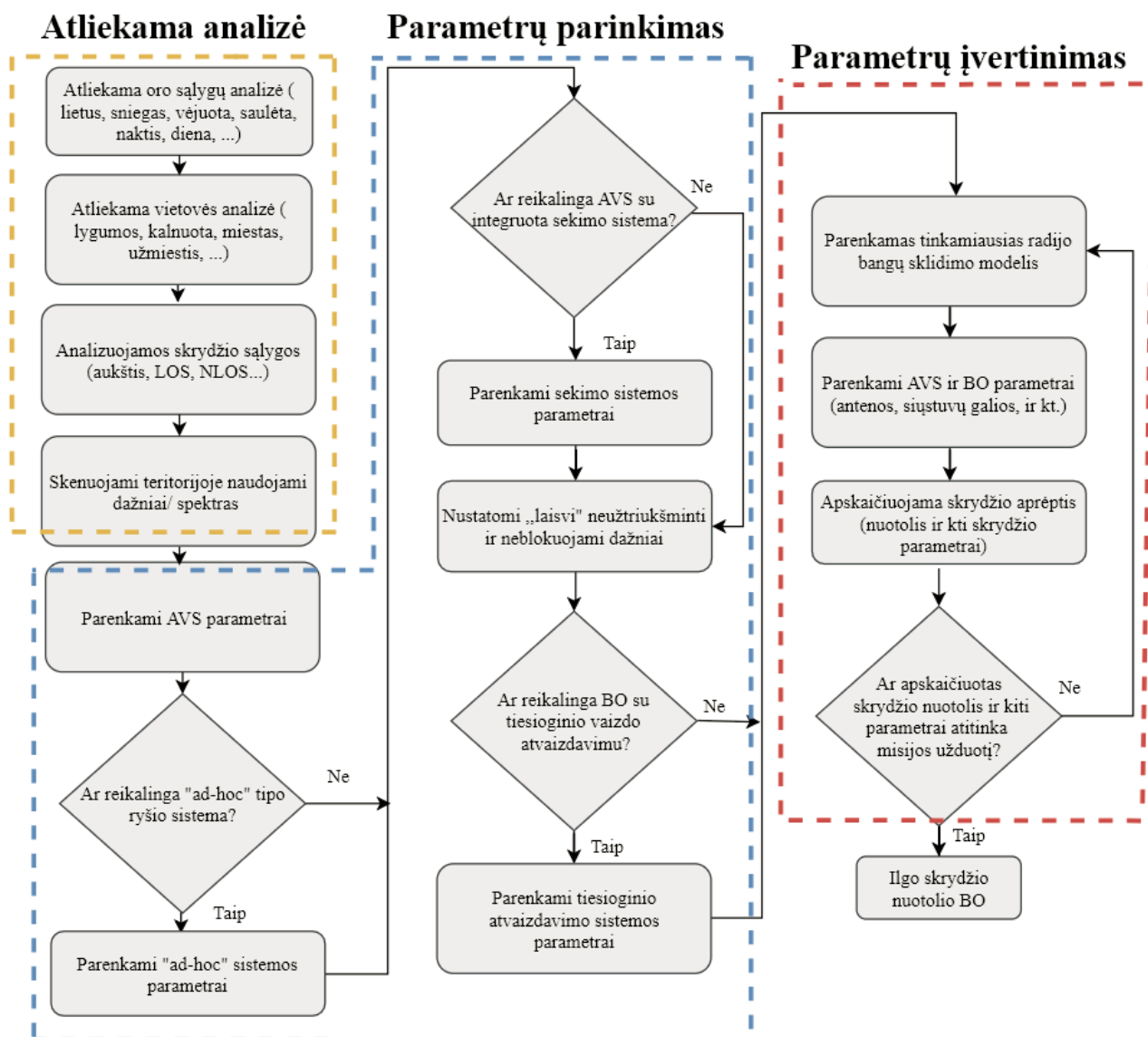
Pirmame etape svarbu tiksliai įvertinti vietovę ir oro sąlygas, todėl algoritme sudaroma vietovės ir oro sąlygų charakteristika: analizuojama ar vietovė yra miškinga, ar kalvuota, ar orlaivis bus naudojamas miesto teritorijoje, kokios šiuo metu yra oro sąlygos, todėl tik tiksliai įvertinus vietovę bei oro sąlygas galime tinkamai pasirinkti antžeminės antenos ir orlaivio parametrus. Pagal šį įvertinimą bus pasirenkamas tinkamiausias radijo bangų sklidimo modelis.

Antrame etape būtina nustatyti belaidžio ryšio interferencines sąlygas, kokie dažnių kanalai naudojami, kokie ne, nes jeigu orlaivis naudojamas miesto vietovėje, tokiu atveju būtinai reikia su spektro analizatoriumi išnagrinėti kokie veikimo dažniai bus tinkamiausi.

Trečiame etape, atliekant gautos užduoties analizę, reikia pasirinkti: ar bus reikalinga AVS su integruota sekimo sistema? Ar reikalinga BO su tiesioginio vaizdo atvaizdavimu? Atsakant į šiuos klausimus pasirenkami tinkamiausi BO ir AVS parametrai. Reikia tiksliai įvertinti ar reikalingas tiesioginis vaizdo transliavimas, kuris energetiniu atžvilgiu dėl didesnio baterijų eikvojimo yra nenaudingas, t. y. reikia tiksliai pasverti ar svarbiau tiesioginis vaizdo transliavimas ar didesnis skrydžio laikas, apskrendant tam tikrą perimetrą.

Paskutiniame etape tikrinami parinkti sistemos parametrai ir įvertinamas skrydžio atstumas. Tik tiksliai atlikus įvertinimą ir patikrą galime pradėti užduoties vykdymą, jeigu patkros metu pastebime netikslumų, tuomet grįžtame į etapą, kuriame parenkame tinkamiausią radijo bangų

sklidimo modelį bei keičiame kitus AVS bei BO parametrus. 12 pav. yra pateikiamas algoritmas pagal kurį bus įvertinama vietovė bei kiti svarbūs faktoriai o taip pat parenkami AVS parametrai didžiausiam BO skrydžio atstumui pasiekti.



12 pav. Nuotoliniu būdu valdomų orlaivių skrydžio atstumo padidinimo algoritmas

Iš pateikto algoritmo matyti, kad modeliuojant ilgo skrydžio nuotolio BO sistemą yra svarbu tinkamai išanalizuoti vietovę, parinkti įrangą, bei jos konfigūraciją. Norint sumažinti galimus nuostolius, tokius kaip orlaivio praradimas arba apgadinimas, o taip pat siekiant išvengti užduoties sąlygų neįvykdymo, būtina paskutinėje stadijoje (prieš išleidžiant orlaivį į misiją) jį pratestuoti. Ir tik atlikus testavimą ir įsitikinus, kad orlaivis bei visa sistema atitinka iškeltas sąlygas galime orlaivį išleisti į misiją. Jeigu nors vienos sąlygos orlaivis ar sistema neįvykdo, grįžtame į pradinę algoritmo etapą, kai iš naujo atliekama dažnių analizė, keičiamas radijo bangų sklidimo modelis ir t.t. Nepavykus tinkamai parinkti sistemos, atsirastų didelė tikimybė prarasti orlaivį ar, dar blogiau, išduoti savo pozicijas galimam priešui

2.3. Radijo bangų sklaidimo skaičiavimo modeliai

Radijo bangų sklaidimo modelių pagalba nustatome AVS veikimo aprėptis, kiek ir kokių reikia AVS stočių, kad užtikrinti kokybišką valdymo ir vaizdo signalų perdavimą. Norint pasiekti didžiausią skrydžio atstumą, bei nuskristi tą patį atstumą su mažiausiais nuostoliais būtina tinkamai parinkti radijo bangų sklaidimo modelį. 4 lentelėje pateikiami radijo bangų sklaidimo modeliai pagal naudojamą dažnį ir vietovę, kurioje bus vykdoma užduotis. To paties modelio nesiūloma naudoti visais atvejais, nes kiekviena vietovė turi savo ypatybes, pavyzdžiui, mieste yra daug aukštų pastatų, o taip pat didelė tikimybė, kad tam tikra dažnių juosta bus labai apkrauta, todėl parenkant radijo bangų sklaidimo modelį būtina tinkamai išanalizuoti vietovę, bei joje naudojamus radijo dažnius.

Skaičiuojant radijo bangų sklaidimą iš AVS į BO valdymui, bei iš BO į AVS informacijos perdavimui reikia apskaičiuoti P_i signalo galią imtuve, dBm.

$$P_i = P_s + G_s(\alpha) - L_\Sigma + G_i(\alpha) - A_{SLA}; \quad (15)$$

čia P_i – signalo galia imtuve, dBm; P_s – siųstuvo spinduliuojama galia, dBm; $G_s(\alpha)$ – siųstuvo antenos stiprinimas, kryptimi α , dB; L_i – slopinimas imtuvo, dB; $G_i(\alpha)$ – imtuvo antenos stiprinimas, kryptimi α , dB; L_s – slopinimas siųstuvo, dB; A_{SLA} – signalo lygio atsarga, dB.

4 lentelėje pateiktos dažniausiai naudojamiems radijo bangų sklaidimo modeliams išvestos $D_{Apr}(\alpha)$ skaičiavimo formulės. Lentelėje $D_{Apr}(\alpha)$ – radijo sistemos aprėpties spindulys, α kryptimi, km. Pateiktos formulės leidžia rasti sistemos aprėptį įvertinant signalo silpimą laisvojoje erdvėje, antenų stiprinimus ir veikimo dažnį. Pateikti radijo bangų sklaidimo modeliai tinka tik skiltyje “Pastabos” nurodytoms vietovėms ir skiltyje “Dažniai” nurodytiems dažnių diapazonams. Kiekvienas atvejis yra skirtingas, todėl norint gauti tikslesnį energetinį biudžetą galima taikyti ir kitus signalų sklaidimo modelius, kurie pasirinktai vietovei gali labiau tikti.

4 lentelė. Radijo bangų sklaidimo modeliai

Dažniai	Modelis	Radijo bangų sklaidimo kelio modeliai	Pastabos
0,8 – 2 GHz	COST-WI	$D_{Apr}(\alpha) \leq 10^{\frac{P_s+A-P_{rib}+G_s(\alpha)-42,6-20\log f_c}{20}};$	Atstumas nuo 20 m iki 5 km. Miesto tipo vietovėse, kai $L_{msd} + L_{rts} \leq 0$
0,15 – 2 GHz	HATA	$D_{Apr}(\alpha) \leq 10^{\frac{P_s+A-P_{rib}+G_s(\alpha)-42,6-20\log f_c}{26}};$	Atstumas iki 20 km. Šį modelį galima naudoti kaimo, priemiesčio, miesto tipo vietovėse.

0,7-100 GHz	Friis	$D_{Apr}(\alpha) \leq 10^{\frac{P_s+A-P_{rib}+G_s(\alpha)+G_i(\alpha)-92,45-20\log(f)}{20}};$	Ši modelį galima naudoti kaimo, priemiesčio, miesto tipo vietovėse.
1 – 6 GHz	SUI	$D_{Apr}(\alpha) \leq \left(10^{\frac{P_s+A-P_{rib}+G_s(\alpha)+G_i(\alpha)-x_f-x_h-L_{fso}-s}{10\gamma}} \right) \times d_0;$	$\gamma=4,7$ miestas; $\gamma= 3,3$ – priemiestis $\gamma= 1,8$ – užmiestis
2 GHz	COST-HATA	$D_{Apr}(\alpha) \leq 10^{\frac{P_{rib}-P_s-A-G_s(\alpha)-G_i(\alpha)+46,3-33,9\log f_c+13,83\log h_{tx}+a-C}{44,9-6,55\log h_{tx}}}$	$a = (1,1\log f_c - 0,7)h_{rx} - 1,56\log f_c - 0,8;$ $C = 0 \text{ dB (Priemiestis);}$ $C = 3 \text{ dB (Miestas);}$

Reikia pastebėti, kad formulės nurodytos 4 lentelėje galioja tik idealiomis radijo bangų sklaidimo sąlygomis, realiomis sąlygomis papildomai reikia įvertinti visus signalo nuostolius. Taikant radijo bangų sklaidimo modelį būtina atsižvelgti ir palikti signalo lygio atsargas, nes kitu atveju padidėja tikimybė prarasti orlaivį.

Skaičiuojant signalo galią būtina įvertinti visus galimus slopinimus, kurie yra sudedami.

$$L_{\Sigma} = L_l + L_{at} + L_o + L_m + L_{sist}; \quad (16)$$

Slopinimai L_{Σ} gali atsirasti dėl kritulių L_l , atmosferinių dujų L_{at} , įvairių vietovių kliūčių L_o , taip pat įvertintinus signalo nykimą dėl daugiakrypčio sklaidimo efekto, atspindžių ir interferencijos L_m , signalo nuostoliai radijo sistemos jungtyse, bangolaidyje radijo kabelyje ir pan. L_{sist} .

2.4. Antenos nesuderinamumo nuostoliai

Antenos nesuderinamumo nuostoliai (*angl. Depointing loss*) atsiranda, kai siuntimo ir priėmimo antenos viena kitos atžvilgiu orientuojamos ne tiksliai pagal pagrindinę spinduliavimo ašį. Tokiu atveju keičiasi antenos stiprinimas, priklausomai nuo nukrypimo kampo Θ . Antenos stiprinimas tarp Θ ir $\Theta 3\text{dB}/2$, t. y. kryptimi, artimai pagrindinio spindulio ašiai, randamas pagal tokią išraišką:

$$G(\theta) = G_{max} - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, \text{ dBi} \quad (17)$$

Kaip matome iš formulės, siekiant iki minimumo sumažinti antenos nesuderinamumą reiktų naudoti antenos sekimo sistemą (*angl. antenna tracking system*), nes kitu atveju naudojant galingas siųstuvo antenas bus patiriami dideli nuostoliai.

2.5. Galios biudžeto skaičiavimas

Galios biudžeto (*angl. Link budget*) skaičiavimas leidžia nustatyti maksimalius galimus nuostolius tarp siųstuvo ir imtuvo antenų. Visose radijo ryšių sistemose yra nuostolių iš įvairių šaltinių. Šie nuostoliai gali būti pastovūs, kiti priklauso nuo statistinių duomenų, o kiti priklauso nuo oro sąlygų. 5 lentelėje pateikti pagrindiniai galios biudžeto skaičiavimą įtakojantys veiksniai. Galios biudžeto skaičiavimas yra labai svarbus radijo ryšio sistemų projektavime, nes apskaičiavus biudžetą galime nustatyti maksimalius galimus nuotolius tarp siųstuvo ir imtuvo antenų. Atsižvelgiant į slopinimą ir į AVS įrangos parametrus ir kokybę gali būti įvertinta kiek energijos siųstuvas turėtų išspinduliuoti, kad ryšio sistema turėtų patikimą ryšį.[18]

5 lentelė. Pagrindiniai radijo ryšio sistemos nuostoliai

Kelio nuostoliai	Signalų perdavimo nuostoliai	Nuostoliai laisvojoje erdvėje	
		Atmosferiniai nuostoliai	Atspindžiai
			Lietaus silpninimas
			Dujų sugėrimas
			Depolarizacija
			Dangaus sukelti triukšmai
	Vietiniai efektai		
	Vietiniai nuostoliai	Įrangos nuostoliai	Maitinimo nuostoliai
			Visi kiti įrangos galimi nuostoliai
		Nuostoliai dėl gamtinių sąlygų	

Tinkamai apskaičiavus galios biudžetą ir kelio nuostolius (slopinimą) galime tinkamai parinkti ryšio sistemos parametrus, žinodami, kad ryšio biudžetas pakankamas ir jis turi atsargą. Jeigu galios biudžetas per mažas keičiame sistemos / įrangos parametrus.

2.6. Signalų sklaidimo skaičiavimas

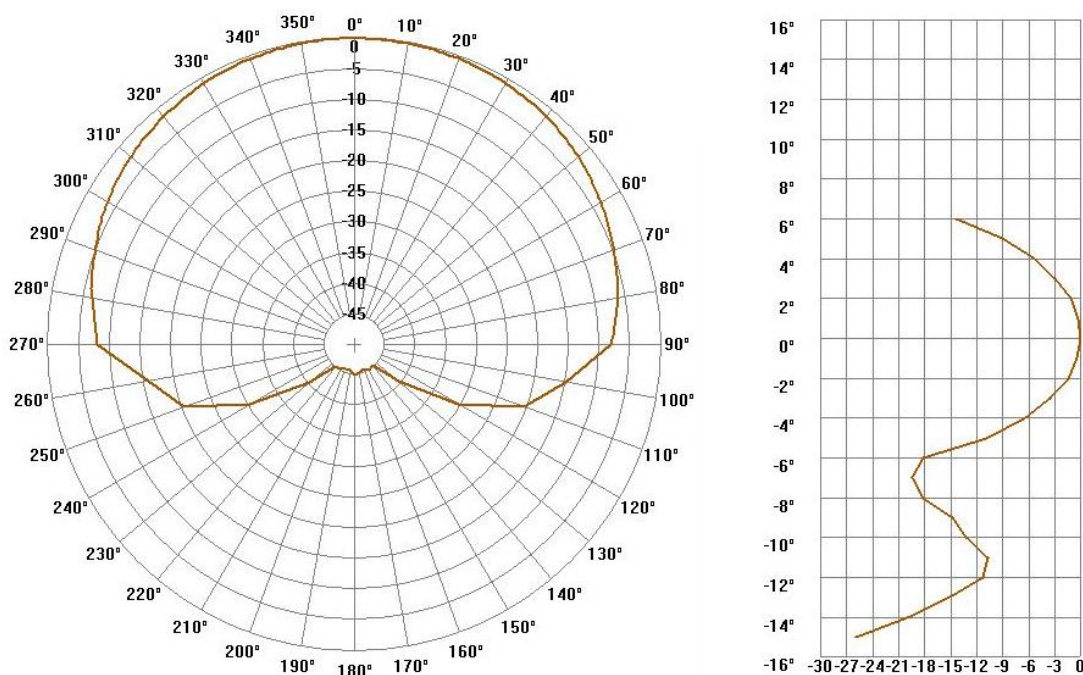
Eksperimentinis tyrimas atliekamas dviem etapais. Pirmame etape kompiuterine belaidžio ryšio signalų sklaidimo prognozavimo programine EDX Signal ProTM įranga parenkame siųstuvo ir imtuvo antenas ir keičiant jų parametrus atliekamas signalų sklaidimo prognozavimas. Antrame etape tyrimas atliekamas lauko sąlygomis, pirmiausia išmatuojamas BO skrydžio atstumas nekeičiant AVS parametrų, antru atveju pakeitus AVS parametrus.

2.6.1. Signalų sklaidimo tyrimas EDX Signal Pro™ programa

Šiandien dažniausiai sutinkamose komerciniuose bepiločiuose orlaiviuose belaidžio ryšio sistemos dažnis – 2.4 GHz (3 lentelė). Populiariausio šiai dienai bepiločio orlaivio „PHANTOM“ antenos stiprinimas yra 3 dBi. Belaidžio ryšio signalų perdavimo sistemos modeliavimas atliktas pasinaudojus programine EDX Signal Pro™ įranga. Visų pirma tyrimas atliekamas analizuojant signalo lygio priklausomybę nuo atstumo. Antru atveju tyrimas atliekamas analizuojant antenos stiprinimo bei jos kryptiškumo priklausomybę nuo atstumo.

2.6.1.1. Signalo lygio priklausomybės nuo atstumo tyrimas

Atliekant nuotoliniu būdu valdomo orlaivio valdymo sistemos tyrimą, kuriuo bandoma padidinti skrydžio atstumą, būtina atlikti radijo signalo lygio priklausomybės nuo atstumo tyrimą. Tyrimo metu pasirinkta plačios spinduliavimo diagramos bazinės stoties antena LMDS 90hb. Šios antenos kryptingumas yra 90°, naudojama vertikali signalo poliarizacija.



13 pav. LMDS 90hb antenos kryptiškumas

Modeliuojant pasirenkamas 3 metrų antžeminės stoties antenos talpinimo aukštis, praktikoje tai pasiekama panaudojant specialų trikojų anteninį laikiklį. Priimame, kad nuotoliniu būdu valdomas orlaivis pakilęs 250 m aukštyje. Keisdami siųstuvo galią skaičiuojame atstumą, signalo lygį imtuve ir ryšio pateikiamumą. 14 ir 15 pav. pateikti siųstuvo bei imtuvo antenų parametrai. Viso eksperimento metu nuotoliniu būdu valdomo orlaivio imtuvo jautrio, antenos stiprinimo ir kt.

parametrai nekeičiami. Ryšio pateikiamumas pradedamas vertinti pasiekus ne mažesnę kaip 99,99 % reikšmę.

Link Receiver Parameters

Antenna:

Use antenna type?
Antenna type: LMDS customer antenna type 1

Antenna Pattern: Use file Isotropic

Antenna pattern file name:
C:\PROGRAM FILES\EDX\SIGN Browse... Display pattern...

Set Antenna orientation/tilt toward transmitter site:

Az. orient.: 211.29 ° Beam tilt: -29.23 ° Rotate antenna Beam tilt az.: 211.29 °

Antenna COR height (AGL): 250.00 m

Cross polarization rejection: 15.00 dB

Diversity operation:

Diversity type: unprotected

Diversity antenna gain: 5.00 dBi

Diversity antenna spacing: 0.00 m

Reliability Method:
Reliability Method 1 Edit

Receiver:

Use Receiver Type Database:
Receiver Type: Cellular/PCS CDMA

Required service threshold: -101.0 dBmW

Required service C/(I+N) ratio: -6.0 dB

Receiver noise level: -95.0 dBmW

Receiver noise figure: 3.0 dB

Equivalent receiver noise bandwidth: 40.0000 MHz

Receiver filter file code: 0

Adjacent Channel Rejection: 25.0 dB

Transmission system:

Transmission line type: custom

Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 3.00 dB

Multiplexer/circ. loss: 0.00 dB

Misc. system losses: 0.00 dB

Antenna gain: 3.00 dBi

Radome loss: 0.00 dB

OK Cancel Help

14 pav. Nustatomi imtuvo antenos parametrai

Link Transmitter Parameters

Antenna:

Use antenna type?
Antenna type: LMDS customer antenna type 1

Antenna Pattern: Use file Isotropic

Polarization: Horizontal Vertical

Antenna pattern file name:
C:\Program Files\EDX\SignalPr Browse... Display pattern...

Set Antenna orientation/tilt toward receiver site?

Az. orient.: 31.29 ° Beam tilt: 32.09 ° Rotate antenna Beam tilt az.: 31.29 °

Antenna COR height (AGL): 3.00 m

Cross polarization attenuation: 18.00 dB

Transmitter:

Use transmitter type database?
Transmitter type: Cellular (850MHz) 20 watt

Maximum transmit power per channel: 0.00 dBW

Minimum transmit power per channel: 0.00 dBW

Power spectral density file code: 0

Transmission system:

Transmission line type: custom

Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 3.00 dB

Multiplexer/circ. loss: 0.00 dB

Misc. system losses: 0.00 dB

Antenna gain: 3.00 dBi

Radome loss: 0.00 dB

Total ERPi: 0.00 dBW

OK Cancel Help

15 pav. Nustatomi siųstuvo antenos parametrai

Keičiant siųstuvo galią modeliuojamas maksimalus skrydžio atstumas. Modeliavimo rezultatai esant skirtingiems antžeminės stoties antenų stiprinimams pateikiami trečiame priede.

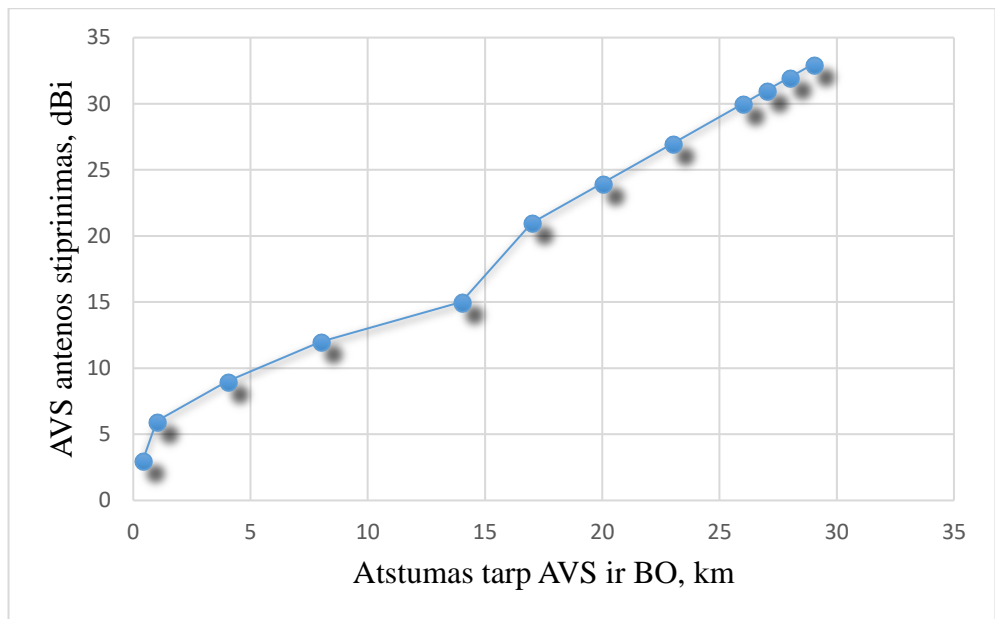
Atlikus tyrimą nustatyta, kad atstumas tarp antžeminės valdymo stoties priklauso nuo antenos stiprinimo. Kuo didesnis antenos stiprinimas, tuo didesniu atstumu orlaivis gali palaikyti ryšį.

Apibendrinti modeliavimo rezultatai gauti su belaidžio ryšio signalų sklaidimo prognozavimo programine EDX Signal ProTM įranga, pateikti 6 lentelėje bei 16-18 pav. diagramose. Lyginant BO ir antžeminės valdymo stoties konfigūracijas galime daryti išvadą, kad norint pasiekti didžiausią skrydžio atstumą reikia naudoti kryptinę kuo didesnio stiprinimo anteną. Su visakryptine antena norint pasiekti tą patį skrydžio atstumą reiktų naudoti dar didesnio stiprinimo anteną, kadangi didinant antenos stiprinimą, didėja ir skirtingomis kryptimis priimamų triukšmų lygis, be to, visakryptės antenos yra riboto stiprinimo (iki 18 dBi), todėl su jomis nėra galimybės pasiekti didžiausią atstumą.

Didžiausias atstumas, kurį pavyko sumodeliuoti padidinus antžeminės valdymo stoties (AVS) antenos aukštį bei jos stiprinimą iki 33 dBi, gautas apie 29 km. Apibendrinti modeliavimo rezultatai pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Modeliavimo rezultatai

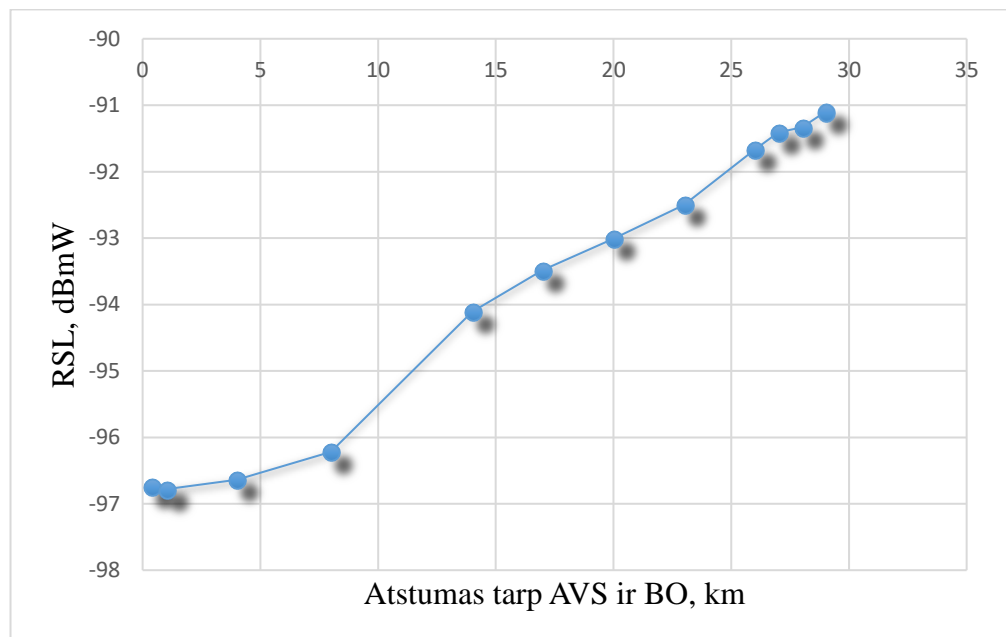
Bandinio Nr.	Veikimo dažnis, MHz	AVS antenos aukštis, m	BO aukštis, m	AVS antenos stiprinimas, dBi	BO antenos stiprinimas, dBi	Atstumas tarp AVS ir BO, km	Imtuvo jautris, dBm	RSL, dBmW	Ryšio pateikiamumas, %
1.	2400	3	250	3	3	0,4	-101	-96,74	99,9999
2.				6		1		-96,78	99,9999
3.				9		4		-96,64	99,9999
4.				12		8		-96,22	99,9982
5.				15		14		-94,11	99,9977
6.				21		17		-93,48	99,9971
7.				24		20		-93,01	99,996
8.				27		23		-92,5	99,9949
9.				30		26		-91,67	99,9945
10.				31		27		-91,41	99,9943
11.				32		28		-91,33	99,9935
12.				33		29		-91,1	99,9932



16 pav. Atstumo tarp AVS ir BO priklausomybė nuo AVS antenos stiprinimo

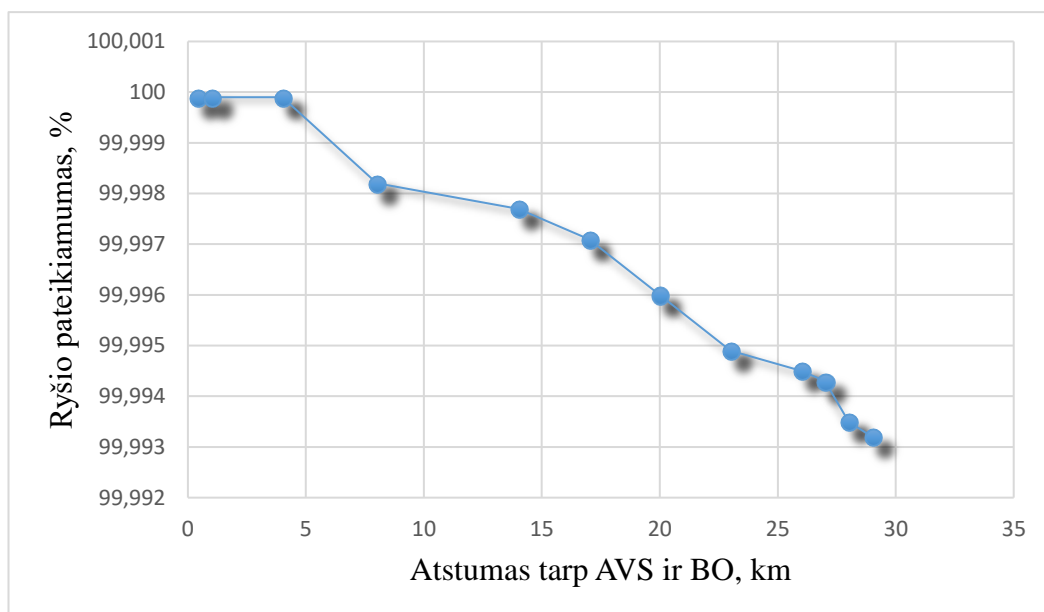
Kaip matome 16 pav. grafike, kuriame pateikiama atstumo tarp AVS ir BO priklausomybė nuo AVS antenos stiprinimo yra beveik tiesinė. Padidinus antžeminės valdymo stoties antenos stiprinimą 6 dBi atstumas padidėja du kartus.

17 pav. grafike pateikiama radijo signalo lygio priklausomybė nuo atstumo tarp AVS ir BO, kaip matome, didėjant atstumui signalo lygis laipsniškai mažėja.



17 pav. Radijo signalo lygio priklausomybė nuo atstumo tarp AVS ir BO

18 pav. grafike pateikiama ryšio pateikiamumo priklausomybė nuo atstumo tarp AVS ir BO. Didėjant atstumui ryšio pateikiamumas palaipsniui mažėja dėl radijo signalo nuostolių, kurie dideliais atstumais vis labiau didėja.



18 pav. Atstumo tarp AVS ir BO priklausomybė su ryšio pateikiamumu

Atliekant skaičiavimus su specializuota EDX Signal Pro™ programine įranga nustatyta, kad padidinus stiprinimą 3 dBi, atstumas padidėja vidutiniškai 1,5 karto. Didėjant atstumui tarp AVS ir BO radijo signalo lygis didėjant atstumui mažėja apie 3 dB, tuo pačiu ryšio pateikiamumas mažėja 0,0033 %.

2.6.1.2. Ryšio sistemos tarp BO ir AVS tyrimas

Ryšio sistemos tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės valdymo stoties tyrimo metu analizuojama operacijos teritorija kurioja bus atliekama užduotis. Šis tyrimas svarbus nes galime nustatyti kokio stiprinimo bei kokio aukščio antenos reikalingos įvykdyti užduotį tam tikroje teritorijoje. Belaidžio ryšio sistemos modeliavimas atliktas pasinaudojus programine EDX Signal Pro™ įranga. Tyrimo metu vietovė parenkama atsitiktinai taip, stengiamasi kiek galima tiksliau įvertinti atsitiktinę vietovę, kaip kad karo metu gavus užduotį iš Štabo – atlikti prieš teritorijos žvalgybą ir taip paremti pėstininkų būrį tiesioginio vaizdo pateikimu.

Gavus raportą iš Štabo atliekama – užduoties bei operacijos rajono analizė. Atliekant analizę naudojamės 12 pav. pateiktu algoritmu, atkreipiant dėmesį į šiuos aspektus:

- Kokio dydžio operacijų rajonas, koks teritorijos reljefas, ar ši vietovė tankiai apgyvendinta, ar yra aukštų pastatų, aukštikalnių;

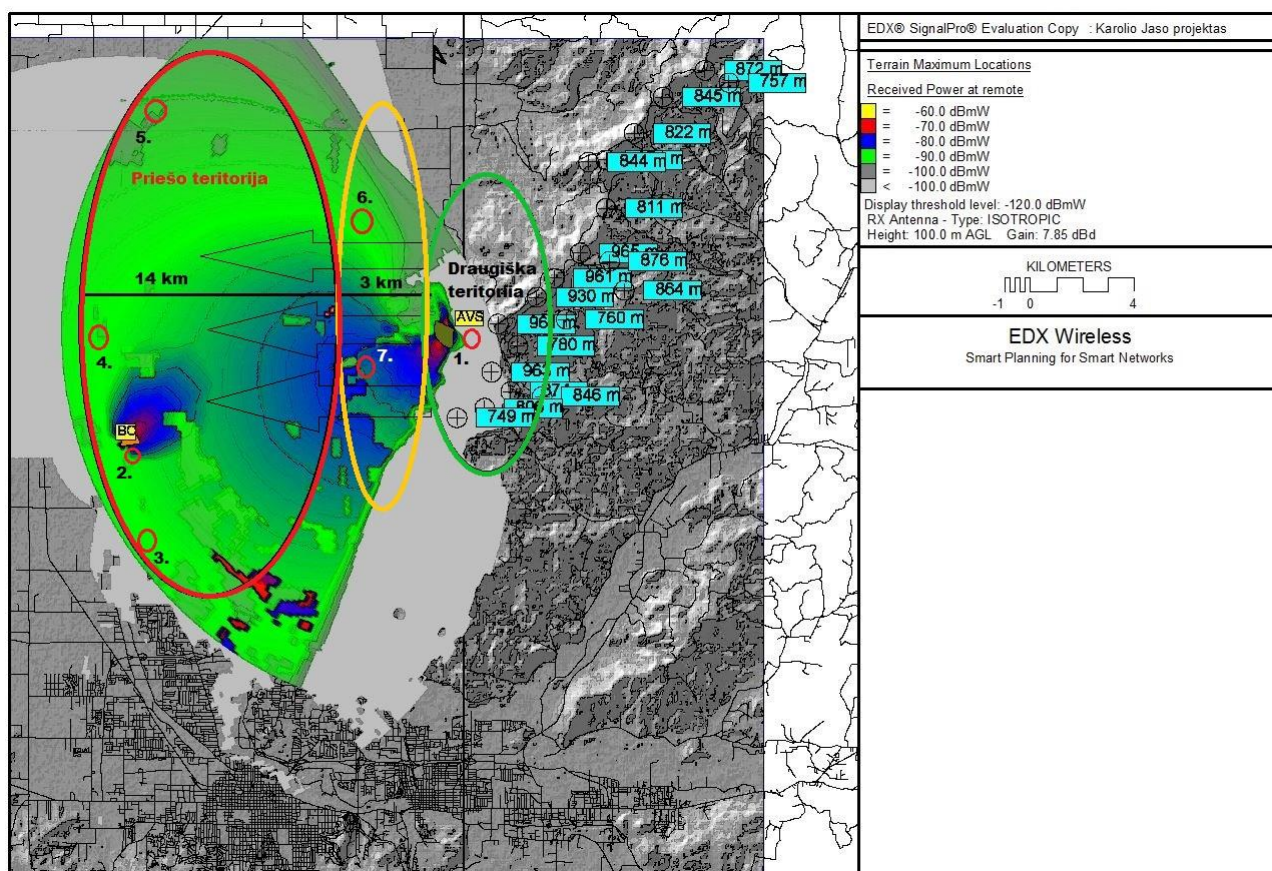
- Analizuojama užduotis, t.y. kiek laiko pėstininkų batalionui reikės palaikymo iš oro, ar reikės tiesioginio vaizdo atvaizdavimo ir t.t.;

- Atliekama draugiškos vietovės analizė – ieškoma tinkamiausios vietos kur būtų galima pastatyti antžeminę valdymo stotį, kad būtų patikimas ryšys tarp BO ir AVS ir tuo pačiu neišduodant priešiškos pajėgoms kurioje vietoje yra pastatyta AVS;

- Atliekama neutralios teritorijos analizė – ieškoma aukščiausių vietų šioje teritorijoje, kad dėl aukščių skirtumų neprarastume orlaivio. Taip pat analizuojama su spektro analizatoriumi ar toje vietovėje nėra 2,4 GHz dažnių juosta užteršta;

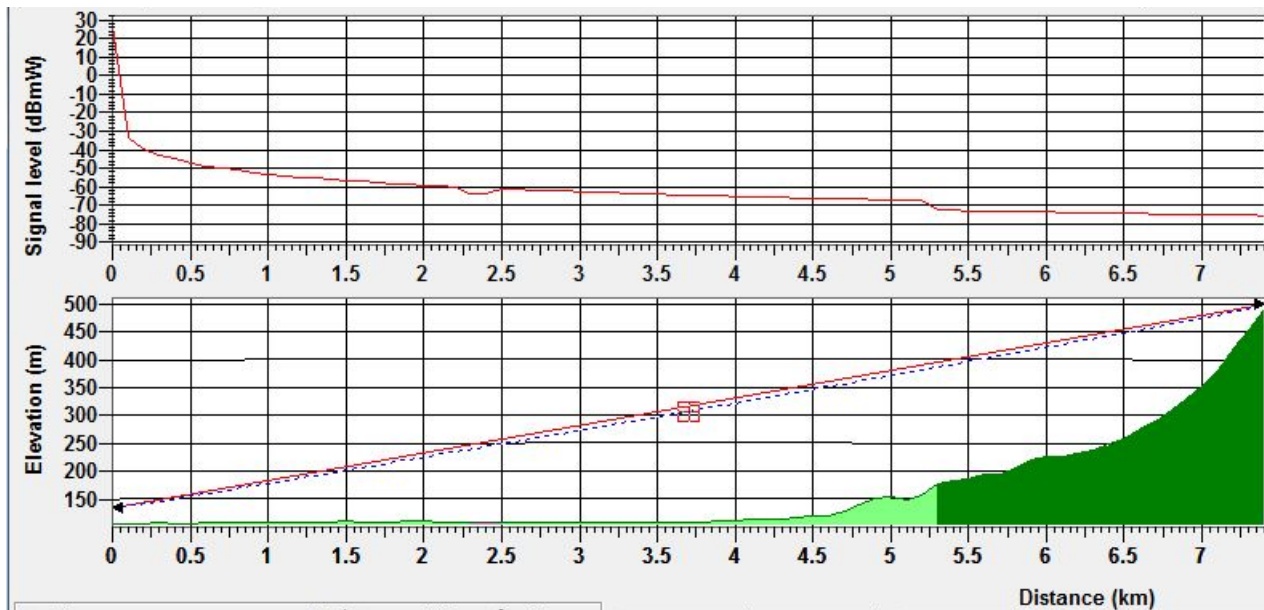
- Priešo teritorijos analizė, t. y. ar ši vietovė tankiai apgyvendinta, ar yra aukštų pastatų, aukštikalnių. Siekiant tinkamo užduoties įvykdymo išmatuojama priešo teritorija, kurioje tikėtina yra apsistojusios priešiškos pajėgos. Išmatavus maksimalius atstumus tarp priešo ir draugiškos vietovės atliekama aukštų pastatų, kalnų analizė.

Tik tinkamai išanalizavus visus šiuos aspektus galime tinkamai suprojektuoti ir vėliau dislokuoti AVS ryšio sistemą. Ryšio sistemos projektavimo tarp AVS ir BO atvaizdavimas pateikiamas 19 pav.

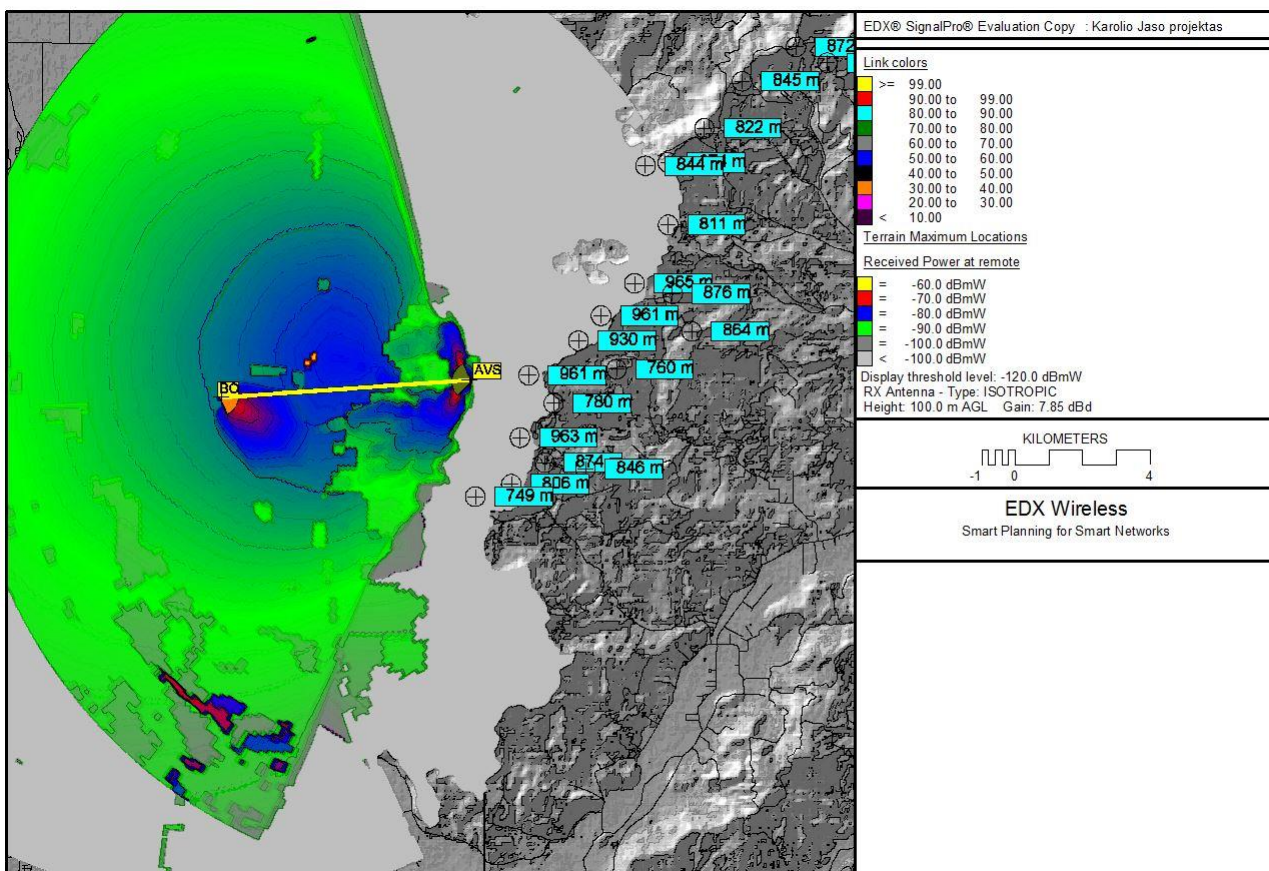


19 pav. Ryšio sistema tarp AVS ir BO

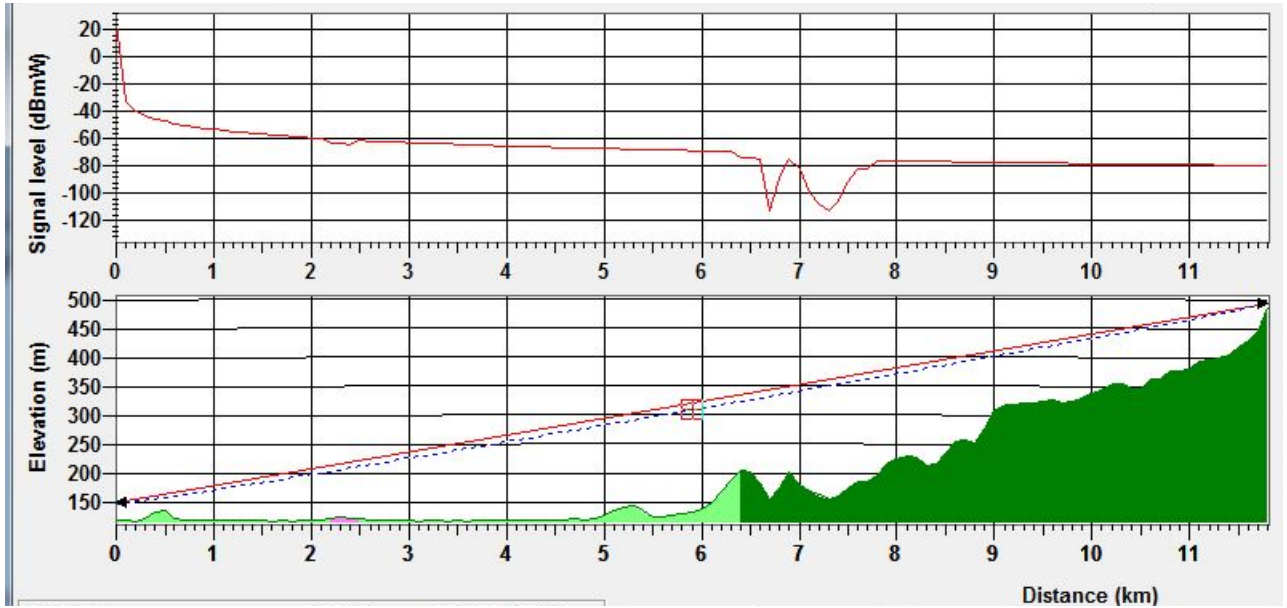
Atliekant ryšio sistemos projektavimą pasirenkami atitinkami taškai, kuriuos programine EDX Signal Pro™ įranga analizuojame – koks toje vietoje tarp orlaivio ir AVS būtų reljefas bei signalų lygis. Ši analizė pateikiama 20-27 pav.



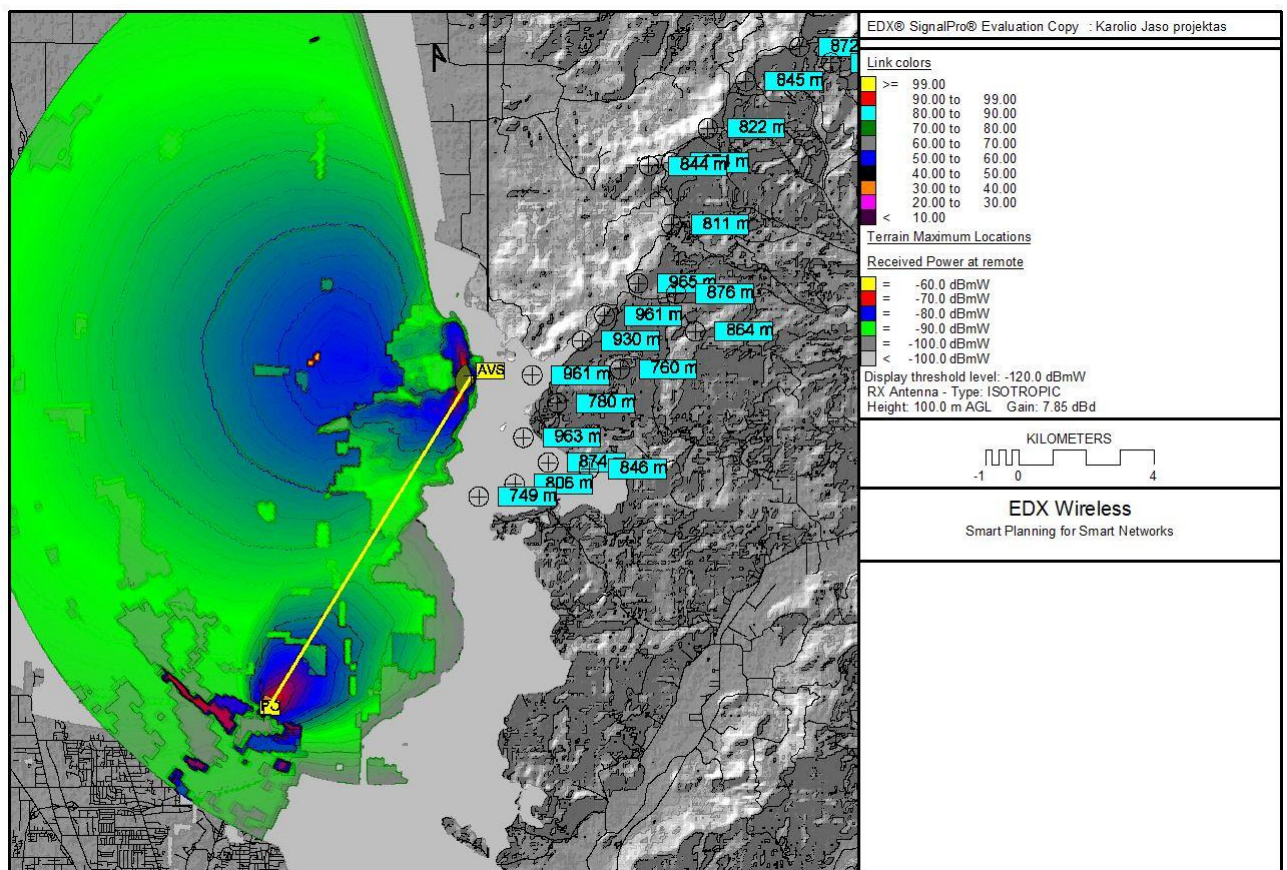
20 pav. Signalų lygio priklausomybė, kai BO yra 7 km nuo AVS



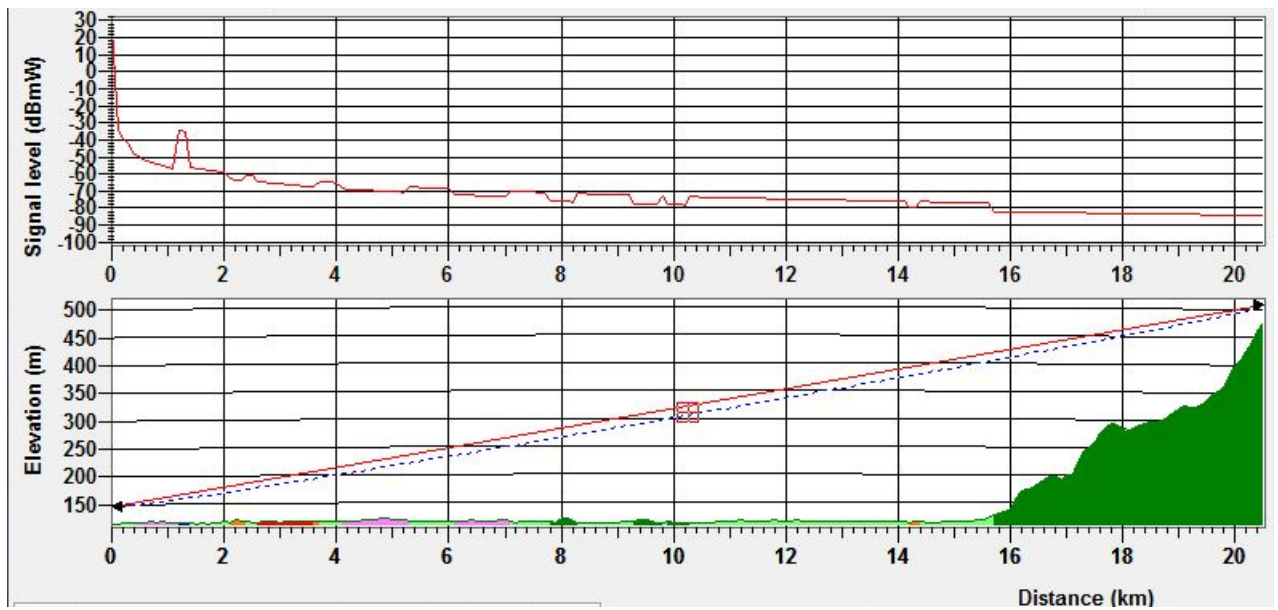
21 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 7 km nuo AVS



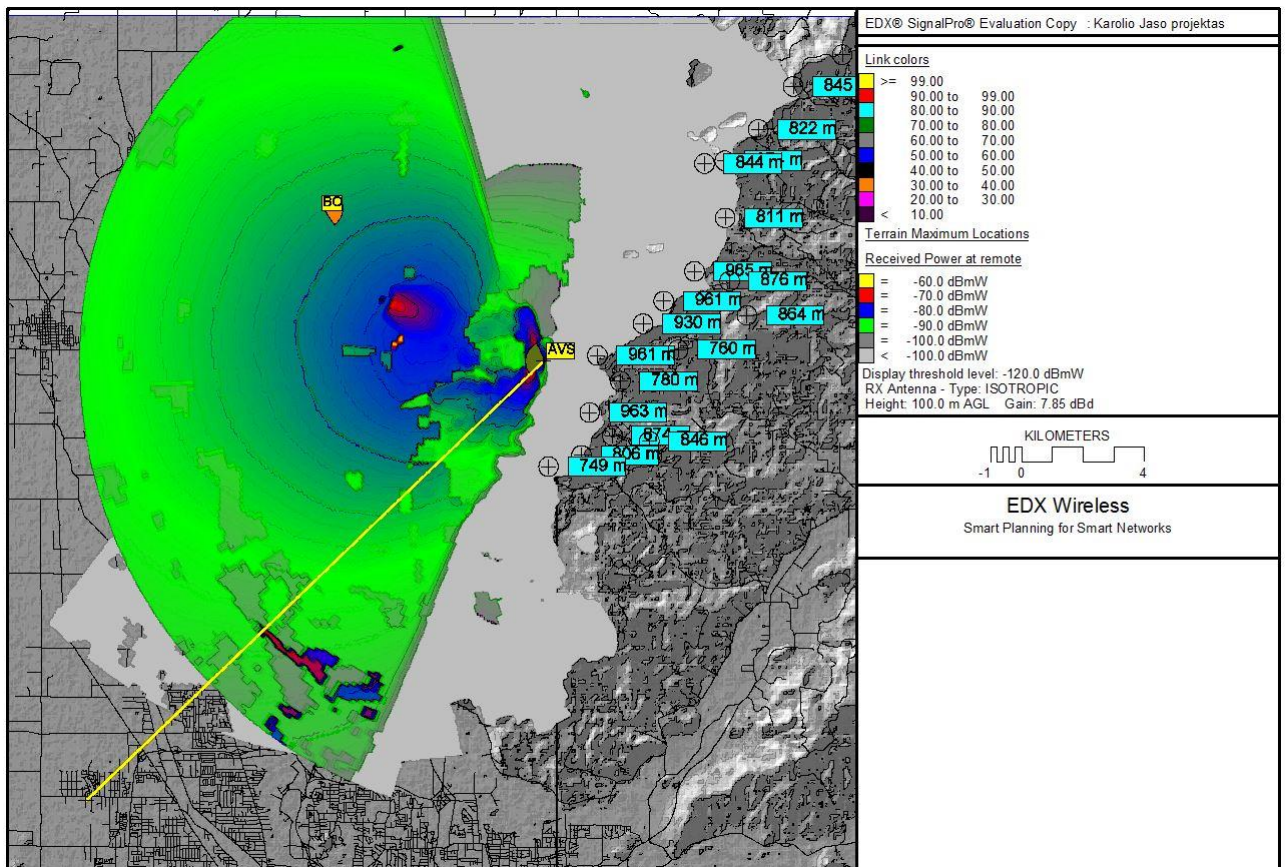
22 pav. Signalo lygio priklausomybė, kai BO yra 14 km nuo AVS



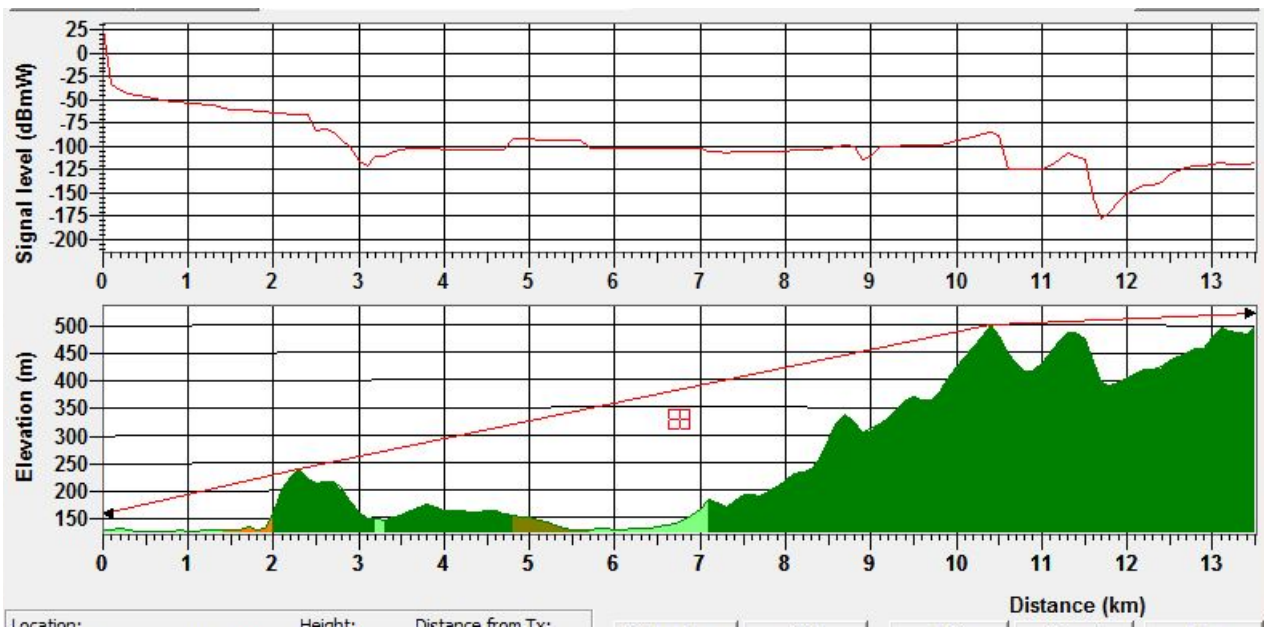
23 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 14 km nuo AVS



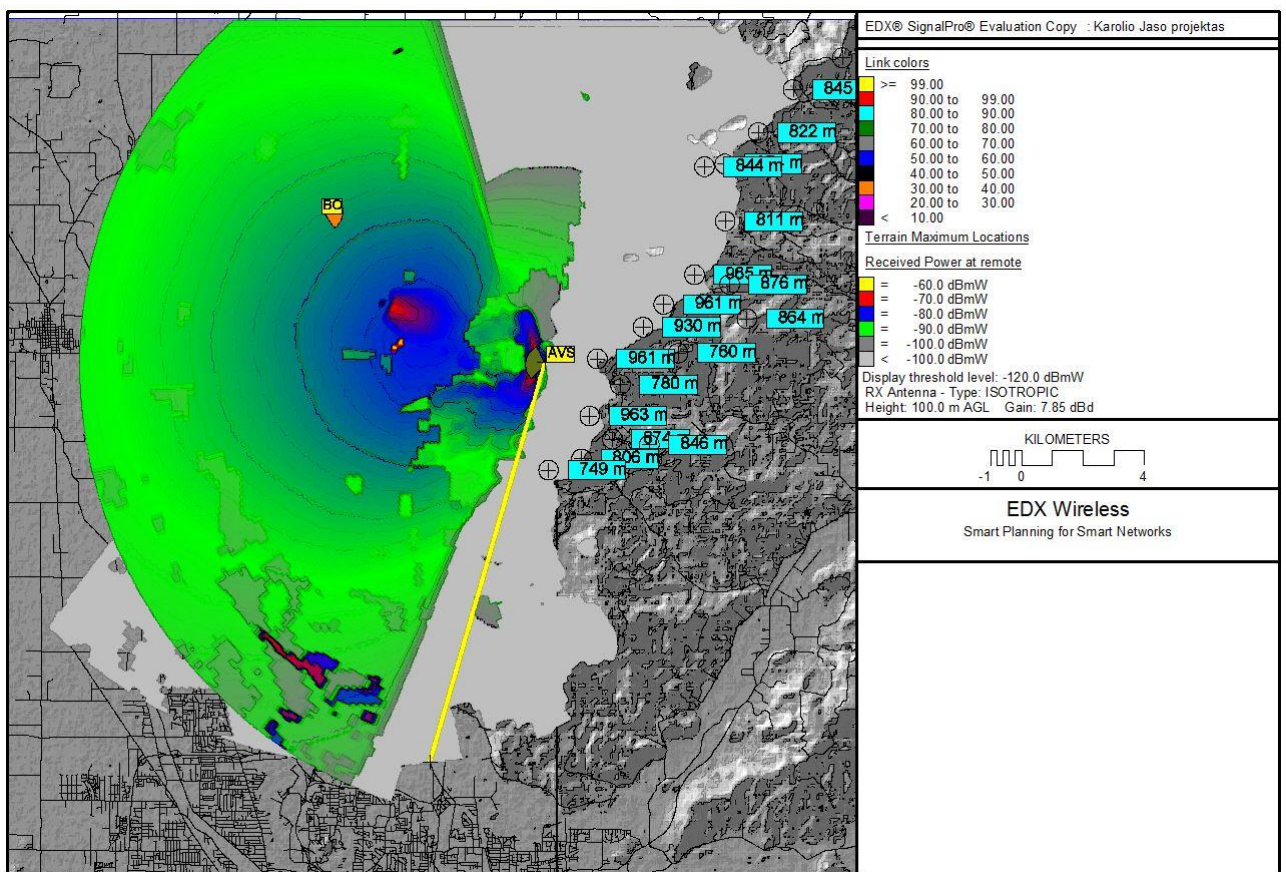
24 pav. Signalų lygio priklausomybė, kai BO yra 20 km nuo AVS



25 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 20 km nuo AVS



26 pav. Signalo lygio priklausomybė, kai BO yra 13 km nuo AVS



27 pav. Priimto signalo galios priklausomybė, kai BO yra 13 km nuo AVS

Atlikus tyrimą nustatyta, kad labai svarbu išanalizuoti vietovę, kurioje bus skraidoma bepiločiu orlaiviu, be to skrendant didelius atstumus su BO būtina panaudoti antenos sekimo sistemą, kaip pavaizduota 26 ir 27 pav. padidėja tikimybė prarasti orlaivį. Taip pat būtina apskaičiuoti galios

biudžetą ir antenos nesuderinamumo nuostolius, kuriuos apskaičiavus - paliekama signalo galios atsarga.

Pasirenkant antžeminės valdymo stoties stovėjimui geriausiai tinkamą vietovę, būtina įvertinti ar ši vietovė eanti aukščiausioje vietoje neišduos koordinacių priešiškos pajėgoms t.y. ar nebus pastebėtas AVS. Tam tikrais atvejais, kad labiau užsimaskuoti gali tekti pasirinkti vidutinio aukščio vietovę, nebūtinai tinkamiausią radijo ryšio su BO aspektu.

Atliekant teritorijos ir užduoties analizę buvo panaudota signalų sklidimo prognozavimo programinė EDX Signal Pro™ įranga, su kuria detalai išanalizuota užduoties teritorija. Kaip matome iš 21 pav. šiai užduočiai nėra reikalinga AVS su sekimo sistema, nes valdymo stoties signalo stiprio užtenka padengti visą teritoriją. Jeigu užduoties teritorija būtų didesnė nei AVS aprėptis, tokiu atveju reiktų AVS su sekimo sistema, kaip pavaizduota 27 pav. Paveikslėlyje matome, kai BO yra išskirdęs iš AVS valdymo zonos aprėpties, tuo metu priimto signalo lygis yra mažesnis nei -100 dBmW.

2.6.2. BO signalų sklidimo tyrimas lauko sąlygomis

Norint kuo tiksliau įvertinti belaidį ryšį tarp nuotoliniu būdu valdomo orlaivio ir antžeminės valdymo stoties bei priklausomybes nuo BO sistemos parametrų, kuriuos galima modifikuoti prieš pradedant misijas, atliekami eksperimentiniai bandymai lauko sąlygomis. Eksperimentas atliekamas dviejų tipų vietovėse – lygumų ir miškingoje. Tyrimo metu matuojame atstumą tarp AVS ir BO:

1. Lygumų teritorijoje, kai sistema:
 - a. su gamykliniais nustatymais;
 - b. yra patobulinta pagal sukurtą algoritimą ir naudojant 9 dBi anteną;
 - c. yra patobulinta pagal sukurtą algoritimą ir naudojant 12 dBi anteną;
2. Miškingoje teritorijoje, kai sistema:
 - a. su gamykliniais nustatymais;
 - b. yra patobulinta pagal sukurtą algoritimą ir naudojant 9 dBi anteną;
 - c. yra patobulinta pagal sukurtą algoritimą ir naudojant 12 dBi anteną.

2.6.2.1. Naudojama įranga

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

- Bepilotis orlaivis – SYMA X56W:
 - vaidzo kamera – su tiesiogine transliacija į telefoną;
 - veikimo dažnis – 2,4 GHz;
 - akumuliatorius – 3,7 V Li-Po 850mAh;
 - skraidymo laikas – iki 10 min.;

- kontroliavimo ribos atvaizduojant vaizdą – iki 60 m.;
- kontroliavimo ribos be tiesioginio vaizdo atvaizdavimo – iki 100 m.;
- svoris – 732 g.;
- dydis – 21,5 x 21,5 x 5,5 cm;
- vaizdo kamera – 0,3 MP FPV WiFi HD kamera;
- antenos stiprinimas – 2 dBi.



28 pav. BO SYMA X56W

- Valdymo pultas SYMA:
 - veikimo dažnis – 2,4 GHz;
 - antenos stiprinimas – 2 dBi.



29 pav. Valdymo pultas

- Antena 9 dBi:
 - veikimo dažnis – 2,4–2,5 GHz;

- kryptingumas – visakryptė;
- stiprinimas – 9 dBi;
- aukštis – 38 cm;



30 pav. Patobulintas valdymo pultas su 9 dBi antena

- Antena 12 dBi:
 - veikimo dažnis – 2,4–5 GHz;
 - kryptingumas – sektorinė;
 - stiprinimas –12 dBi;
 - aukštis – 1,2 m.



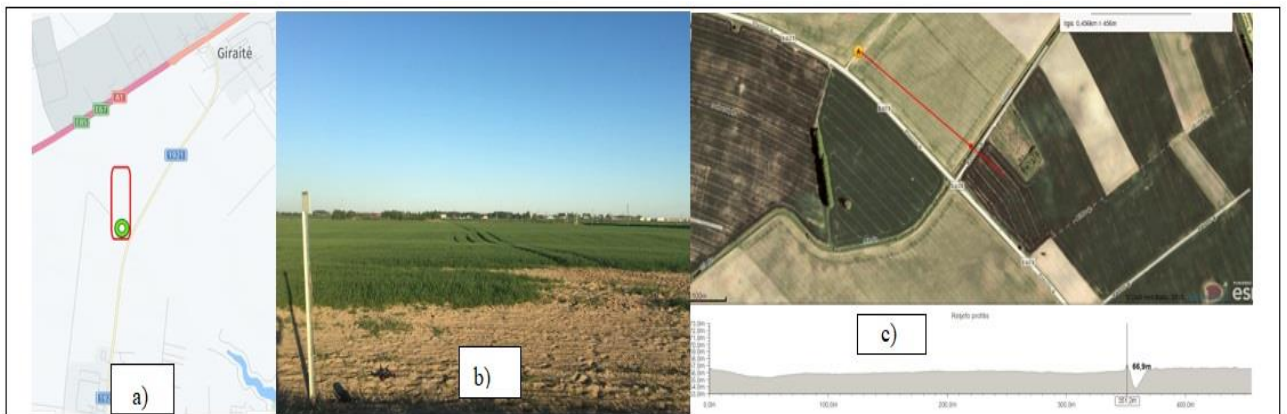
31 pav. Patobulintas valdymo pultas su 12 dBi antena

2.6.2.2. Tyrimo eiga

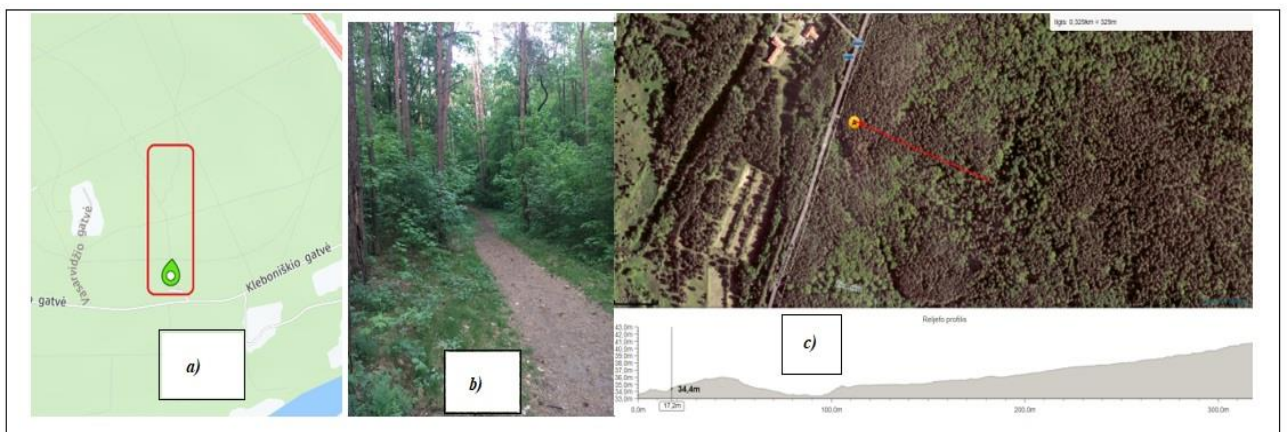
Tyrimas atliktas dviejų tipų vietovėse – lygumos ir miškingoje. Lygumų teritorija pasirinkta užmiestyje, Kauno rajone, tarp Giraitės ir Užliedžių miestelių. Vietovės koordinatės: 54.967176, 23.84259. Tyrimas atliktas saulėtą vakarą, esant 17 laipsnių šilumos, 2 m/s vėjui. Miškinga vietovė pasirinkta Kauno rajone esančiame Kleboniškių miške. Vietovės koordinatės: 54.94358, 23.92365. Tyrimas atliktas saulėtą vakarą, esant 16 laipsnių šilumos, 2 m/s vėjui.

Tyrimo lygumų teritorijoje atvaizdavimas pateiktas 32 pav. a) vietovės atvaizdavimas žemėlapyje, b) vietovės nuotrauka, kurioje matosi pastatyta sektorinė antena nukreipta į tyrimo lauką, c) vietovės reljefo atvaizdavimas su trasos pjūviu.

Tyrimo miškingoje teritorijoje atvaizdavimas pateiktas 33 pav. a) vietovės atvaizdavimas žemėlapyje, b) vietovės nuotrauka, kurioje matosi miško vaizdas, c) vietovės reljefo atvaizdavimas su trasos pjūviu.



32 pav. Tyrimo lygumų teritorijoje atvaizdavimas



33 pav. Tyrimo miškingoje teritorijoje atvaizdavimas

Visų pirma tyrimas atliktas orlaivio ir antenos gamyklinių parametų patikrinimui, t.y. nustatyti kokį atstumą orlaivis gali nusikristi nepakeitus parametų lygumų ir miškingose vietovėse.

Atlikus tyrimą nustatyta, kad orlaivis su išjungta vaizdo kamera nuskrenda lygumų vietovėje – 80 metrų, miškingoje vietovėje – 60 metrų, skrendant tolimensiu atstumu prarandamas orlaivio valdymas. Orlaivis su įjungta kamera nuskrenda lygumų vietovėje – 60 metrų, miškingoje vietovėje – 45 metrus. Atlikus tyrimą nustatyta, kad orlaivio gamintojo pateiktas skrydžio atstumas yra didesnis nei orlaivis realiai nuskrenda. Taip pat nustatyta, kad orlaivio skrydžio atstumas tiesiogiai priklauso nuo to ar įjungtas tiesioginis vaizdo transliavimas į valdymo pultą ar ne. Dėl to atliekant užduoties analizę būtina įvertinti ar reikalingas tiesioginis vaizdo transliavimas.

Antras tyrimas buvo atliktas patobulinus valdymo pultą, t.y., pašalinama buvusi antena ir sumontuojamas jungiamasis kabelis su RP-SMA tipo antenos jungtimi. Tyrimas atliktas su dviejų tipų antenomis: visakrypte 9 dBi ir sektorine 12 dBi stiprinimo.

Tyrimo metu nustatyta, kad orlaivis su visakryptine antena 9 dBi stiprinimo lygumų teritorijoje nuskrenda 230 metrų, miškingoje vietovėje – 160 metrų;

Prie AVS prijungus sektorinę anteną 12 dBi stiprinimo ir ją pastačius 2,6 metro aukštyje, orlaivis nuskrenda lygumų vietovėje – 350 metrų, miškingoje vietovėje 270 metrų.

Visų tyrimų metu orlaivis buvo pakilęs į ~ 25 metrų aukštį. Miškingoje vietovėje medžių aukštis buvo apie 15-20 metrų.

2.6.2.3. Tyrimo rezultatai

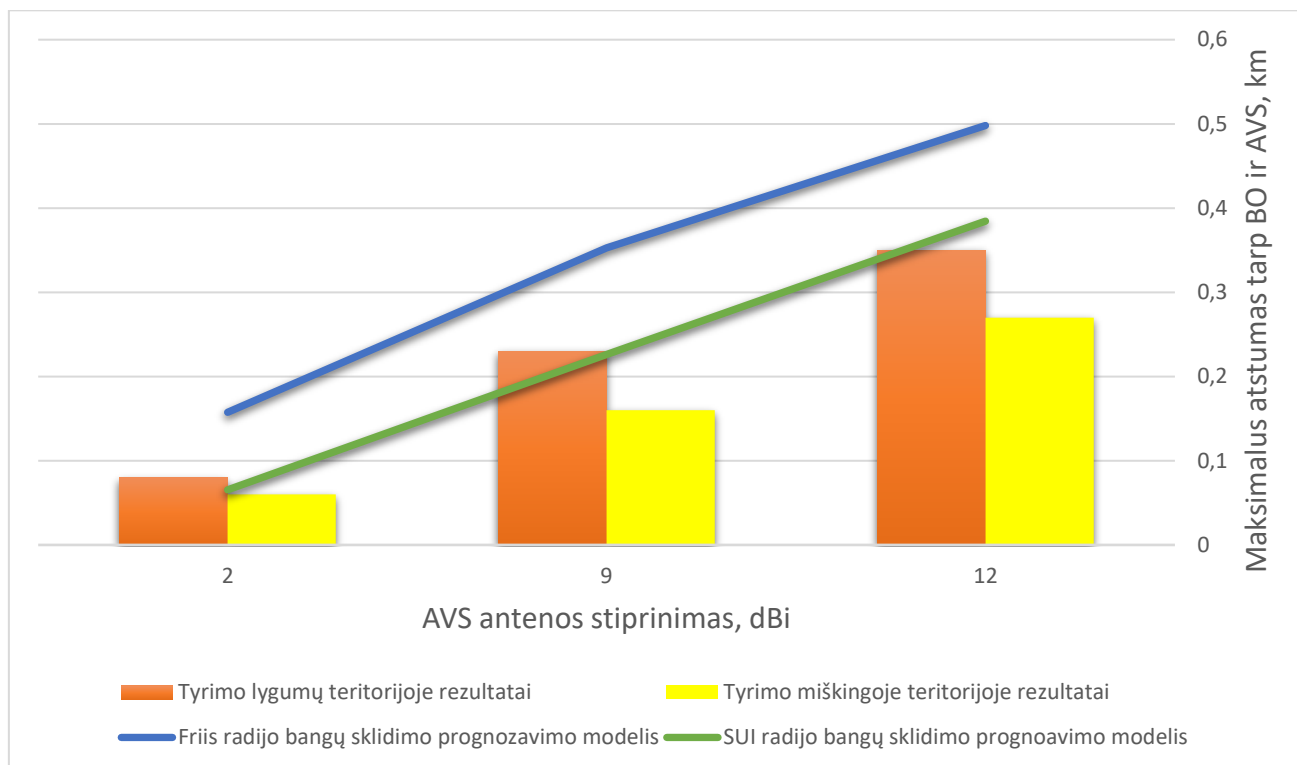
Tyrimo metu nustatyta, kad skrydžio atstumas tiesiogiai priklauso nuo antenos stiprinimo, vietovės tipo, antenos kryptingumo bei nuo tiesioginio vaizdo transliavimo funkcijos naudojimo. Tyrimo rezultatai pateikiami 7 lentelėje. Teorinių ir eksperimentinio tyrimo rezultatų palyginimas pateiktas 34 pav.

7 lentelė. Tyrimo rezultatai

Bandymo Nr.	Veikimo dažnis, MHz	AVS antenos aukštis, m	BO aukštis, m	Siųstuvo spinduliuojama galia, dbm	AVS antenos stiprinimas, dBi	BO antenos stiprinimas, dBi	Maksimalus atstumas tarp BO ir AVS, km	PSL, dBm	Atstumo pasikeitimas kartais	Vietovės tipas
1.	2400	2,6	25	-13	2	2	0,08	-93	1,00	Lygumų
2.					9		0,23		2,88	Lygumų
3.					12		0,35		4,38	Lygumų
4.					2		0,06		1,00	Miškinga
5.					9		0,16		2,67	Miškinga
6.					12		0,27		4,50	Miškinga
7.					2		0,16		2,00	Friis
8.					9		0,35		4,38	Friis
9.					12		0,50		6,25	Friis
10.					2		0,07		0,88	SUI
11.					9		0,23		2,88	SUI
12.					12		0,38		4,75	SUI

Patobulinus AVS ir sumontavus visakryptę anteną 9 dBi atstumas padidėjo 2,9 karto, o sumontavus 12 dBi anteną atstumas padidėjo 4,4 karto lyginant su AVS gamykliniais parametrais.

Pažymėtina, kad realiose sąlygose patikrintas BO skrydžio atstumas yra 20 % mažesnis, nei oficialiai deklaruojamas.



34 pav. Tyrimo rezultatai

Iš 34 pav. pateikto grafiko matome, kad orlaivis su tais pačiais parametrais lygumose nuskrenda toliau, dėl to kad tarp AVS ir BO nėra kliūčių. Atliekant užduoties analizę būtina tiksliai įvertinti kur bus skraidoma, nes kitu atveju, padidėja tikimybė prarasti orlaivį.

Atlikus tyrimą lauko sąlygomis ir palyginus gautus rezultatus su SUI ir Friis radijo bangų sklaidimo modeliais, nustatyta, kad esant AVS antenos 9 dBi stiprinimui SUI modelis prognozuoja tokį pat nuotolį, kaip ir buvo gauta atliekant tyrimą lauko sąlygomis lygumų teritorijoje. Friis modelis esant antenos 9 dBi stiprinimui prognozuoja 2 kartais didesnę maksimalų skrydžio nuotolį palyginus su gautais rezultatai atliekant tyrimą lygumų vietovėje lauko sąlygomis.

Išvados

1. Atlikus tyrimą nustatyta, kad norint pasiekti didžiausią BO skrydžio nuotolį reikia kokybiškos kryptinės antenos ir galingo siųstuvo, o didesniuose (> 2 km) būtina naudoti antenos sekimo ir jos krypties paderinimo sistemą. Naudojant visakryptę anteną ir norint pasiekti tą patį atstumą, kaip su kryptine antena, reikia naudoti ekvivalentinio arba didesnio stiprinimo visakryptę anteną. Tačiau didinant antenos stiprinimą, didėja ir skirtingomis kryptimis priimamų triukšmų lygis, be to, visakryptės antenos yra riboto stiprinimo (iki 18 dBi), todėl su jomis nėra galimybės pasiekti didžiausią atstumą;

2. Atliekant skaičiavimus su specializuota EDX Signal Pro™ programine įranga nustatyta, kad padidinus stiprinimą 3 dBi, atstumas padidėja vidutiniškai 1,5 karto. Didėjant atstumui tarp AVS ir BO radijo signalo lygis didėjant atstumui mažėja apie 3 dB, tuo pačiu ryšio pateikiamumas mažėja 0,0033 %;

3. Atlikus tyrimą lauko sąlygomis ir gauti rezultatai palyginti su SUI ir Friis radijo bangų sklidimo modeliais. Nustatyta, kad esant AVS antenos 9 dBi stiprinimui SUI modelis prognozuoja tokį pat nuotolį, kaip ir buvo gauta atliekant tyrimą lauko sąlygomis lygumų teritorijoje. Friis modelis esant antenos 9 dBi stiprinimui prognozuoja 2 kartais didesnę maksimalų skrydžio nuotolį palyginus su gautais rezultatais atliekant tyrimą lygumų vietovėje lauko sąlygomis;

4. Atliekant tyrimus lauko sąlygomis nustatyta, kad orlaivio SYMA gamintojas nurodo 20 % didesnę valdymo atstumą, nei šis orlaivis gali pasiekti;

5. Tyrimo lauko sąlygomis metu buvo patikrintas sudarytas atstumo padidinimo algoritmas. Tyrimo metu buvo atliekami bandymai miškingoje ir lygumų teritorijose. Taip pat nustatyta, kad belaidžiam ryšiui labai didelę įtaką turi aplinkiniai pastatai, medžiai, reljefas (kaip ir buvo nurodyta algoritme);

6. Patobulinus AVS ir sumontavus visakryptę anteną 9 dBi atstumas padidėjo 2,9 karto, o sumontavus 12 dBi anteną atstumas padidėjo 4,4 karto lyginant su AVS gamykliniais parametrais;

7. Atlikus tyrimus lauko sąlygomis ir programine įranga nustatyta, kad labai svarbu išanalizuoti vietovę, kurioje bus skraidoma bepiločiu orlaiviu. Nuo to priklauso kokį maksimalų skrydžio atstumą pasieksime, todėl kiekviena vietovė bei kiekvienu atveju privalo būti vertinama atskirai pasinaudojant sudarytu atstumo padidinimo algoritmu;

8. Atlikus civilinės paskirties bepiločio orlaivio sistemos patobulinimą nustatyta, kad be didesnių papildomų investicijų, galima juos pritaikyti karinėms žvalgybos reikmėms, kurios nereikalauja didelių orlaivio funkcinių galimybių, taikymosi sistemų, papildomų signalų kodavimo algoritmų ir kitų saugumo parametrų.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. All you need to know about frequencies on which drones operate [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-06-06]. Prieiga per internetą: <https://www.jammer-store.com/drones-frequencies>
2. Outdoor Long-Range WLANs: A Lesson for IEEE 802.11ah. From Research gate [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-05-07]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/281644239_Outdoor_Long-Range_WLANs_A_Lesson_for_IEEE_80211ah?ev=publicSearchHeader&sg=MOUqZbzbIJJa2imMqmq6gc7qXPmKfU48NuxR0sRSrpIdLIYbKwGc-1IXPcTndTHW
3. Long-range communication framework for multi-agent autonomous UAVs [žiūrėta 2017-12-21]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6842279/>
4. Lietuvos Respublikos Ryšių reguliavimo tarnybos direktoriaus 2009 m. kovo 29 d. įsakymas Nr. 1V-344 „Dėl interneto prieigos paslaugų kokybės rodiklių įvertinimo metodikos patvirtinimo“ [žiūrėta 2017-06-08]. Prieiga per internetą: www.rrt.lt/lt/teisine-informacija/teisine-informacija_1072/rrt-teises-aktu-paieska/148/download/247.html+&cd=2&hl=lt&ct=clnk&gl=lt
5. Dainius Balbonas, Gintautas Daunys „Jutiklių tinklai“ [žiūrėta 2017-12-08]. Prieiga per internetą <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/445/jutikliu-tinklai/>
6. WiFi antenna installation best practises design guide [žiūrėta 2017-12-27]. Prieiga per internetą <http://www.l-com.com/content/WiFi%20Antenna%20Installation%20Best%20Practices.pdf>
7. Fresnel Diffraction [žiūrėta 2017-06-10]. Prieiga per internetą: <http://wyant.optics.arizona.edu/webMathematica/myprograms/fresnelZones/FresnelDiffraction.pdf>
8. Professor Narayan Mandayam Wireless! The forces and strategies that shaped a revolution [žiūrėta 2018-01-02]. Prieiga per internetą http://mobilityfirst.winlab.rutgers.edu/~narayan/Course/Wless/Lecture_3_RadioPropagation_Model_Sneha.pdf
9. Experimental Evaluation and Characterization of Long-Distance 802.11g Links [žiūrėta 2017-12-22]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.ktu.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4498212&tag=1>
10. Comparison of propagation path loss models on outdoor wireless lan applications in rural area [žiūrėta 2018-01-22]. Prieiga per internetą http://cogs.uniten.edu.my/portal/NatGrad2015/Proceedings/EM/PaperID_69.pdf

11. Tactical Information Operations for Autonomous Teams of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)' [žiūrėta 2018-01-22]. Prieiga per internetą
<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.ktu.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1036114>
12. Rui Zhang. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges žiūrėta 2018-01-22]. Prieiga per internetą
<https://www.ece.nus.edu.sg/stfpage/elezhang/Publications/UAV%20Communications.pdf>
13. Phantom 4 Pro spec. žiūrėta 2017-12-21]. Prieiga per internetą:
<https://www.dji.com/phantom-4-pro/info>
14. Phantom 4 spec. [žiūrėta 2017-12-21]. Prieiga per internetą:
<https://www.dji.com/phantom-4/info#specs>
15. Karma Tech Spec [žiūrėta 2017-12-21]. Prieiga per internetą:
<https://shop.gopro.com/EMEA/karmatechspecs>
16. Inspire Tech Spec [žiūrėta 2017-12-21]. Prieiga per internetą:
<https://www.dji.com/inspire-2/info>
17. Jonas Gustafsson ir Fredrik Henriksson „UAV tracking device using 2.4 GHZ video transmitter“, [žiūrėta 2018-02-19]. Prieiga per internetą:
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1029811/FULLTEXT01.pdf>
18. Protocol of communications for vorsat satellite „Link budget“, [žiūrėta 2018-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://paginas.fe.up.pt/~ee97054/Link%20Budget.pdf>

Priedai

1 priedas. RSL priklausomybės nuo atstumo matavimų rezultatai

Link Performance 3 dBi Report

----- Transmitter data:

Latitude: 44 22 53.59 North
Longitude: 123 11 13.53 West
Site elevation = 79.4 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = DA
Antenna model name = Cellular (850MHz) 20 watt
Antenna pattern file name: C:\Program Files\EDX\SignalPro Evaluation\Library Data\pat\l
Antenna COR height AGL = 3.0 m
Antenna orientation = 31.29 degs
Antenna beamtilt = 0.54 degs
Antenna beamtilt azimuth = 31.29 degs
Antenna polarization = Vertical
Cross polarization rejection= 18.00 dB
Transmitter power(max): 0.00 dBW
Transmitter power(min): 0.00 dBW
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 3.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 3.00 dBi
Total Transmitted ERPi: 0.00 dBW
Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 23 4.66 North
Longitude: 123 11 4.12 West
Site elevation = 83.2 m
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 250.0 m
Antenna orientation = 211.29 degs
Antenna beamtilt = -0.54 degs
Antenna beamtilt azimuth = 211.29 degs
Antenna polarization = Vertical
Cross polarization rejection: 15.00 dB
Diversity type: unprotected
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 3.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 3.00 dBi

Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00
Percent of time: 50.00 %
Percent of locations: 50.00 %
Margin = 0.00 dB
Earth effective radius = 1.333
Ground conductivity: 8.00 mS
Relative permittivity: 15.00
Atmosphere type: None
Climate type: Continental temperate
Use terrain data: Yes

Use clutter data: Yes
Use building data: No
Include reflection: Yes
Include Fresnel zone loss: Yes
Use clutter height: No
Path length: 0.400 km
Analysis point spacing along path: 0.100 km
Free space loss: 92.10 dB
Number of obstacles: 0
Total obstacle loss: 0.00 dB
Atmospheric absorption loss = 0.00 dB
Clutter loss = 20.00 dB
Reflection loss = -3.74 dB
Partial fresnel zone loss = 0.00 dB
Fresnel zone clearance = 16.63
Pathloss adjustment for statistics = 0.00 dB
Total excess path loss = 16.26 dB
Total invariant path loss: 108.35 dB

Fading parameters:

Fade outage calculation method: ITU-R Rec. 530-8
Path region: Inland
% time refractivity gradient: 20.00
Antenna height coefficient Co: 1.70 dB
Fraction of path over/near water: 0.0100
Other external interference: -150.00 dBmW
Dispersive fade margin: 80.0 dB
Fade occurrence factor: 5.0
Rain outage calculation method: Crane
Rain rate table: ITU-R map regions
Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

Received signal level: -94.74 dBmW
Received Power Flux Density: -95.69 dBW/m²
Receiver noise figure: 3.00 dB
Receiver noise bandwidth: 40.0000 MHz
Receiver noise power: -94.96 dBmW
External interference: -150.00 dBmW
Required C/(I+N) ratio: -6.00 dB
Link threshold: -100.96 dBmW
Flat fade margin: 6.22 dB
Composite fade margin: 6.22 dB
Fade margin against noise: 6.22 dB
Fade margin against interference: 61.26 dB
Worst month fade probability: 0.00000 %
Annual fade probability: 0.00000 %
Annual fade outage time: 0.0 secs
Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 99.99999 %

Link Performance 6 dBi Report

Transmitter data:

Latitude: 44 22 53.59 North
Longitude: 123 11 13.53 West
Site elevation = 79.4 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = DA
Antenna model name = Cellular (850MHz) 20 watt

Antenna pattern file name: C:\Program Files\EDX\SignalPro Evaluation\Library Data\pat\l

Antenna COR height AGL = 3.0 m

Antenna orientation = 31.29 degs

Antenna beamtilt = 0.19 degs

Antenna beamtilt azimuth = 31.29 degs

Antenna polarization = Vertical

Cross polarization rejection= 18.00 dB

Transmitter power(max): 0.00 dBW

Transmitter power(min): 0.00 dBW

Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 3.00 dB

Circulator loss: 0.00 dB

Other system loss: 0.00 dB

Radome loss: 0.00 dB

Maximum antenna gain: 6.00 dBi

Total Transmitted ERPi: 3.00 dBW

Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 23 21.27 North

Longitude: 123 10 49.99 West

Site elevation = 82.7 m

Antenna type = OMNI

Antenna COR height AGL = 250.0 m

Antenna orientation = 211.29 degs

Antenna beamtilt = -0.19 degs

Antenna beamtilt azimuth = 211.29 degs

Antenna polarization = Vertical

Cross polarization rejection: 15.00 dB

Diversity type: unprotected

Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 3.00 dB

Circulator loss: 0.00 dB

Other system loss: 0.00 dB

Radome loss: 0.00 dB

Maximum antenna gain: 3.00 dBi

Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00

Percent of time: 50.00 %

Percent of locations: 50.00 %

Margin = 0.00 dB

Earth effective radius = 1.333

Ground conductivity: 8.00 mS

Relative permittivity: 15.00

Atmosphere type: None

Climate type: Continental temperate

Use terrain data: Yes

Use clutter data: Yes

Use building data: No

Include reflection: Yes

Include Fresnel zone loss: Yes

Use clutter height: No

Path length: 1.000 km

Analysis point spacing along path: 0.100 km

Free space loss: 100.06 dB

Number of obstacles: 0

Total obstacle loss: 0.00 dB

Atmospheric absorption loss = 0.00 dB

Clutter loss = 20.00 dB

Reflection loss = -4.56 dB

Partial fresnel zone loss = 0.00 dB

Fresnel zone clearance = 7.47

Pathloss adjustment for statistics = 0.00 dB
Total excess path loss = 15.44 dB
Total invariant path loss: 115.50 dB

Fading parameters:

Fade outage calculation method: ITU-R Rec. 530-8
Path region: Inland
% time refractivity gradient: 20.00
Antenna height coefficient Co: 1.70 dB
Fraction of path over/near water: 0.0100
Other external interference: -150.00 dBmW
Dispersive fade margin: 80.0 dB
Fade occurrence factor: 5.0
Rain outage calculation method: Crane
Rain rate table: ITU-R map regions
Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

Received signal level: -97.78 dBmW
Received Power Flux Density: -98.72 dBW/m²
Receiver noise figure: 3.00 dB
Receiver noise bandwidth: 40.0000 MHz
Receiver noise power: -94.96 dBmW
External interference: -150.00 dBmW
Required C/(I+N) ratio: -6.00 dB
Link threshold: -100.96 dBmW
Flat fade margin: 3.18 dB
Composite fade margin: 3.18 dB
Fade margin against noise: 3.18 dB
Fade margin against interference: 58.22 dB
Worst month fade probability: 0.00000 %
Annual fade probability: 0.00000 %
Annual fade outage time: 0.0 secs
Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 99.99999 %

Link Performance 32 dBi Report

Transmitter data:

Latitude: 44 22 53.59 North
Longitude: 123 11 13.53 West
Site elevation = 79.4 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = DA
Antenna model name = Cellular (850MHz) 20 watt
Antenna pattern file name: C:\Program Files\EDX\SignalPro Evaluation\Library Data\pat\l
Antenna COR height AGL = 3.0 m
Antenna orientation = 31.29 degs
Antenna beamtilt = 0.01 degs
Antenna beamtilt azimuth = 31.29 degs
Antenna polarization = Vertical
Cross polarization rejection= 15.00 dB
Transmitter power(max): 0.00 dBW
Transmitter power(min): 0.00 dBW
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 3.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 32.00 dBi

Total Transmitted ERPi: 29.00 dBW

Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 35 48.19 North

Longitude: 123 0 12.04 West

Site elevation = 83.0 m

Antenna type = OMNI

Antenna COR height AGL = 250.0 m

Antenna orientation = 211.41 degs

Antenna beamtilt = -0.01 degs

Antenna beamtilt azimuth = 211.41 degs

Antenna polarization = Vertical

Cross polarization rejection: 15.00 dB

Diversity type: unprotected

Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 3.00 dB

Circulator loss: 0.00 dB

Other system loss: 0.00 dB

Radome loss: 0.00 dB

Maximum antenna gain: 3.00 dBi

Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00

Percent of time: 50.00 %

Percent of locations: 50.00 %

Margin = 0.00 dB

Earth effective radius = 1.333

Ground conductivity: 8.00 mS

Relative permittivity: 15.00

Atmosphere type: None

Climate type: Continental temperate

Use terrain data: Yes

Use clutter data: Yes

Use building data: No

Include reflection: Yes

Include Fresnel zone loss: Yes

Use clutter height: No

Path length: 28.010 km

Analysis point spacing along path: 0.100 km

Free space loss: 129.00 dB

Number of obstacles: 0

Total obstacle loss: 0.00 dB

Atmospheric absorption loss = 0.00 dB

Clutter loss = 20.00 dB

Reflection loss = -3.84 dB

Partial fresnel zone loss = 5.04 dB

Fresnel zone clearance = 0.10

Pathloss adjustment for statistics = -0.09 dB

Total excess path loss = 21.12 dB

Total invariant path loss: 150.12 dB

Fading parameters:

Fade outage calculation method: ITU-R Rec. 530-8

Path region: Inland

% time refractivity gradient: 20.00

Antenna height coefficient Co: 1.70 dB

Fraction of path over/near water: 0.0100

Other external interference: -150.00 dBmW

Dispersive fade margin: 80.0 dB

Fade occurrence factor: 5.0

Rain outage calculation method: Crane

Rain rate table: ITU-R map regions

Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

Received signal level: -91.33 dBmW
Received Power Flux Density: -92.28 dBW/m²
Receiver noise figure: 3.00 dB
Receiver noise bandwidth: 40.0000 MHz
Receiver noise power: -94.96 dBmW
External interference: -150.00 dBmW
Required C/(I+N) ratio: -6.00 dB
Link threshold: -100.96 dBmW
Flat fade margin: 9.63 dB
Composite fade margin: 9.63 dB
Fade margin against noise: 9.63 dB
Fade margin against interference: 64.67 dB
Worst month fade probability: 0.04767 %
Annual fade probability: 0.00648 %
Annual fade outage time: 2043.5 secs
Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 99.99352 %

2 priedas. Priimto signalo galios matavimų rezultatai

Link Performance 7 km Report

Transmitter data:

Latitude: 44 12 26.52 North
Longitude: 123 5 50.56 West
Site elevation = 105.3 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 85.93 degs
Antenna beamtilt = 2.83 degs
Antenna beamtilt azimuth = 85.93 degs
Antenna polarization = Horizontal
Cross polarization rejection= 15.00 dB
Transmitter power(max): -3.00 dBW
Transmitter power(min): -50.00 dBW
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 20.00 dBi
Total Transmitted ERPi: 17.00 dBW
Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 12 43.26 North
Longitude: 123 0 19.87 West
Site elevation = 468.6 m
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 265.99 degs
Antenna beamtilt = -2.83 degs
Antenna beamtilt azimuth = 265.99 degs
Antenna polarization = Horizontal
Cross polarization rejection: 15.00 dB
Diversity type: unprotected
Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB

Maximum antenna gain: 20.00 dBi

Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00
Percent of time: 50.00 %
Percent of locations: 50.00 %
Margin = 0.00 dB
Earth effective radius = 1.333
Ground conductivity: 8.00 mS
Relative permittivity: 15.00
Atmosphere type: None
Climate type: Continental temperate
Use terrain data: Yes
Use clutter data: Yes
Use building data: No
Include reflection: No
Include Fresnel zone loss: Yes
Use clutter height: No
Path length: 7.338 km
Analysis point spacing along path: 0.100 km
Free space loss: 117.37 dB
Number of obstacles: 0
Total obstacle loss: 0.00 dB
Atmospheric absorption loss = 0.00 dB
Clutter loss = 25.00 dB
Reflection loss = 0.00 dB
Partial fresnel zone loss = 0.00 dB
Fresnel zone clearance = 7.16
Pathloss adjustment for statistics = 0.00 dB
Total excess path loss = 25.00 dB
Total invariant path loss: 142.36 dB

Fading parameters:

Fade outage calculation method: Vigants-Barnett
Vigants-Barnett C factor: 1.0
Other external interference: -150.00 dBmW
Dispersive fade margin: 80.0 dB
Fade occurrence factor: 5.0
Rain outage calculation method: Crane
Rain rate table: ITU-R map regions
Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

Received signal level: -75.44 dBmW
Received Power Flux Density: -76.38 dBW/m²
Receiver noise figure: 5.00 dB
Receiver noise bandwidth: 10.0000 MHz
Receiver noise power: -98.98 dBmW
External interference: -150.00 dBmW
Required C/(I+N) ratio: 9.60 dB
Link threshold: -89.38 dBmW
Flat fade margin: 13.94 dB
Composite fade margin: 13.94 dB
Fade margin against noise: 13.94 dB
Fade margin against interference: 64.96 dB
Worst month fade probability: 0.00589 %
Annual fade probability: 0.00147 %

Annual fade outage time: 464.8 secs
Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 99.99853 %

Link Performance 14 km Report

----- Transmitter data:

Latitude: 44 7 22.08 North
Longitude: 123 4 57.33 West
Site elevation = 119.9 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 31.32 degs
Antenna beamtilt = 1.68 degs
Antenna beamtilt azimuth = 31.32 degs
Antenna polarization = Horizontal
Cross polarization rejection= 15.00 dB
Transmitter power(max): -3.00 dBW
Transmitter power(min): -50.00 dBW
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 20.00 dBi
Total Transmitted ERPi: 17.00 dBW
Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 12 46.83 North
Longitude: 123 0 21.53 West
Site elevation = 465.0 m
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 211.38 degs
Antenna beamtilt = -1.68 degs
Antenna beamtilt azimuth = 211.38 degs
Antenna polarization = Horizontal
Cross polarization rejection: 15.00 dB
Diversity type: unprotected
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 20.00 dBi
Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00
Percent of time: 50.00 %
Percent of locations: 50.00 %
Margin = 0.00 dB
Earth effective radius = 1.333
Ground conductivity: 8.00 mS
Relative permittivity: 15.00
Atmosphere type: None
Climate type: Continental temperate
Use terrain data: Yes
Use clutter data: Yes
Use building data: No
Include reflection: No

Include Fresnel zone loss: Yes
Use clutter height: No
Path length: 11.743 km
Analysis point spacing along path: 0.100 km
Free space loss: 121.45 dB
Number of obstacles: 0
Total obstacle loss: 0.00 dB
Atmospheric absorption loss = 0.00 dB
Clutter loss = 25.00 dB
Reflection loss = 0.00 dB
Partial fresnel zone loss = 0.00 dB
Fresnel zone clearance = 3.65
Pathloss adjustment for statistics = -0.01 dB
Total excess path loss = 24.99 dB
Total invariant path loss: 146.44 dB

Fading parameters:

Fade outage calculation method: Vigants-Barnett
Vigants-Barnett C factor: 1.0
Other external interference: -150.00 dBmW
Dispersive fade margin: 80.0 dB
Fade occurrence factor: 5.0
Rain outage calculation method: Crane
Rain rate table: ITU-R map regions
Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

Received signal level: -79.48 dBmW
Received Power Flux Density: -80.43 dBW/m²
Receiver noise figure: 5.00 dB
Receiver noise bandwidth: 10.0000 MHz
Receiver noise power: -98.98 dBmW
External interference: -150.00 dBmW
Required C/(I+N) ratio: 9.60 dB
Link threshold: -89.38 dBmW
Flat fade margin: 9.90 dB
Composite fade margin: 9.90 dB
Fade margin against noise: 9.90 dB
Fade margin against interference: 60.92 dB
Worst month fade probability: 0.59972 %
Annual fade probability: 0.14993 %
Annual fade outage time: 47282.2 secs
Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 99.85007 %

Link Performance 20 km Report

Transmitter data:

Latitude: 44 5 0.83 North
Longitude: 123 11 23.92 West
Site elevation = 115.7 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 45.91 degs
Antenna beamtilt = 1.01 degs
Antenna beamtilt azimuth = 45.91 degs
Antenna polarization = Horizontal
Cross polarization rejection = 15.00 dB
Transmitter power(max): -3.00 dBW

Transmitter power(min): -50.00 dBW
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB

Maximum antenna gain: 20.00 dBi

Total Transmitted ERPi: 17.00 dBW

Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 12 42.14 North

Longitude: 123 0 18.75 West

Site elevation = 477.6 m

Antenna type = OMNI

Antenna COR height AGL = 30.0 m

Antenna orientation = 226.04 degs

Antenna beamtilt = -1.01 degs

Antenna beamtilt azimuth = 226.04 degs

Antenna polarization = Horizontal

Cross polarization rejection: 15.00 dB

Diversity type: unprotected

Transmission line length: 0.00 m

Transmission line loss: 0.00 dB

Circulator loss: 0.00 dB

Other system loss: 0.00 dB

Radome loss: 0.00 dB

Maximum antenna gain: 20.00 dBi

Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00

Percent of time: 50.00 %

Percent of locations: 50.00 %

Margin = 0.00 dB

Earth effective radius = 1.333

Ground conductivity: 8.00 mS

Relative permittivity: 15.00

Atmosphere type: None

Climate type: Continental temperate

Use terrain data: Yes

Use clutter data: Yes

Use building data: No

Include reflection: No

Include Fresnel zone loss: Yes

Use clutter height: No

Path length: 20.498 km

Analysis point spacing along path: 0.100 km

Free space loss: 126.29 dB

Number of obstacles: 0

Total obstacle loss: 0.00 dB

Atmospheric absorption loss = 0.00 dB

Clutter loss = 25.00 dB

Reflection loss = 0.00 dB

Partial fresnel zone loss = 0.00 dB

Fresnel zone clearance = 3.86

Pathloss adjustment for statistics = -0.03 dB

Total excess path loss = 24.97 dB

Total invariant path loss: 151.26 dB

Fading parameters:

Fade outage calculation method: Vigants-Barnett

Vigants-Barnett C factor: 1.0

Other external interference: -150.00 dBmW

Dispersive fade margin: 80.0 dB
Fade occurrence factor: 5.0
Rain outage calculation method: Crane
Rain rate table: ITU-R map regions
Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

Received signal level: -84.26 dBmW
Received Power Flux Density: -85.21 dBW/m²
Receiver noise figure: 5.00 dB
Receiver noise bandwidth: 10.0000 MHz
Receiver noise power: -98.98 dBmW
External interference: -150.00 dBmW
Required C/(I+N) ratio: 9.60 dB
Link threshold: -89.38 dBmW
Flat fade margin: 5.12 dB
Composite fade margin: 5.12 dB
Fade margin against noise: 5.12 dB
Fade margin against interference: 56.14 dB
Worst month fade probability: 12.55149 %
Annual fade probability: 3.13787 %
Annual fade outage time: 989559.2 secs
Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 96.86212 %

Link Performance 13 km Report

Transmitter data:

Latitude: 44 5 45.29 North
Longitude: 123 3 4.85 West
Site elevation = 130.0 m
Transmitter frequency = 2400.0000 MHz
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 16.01 degs
Antenna beamtilt = 1.55 degs
Antenna beamtilt azimuth = 16.01 degs
Antenna polarization = Horizontal
Cross polarization rejection = 15.00 dB
Transmitter power(max): -3.00 dBW
Transmitter power(min): -50.00 dBW
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 20.00 dBi
Total Transmitted ERP_i: 17.00 dBW
Free space optics link?: = No

Receiver data:

Latitude: 44 12 44.74 North
Longitude: 123 0 16.94 West
Site elevation = 493.9 m
Antenna type = OMNI
Antenna COR height AGL = 30.0 m
Antenna orientation = 196.04 degs
Antenna beamtilt = -1.55 degs
Antenna beamtilt azimuth = 196.04 degs
Antenna polarization = Horizontal

Cross polarization rejection: 15.00 dB
Diversity type: unprotected
Transmission line length: 0.00 m
Transmission line loss: 0.00 dB
Circulator loss: 0.00 dB
Other system loss: 0.00 dB
Radome loss: 0.00 dB
Maximum antenna gain: 20.00 dBi

Propagation:

Propagation model: Anderson-2D v1.00
Percent of time: 50.00 %
Percent of locations: 50.00 %
Margin = 0.00 dB
Earth effective radius = 1.333
Ground conductivity: 8.00 mS
Relative permittivity: 15.00
Atmosphere type: None
Climate type: Continental temperate
Use terrain data: Yes
Use clutter data: Yes
Use building data: No
Include reflection: No
Include Fresnel zone loss: Yes
Use clutter height: No

Path length: 13.476 km
Analysis point spacing along path: 0.100 km
Free space loss: 122.65 dB
Number of obstacles: 2
Obstacles: Dist. from TX(km) Height(m) Loss(dB)

 2.300 240.0 10.9
 10.400 500.0 26.6

Total obstacle loss: 37.45 dB
Atmospheric absorption loss = 0.00 dB
Clutter loss = 25.00 dB
Reflection loss = 0.00 dB
Partial fresnel zone loss = 0.00 dB
Fresnel zone clearance = 2.38
Pathloss adjustment for statistics = -0.02 dB
Total excess path loss = 62.43 dB
Total invariant path loss: 185.08 dB

Fading parameters:

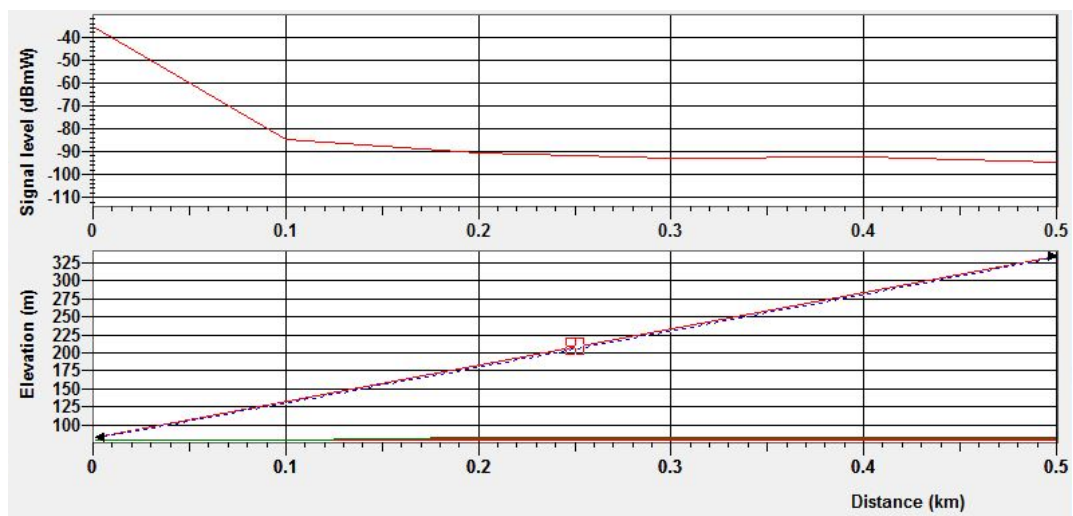
Fade outage calculation method: Vigants-Barnett
Vigants-Barnett C factor: 1.0
Other external interference: -150.00 dBmW
Dispersive fade margin: 80.0 dB
Fade occurrence factor: 5.0
Rain outage calculation method: Crane
Rain rate table: ITU-R map regions
Rain region: f
Rain rate 0.01% of the time: 0.0 (mm/hr)
Use correlated rain fade analysis: No

Link Performance:

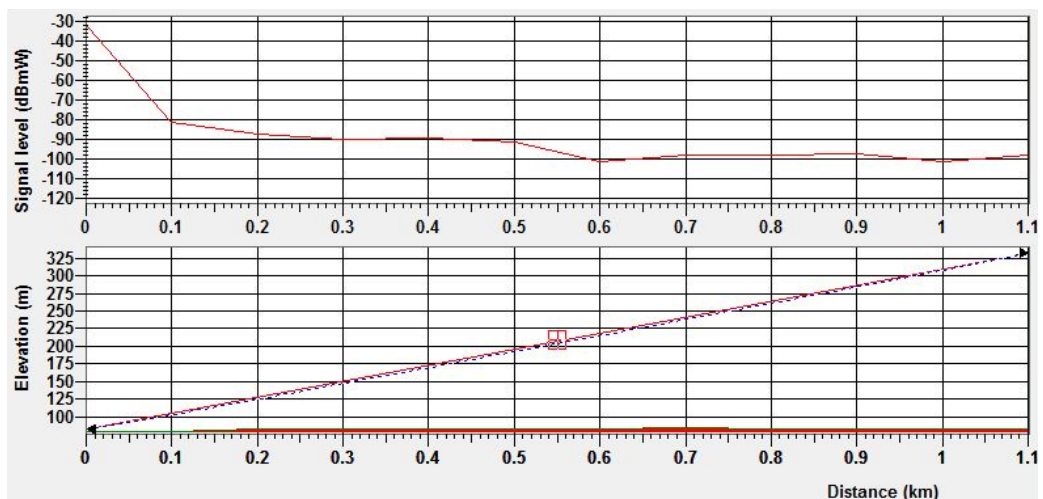
Received signal level: -118.09 dBmW
Received Power Flux Density: -119.04 dBW/m2
Receiver noise figure: 5.00 dB
Receiver noise bandwidth: 10.0000 MHz

Receiver noise power: -98.98 dBmW
 External interference: -150.00 dBmW
 Required C/(I+N) ratio: 9.60 dB
 Link threshold: -89.38 dBmW
 Flat fade margin: -28.71 dB
 Composite fade margin: -28.71 dB
 Fade margin against noise: -28.71 dB
 Fade margin against interference: 22.31 dB
 Worst month fade probability: 50.00000 %
 Annual fade probability: 50.00000 %
 Annual fade outage time: 15768000.0 secs
 Annual rain outage time: 0.0 secs
Total link reliability: 50.00000 %

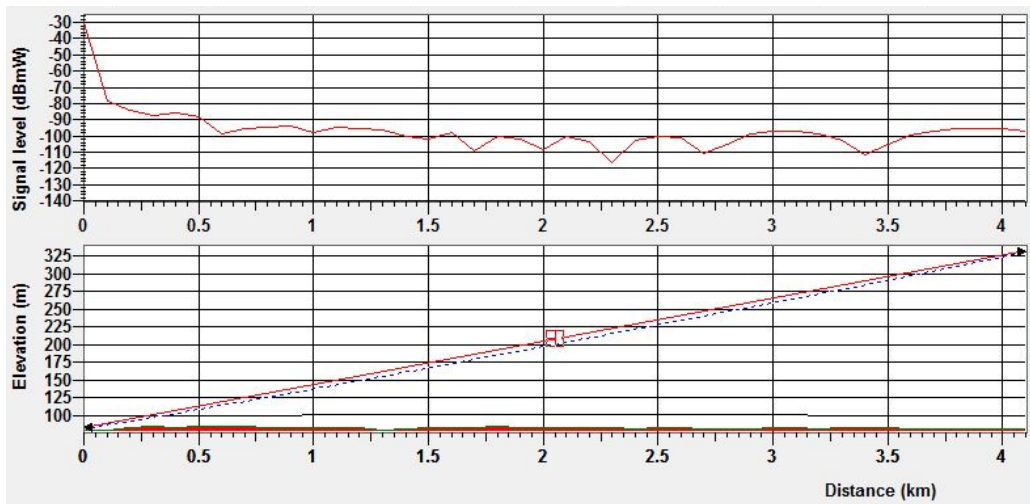
3 priedas. Signalio lygio priklausomybės nuo atstumo tyrimo rezultatai



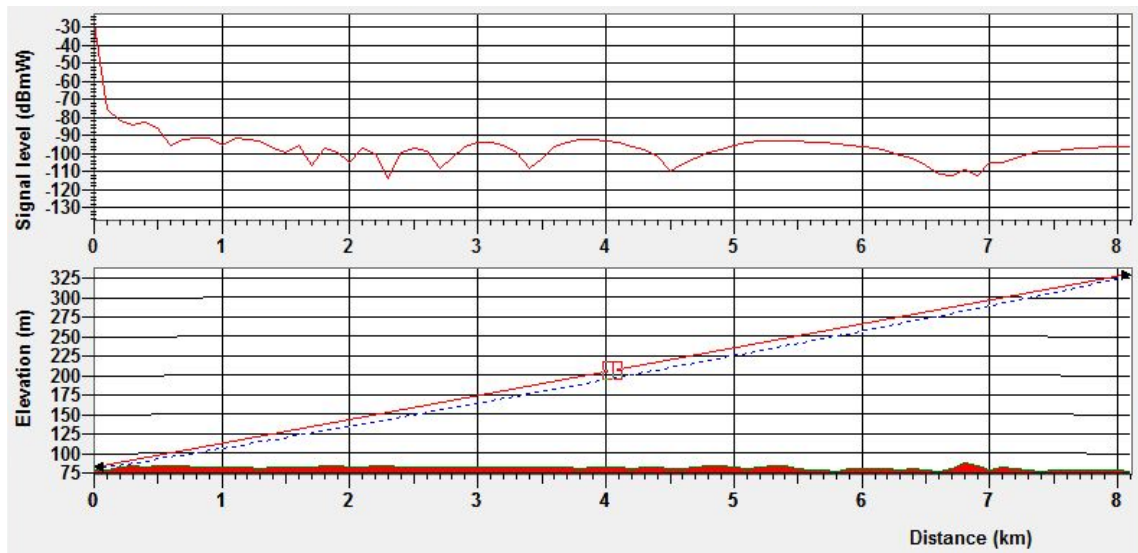
1 pav. Signalio lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 3 dBi stiprinimo antena



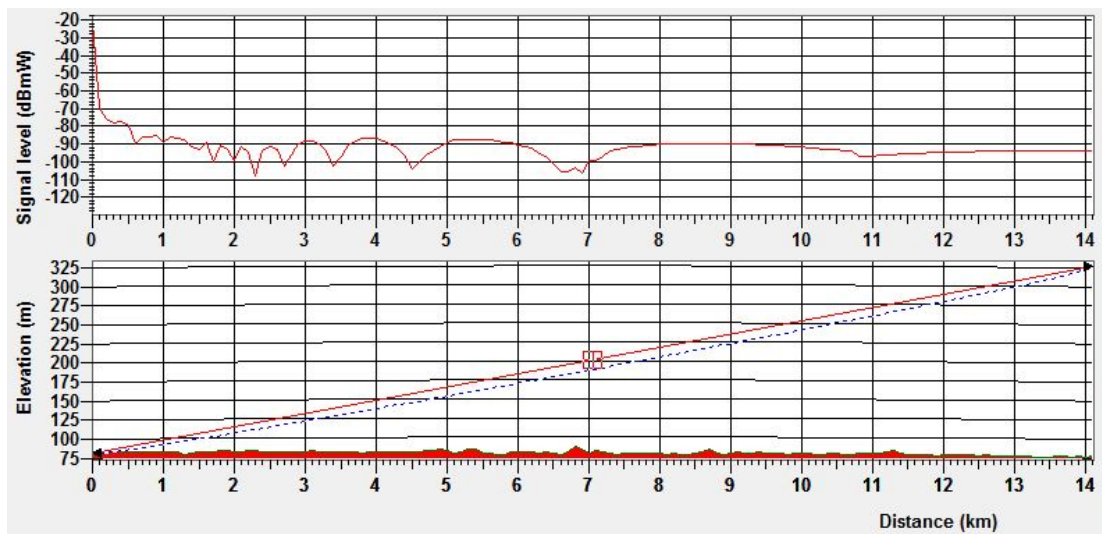
2 pav. Signalio lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 6 dBi stiprinimo antena



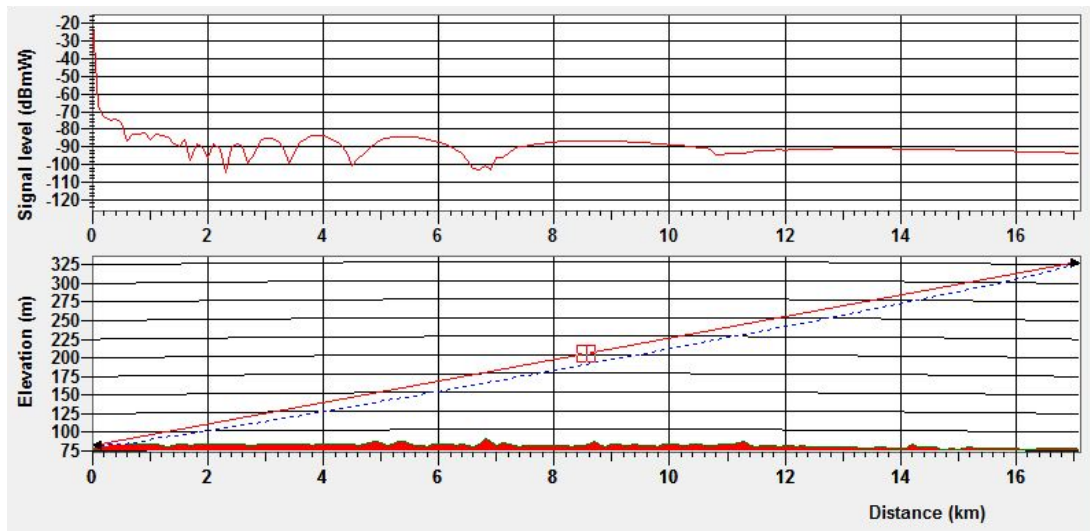
3 pav. Signalų lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 9 dBi stiprinimo antena



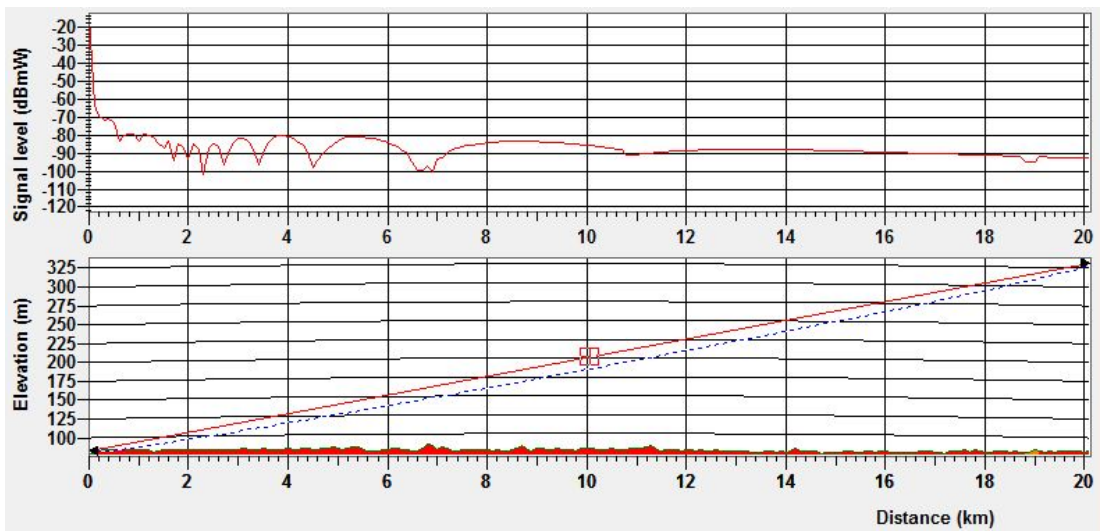
4 pav. Signalų lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 12 dBi stiprinimo antena



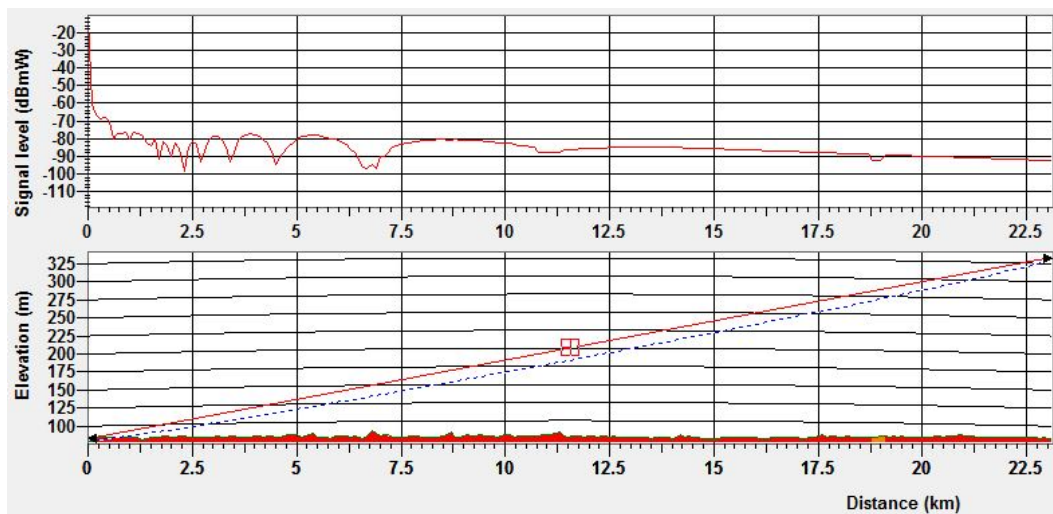
5 pav. Signalų lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 15 dBi stiprinimo antena



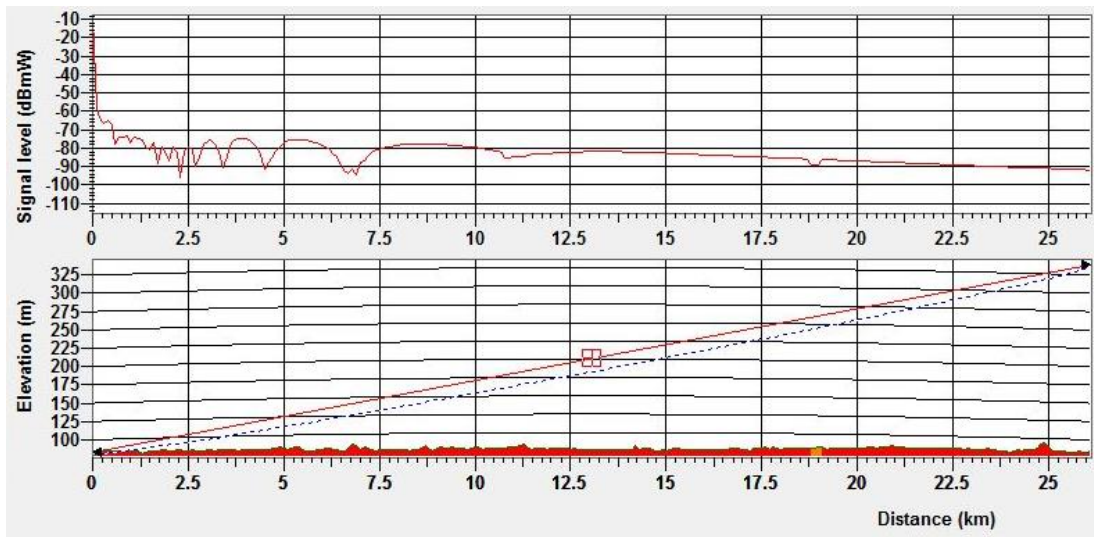
6 pav. Signalo lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 21 dBi stiprinimo antena



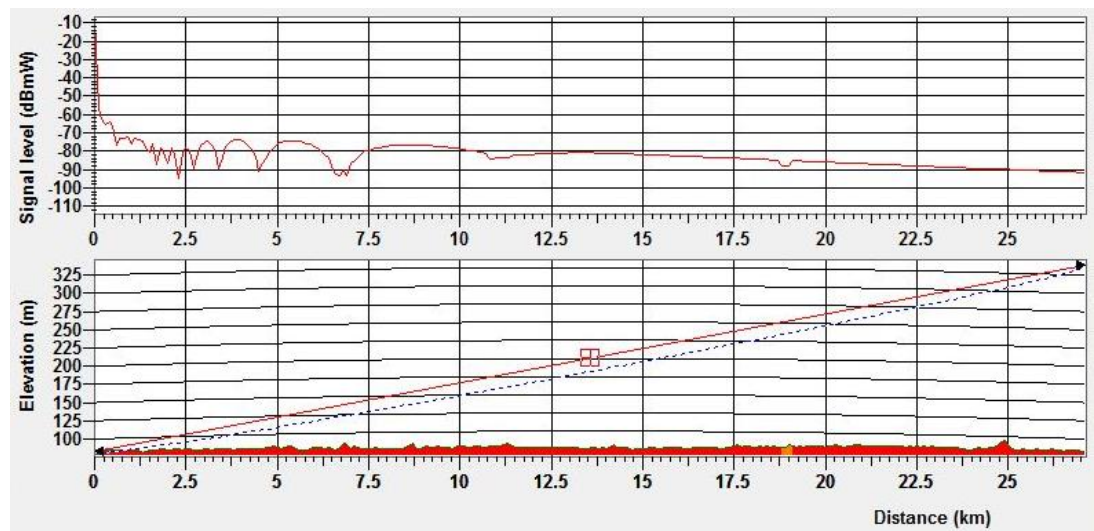
7 pav. Signalo lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 24 dBi stiprinimo antena



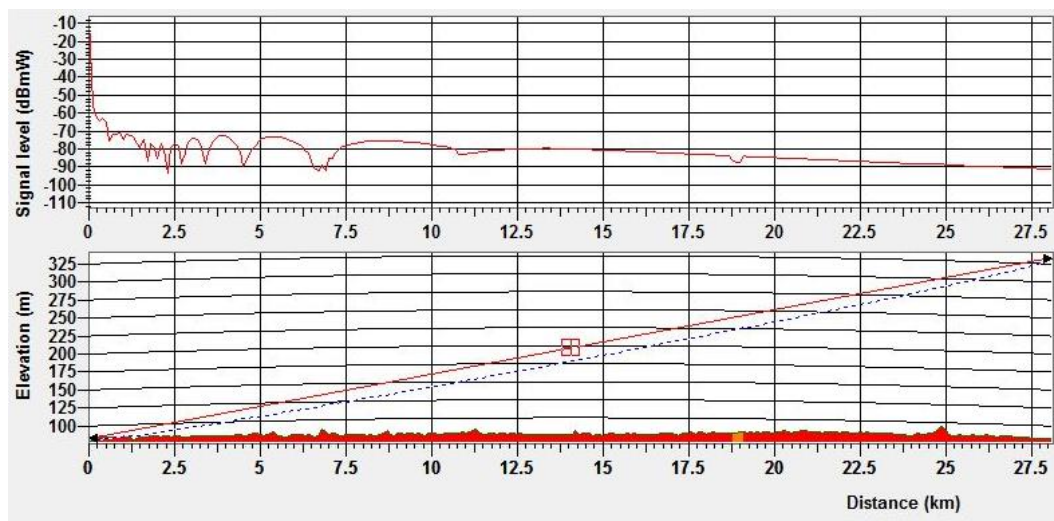
8 pav. Signalo lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 27 dBi stiprinimo antena



9 pav. Signalų lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 30 dBi stiprinimo antena



10 pav. Signalų lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 31 dBi stiprinimo antena



11 pav. Signalų lygio priklausomybė nuo atstumo, kai AVS įdiegta 32 dBi stiprinimo antena

4 priedas. Tyrimo lauko sąlygomis atvaizdavimas



1 pav. Tyrimo lygumų teritorijoje plotas



2 pav. Tyrimo lygumų teritorijoje ilgis



3 pav. Tyrimo miškingoje teritorijoje plotas



4 pav. Tyrimo miškingoje teritorijoje ilgis