VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Šarūnas Budrevičius

DUOMENŲ PERDAVIMO NUOTOLIO TYRIMAS TARP BEPILOČIO ORLAIVIO IR ANTŽEMINĖS STOTIES
DATA TRANSMISSION RANGE STUDY BETWEEN UNMANNED AERIAL VEHICLE AND GROUND STATION

Baigiamasis magistro darbas

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX052

Telekomunikacijų technologijų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Šarūnas Budrevičius

DUOMENŲ PERDAVIMO NUOTOLIO TYRIMAS TARP BEPILOČIO ORLAIVIO IR ANTŽEMINĖS STOTIES
DATA TRANSMISSION RANGE STUDY BETWEEN UNMANNED AERIAL VEHICLE AND GROUND STATION

Baigiamasis magistro darbas

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX052

Telekomunikacijų technologijų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas_doc.dr Darius Guršnys____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Konsultantas_____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX052

Telekomunikacijų technologijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(Parašas)
Algirdas Baškys
(Vardas, pavardė)
_____
(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

…….....Nr. .....
Vilnius

Studentui Šarūnui Budrevičiui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Duomenų perdavimo nuotolio tyrimas tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties

Data transmission range study between unmanned aerial vehicle and ground station

patvirtinta 202…m. ……..…… d. dekano potvarkiu Nr. …….

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 202…m. ……..…… d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Darbo tikslas – ištirti duomenų perdavimo nuotolį tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties naudojant belaidžio ryšio įrangą ir TCP/IP protokolą.

Reikalavimai. Atstumo fiksavimui bus naudojama GPS įranga. Praktiniuose eksperimentuose turės būti įvertintos įvairios techninės įrangos konfigūracijos. Turėtų būti atliktas ryšio nuotolio modeliavimas ir gauti teoriniai rezultatai palyginti su eksperimentiniais.

Aiškinamojo rašto turinys:
1. Įvadas. Užduoties analizė.
2. Analogiškų tyrimų apžvalga.
3. Tyrime naudojamos įrangos analizė.
4. Ryšio sistemos modeliavimas.
5. Tyrimo eksperimentai ir rezultatai
   5.1. Naudojamos įrangos testavimas.
   5.2. Įrangos montavimas ir pritaikymas naudoti bepiločiame orlaivyje.
   5.3. Ryšio veikimo nuotolio testavimas atliekant autonominius skrydžius.
6. Rezultatų apibendrinimas.

Literatūros ir informacinių šaltinių sąrašas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas .....
(Parašas)
doc.dr. Darius Guršnys
(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
……..
(Parašas)
Šarūnas Budrevičius
(Vardas, pavardė)
2020-12-14
……..…...
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Telekomunikacijų inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas
Pavadinimas **Duomenų perdavimo nuotolio tyrimas tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties**
Autorius **Šarūnas Budrevičius**
Vadovas **Darius Guršnys**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamojo magistro darbo analogiškų tyrimų apžvalgoje nagrinėjami analogiški duomenų perdavimo tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties tyrimai.

Baigiamojo magistro darbo projektinėje dalyje pateiktas sistemos ryšio modelis, programos kodas, tyrime gautų rezultatų lentelės, grafikai, ryšio modelio palyginimas su ryšio nuotolio bandymais atliktais realiomis sąlygomis.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, analogiškų tyrimų apžvalga, tyrime naudojamos įrangos analizė, tyrimo eksperimentai ir rezultatai, ryšio sistemos modeliavimas, rezultatų apibendrinimas ir literatūra.

Darbo apimtis: 57 p. teksto be priedų, 41 iliustr., 26 lent., 21 bibliografinis šaltinis.
Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: bepilotis orlaivis, TCP/IP protokolas, siųstuvas, imtuvas, antžeminė stotis, ryšio modelis, aukštos raiškos vaizdo perdavimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Computer Science and Communications Technologies

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Telecommunications Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Data Transmission Range Study Between Unmanned Aerial Vehicle and Ground Station**

Author **Šarūnas Budrevičius**

Academic supervisor **Darius Guršnys**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In the final master's thesis was analysed analogous studies of data transmission between unmanned aerial vehicle and ground station.

The project part of the final master's thesis presents the system communication model, programming code, tables and graphs of reached results and the system communication model comparison with real-world communication distance tests.

The work structure: introduction, an overview of analogous researches, analysis of the equipment used in the study, research experiments and results, communication system modelling, summary of results and references.

Thesis consist of: 57 p. text without appendixes, 41 pictures, 26 tables, 21 bibliographical entries.
Appendixes included.

Keywords: unmanned aerial vehicle, TCP/IP protocol, transmitter, receiver, ground station, communication model, high definition video transmission.

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Šarūnas Budrevičius, 20162497

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Telekomunikacijų inžinerija, TETfm-20

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2022 m. gegužės 25 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Duomenų perdavimo nuotolio tyrimas tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Darius Guršnys. Mano darbo vadovas docentas daktaras Darius Guršnys.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Šarūnas Budrevičius

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS....8
LENTELIŲ SĄRAŠAS....9
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS....10
ĮVADAS. UŽDUOTIES ANALIZĖ....11
1. ANALOGIŠKŲ TYRIMŲ APŽVALGA....13
1.1. Tiesioginis duomenų perdavimas dronas–žemė....13
1.2. Dronas–žemė tyrimas naudojant 2,4 GHz dažnio įrangą....16
1.3. Duomenų perdavimas pasitelkiant bepiločių orlaivių tinklą....17
1.4. Apibendrinimas ir išvados....21
2. TYRIME NAUDOJMAOS ĮRANGOS ANALIZĖ....23
2.1. Siųstuvas–imtuvas „Microhard pMDDL2450“....23
2.2. Vaizdo kamera „Gopro 4 Silver“....24
2.3. Vaizdo kodavimo įrenginys „Orivision ZY-EH201“....25
2.4. Apibendrinimas ir išvados....25
3. TYRIMO EKSPERIMENTAI IR REZULTATAI....27
3.1. Bendro sistemos veikimo eksperimentas....27
3.2. „pMDDL2450“ siųstuvo-imtuvo duomenų pralaidumo eksperimentai....28
3.3. Vidutinės duomenų spartos ir standartinio nuokrypio skaičiavimai....39
3.4. Eksperimentinis 2,4 GHz antenos stiprinimo koeficiento nustatymas....40
3.5. Apibendrinimas ir išvados....43
4. RYŠIO SISTEMOS MODELIAVIMAS....44
4.1. Ryšio sistemos modelis....44
4.2. Reikalingos duomenų spartos nustatymas ir vaizdo kokybės apibrėžimas....45
4.3. Ryšio modelio programinės įrangos kūrimas....46
4.4. Sukurtos programinės įrangos veikimo patikrinimas realiomis sąlygomis....50
4.5. Apibendrinimas ir išvados....53
REZULTATŲ APIBENDRINIMAS....54
LITERATŪRA....56
PRIEDAI....58

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Dronas–žemė duomenų perdavimo sistema 13
1.2 pav. Sumodeliuoto kanalo praradimo rezultatas esant 400 MHz nešlio dažniui 15
1.3 pav. Tyrime naudojama įranga....16
1.4 pav. Duomenų pralaidumo eksperimentų rezultatai 2 m aukštyje 17
1.5 pav. Išmatuotų duomenų pralaidumo rezultatai skirtinguose taškuose....17
1.6 pav. FANET padengimo srities nelaimingo atsitikimo atveju scenarijus 18
1.7 pav. 4G-LTE bepiločių orlaivių tinklo modelis 19
1.8 pav. RSRP ir duomenų pralaidumo priklausomybė 20
1.9 pav. Dviejų bepiločių orlaivių ir bazinės stoties tinklo modelis 21
2.1 pav. „Microhard pMDDL2450“ siųstuvas 23
2.2 pav. „Gopro 4 Silver“ vaizdo kamera 25
2.3 pav. Vaizdo kodavimo įrenginys „Orivision ZY-EH201“ 25
3.1 pav. Priimamo signalo lygis, kai imtuvo galia 7 dBm 27
3.2 pav. Priimamo signalo lygis, kai imtuvo galia 8 dBm 27
3.3 pav. Vaizdas iš vaizdo kameros eksperimento metu....28
3.4 pav. „pMDDL2450“ modulis – bepilotis orlaivis 31
3.5 pav. „pMDDL2450“ modulis – antžeminė stotis....31
3.6 pav. Duomenų spartos pagal atstumą palyginimas 5 m, 10 m ir 15 m aukščiuose 32
3.7 pav. Duomenų spartos pagal atstumą palyginimas 20 m ir 30 m aukščiuose 33
3.8 pav. Duomenų spartos pagal atstumą palyginimas 40 m ir 50 m aukščiuose 34
3.9 pav. Ryšys tarp RSSI ir SNR 34
3.10 pav. Duomenų spartos palyginimas pagal 64-QAM moduliacijas....36
3.11 pav. Duomenų spartos palyginimas pagal 16-QAM moduliacijas....36
3.12 pav. Duomenų spartos palyginimas tarp QPSK_3/4, QPSK_1/2 ir BPSK_1/2 38
3.13 pav. Siųstuve naudojama įvairiakryptė 2,4 GHz antena 41
3.14 pav. Etaloninė 8 dBi 2,4 GHz antena 41
3.15 pav. 2,4 GHz kryptinė antena....41
3.16 pav. Spektro analizatoriuje užfiksuotų antenų signalų stiprumai, siųstuvo antena....42
3.17 pav. Eksperimento metu pagaminta 2,4 GHz antena 42
3.18 pav. Spektro analizatoriuje užfiksuotų antenų signalų stiprumai, pagaminta antena....43
4.1 pav. Ryšio modelio schema....44
4.2 pav. Supaprastintų rezultatų atvaizdavimas grafiškai 48
4.3 pav. Grafinis ryšio praradimo atvaizdavimas....49
4.4 pav. Rezultatų atvaizdavimas ekrane 49
4.5 pav. Programinės įrangos rezultatas, kai atstumas 1 km....50
4.6 pav. Supaprastintų rezultatų grafinis atvaizdavimas, kai atstumas 1 km 51
4.7 pav. RSSI, SNR ir moduliacija....51
4.8 pav. Duomenų pralaidumo testas 51
4.9 pav. Programinės įrangos rezultatas, kai atstumas 0,5 km....52
4.10 pav. Supaprastintų rezultatų atvaizdavimas, kai atstumas 0,5 km 52
4.11 pav. Perduodamo vaizdo kadras 0,5 km atstumu 53

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Suspaustų duomenų perdavimo sparta, kai vaizdas koduojamas „H.264“.....16
2.1 lentelė. Optimalios našumo specifikacijos.....24
3.1 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, kai atstumas tarp modulių 1 m.....29
3.2 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 5 m.....31
3.3 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 10 m aukštis.....31
3.4 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 15 metrų aukštis.....32
3.5 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 20 metrų aukštis.....32
3.6 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 30 metrų aukštis.....33
3.7 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 40 metrų.....33
3.8 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 50 metrų aukštis.....34
3.9 lentelė. Duomenų pralaidumo su 64-QAM_5/6 matavimo rezultatai.....35
3.10 lentelė. Duomenų pralaidumo su 64-QAM_3/4 matavimo rezultatai.....35
3.11 lentelė. Duomenų pralaidumo su 64-QAM_2/3 matavimo rezultatai.....35
3.12 lentelė. Duomenų pralaidumo su 16-QAM_3/4 matavimo rezultatai.....35
3.13 lentelė. Duomenų pralaidumo su 16-QAM_1/2 matavimo rezultatai.....36
3.14 lentelė. Duomenų pralaidumo su QPSK_3/4 matavimo rezultatai.....37
3.15 lentelė. Duomenų pralaidumo su QPSK_1/2 matavimo rezultatai.....37
3.16 lentelė. Duomenų pralaidumo su BPSK_1/2 matavimo rezultatai.....37
3.17 lentelė. Duomenų pralaidumo rezultatai, kai naudojamos siųstuvo 8 dBi antenos.....38
3.18 lentelė. Vidutinė duomenų sparta, kvadratinis ir standartinis nuokrypiai.....40
4.1 lentelė. Duomenų sparta pagal vaizdo kokybę, „H.264“ vaizdo kodavimas.....45
4.2 lentelė. Duomenų sparta pagal vaizdo kokybę, „H.265“ vaizdo kodavimas.....46

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

AES (angl. *Advanced Encryption Standard*) – šifravimo algoritmas.
BPSK (angl. *Binary pfase-shift keying*) – dvejetainis fazės poslinkis.
CBR (angl. *Constant bit rate*) – pastovi bitų sparta.
FANET (angl. *Flying ad hoc network*) – skraidantis belaidžio ryšio tinklas.
FDD (angl. *Frequency division duplexing*) – dažnio padalijimo dupleksas.
GPS (angl. *Global Positioning System*) – globali padėties nustatymo sistema.
HD (angl. *High definition*) – aukšta raiška.
HDMI (angl. *High-Definition Multimedia Interface*) – didelės raiškos daugialypės terpės sąsaja.
HEVC (angl. *High efficiency video coding*) – aukšto efektyvumo vaizdo kodavimas.
HTTP (angl. *Hypertext transfer protocol*) – informacijos perdavimo tinkle protokolas.
IP (angl. *Internet Protocol*) – internetinis protokolas.
LAN (angl. *Local area network*) – vietinis tinklas.
LDPC (angl. *Low-Density Parity Check*) – mažo tankio pariteto patikra.
LOS (angl. *Line of Sight*) – tiesioginis matomumas.
MANET (angl. *A Mobile Ad-Hoc Network*) – belaidžio ryšio tinklas.
MIMO (angl. *multiple – input and multiple – output*) – keletas įėjimų, keletas išėjimų.
MRC (angl. *Maximal Ratio Combining*) – maksimalus santykinis derinimas.
ML (angl. *Maximal Likelihood*) – didžiausios tikimybės.
NLOS (angl. *Non Line of Sight*) – netiesioginis matomumas.
OFDM (angl. *Orthogonal frequency-division multiplexing*) – stačiakampė dažnio dalijimo moduliacija.
PHY (angl. *Ethernet physical layer*) – standartinis fizinis „Ethernet“ sluoksnis.
RSRP (angl. *Reference Signal Recieve Power*) – atskaitos signalo priėmimo galia.
RTSP (angl. *Real time streaming protocol*) – tiesioginio transliavimo protokolas.
RSSI (angl. *Received signal strenght indication*) – priimamo signalo stiprumas.
SNR (angl. *Signal to noise ratio*) – signalas – triukšmas santykis.
TCP (angl. *Transmission Control Protocol*) – transportavimo valdymo protokolas.
TDD (angl. *Timi division duplexing*) – laiko dalijimo dupleksas.
UDP (angl. *User datagram protocol*) – transportavimo protokolas.
VBR (angl. *Variable bit rate*) – kintama bitų sparta.
VOEI (angl. *Video transmission with UAV replacement based on Energy Information*) – vaizdo perdavimo modelis pagrįstas energijos efektyvumu naudojant bepilotį orlaivį.
QAM (angl. *Quadrature amplitude modulation*) – kvadratinė amplitudės moduliacija.
QoE (angl. *Quality of Experience*) – patirties kokybė.
QPSK (angl. *Quadrature pfase-shift keying*) – kvadratinis fazių poslinkis.

ĮVADAS. UŽDUOTIES ANALIZĖ

Tiriamoji problema

Pastaraisiais metais bepiločių orlaivių panaudojimas sparčiai didėja, jie naudojami labai įvairiais tikslais (pvz., žvalgyba, žmonių paieška, krovinių gabenimas, meteorologiniai stebėjimai, moksliniai tyrimai, žemdirbystė, įvairių konstrukcijų, pvz., tiltų, stebėjimas, kino filmų kūrimas, gaisrų gesinimas, kartografija, reljefo stebėjimas, pasiklydusių laivų paieška, misijų pavojingose žmogaus gyvybei zonose vykdymas). Be to, bepiločiai orlaiviai naudojami, kaip interneto ryšio stotelė suteikti prieigai, kur tokios galimybės nėra. Dėl šių priežasčių didėja poreikis vis didesniam duomenų perdavimo nuotoliui tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties.

Šiuo metu yra siūloma daug įvairios įrangos aukštos raiškos vaizdui perduoti, tačiau perdavimo nuotolis yra stipriai ribotas. Kad perduoti aukštos raiškos vaizdą, reikalinga didelė duomenų perdavimo sparta, mažinant šią spartą galima pasiekti didesnį perdavimo nuotolį, tačiau tuomet yra mažinama perduodamo vaizdo kokybė. Kad perduoti aukštos raiškos vaizdą naudojant įrangą sumontuotą bepiločiame orlaivyje, yra susiduriama su problemomis suderinant šios įrangos naudojamus dažnius su kitais bepiločio orlaivio naudojamos įrangos dažniais. Įprastai rankiniam bepiločio orlaivio valdymui yra naudojama 2,4 GHz dažnių ruožas, telemetrijai ir valdymui per ją naudojami 433 MHz, 868 MHz arba 915 MHz dažnių ruožai, analoginio vaizdo perdavimui 1,2 GHz ir 5,8 GHz vaizdo siųstuvai. Todėl svarbu parinkti tinkamą įrangą, kuri tenkins duomenų perdavimo nuotolį išvengiant interferencijos.

Siekiant išspręsti šią problemą, naudojama įvairi 3G, 4G LTE, 2,4 GHz ir 5,8 GHz „Wifi“ belaidžio ryšio įranga. Taip pat šiuo metu yra sparčiai tiriama belaidžio ryšio tinklo (angl. *A Mobile Ad-Hoc Network*, MANET) suformuoto iš kelių bepiločių orlaivių problema, kuri sparčiai sprendžiama įgyvendinant 5G ryšio tinklą. Yra atlikta daug tyrimų šioms sistemoms analizuoti, kurie yra pateikti analogiškų tyrimų apžvalgoje.

Tyrimo metu išanalizuotos įvairios techninės įrangos konfigūracijos, atliktas ryšio sistemos modeliavimas ir atlikti ryšio veikimo nuotolio eksperimentai vykdant skrydžius su bepiločiu orlaiviu. Ataskaitoje pateikti šių eksperimentų rezultatai. Tyrime atstumo fiksavimui naudojama „GPS“ įranga, aukštos raiškos vaizdo perdavimui tiriamoji belaidžio ryšio įranga yra „Microhard pMDDL2450“, kur siųstuvas sumontuotas bepiločiame orlaivyje, o imtuvas yra antžeminė stotis.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – 2,4 GHz ir 5,8 GHz „Wifi“ belaidžio ryšio įranga.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra ištirti duomenų perdavimo nuotolį tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties naudojant belaidžio ryšio įrangą ir TCP/IP protokolą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti įgyvendinami šie uždaviniai:

1. Analogiškų tyrimų apžvalgą.
2. Tyrime naudojamos įrangos analizė.
3. Ryšio sistemos modeliavimas.
4. Tyrime numatytų eksperimentų atlikimas.
5. Ryšio sistemos modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų palyginimas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

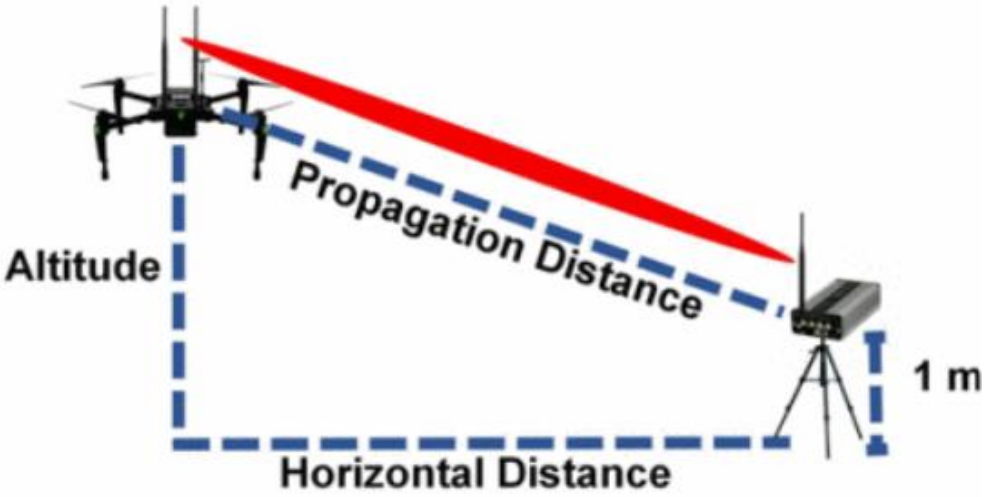
Tyrimų rezultatai gali būti naudojami pritaikant tiriamąją belaidžio ryšio įrangą įvairioms bepiločių orlaivių problemoms spręsti įgyvendinant aukštos raiškos vaizdo perdavimą. Remiantis gautais rezultatais parinkti tokią įrangą, kuri netrukdytų kitai, bepiločiame orlaivyje esančiai įrangai veikti.

1. ANALOGIŠKŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgti analogiški duomenų perdavimo tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties tyrimai. Pateikti problemos sprendimo būdai, taikomi metodai, eksperimentai ir pasiekti rezultatai. Apžvalgoje pateikta 400 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2,4 GHz ir 5 GHz dažnių ruožų duomenų perdavimo dronas–žemė, skraidančio tinklo (angl. *Flying ad hoc network*, FANET), 4G-LTE vaizdo persiuntimo realiu laiku ir duomenų perdavimo pralaidumo didinimo panaudojant kelis bepiločius orlaivius tyrimai.

1.1. Tiesioginis duomenų perdavimas dronas–žemė

Dronas–žemė duomenų perdavimo tipą sudaro bepilotis orlaivis ir antžeminė stotis su siųstuvo ir imtuvo įranga (1.1 pav.). Tokio tipo duomenų perdavimas yra paprastesnis, lengvai įgyvendinamas ir pigesnis nei duomenų perdavimo tipas panaudojant bepiločių orlaivių tinklą. Tačiau, kad perduoti aukštos raiškos vaizdą, tokios sistemos veikimo nuotolis yra ribotas. Šiuo atveju yra naudojami skirtingų dažnių siųstuvai ir imtuvai, tokios įrangos panaudojimą pateikia analizuojamo tyrimo autoriai, kurie nagrinėja 900 MHz, 1800 MHz ir 5 GHz duomenų perdavimą skirtingomis sąlygomis, kai yra tiesioginis matomumas (angl. *Line of Sight*, LOS), netiesioginis matomumas su kliūtimis – medžiais, netiesioginis matomumas su kliūtimis – krūmais (angl. *Non Line of Sight*, NLOS). Tyrimui naudojamas „USRP E312“ siųstuvas ir imtuvas, kuris turi 70 MHz – 6 GHz dažnių pasirinkimo galimybę. Atliekant praktinius tyrimus naudojamos skirtingos anksčiau minėtos aplinkos bei skirtingas bepiločio orlaivio aukštis ir horizontalusis atstumas nuo jo iki antžeminės stoties. Rezultatams gauti autoriai naudoja formules skirtas apskaičiuoti signalo lygį ir pralaidumą, kurias pateikia „IEEE 802.11“ standartas (Shi, Enami, Wensowitch & Camp , 2018).



1.1 pav. Dronas–žemė duomenų perdavimo sistema (Shi et.al., 2018)

Signalo sklidimo kelio praradimo apskaičiavimui naudojama formulė (Shi et.al., 2018):

$$PL(d) = 20log_{10}\left(\frac{4\pi d_0 f}{c}\right) + \overline{PL}(d, d_0) + X_s \quad (1.1)$$

čia *PL(d)* – absoliutus sklidimo kelio nuostolis (dB); $\overline{PL}(d, d_0)$ – santykinis sklidimo kelio nuostolis nuo imtuvo vietos *d* iki atskaitos atstumo d_0 (dB); $20log_{10}\left(\frac{4\pi d_0 f}{c}\right)$ – laisvosios erdvės kelio praradimas, kai atskaitos atstumas d_0 – 10 m (dB); kur *f* – centrinis dažnis (MHz), *c* – šviesos greitis (m/s); X_s – papildomas signalo slopinimas (dB).

Tyrime naudojamos įvairiakryptės antenos, dvi dvigubo dažnio „VERT900“ antenos, 900 MHz ir 1800 MHz dažniams, ir dvi „VERT2450“ antenos 5 GHz dažniui. Abi antenos turi 3 dBi stiprinimo koeficientus. Atliktas signalo silpnėjimo stebėjimas keičiant bepiločio orlaivio aukštį: 0 m, 10 m, 20 m, 30 m ir keičiant horizontalų atstumą nuo 10 m iki 100 m. Tyrimų rezultatai parodo, kad 900 MHz dažniu signalas perduodamas su mažiausiu signalo kelio praradimu didesniu atstumu, tačiau 5 GHz dažniu signalas mažesniu atstumu perduodamas sklandžiau nei 900 MHz LOS aplinkoje. NLOS aplinkoje matoma tokia pati tendencija kaip LOS aplinkoje, tačiau pastebima, kad pritaikyta spindulių formavimo sistema LOS aplinkoje, kai atstumas mažesnis, pagerina signalo pralaidumą, o NLOS aplinkoje pagerina signalo pralaidumą kai atstumas didesnis (Shi et.al., 2018).

Kiti nagrinėjami 400 MHz dažnio siųstuvas ir imtuvas skirti perduoti aukštos raiškos vaizdą dideliu atstumu. Šią sistemą, sumontuotą ant bepiločio orlaivio, sudaro imtuvas, siųstuvas, derinamas daugiafunkcinis kompleksinis filtras, du sigma-delta trupmeninio dažnio sintezatoriai ir pagrindinės juostos kalibravimo grandinės, kurios taikomos TDD (angl. *Time division duplexing*,) ir FDD (angl. *Frequency division duplexing*) sistemoms. Kad atitiktų skirtingus duomenų perdavimo spartos ir jautrumo reikalavimus, susijusius su valdymo signalo ir vaizdo signalo perdavimu, siųstuvas ir imtuvas palaiko „BPSK/QPSK/QAM“ moduliacijas. Naudojamo imtuvo jautrumas yra -75 dBm, o siųstuvo galia 12 dBm. Idealiomis sąlygomis, belaidžio signalo perdavimas ir sklidimo procesas gali būti suformuluotas (Huang, Lin, Wang, Chen & Dong, 2020):

$$P_r = P_t - C_t + G_t - P_L + G_r - C_r \quad (1.2)$$

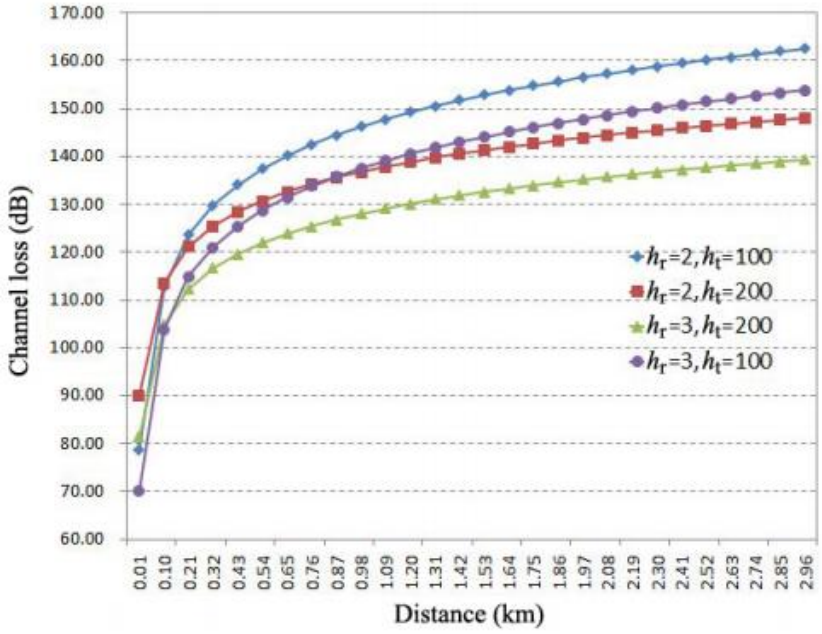
čia P_r ir P_t imtuvo ir siųstuvo galia (dBm); G_r ir G_t žymi imtuvo ir siųstuvo antenos stiprinimą (dBi); C_r ir C_t pajungimo galios praradimas (dB); P_L signalo praradimas realiomis sąlygomis (dB), kuris randamas apskaičiuojant 1.3 ir 1.4 formules paremtas klasikinio belaidžio kanalo modelio „COST231-Hata”:

$$P_L = 46{,}3 + 33{,}9logf_c - 13{,}82logh_t - a(h_r) + (44{,}9 - 6{,}55logh_t)logd + C_m \quad (1.3)$$

$$a(h_r) = 3{,}2 \cdot [\log(11{,}75 \cdot h_r)]^2 - 4{,}97 \quad (1.4)$$

čia f_c – nešlio dažnis (MHz); d – sklidimo atstumas (km); h_t – siųstuvo aukštis (m); h_r – imtuvo aukštis (m); C_m – aplinkos modifikavimo vertė (dB): 0 dB vidutinio dydžio miestui, 3 dB miesto centrui, -12,28 dB miesto pakraščiams, -22,52 dB kaimo vietovėms; $a(h_r)$ imtuvo aukščio faktorius (m) pateiktas 1.4 formulėje.

Atlikta simuliacija pasirinkus miesto pakraščių aplinką, gauti rezultatai pateikti grafike (1.2 pav.). Grafike matoma, kad kanalo praradimas yra jautrus imtuvo ir siųstuvo aukščiams, ir priklauso nuo sklidimo atstumo. Kaip matoma, kai h_r nustatomas 3 metrai ir h_t 200 metrų aukštis, kanalo praradimas mažesnis už 140 dBm 3 km nuotoliu (Huang et.al., 2020).



1.2 pav. Sumodeliuoto kanalo praradimo rezultatas esant 400 MHz nešlio dažniui (Huang et.al., 2020)

Siekiant perduoti aukštos raiškos vaizdą reikalinga ne mažesnė nei 72 Mb/s duomenų perdavimo sparta. Siųstuvui ir imtuvui pritaikius aukšto lygio signalo moduliaciją ir atlikus matavimus, gauti rezultatai, kurie parodo, kad paklaidos vektoriaus dydis viršija -35 dBc siųstuvo režime ir -29 dBc imtuvo režime, pasiekta duomenų perdavimo sparta didesnė nei 72 Mb/s, pasiektas -75 dBm jautrumas (Huang et.al., 2020).

Tiriant aukštos raiškos duomenų vaizdo perdavimą reikia įvertinti galimą signalo praradimą dėl bepiločio orlaivio judėjimo, pozicijos pasikeitimo ir sumontuoto siųstuvo ir imtuvo antenų krypčių, polinkių tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties antenų. Geriausias duomenų perdavimo pralaidumas pasiekiamas, kai bepilotis orlaivis palaiko pastovią poziciją bei siųstuvų ir imtuvų antenos yra nukreiptos tiksliai viena į kitą (Kawamoto, Nishiyama, Kato, Ono & Miura, 2019).

Norint parinkti tinkamą siųstuvą ir imtuvą, kad perduoti aukštos raiškos vaizdą, reikalinga nustatyti kokį kiekį duomenų reikia išsiųsti. 1.1 lentelėje pateikta skirtingų vaizdo formatų suspaustų duomenų spartos ir nesuspaustų duomenų spartos skirtumas.

1.1 lentelė. Suspaustų duomenų perdavimo sparta, kai vaizdas koduojamas „H.264“ (Zhou, 2017)

Formatas	Pikelių skaičius eilutėje	Eilučių skaičius kadre	Pikseliai	Nesuspaustų duomenų sparta, Mb/s	Suspaustų duomenų sparta, Mb/s
VGA	640	480	307,200	442	2,2
720p	1280	720	921,600	1328	6,64
1080p	1920	1080	2,073,600	2986	14,93
2k	2048	1152	2,359,296	3400	17,0
4k	4096	2160	8,847,360	12,740	63,7

Duomenų spartai sumažinti naudojamas aukšto efektyvumo vaizdo kodavimas (angl. *High efficiency video coding*, HEVC), dar žinomas kaip „H.265“ ir „MPEG-H Part 2“, naudojant šį kodavimą, sumažinus duomenų spartą, galima sutaupyti kanalo pralaidumo. „H.264“ yra vienas iš dažniausiai naudojamų vaizdo kodavimo formatų filmavimui, suspaudimui ir vaizdo turiniui platinti. Suspaustų duomenų spartai apskaičiuoti reikia padalinti nesuspaustų duomenų spartą iš suspaudimo santykio, kuris yra lygus 200 (Zhou, 2017).

1.2. Dronas–žemė tyrimas naudojant 2,4 GHz dažnio įrangą

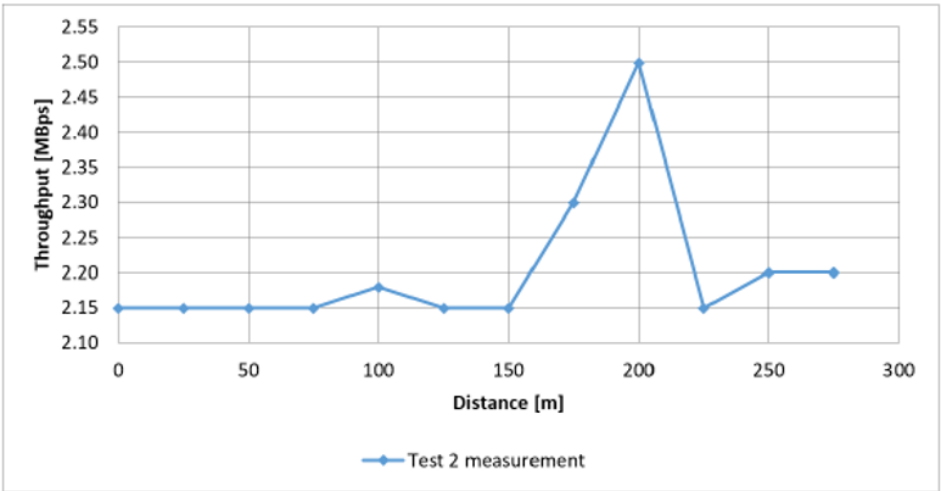
„IEEE 802.11“ standartas pateikia gana nebrangius sprendimus 2,4–5 GHz dažnių diapazone (Yanmaz, Hayat, Scherer & Bettstetter, 2014). Vieną iš šių sprendimų pateikia nagrinėjamo straipsnio autoriai, kurie pristato sistemos tyrimą skirtą perduoti aukštos rezoliucijos nuotraukoms tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties. Tyrimo tikslas – nustatyti nuotolio atstumą ir duomenų pralaidumą su pasirinkta įranga (Papic, Solic, Milan, Gotovac & Polic, 2021).

Autorių pateiktą sistemą sudaro bepilotis orlaivis ir antžeminė stotis (1.3 pav.), naudojama įranga siųsti duomenims - „Microhard pMDDL2450“ 2,4 GHz dažnio siųstuvas–imtuvas. Antžeminėje stotyje naudojama kryptinė 14 dBi antena, o bepiločiame orlaivyje įvairiakryptė 2 dBi antena. Eksperimentų metu, kad išmatuoti duomenų pralaidumą, panaudotas „Raspberry Pi 3“, kuriame sukurtas serveris su „Python“ programiniu kodu, kuris siunčia aukštos rezoliucijos nuotraukas į antžeminę stotį (Papic et. al, 2021).



1.3 pav. Tyrime naudojama įranga (Papic et. al, 2021)

Atlikti penki eksperimentai šio tyrimo tikslui pasiekti. 1.4–1.5 paveikslėliuose pateikiami atliktų eksperimentų rezultatai (Papic et. al, 2021).



1.4 pav. Duomenų pralaidumo eksperimentų rezultatai 2 m aukštyje (Papic et. al, 2021)

Measurement Location	Throughput (MBps)	UAV Altitude (m)	Comment
ML1 (1450 m distance from GS)	1.5	10	
	1.6	30	
	1.6	50	
	1.85	50	Antenna rotated for 90°
ML2 (2750 m distance from GS)	1.4	25	
	1.5	50	
	2.1	50	Antenna rotated for 90°
ML3 (4250 m distance from GS)	0.275	100	Bandwidth reduced from 8 to 4 MHz
ML4 (5400 m distance from GS)	0.35	100	Bandwidth reduced from 8 to 4 MHz

1.5 pav. Išmatuotų duomenų pralaidumo rezultatai skirtinguose taškuose (Papic et. al, 2021)

Visų eksperimentų metu buvo naudojama maksimali 30 dBm „pMDDL2450“ modulių galia. Tyrimai atlikti tiesioginiu matomumu, vietovėje su nedidelėmis medžių, krūmų kliūtimis. Eksperimentų rezultatai pateikia pralaidumo matavimus įvairiems atstumams tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties, skirtingus antenų aukščius ir orlaivio pasisukimo kampus. Autorių pagrindinis pasiektas rezultatas – 5 km atstumu išmatuota 11,2 Mb/s duomenų sparta.

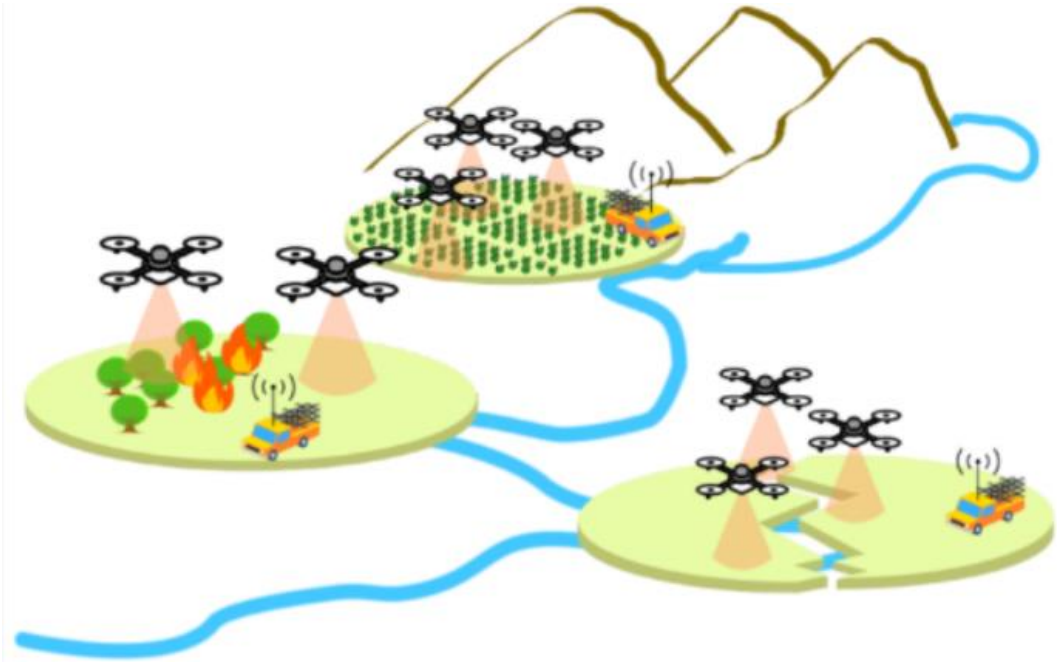
1.3. Duomenų perdavimas pasitelkiant bepiločių orlaivių tinklą

Skraidantis „ad hoc“ tinklas FANET yra sudarytas iš grupės bepiločių orlaivių skraidančių autonomiškai (1.6 pav.) (Hosseini, Jamal, Haque, Magesacher & Matolak, 2019). Lyginant su vieno bepiločio orlaivio sistema FANET yra tvaresnė ir gali padengti didesnę dominančią sritį. Ši sistema pritaikoma daugeliu išmanaus miesto scenarijų (pvz., atkūrimas nelaimės atveju, aplinkos stebėjimas, saugumas, transporto spūsčių sekimas). Šiems scenarijams įgyvendinti yra reikalingas kokybiškas vaizdo perdavimas. Toks vaizdo perdavimas turi išlaikyti atitinkamą kokybę (angl. *Quality of Experience*, QoE), kuri reiškia ryškų ir aiškų vaizdą su mažu vėlinimu (Cumino et.al., 2018). QoE

svarbus dėl to, kad įvykus žemės drebėjimui, ugnikalnio išsiveržimui, gaisrui ir kitiems nelaimingiems atsitikimams, gelbėjimo tarnyboms, operacijų vykdymui, reikalingas kuo aiškesnis vaizdas, kitaip tariant, bepiločiai orlaiviai tampa mūsų akimis danguje. Dėl to yra svarbu įvertinti skrydžio laiką, atitinkamai kuo efektyvesnę naudojamą įrangą (Wang et al., 2020).

Vaizdo perdavimo modelis pagrįstas energijos efektyvumu naudojant bepilotį orlaivį (angl. *Video transmission with UAV replacement based on Energy Information,* VOEI) yra metodas, kuris priima visus sprendimus, atsižvelgdamas į energijos efektyvumo klausimus, kad būtų galima vykdyti energijos vartojimo efektyvumo operacijas, išvengiant tinklo nutraukimo, trajektorijos nukrypimų ir nepadengtų stebėjimo zonų. Šis sistemos modelis padeda FANET efektyviai išlaikyti padengimo zoną, kai vienam iš tinkle esančių bepiločių orlaivių tenka grįžti į antžeminę stotį baterijos pakeitimui ar įkrovimu (Cumino et.al., 2018).

Siekiant įgyvendinti FANET modelį ir energijos efektyvumo sistemą, atlikta simuliacija naudojant „Mobile Multi-Media Wireless Network OMNeT++“ sistemą. Simuliacija buvo sudaryta iš 35 bepiločių orlaivių kurie sukuria bendrą tinklą ir padengia 200 x 200 m plotą stebėjimui su aukštos raiškos vaizdo perdavimu. Pritaikius VOEI sistemos modelį, pasiektas 100 % įgyvendinimas – bepiločių orlaivių įkrovimas išvengiant bet kokio drono, tinklo praradimo ar nepadengtos numatytos stebėjimo srities (Cumino et.al, 2018).

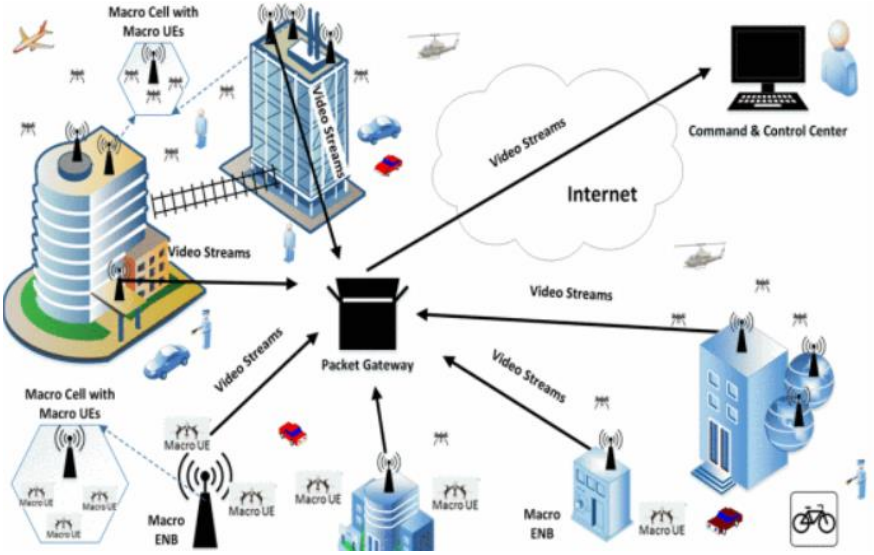


1.6 pav. FANET padengimo srities nelaimingo atsitikimo atveju scenarijus (Cumino et.al., 2018)

Siekiant pagerinti aukštos raiškos vaizdo perdavimo kokybę gali būti naudojamas „ECORA“ mechanizmas, kuris pagerina perdavimo ryšį geografinių maršrutų protokoluose, skirtuose bepiločių orlaivių tinklams 3D aplinkoje ir taip pagerinti paketų pristatymo greitį ir gaunamo vaizdo kokybę. „ECORA“ padeda įvertinti būsimą šalia esančio bepiločio orlaivio padėtį ir vadovaujantis perėmimo

krypties ir atstumo kriterijais, apskaičiuoti jų ryšio indeksą. Panaudojant šį gautą ryšio indeksą galima nustatyti geriausią šalia esantį bepilotį orlaivį, kuriam reikia perduoti duomenų paketą, siekiant išlaikyti stabilų sistemos darbą ir nenutrūkstamą duomenų perdavimą. Pritaikant šį mechanizmą atlikti bandymai „Network Simulator-3“ imitavimo programinėje įrangoje. Gauti rezultatai parodo, kad „ECORA“ ženkliai pagerino „Greedy Perimeter Stateless Routing“ protokolą su sklandesniu duomenų perdavimu ir geresne perduodamo aukštos raiškos vaizdo kokybe (Costa, Rosario, Cerqueira & Santos, 2014).

Siekiant perduoti aukštos raiškos vaizdą taip pat gali būti naudojamas 4G-LTE ryšys. Tokio ryšio panaudojimas pritaikomas transliuoti vaizdo įrašus realiu laiku (Bergh & Pollin, 2017). Tokio tipo sistemos yra sudarytos iš skraidančių dronų tinklo, kurie filmuoja tam tikrą žemės plotą ir siunčia realaus laiko vaizdo medžiagą bazinėms stotims, o bazinės stotys šiuos vaizdo įrašus perduoda į vieną komandų ir valdymo centrą (1.7 pav.). Siekiant pagerinti vaizdo įrašo kokybę gali būti pritaikytas metodas pasitelkiant atraminio signalo priėmimo galią (angl. *Reference Signal Recieve Power*, RSRP). Toliau pateikiama ryšio sistema paremta „3GPP R4-092042“ standartu, kuris panaudotas sukurti dronų tinklą, kuriame dronai realiu laiku perduoda vaizdo įrašus bazinėms stotims (Naveed, Qazi, Khawaja & Mustaqim, 2019).



1.7 pav. 4G-LTE bepiločių orlaivių tinklo modelis (Naveed et.al., 2019)

Šiam modeliui įgyvendinti gali būti atliekama realaus pasaulio simuliacija panaudojant „Gauss-Markov“ mobilumo modelį nustatyti bepiločių orlaivių trajektorijoms. Šis modelis naudoja bepiločių orlaivių greitį, polinkį ir kryptį (Naveed et.al., 2019):

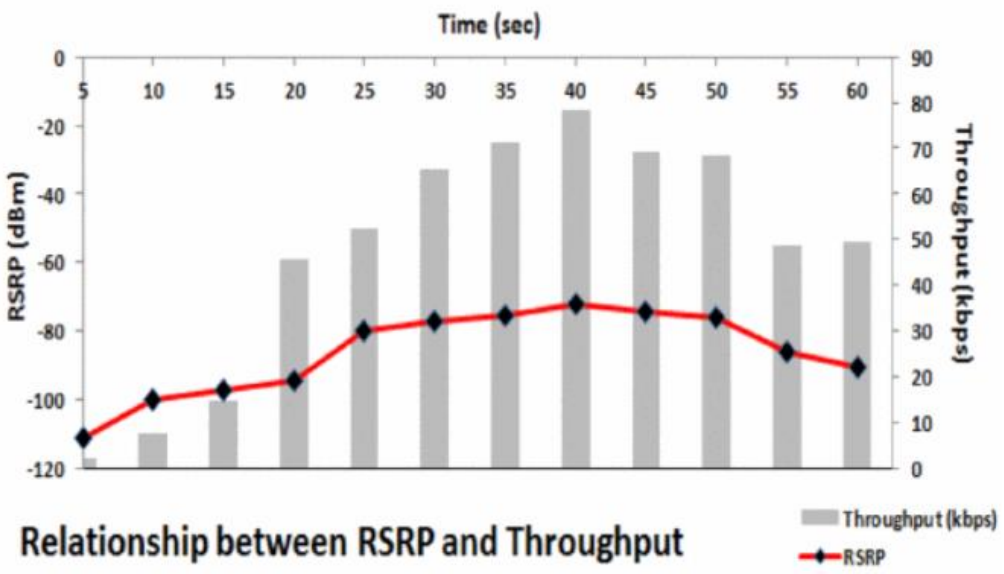
$$S_n = \alpha S_{n-1} + (1-\alpha)\bar{s} + \sqrt{(1-\alpha^2)S_{x_{n-1}}} \quad (1.5)$$

$$\theta_n = \alpha \theta_{n-1} + (1-\alpha)\bar{\theta} + \sqrt{(1-\alpha^2)\theta_{x_{n-1}}} \quad (1.6)$$

$$p_n = \alpha p_{n-1} + (1-\alpha)\bar{p} + \sqrt{(1-\alpha^2)p_{x_{n-1}}} \quad (1.7)$$

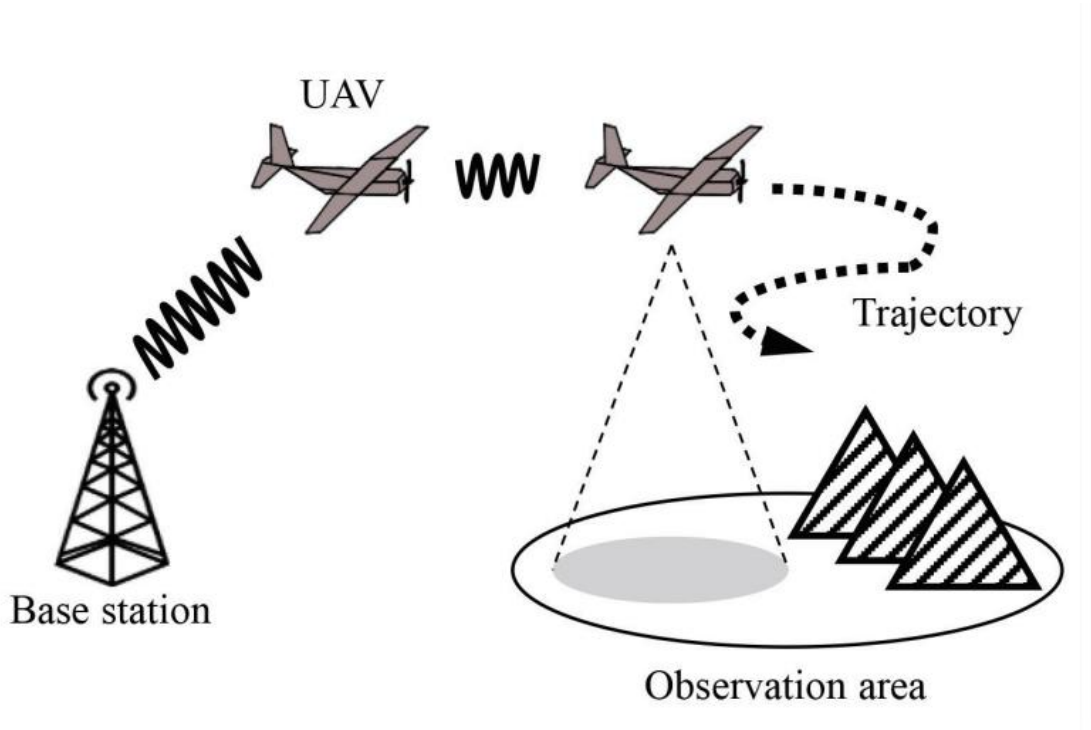
čia S_n, θ_n, p_n – naujas greitis, nauja kryptis ir naujas polinkis.

Simuliacijoms atlikti naudojama „Network Simulator-3“ imitavimo programinė įranga. Atliktų simuliacijų pritaikant šį metodą rezultatai pateikti 1.8 paveiksle. Matoma, kad duomenų pralaidumas priklauso nuo RSRP.



1.8 pav. RSRP ir duomenų pralaidumo priklausomybė (Naveed et.al., 2019)

Panašiu dronų tinklo veikimo principu gali būti naudojami du bepiločiai orlaiviai ir antžeminė stotis didelio nuotolio vaizdo perdavimui realiu laiku (1.9 pav.) (Hein, Kraft, Brauchle & Berger, 2019). Tokią sistemą sudaro antžeminė stotis priimanti vaizdo duomenis, vaizdo duomenis retransliuojantis bepilotis orlaivis esantis pasiekiamumo srityje tiek su antžemine stotimi, tiek su bepiločiu orlaiviu, kuris atlieka numatytos teritorijos stebėjimą ir siunčia vaizdo duomenis retransliuojančiam dronui. Tokioje sistemoje naudojami siųstuvai ir imtuvai. Šiam metodui tirti gali būti pritaikoma „Shannon – Hartley“ teorema skirta nustatyti ryšio greičiui tarp bepiločio orlaivio ir bazinės stoties, ir tarp retransliuojančio bepiločio orlaivio su misiją vykdančiu bepiločiu orlaiviu. Atlikus skaičiavimus galima nustatyti optimalią retransliuojančio bepiločio orlaivio poziciją, kad būtų pasiektas didžiausias pralaidumas perduoti aukštos raiškos vaizdą (Horiuchi, Nishiyama, Kato, Ono & Miura, 2016).



1.9 pav. Dviejų bepiločių orlaivių ir bazinės stoties tinklo modelis (Horiuchi et.al., 2016)

$$C = Blog_2(1 + \gamma) \tag{1.8}$$

čia C – ryšio greitis (m/s); B – ryšio pralaidumas (Mb/s); γ – signalo–triukšmo santykis (dB); Priimamo signalo galia P_r apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_r = (\frac{\lambda}{4\pi d})^2 \cdot G_t G_r P_t \tag{1.9}$$

čia λ – bangos ilgis (km); d – persiuntimo atstumas (km); G_t ir G_r – siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientai (dBi); P_t siunčiamo signalo galia (dBm).

Pagal 1.9 formulę matoma, kad didėjant ryšio atstumui, mažėja priimamo signalo galia, automatiškai mažėja ir ryšio greitis.

1.4. Apibendrinimas ir išvados

Apžvelgus įvairius aukštos raiškos vaizdo perdavimo iš bepiločio orlaivio į antžeminę stotį metodus galima padaryti šias išvadas:

1. Tiesioginio duomenų perdavimo dronas–žemė metodas yra paprastesnis įgyvendinti, reikalaujantis mažiau išteklių ir išlaidų, tačiau naudojant šį metodą yra didesnė tikimybė prarasti duomenis ir stebimos srities plotas yra ribotas.

2. Naudojant 400 MHz dažnį galima pasiekti didžiausią perduodamų duomenų nuotolį, tačiau su mažesne duomenų perdavimo sparta, o naudojant 5 GHz dažnį, nuotolis mažesnis, tačiau perduodamų duomenų sparta didesnė.

3. FANET duomenų perdavimo metodas palyginus su vieno bepiločio orlaivio sistema yra patikimesnis perduodamų duomenų praradimo atveju. Gali būti padengtas didesnis stebimos srities plotas ir tolimas perduodamų duomenų nuotolis, tačiau gali būti ir ribotas dėl reikalingų didelio išteklių skaičiaus. Taip pat didėjant bepiločių orlaivių skaičiui, didėja klaidos faktorius, kai gali sutrikti drono darbas (išsikrauti baterija, sugesti elektronika, susidaužti tarpusavyje).

4. Pagal atliktą tyrimų apžvalgą, matoma, kad tik pirmame ir antrame pateiktuose tyrimuose yra atlikti praktiniai matavimai, kituose tik simuliacijos. Tik pirmame tyrime siejamas atstumas su perduodamo vaizdo įrašo kokybe. Todėl, šiai spragai užpildyti, šio darbo tikslas ir yra atlikti tyrimą atliekant praktinius matavimus siejant atstumą ir perduodamo vaizdo įrašo kokybę.

2. TYRIME NAUDOJMAOS ĮRANGOS ANALIZĖ

Tyrime naudojamas „Microhard pMDDL2450“ belaidis skaitmeninis siųstuvas–imtuvas duomenims perduoti. Vaizdo duomenims generuoti naudojama „Gopro 4 silver“ veiksmo kamera su „Orivision ZY-EH201“ vaizdo kodavimo įranga. Įranga sumontuota ant bepiločio orlaivio.

2.1. Siųstuvas–imtuvas „Microhard pMDDL2450“

„Microhard pMDDL2450“ (2.1 pav.) yra didelės galios MIMO (angl. *multiple – input and multiple – output*) siųstuvas–imtuvas, naudojantis 2,4 GHz dažnių diapazoną. Šis įrenginys suteikia duomenų pralaidumą ir veikimo nuotolį, reikalingą sudėtingiems, daug duomenų reikalaujantiems scenarijams. „Microhard pMDDL2450“ siųstuvas–imtuvas, naudodamas MRC (angl. *Maximal Ratio Combining*), ML (angl. *Maximal Likelihood*) dekodavimą ir LDPC (angl. *Low-Density Parity Check*), siekia išlaikyti nepertraukiamą duomenų perdavimą. „pMDDL2450“ turi „Ethernet“ duomenų ryšį (pMDDL2450, n. d.).



2.1 pav. „Microhard pMDDL2450“ siųstuvas–imtuvas (pMDDL2450, n. d.)

Pagrindinės „pMDDL2450“ savybės:

1. MIMO funkcija, veikimas 2,4 GHz dažnio diapazone.
2. Tinklo protokolas: TCP/IP.
3. Duomenų pralaidumas didesnis nei 25 Mb/s su 8 MHz kanalu (-78 dBm imtuvo jautrumas).
4. Duomenų pralaidumas didesnis nei 2 Mb/s su 4 MHz kanalu (-102 dBm imtuvo jautrumas).
5. Imtuvas mažas ir lengvas, imtuvo svoris 7 gramai, kartu su paskirstymo plokšte 50 gramų.
6. „10/100 Ethernet“ išėjimas (LAN/WAN).
7. Reguliuojama siuntimo galia iki 1 W.
8. Palaiko 128 bitų ir 256 bitų AES kodavimą.

„Multiple – input and multiple – output“ yra terminas, nurodantis, kad siųstuvas–imtuvas turi daugiau nei po vieną anteną ir gali persiųsti daugiau duomenų tuo pačiu metu, naudojant tą patį kanalą. MIMO technologija pagerina radijo ryšį, padidina belaidžio ryšio suteikiamą pralaidumą ir pagerina veikimo nuotolį. Ši „pMDDL2450“ siųstuvo-imtuvo funkcija gali būti įjungiama arba išjungiama priklausomai nuo vartotojo.

Toliau 2.1 lentelėje pateikiama gamintojo nurodytos optimalios našumo specifikacijos su skirtingomis moduliacijomis.

2.1 lentelė. Optimalios našumo specifikacijos (pMDDL2450, n. d.).

Moduliacija	IPerf pralaidumas, Mb/s	Visa siųstuvo galia, dBm
8 MHz kanalas		
BPSK_1/2	3	30
QPSK_1/2	5,9	30
QPSK_3/4	8,8	30
16-QAM_1/2	11,6	30
16-QAM_3/4	17,1	30
64-QAM_2/3	22,8	30
64-QAM_3/4	25,5	30
64-QAM_5/6	27,8	30
4 MHz kanalas		
BPSK_1/2	1,51	30
QPSK_1/2	2,98	30
QPSK_3/4	4,4	30
16-QAM_1/2	5,8	30
16-QAM_3/4	8,6	30
64-QAM_2/3	11,4	30
64-QAM_3/4	12,8	30
64-QAM_5/6	14	30

PSK (angl. *Phase Shift Keying*) yra skaitmeninė moduliacija, kuri perduoda duomenis keičiant pastovaus dažnio signalo pradinę fazę. BPSK laikoma atspariausia triukšmams skaitmeninė moduliacija, kuri naudojama didelio nuotolio belaidžiai komunikacijai. QAM (angl. *Quadrature amplitude modulation*) yra skaitmeninės moduliacijos metodas, kuris perduoda du skaitmeninius bitų srautus keisdamas dviejų nešėjų bangų amplitudes ir panaudodamas ASK (angl. *Amplitude-shift keying*) skaitmeninę moduliaciją (Yan, Fu, Zhang & Wang, 2019).

Taip pat svarbus aspektas, kad įranga teikia duomenis realiu laiku apie priimamo signalo lygį, signalo–triukšmo santykį, naudojamą moduliaciją, persiųstų duomenų kiekį. Įrenginyje yra įdiegtas „Iperf“ įrankis, kuris suteikia galimybę išmatuoti duomenų pralaidumą realiu laiku, matavimo taške.

2.2. Vaizdo kamera „Gopro 4 Silver“

Tyrime, generuoti vaizdui, naudojamas „Gopro 4 Silver“ (2.2 pav.) įrenginys, kuris palaiko 1280p rezoliuciją su 30 kadrų dažniu, 1080p rezoliuciją su 60 kadrų dažniu ir 720p su 120 kadrų dažniu. Ši

kamera buvo pasirinkta naudoti dėl HDMI išėjimo, kuris leidžia nesunkiai susieti kamerą su vaizdo kodavimo įrenginiu „Orivision ZY-EH201“.



2.2 pav. „Gopro 4 Silver“ vaizdo kamera (Gopro, n. d.)

2.3. Vaizdo kodavimo įrenginys „Orivision ZY-EH201“

„Orivision ZY-EH201“ (2.3 pav.) yra aukštos raiškos vaizdo kodavimo įrenginys turintis vieną HDMI kanalo įėjimą, kuris palaiko „H.265“ ir „H.264“ aukšto profilio, pagrindinio profilio, pradinio profilio kodavimo formatus ir turi du vaizdo transliacijos išėjimus, kurie palaiko HTTP, RTSP, UDP protokolus (Orivision, n. d.).



2.3 pav. Vaizdo kodavimo įrenginys „Orivision ZY-EH201“ (Orivision, n. d.)

„Orivision ZY-EH201“ turi pastovios bitų spartos (angl. *Constant bit rate,* CBR) ir kintamos bitų spartos (angl. *Variable bit rate,* VBR) parinktį. Bitų spartos ruožas 16 Kbps–12 Mbps palaiko 720p, 1080p HD vaizdo įėjimą. Išėjime gali būti nustatomos rezoliucijos: didžiausia - 1920x1080p, mažiausia - 640x360p, kadrų dažnis 30 arba 60.

2.4. Apibendrinimas ir išvados

Apžvelgus ir išanalizavus sistemoje naudojamą įranga galima padaryti šias išvadas:

1. Siųstuvo teikiamas duomenų pralaidumas tenkina tyrime naudojamos vaizdo kokybės persiuntimui reikalingą duomenų spartą.

2. Siųstuvas pats fiksuoja priimamo signalo lygį, kurį galima stebėti realiu laiku, taip pat, kaip moduliaciją, signalo–triukšmo santykį ir atlikti duomenų pralaidumo bandymus naudojant įrenginyje įdiegtą „Iperf“ įrankį.

3. Nors ir vaizdo kamera „Gopro 4 Silver“ palaiko 1280p rezoliuciją, pasirinkta naudoti 1080p ir žemesnes rezoliucijas, nes vaizdo kodavimo įrenginys „Orivisio ZY-EH201“ įėjime palaiko tik 1080p rezoliuciją.

3. TYRIMO EKSPERIMENTAI IR REZULTATAI

3.1. Bendro sistemos veikimo eksperimentas

Atlikti du eksperimentai su 7 dBm ir 8 dBm „pMDDL2450“ siųstuvo galiomis. Vaizdo kameros parametrai nustatyti 1280p 30 kadrų per sekundę, vaizdo kodavimo įrangos išėjime 1080p 30 kadrų per sekundę, nustatytas CBR lygus 2 Mb/s. Siųstuvo-imtuvo moduliacija – automatinė. Eksperimentas atliktas atvirame lauke, tiesioginiu matomumu. Matuojamas priimamo signalo lygis RSSI ir stebimas duomenų pralaidumas. Pirmojo eksperimento metu su 7 dBm galia pasiektas didžiausias 650 m perduodamo vaizdo nuotolis. Vaizdo persiuntimas nutrūko imtuve RSSI sumažėjus iki -85 dBm (3.1 pav.). Persiunčiamo vaizdo kadras pateiktas 3.3 paveikslėlyje.



3.1 pav. Priimamo signalo lygis, kai imtuvo galia 7 dBm (sudaryta autoriaus)

Antrojo eksperimento metu nustatyta 8 dBm siųstuvo galia. Pasiektas 850 metrų maksimalus vaizdo perdavimo nuotolis. Vaizdo perdavimas nutrūko imtuve RSSI sumažėjus iki -79 dBm (3.2 pav.).



3.2 pav. Priimamo signalo lygis, kai imtuvo galia 8 dBm (sudaryta autoriaus)



3.3 pav. Vaizdas iš vaizdo kameros eksperimento metu (sudaryta autoriaus)

Eksperimentų metu nustatyti duomenų perdavimo atstumai esant 7 dBm ir 8 dBm siųstuvo galioms. Palyginus šiuos rezultatus, matoma, kad su šiais vaizdo parametrais padidinus galią 1 dBm atstumas padidėjo 1,3 karto.

3.2. „pMDDL2450“ siųstuvo-imtuvo duomenų pralaidumo eksperimentai

Toliau pateiktų eksperimentų tikslas yra išanalizuoti tyrime naudojamo „pMDDL2450“ siųstuvo-imtuvo galimybes, atliekant realius eksperimentus, išmatuojant duomenų pralaidumą skirtingomis sąlygomis. Išanalizuoti, kokių rezultatų galima pasiekti ant žemės, sumontavus įrangą ant bepiločio orlaivio, o gauti rezultatai palyginti su gamintojų teikiamais duomenimis apie duomenų pralaidumą.

Eksperimentuose naudojami du „pMDDL2450“ įrenginiai, vienas kaip „Master“, o kitas „Slave“. Naudojamas 2477 MHz dažnis, 8 MHz kanalas, abiejuose moduliuose nustatyta 7 dBm galia. Naudojamos tik įvairiakryptės antenos, siųstuvo antena 0 dBi, imtuvo antena 8 dBi. Eksperimento metu naudojamas „IPerf“ duomenų pralaidumo matavimas, ši funkcija yra integruota „pMDDL2450“ modulių aplikacijoje. „IPerf“ konfigūracija: ant bepiločio orlaivio sumontuotas modulis nustatytas kaip serveris, antžeminis modulis kaip klientas, iš kurio yra siunčiamas duomenų srautas, naudojamas TCP protokolas, duomenų matavimo laikas – 5 sekundės, TCP lango dydis – 128 000 kB, gaunamų rezultatų matavimo vienetai – Mb/s.

Pirmieji eksperimentai atlikti modulių nesumontavus ant bepiločio orlaivio, iš esmės kaip dvi antžeminės stotys. Siųstuvas ir imtuvas buvo pakelti nuo žemės į 1 metro aukštį, įvairiakryptės antenos nukreiptos į viršų, statmenai horizonto. Eksperimentai atlikti atvirame lauke, be medžių, krūmų ar kitų kliūčių, oro sąlygos puikios, be lietaus ar sniego. Šių eksperimentų tikslas – nustatyti

atskirai kiekvienos moduliacijos duomenų pralaidumą, kai nustatytas 8 MHz kanalo plotis, kai nustatytas 4 MHz kanalo plotis, siųstuvui ir imtuvui nutolus 1 metro atstumu ir gautus duomenis palyginti su gamintojo aprašyme pateiktais duomenimis, kurie pateikti aukščiau 2.1 lentelėje. Kiti atliekami eksperimentai didinant atstumą tarp modulių. Eksperimentų rezultatų lentelėse pateikiamos parinktos moduliacijos, duomenų pralaidumas, fiksuojamos RSSI ir SNR vertės, kurias fiksuoja pats įrenginys.

3.1 ir 1–4 lentelėse (B priedas) pateikti eksperimentų metu gauti rezultatai. Atlikti bandymai: 1 m, 25 m, 50 m, 100 m ir 150 m atstumu. 3.1 lentelėje pateikti eksperimento rezultatai, kurie yra geriausio scenarijaus, kai abu siųstuvas ir imtuvas yra šalia vienas kito. Šie rezultatai yra lyginami su 2.1 lentelėje pateiktais gamintojo duomenų pralaidumo duomenimis. Iš gautų rezultatų matyti, kad realioje situacijoje tiksliai atitinka tik BPSK_1/2 moduliacijos duomenų pralaidumas, visos kitos moduliacijos yra su paklaida, kuri didėja, pasirenkant vis aukštesnę moduliaciją. Šiuo atveju RSSI yra -45 dBm, kas yra identifikuojama kaip puikus signalo lygis. Pradėjus didinti atstumą tarp modulių, natūraliai mažėja ir RSSI lygis, nutolus 25 m, RSSI nustatomas -70 dBm, kas identifikuojama kaip geras signalo lygis, šiuo atveju duomenų pralaidumas nelabai sumažėjo, tačiau pasiekus 100 m atstumą, RSSI -79 dBm, kuris identifikuojamas kaip prastas signalo lygis, duomenų pralaidumas labai sumažėjo ir aukščiausių moduliacijų 64-QAM_3/4 ir 64-QAM_5/6 duomenų pralaidumo nepavyko išmatuoti.

3.1 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, kai atstumas tarp modulių 1 m (sudaryta autoriaus).

Moduliacija	IPerf pralaidumas, Mb/s	Galia, dBm	RSSI, dBm
8 MHz kanalo plotis			
BPSK_1/2	3,03	7	-45
QPSK_1/2	5,27	7	-45
QPSK_3/4	7,86	7	-45
16-QAM_1/2	10,67	7	-45
16-QAM_3/4	15,29	7	-45
64-QAM_2/3	18,63	7	-45
64-QAM_3/4	21,57	7	-45
64-QAM_5/6	23,26	7	-45
4 MHz kanalo plotis			
BPSK_1/2	1,52	7	-45
QPSK_1/2	2,84	7	-45
QPSK_3/4	4,05	7	-45
16-QAM_1/2	5,4	7	-45
16-QAM_3/4	7,68	7	-45
64-QAM_2/3	10,1	7	-45
64-QAM_3/4	11,2	7	-45
64-QAM_5/6	11,92	7	-45

Kiti eksperimentai įvykdyti sumontavus „Master“ modulį ant bepiločio orlaivio (3.4 pav.), o antžeminės stoties modulis sumontuotas ant trikojo (3.5 pav.). Naudojamas bepilotis orlaivis yra šešių

variklių sukasparnis (angl. *Hexacopter*), kuriame yra autopilotas. Toks bepilotis orlaivis pasirinktas tam, kad būtų galima nurodžius reikiamą aukštį ir atstumą, išbūti tame taške penkias sekundes, kurios reikalingos „IPerf“ matavimo atlikimui. Siųstuvas sumontuotas bepiločio orlaivio apačioje, su antenomis nukreiptomis į apačią, statmenai horizontui. Aplink modulį yra anglies pluošto ir aliuminio konstrukcijų, kurios gali turėti įtakos signalo lygiui, susidarius atspindžiams. Taip pat svarbu šių bandymų metu nenaudoti 2,4 GHz valdymo pulto bepiločio orlaivio rankiniam valdymui, jei toks yra naudojamas. Skrydžio metu, perėjus į automatinio skrydžio režimą, pultą būtina išjungti (Lashari, Ali & Laghari. 2020). Nustatyta, kad 2,4 GHz valdymo pultas trikdo „pMDDL2450“ signalą ir sumažina perduodamų duomenų spartą trejais kartais.

Šių eksperimentų metu skraidyta su bepiločiu orlaiviu, atitinkamai keičiant atstumą ir aukštį, bandymai atlikti atvirame lauke, tiesioginiu matomumu. Vietomis iš kairės ar dešinės, 20 m atstumu nuo skraidyklės, yra neaukštų, apie 5–10 m aukščio krūmų ar medžių. Oro sąlygos puikios, be lietaus ar sniego. Bepiločio orlaivio pozicijos išlaikymas erdvėje gali siekti iki 1 m poslinkio paklaidos, tai reiškia, kad eksperimento metu, bepilotis orlaivis gali pajudėti į šonus, aukštyn, žemyn ar truputį pasisukti apie savo ašį, tokias paklaidas lemia bepiločiame orlaivyje naudojama įranga valdymui ir pozicijos nustatymui, bei vėjo stiprumas. Eksperimentų metu nustatytas vėjo stiprumas 5–7 m/s. Šie pakitimai gali lemti antenų kryptingumo diagramų lapelių pasislinkimą ir atitinkamai daryti įtaką signalo lygiui.

3.2–3.8 lentelėse pateikti bandymų rezultatai sumontavus įrangą ant bepiločio orlaivio. Nustačius „Auto“ moduliacijos režimą, skrendama skirtingame aukštyje didinant atstumą ir sustojant atskaitos taškuose. Šiuose taškuose matuojamas duomenų pralaidumas ir fiksuojama tuo metu moduliuose naudojama moduliacija, RSSI ir SNR. Pagal gautus rezultatus, matyti, kad didinant aukštį, didėja veikimo nuotolis, tačiau artimesniuose atstumuose didinant aukštį, prastėja signalo lygis, kas lemia mažesnį duomenų pralaidumą. Taip pat kaip matoma 3.6–3.8 paveikslėliuose, didėjant atstumui, kai kuriuose taškuose atsiranda duomenų spartos šuoliai, atitinkamai šiuose taškuose yra žemi RSSI ir SNR duomenys, toks rezultatas parodo, kad galimai skrydžio metu minėti drono pozicijos pasikeitimai gali paslinkti antenų kryptingumo diagramų lapelius, pasikeisti sklidimo kampas ir gali labai sumažėti signalo stiprumo lygis. 3.9 paveikslėlyje yra pateiktas ryšys tarp priimamo signalo lygio bei signalo–triukšmo santykio. Šis ryšys patvirtina SNR priklausomybę nuo RSSI. O nuo SNR priklauso duomenų pralaidumas. Mažėjanti SNR vertė lemia mažesnį duomenų pralaidumą.



3.4 pav. „pMDDL2450“ modulis – bepilotis orlaivis (sudaryta autoriaus)



3.5 pav. „pMDDL2450“ modulis – antžeminė stotis (sudaryta autoriaus)

3.2 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 5 m aukštis (sudaryta autoriaus).

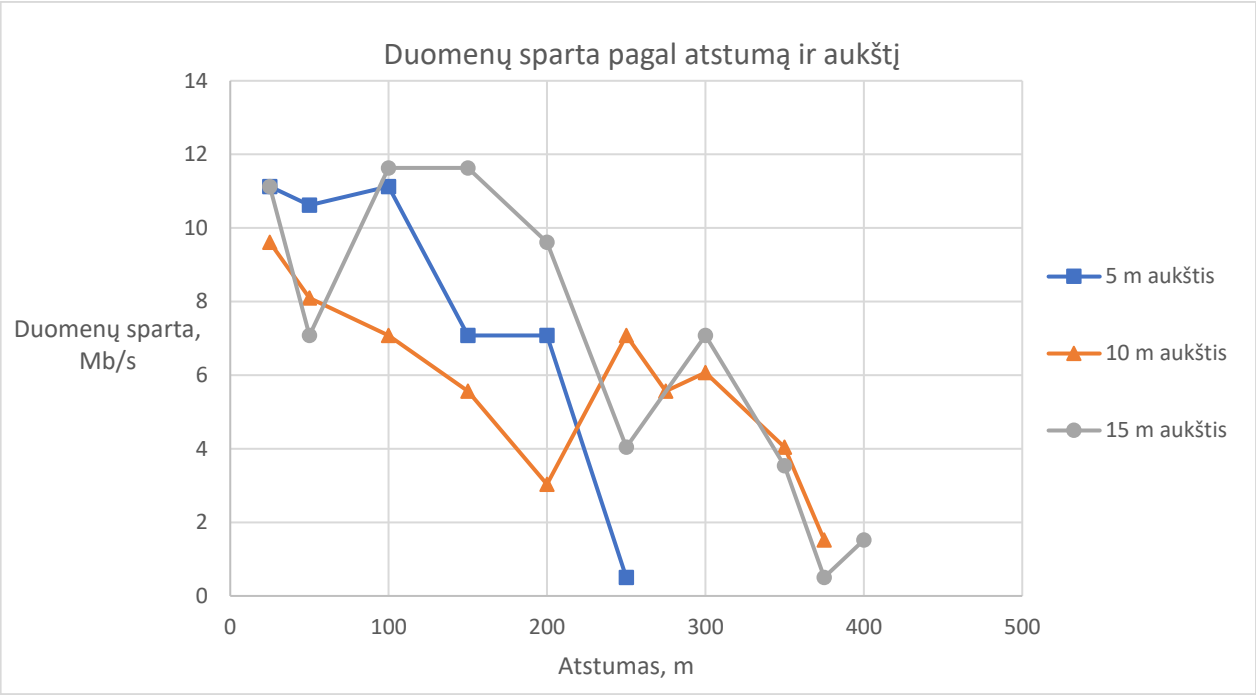
Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-65	31	64-QAM_3/4	11,128
50	-70	23	64-QAM_3/4	10,622
100	-67	20	16-QAM_1/2	11,128
150	-74	15	QPSK_3/4	7,081
200	-77	14	QPSK_3/4	7,081
250	-80	13	QPSK_1/2	0,506

3.3 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 10 m aukštis (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-68	27	16-QAM_3/4	9,61
50	-72	23	64-QAM_5/6	8,093
100	-75	19	16-QAM_3/4	7,081
150	-77	18	16-QAM_3/4	5,564
200	-83	11	QPSK_3/4	3,035
250	-84	12	QPSK_3/4	7,081
275	-78	16	16-QAM_3/4	5,564
300	-78	17	QPSK_3/4	6,07
350	-83	13	QPSK_3/4	4,046
375	-84	11	BPSK_1/2	1,517

3.4 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 15 metrų aukštis (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-67	27	64-QAM_5/6	11,128
50	-78	14	QPSK_3/4	7,081
100	-78	14	16-QAM_3/4	11,633
150	-75	20	16-QAM_3/4	11,633
200	-75	20	16-QAM_3/4	9,61
250	-81	13	BPSK_1/2	4,046
300	-79	15	QPSK_1/2	7,081
350	-82	13	QPSK_3/4	3,541
375	-85	10	QPSK_3/4	0,506
400	-86	9	BPSK_1/2	1,517



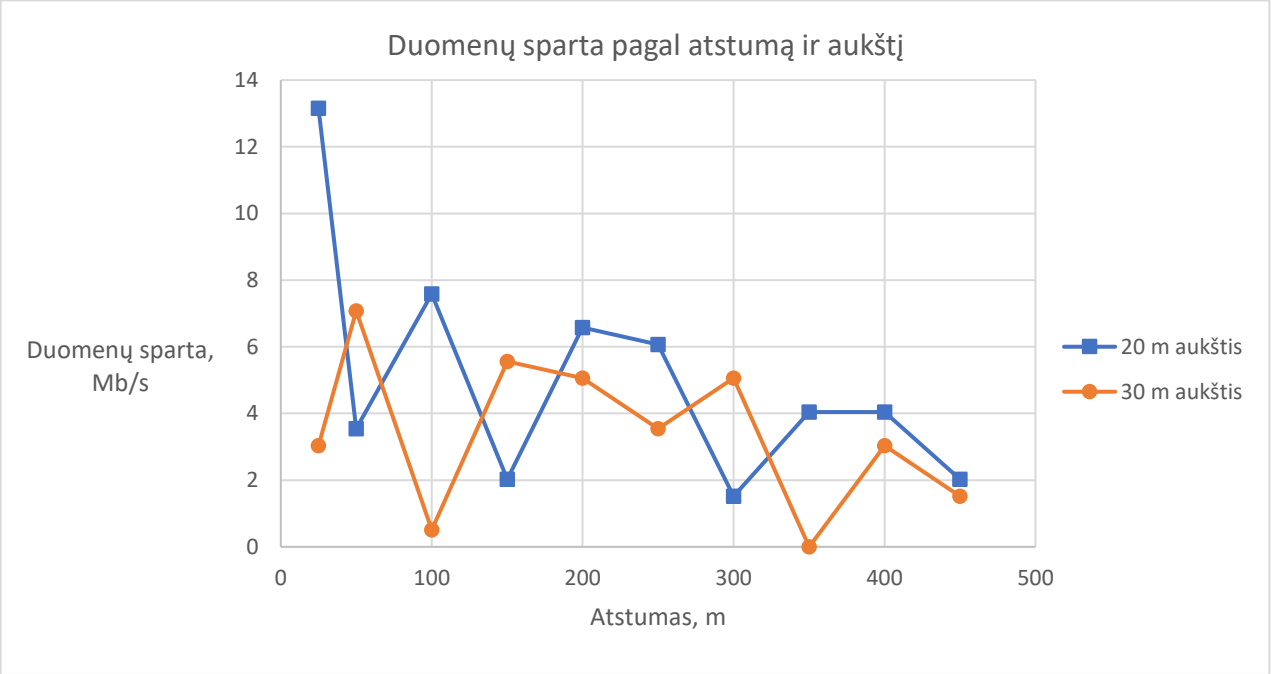
3.6 pav. Duomenų spartos pagal atstumą palyginimas 5 m, 10 m ir 15 m aukščiuose (sudaryta autoriaus)

3.5 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 20 metrų aukštis (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-65	30	64-QAM_2/3	13,151
50	-78	17	QPSK_3/4	3,541
100	-74	21	QPSK_3/4	7,587
150	-85	10	16-QAM_1/2	2,023
200	-80	15	16-QAM_1/2	6,575
250	-79	16	16-QAM_1/2	6,07
300	-89	6	QPSK_1/2	1,517
350	-82	13	16-QAM_3/4	4,046
400	-86	9	QPSK_3/4	4,046
450	-83	12	QPSK_3/4	2,023

3.6 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 30 metrų aukštis (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-76	19	16-QAM_3/4	3,035
50	-69	26	16-QAM_3/4	7,081
100	-79	16	16-QAM_1/2	0,506
150	-79	16	16-QAM_1/2	5,564
200	-79	16	16-QAM_1/2	5,058
250	-83	12	16-QAM_1/2	3,541
300	-77	17	QPSK_1/2	5,058
350	-86	9	QPSK_1/2	0
400	-79	15	QPSK_1/2	3,035
450	-83	12	QPSK_1/2	1,517



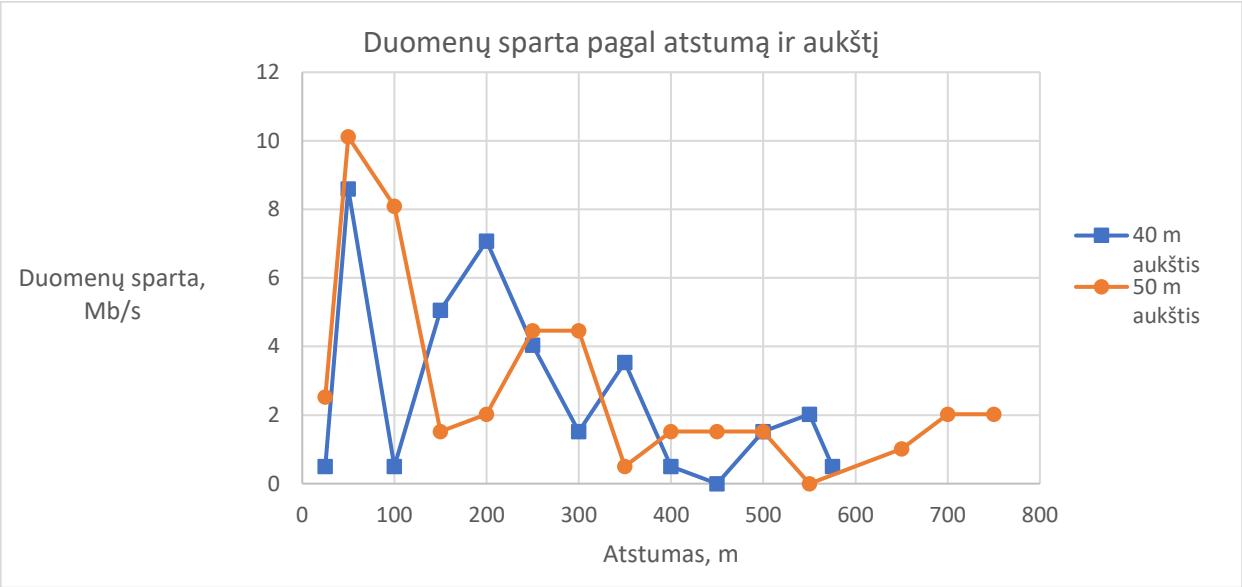
3.7 pav. Duomenų spartos pagal atstumą palyginimas 20 m ir 30 m aukščiuose (sudaryta autoriaus)

3.7 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 40 metrų aukštis (sudaryta autoriaus).

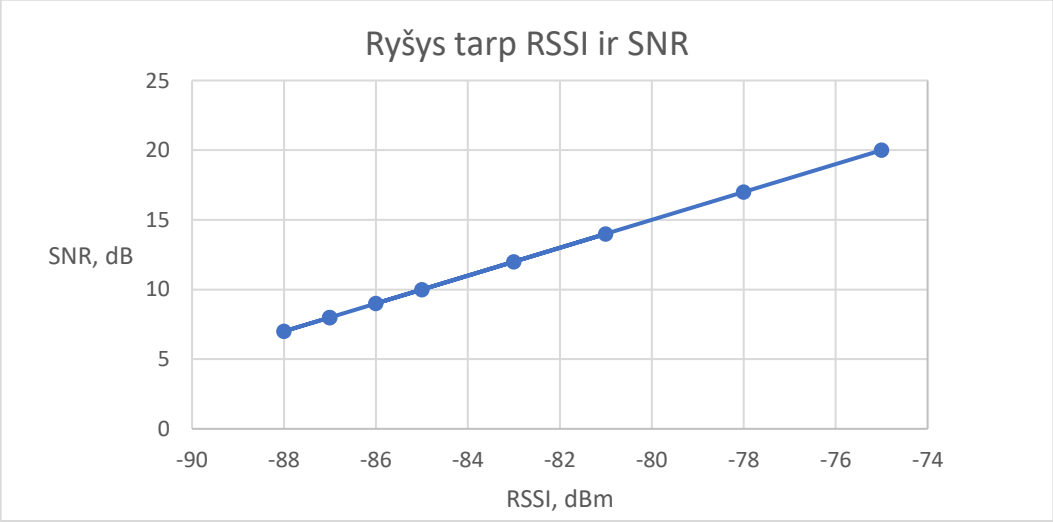
Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-74	21	16-QAM_1/2	0,506
50	-73	22	64-QAM_2/3	8,599
100	-84	11	QPSK_3/4	0,506
150	-79	16	QPSK_3/4	5,058
200	-80	15	16-QAM_1/2	7,081
250	-81	14	16-QAM_3/4	4,046
300	-86	9	QPSK_3/4	1,517
350	-80	15	QPSK_3/4	3,541
400	-87	8	QPSK_1/2	0,506
450	-87	8	QPSK_1/2	0
500	-85	9	QPSK_1/2	1,517
550	-85	10	QPSK_1/2	2,023
575	-85	9	BPSK_1/2	0,506

3.8 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, 50 metrų aukštis (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	-75	20	16-QAM_1/2	2,529
50	-78	17	QPSK_3/4	10,116
100	-78	17	16-QAM_3/4	8,093
150	-86	9	QPSK_3/4	1,517
200	-85	10	QPSK_3/4	2,023
250	-83	12	QPSK_1/2	4,46
300	-81	14	16-QAM_3/4	4,46
350	-87	8	QPSK_1/2	0,506
400	-86	9	QPSK_1/2	1,517
450	-85	10	BPSK_1/2	1,517
500	-85	10	QPSK_1/2	1,517
650	-88	7	QPSK_1/2	1,012
700	-86	8	QPSK_1/2	2,023
750	-87	8	BPSK_1/2	2,023



3.8 pav. Duomenų spartos pagal atstumą palyginimas 40 m ir 50 m aukščiuose (sudaryta autoriaus)



3.9 pav. Ryšys tarp RSSI ir SNR (sudaryta autoriaus)

Kitas eksperimentas atliktas nustatant konkrečią moduliaciją, kaip buvo daroma pirmojo bandymo metu, tik šiuo atveju įranga sumontuota ant bepiločio orlaivio ir pasirinkta naudoti tik 8 MHz kanalo plotį. Gauti rezultatai pateikti 3.9–3.16 lentelėse, pagal juos galima palyginti, kad ant žemės atliktų eksperimentų rezultatai yra geresni nei šiuo atveju, priežastis galimai tokia pati kaip minėta aukščiau atliktame eksperimente. Lyginant su „Auto“ moduliacijos režimu, nustačius konkrečią moduliaciją galima pastoviai išlaikyti didesnį duomenų pralaidumą, tačiau tokiu atveju sistema tampa labai jautri į bepiločio orlaivio pozicijos pasikeitimus erdvėje ir suprastėjus signalo stiprumo lygiui, greitai prarandami duomenys, „Auto“ režimo atveju, sumažėjus signalo stiprumo lygiui yra perjungiama į kitą moduliaciją, kas sumažina duomenų pralaidumą, tačiau toliau galima siųsti duomenis, tik su mažesne duomenų sparta.

3.9 lentelė. Duomenų pralaidumo su 64-QAM_5/6 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	5	-65	30	64-QAM_5/6	13,657
50	5	-69	26	64-QAM_5/6	11,128
100	5	-73	22	64-QAM_5/6	7,587

3.10 lentelė. Duomenų pralaidumo su 64-QAM_3/4 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-71	24	64-QAM_3/4	3,672
50	10	-68	27	64-QAM_3/4	14,229
100	10	-76	19	64-QAM_3/4	0,459

3.11 lentelė. Duomenų pralaidumo su 64-QAM_2/3 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

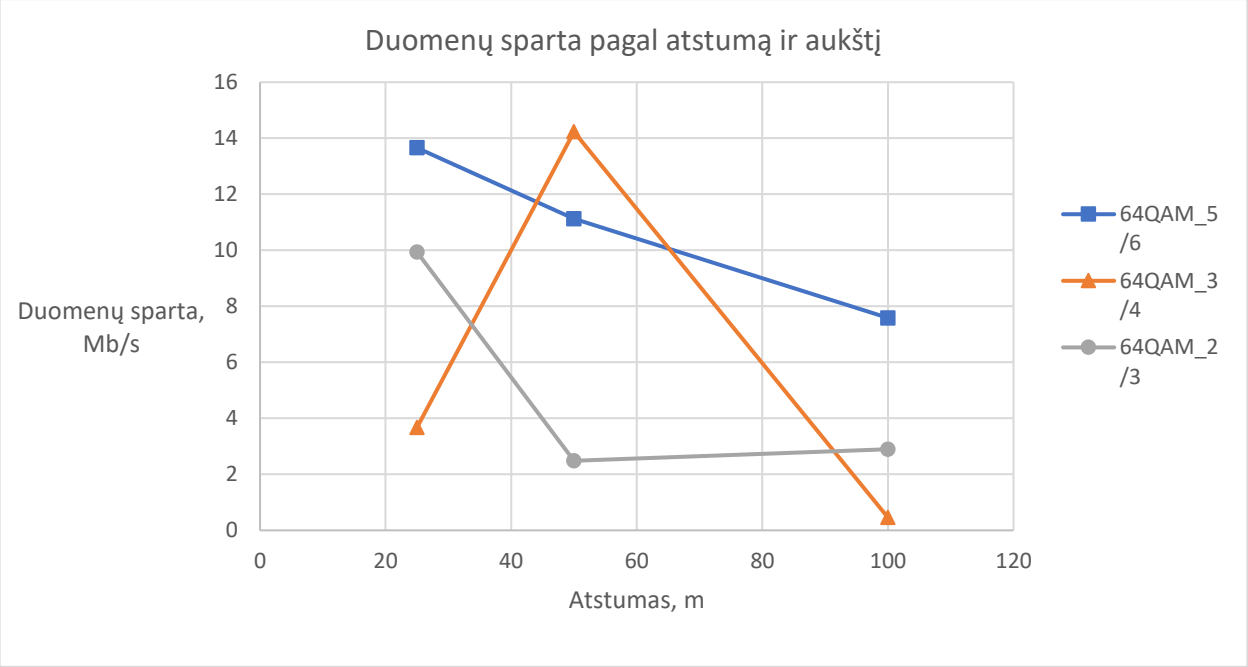
Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-65	29	64-QAM_2/3	9,936
50	10	-69	25	64-QAM_2/3	2,484
100	10	-74	20	64-QAM_2/3	2,898

3.12 lentelė. Duomenų pralaidumo su 16-QAM_3/4 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

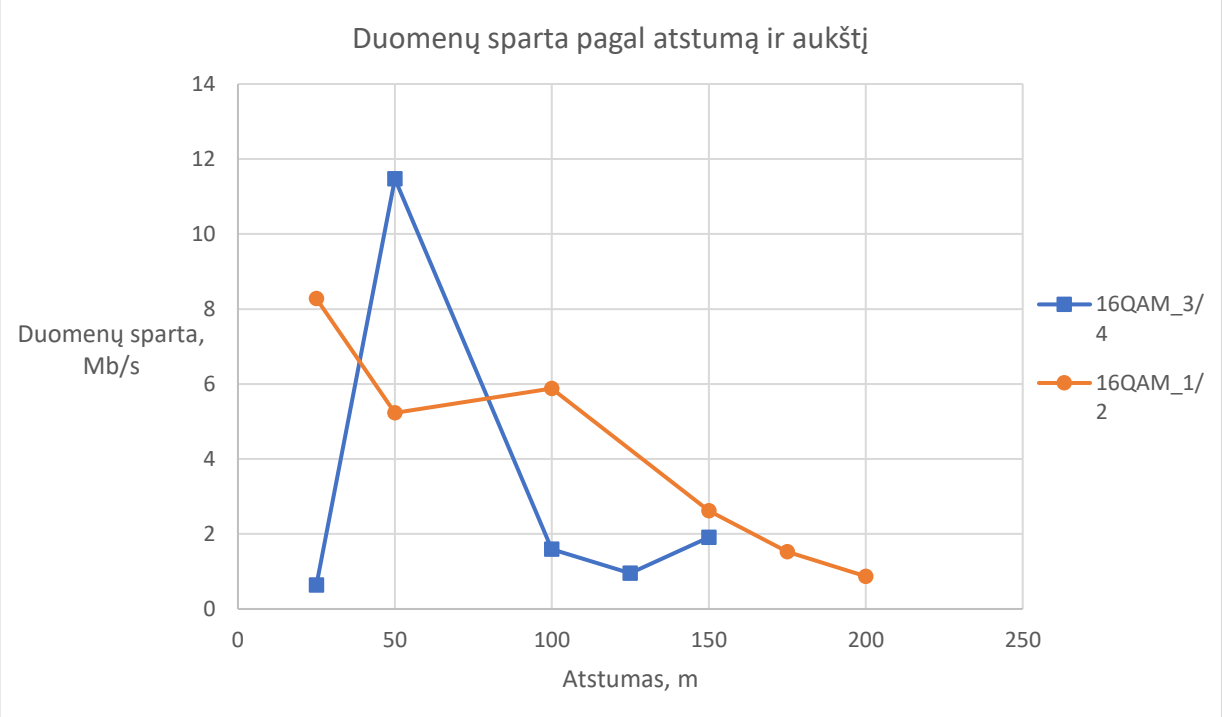
Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-72	23	16-QAM_3/4	0,637
50	10	-68	27	16-QAM_3/4	11,47
100	10	-73	21	16-QAM_3/4	1,593
125	10	-77	18	16-QAM_3/4	0,956
150	10	-75	20	16-QAM_3/4	1,912

3.13 lentelė. Duomenų pralaidumo su 16-QAM_1/2 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-76	18	16-QAM_1/2	8,276
50	10	-70	24	16-QAM_1/2	5,227
100	10	-76	18	16-QAM_1/2	5,881
150	10	-77	17	16-QAM_1/2	2,614
175	20	-80	14	16-QAM_1/2	1,525
200	20	-78	16	16-QAM_1/2	0,871



3.10 pav. Duomenų spartos palyginimas pagal 64-QAM moduliacijas (sudaryta autoriaus)



3.11 pav. Duomenų spartos palyginimas pagal 16-QAM moduliacijas (sudaryta autoriaus)

3.14 lentelė. Duomenų pralaidumo su QPSK_3/4 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

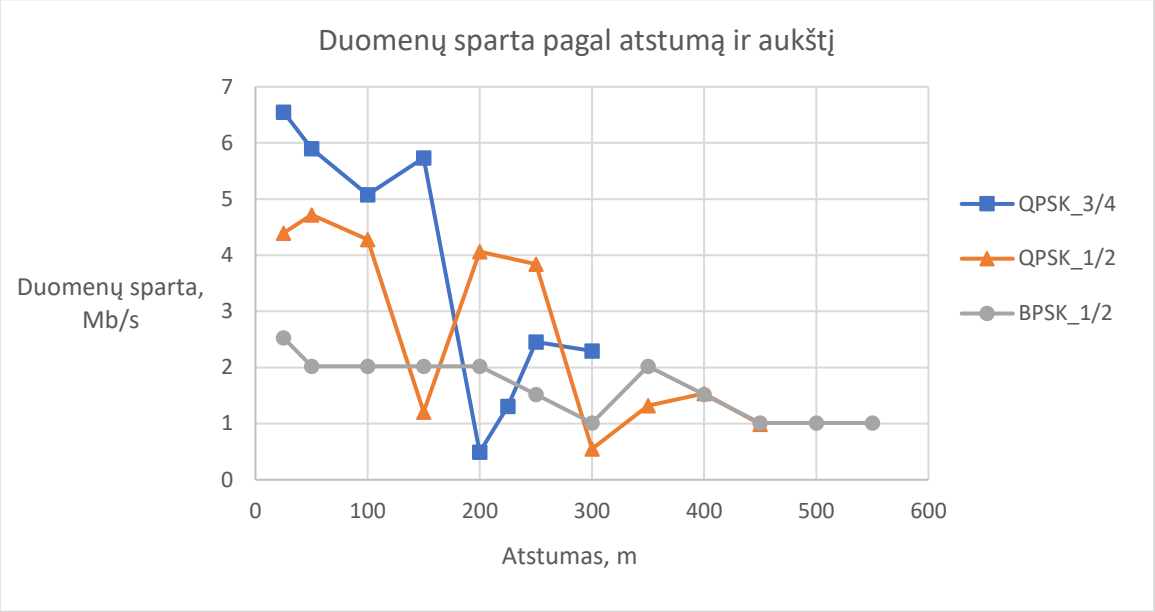
Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-61	33	QPSK_3/4	6,552
50	10	-71	23	QPSK_3/4	5,897
100	10	-76	18	QPSK_3/4	5,078
150	10	-76	18	QPSK_3/4	5,733
200	10	-79	15	QPSK_3/4	0,491
225	20	-78	16	QPSK_3/4	1,31
250	30	-79	15	QPSK_3/4	2,457
300	30	-81	13	QPSK_3/4	2,293

3.15 lentelė. Duomenų pralaidumo su QPSK_1/2 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-69	26	QPSK_1/2	4,392
50	10	-66	28	QPSK_1/2	4,721
100	10	-72	22	QPSK_1/2	4,282
150	10	-83	11	QPSK_1/2	1,208
200	10	-75	19	QPSK_1/2	4,063
250	10	-77	17	QPSK_1/2	3,843
300	10	-84	10	QPSK_1/2	0,549
350	30	-82	12	QPSK_1/2	1,318
400	30	-82	12	QPSK_1/2	1,537
450	40	-85	9	QPSK_1/2	0,988
500	40	-82	12	QPSK_1/2	0,769

3.16 lentelė. Duomenų pralaidumo su BPSK_1/2 matavimo rezultatai (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	10	-64	30	BPSK_1/2	2,529
50	10	-70	24	BPSK_1/2	2,023
100	10	-72	22	BPSK_1/2	2,023
150	10	-76	18	BPSK_1/2	2,023
200	10	-75	19	BPSK_1/2	2,023
250	20	-77	16	BPSK_1/2	1,517
300	30	-85	8	BPSK_1/2	1,012
350	30	-80	13	BPSK_1/2	2,023
400	30	-82	12	BPSK_1/2	1,517
450	40	-85	8	BPSK_1/2	1,012
500	40	-84	9	BPSK_1/2	1,012
550	40	-83	10	BPSK_1/2	1,012



3.12 pav. Duomenų spartos palyginimas tarp QPSK_3/4, QPSK_1/2 ir BPSK_1/2 (sudaryta autoriaus)

Rezultatų palyginimui pakeistos siųstuvo antenos iš 0 dBi į 8 dBi antenas (TP-LINK, 2021) ir atlikti eksperimentai su įjungta automatine moduliacija. Šių eksperimentų rezultatai pateikti 3.17 lentelėje. Skrydžiai atlikti iki 450 metrų atstumo, atskaitos taškai kas 50 metrų ir aukštis keičiamas į 5, 10, 15 ir 20 metrų aukštį. Fiksuojamas priimamo signalo lygis, signalo–triukšmo santykis, moduliacija ir matuojamas duomenų pralaidumas.

3.17 lentelė. Duomenų pralaidumo rezultatai, kai naudojamos siųstuvo 8 dBi antenos (sudaryta autoriaus).

Atstumas, m	Aukštis, m	RSSI, dBm	SNR, dB	Moduliacija	Duomenų sparta, Mb/s
25	5	-61	35	64-QAM_5/6	17,197
25	10	-65	32	64-QAM_5/6	16,186
25	15	-72	24	16-QAM_3/4	9,61
50	20	-73	23	16-QAM_1/2	10,116
50	15	-71	25	16-QAM_3/4	12,645
50	10	-68	28	16-QAM_3/4	14,668
50	5	-68	29	64-QAM_3/4	15,174
100	5	-74	23	16-QAM_3/4	11,633
100	10	-73	24	64-QAM_2/3	11,633
100	15	-72	24	64-QAM_2/3	13,151
100	20	-76	20	16-QAM_3/4	9,61
150	20	-76	20	16-QAM_3/4	10,622
150	15	-72	24	16-QAM_3/4	10,622
150	10	-76	20	16-QAM_3/4	9,104
150	5	-71	25	16-QAM_3/4	13,151
200	5	-70	26	64-QAM_3/4	13,151
200	10	-72	25	64-QAM_3/4	13,151
200	15	-79	18	16-QAM_3/4	7,081
200	20	-78	19	16-QAM_1/2	9,61
250	20	-82	14	BPSK_1/2	3,035
250	15	-76	21	QPSK_3/4	10,116
250	10	-72	24	16-QAM_1/2	11,128

250	5	-85	11	BPSK_1/2	3,035
300	5	-83	13	BPSK_1/2	2,529
300	10	-73	23	16-QAM_3/4	11,128
300	15	-82	14	QPSK_3/4	6,575
300	20	-76	20	QPSK_3/4	7,587
350	15	-74	21	16-QAM_1/2	8,599
350	10	-75	20	16-QAM_3/4	8,093
350	5	-79	16	QPSK_3/4	4,046
400	5	-77	18	QPSK_1/2	6,07
400	10	-81	14	QPSK_3/4	4,046
400	15	-74	21	16-QAM_3/4	8,599
400	20	-79	16	QPSK_1/2	4,552
450	20	-76	19	16-QAM_3/4	7,081
450	15	-77	18	16-QAM_1/2	3,541

Pagal gautus rezultatus, matoma, kad su 8 dBi antenomis 5–20 metrų aukštyje gaunamas aukštesnis RSSI lygis ir didesnė perduodamų duomenų sparta matavimo taškuose pvz.: su 8 dBi antenomis 15 m aukštyje ir 400 m nuotoliu išmatuotas -74 dBm RSSI ir 8,599 Mb/s duomenų sparta, o su 0 dBi tomis pačiomis sąlygomis išmatuotas -86 dBm RSSI ir 1,517 Mb/s duomenų sparta.

3.3. Vidutinės duomenų spartos ir standartinio nuokrypio skaičiavimai

Pagal atliktų eksperimentų rezultatus, matoma, kad duomenų pralaidumas nėra pastovus atsižvelgiant į priimamo signalo lygį. Vertinant tos pačios vertės signalo lygį, matoma, kad pralaidumas yra skirtingas. Kadangi planuojama kuriamoje programinėje įrangoje skaičiuoti ir pateikti priimamo signalo lygį, tai svarbu įvertinti, kokia tikėtina duomenų sparta bus prie šio signalo lygio, remiantis atliktais eksperimentais. Šiam tikslui pasiekti, remiantis 3.2–3.8 ir 3.17 lentelėse pateiktais duomenimis, priimamo signalo lygis suskirstytas į rėžius ir atitinkamai kiekvienam rėžiui apskaičiuoti kvadratinis ir standartinis nuokrypiai. Atitinkamai pagal gautus nuokrypius, galima pasirinkti tenkinantį paklaidos dydį ir atitinkamą tikimybę šiam atvejui.

Priimamo signalo lygis suskirstytas atitinkamai: nuo -65 iki -67 dBm, nuo -68 iki -72 dBm, nuo -73 iki -76 dBm, nuo -77 iki -79 dBm, nuo -80 iki -83 dBm, nuo -84 iki -86 dBm ir nuo -87 iki -89 dBm. Vidutinė duomenų sparta apskaičiuota sudėjus visas vertes ir padalinus jas iš bendro jų skaičiaus. Šis rezultatas priimamas kaip tikroji reikšmė. Pagal tai, nuo šios reikšmės apskaičiuoti nuokrypiai kiekvienam rezultatui, šiuos sudėjus ir padalinus iš bendro nuokrypių skaičiaus, gaunamas kvadratinis nuokrypis iš kurio ištraukus šaknį, gausime standartinį nuokrypį.

Nuokrypiui apskaičiuoti:

$$(a - b)^2 \tag{3.1}$$

čia a – duomenų sparta, Mb/s; b – duomenų spartos vidurkis, Mb/s;

Kvadratinis nuokrypis:

$$\sigma^2 = \frac{c+e+d}{3} \tag{3.2}$$

čia σ^2 – kvadratinis nuokrypis; c, e, d – nuokrypiai;

Toliau 3.18 lentelėje pateikta apskaičiuotos vidutinės duomenų spartos, kvadratiniai ir standartiniai nuokrypiai:

3.18 lentelė. Vidutinė duomenų sparta, kvadratinis ir standartinis nuokrypiai (sudaryta autoriaus).

Priimamo signalo lygis, dBm	Vidutinė duomenų sparta, Mb/s	Kvadratinis nuokrypis, Mb/s	Standartinis nuokrypis, Mb/s
Nuo -65 iki -67	12,58	2,91	1,7
Nuo -68 iki -72	11,98	3,76	1,9
Nuo -73 iki -76	9,19	2,37	1,54
Nuo -77 iki -79	6,4	4,43	2,12
Nuo -80 iki -83	4,03	1,77	1,33
Nuo -84 iki -86	1,79	0,71	0,84
Nuo -87 iki -89	1,11	0,59	1,51

Gauti rezultatai naudojami programinėje įrangoje vartotojui pateikti duomenis apie tikėtiną duomenų spartą priklausomai nuo apskaičiuoto priimamo signalo lygio.

3.4. Eksperimentinis 2,4 GHz antenos stiprinimo koeficiento nustatymas

Siųstuve, kuris sumontuotas ant drono, pasirinkta naudoti pagal užsakymą pagamintas antenas (3.13 pav.), kurios yra minimalaus dydžio ir yra lanksčios, atsižvelgiant, kad tai nėra stacionarus siųstuvas, o sumontuotas ant skraidyklės, kuri turi atitinkamą klaidos tikimybę, kai dėl baterijos išsikrovimo, elektronikos gedimo, staigaus oro sąlygų pasikeitimo, skraidyklė gali nukristi ir trenktis į žemę, todėl dužimo atveju šios antenos yra patvarios lyginant su antenomis, kurių korpusas yra pagamintas iš plastiko. Tačiau šios naudojamos antenos stiprinimo koeficientas yra nežinomas, todėl kuriant pristatytos sistemos modelį yra svarbu žinoti naudojamų antenų stiprinimo koeficientus. Šiam tikslui įgyvendinti, pasirinkta naudoti antenų palyginimo metodą, kuris gali nurodyti tikėtiną naudojamos antenos stiprinimo koeficientą palyginus ją su kita antena, kurios stiprinimo koeficientas yra žinomas.

Šiam eksperimentui įgyvendinti naudojamas spektro analizatorius su prie jo prijungta kryptine 2,4 GHz antena, kuri skirta siųsti generuojamą signalą. Generuojamam signalui priimti, prie spektro analizatoriaus prijungiama 2,4 GHz įvairiakryptė antena, palyginimui pasirinkta etaloninė 8 dBi 2,4 GHz antena. Paleidus sistemą, kryptinė antena siunčia signalą, o įvairiakryptė antena jį priima, analizatorius ekrane atvaizduoja šio priimto signalo stiprumą.



3.13 pav. Siųstuve naudojama įvairiakryptė 2,4 GHz antena (sudaryta autoriaus)



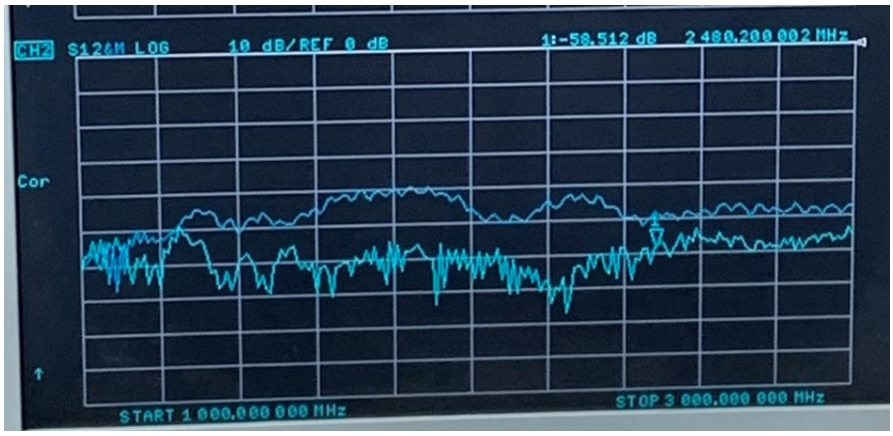
3.14 pav. Etaloninė 8 dBi 2,4 GHz antena (sudaryta autoriaus)



3.15 pav. 2,4 GHz kryptinė antena (sudaryta autoriaus)

Pirmasis eksperimento etapas yra išmatuoti palyginimui pasirinktos etaloninės 8 dBi 2,4 GHz antenos priimamo signalo stiprumą ir jį įrašyti spektro analizatoriaus atmintyje. Įrašius duomenis, prijungiama matuojama antena ir analogiškai taip pat kaip su palyginamąja antena atliekamas signalo stiprumo matavimas. Signalo stiprumas matuojamas ties 2477 MHz dažniu. Šį signalo stiprumą prilyginame atmintyje įrašytam signalo stiprumui ir lyginame skirtumą. Jei mūsų signalo stiprumas sutampa su įrašytu, tai galima teigti, kad tikėtinas matuojamos antenos stiprinimo koeficientas yra 8

dBi. 3.16 paveikslėlyje pavaizduotas spektro analizatoriaus vaizdas, kuriame matomi abiejų antenų signalų stiprumai. Paveikslėlyje aukščiau atvaizduotas signalas – stipresnis signalas, kuris įrašytas į atmintį – etaloninės antenos priimamas signalas, o žemiau esantis yra matuojamos antenos signalas. Spektro analizatoriaus vieno langelio vertė nustatyta 10 dB. Pagal šį vaizdą, galima spręsti, kad priimamo signalo stiprumo skirtumas tarp lyginamų antenų yra 8 dB, kas nurodo, kad tikėtinas matuojamos antenos stiprinimo koeficientas yra 0 dBi.



3.16 pav. Spektro analizatoriuje užfiksuotų antenų signalų stiprumai, siųstuvo antena (sudaryta autoriaus)

Eksperimentų palyginimui, atliktas dar vienas matavimas, tik vietoje siųstuve naudojamos antenos, buvo pagaminta kita 2,4 GHz įvairiakryptė antena (3.17 pav.), kuri taip pat atliekant tuos pačius aukščiau paminėtus veiksmus yra palyginama su etalonine 8 dBi 2,4 GHz antena. 3.18 paveikslėlyje pavaizduotas šio eksperimento rezultatas, kuriame matoma, kad tarp šių lyginamų antenų priimamo signalo lygio stiprumas skiriasi 5 dB, o pagal tai galima teigti, kad tikėtinas šios antenos stiprinimo koeficientas yra 3 dBi.



3.17 pav. Eksperimento metu pagaminta 2,4 GHz antena (sudaryta autoriaus)



3.18 pav. Spektro analizatoriuje užfiksuotų antenų signalų stiprumai, pagaminta antena (sudaryta autoriaus)

Atlikus eksperimentą nustatyta, kad tikėtinas tyrime naudojamos siųstuvo antenos stiprinimo koeficientas yra 0 dBi. Šis rezultatas svarbus praktinių bandymų palyginimui su teoriniais skaičiavimais.

3.5. Apibendrinimas ir išvados

Atlikus eksperimentus su tyrime naudojama įranga ir išbandžius sukurtą programinę įrangą galima padaryti šias išvadas:

1. Atliktas visos sistemos veikimo patikrinimas, kuris patvirtino visos sistemos veikimą. Išbandytas vaizdo perdavimas realiu laiku, atlikti priimamo signalo lygio stebėjimo eksperimentai, išbandytos skirtingos vaizdo raiškos išėjimai vaizdo kodavimo įrenginyje.

2. Atliktas „pMDDL2450“ duomenų pralaidumo testas, kai siųstuvas ir imtuvas nutolę vienas nuo kito per 1 metrą, aukštesnių moduliacijų rezultatai neatitiko gamintojo nurodytų duomenų pralaidumo rezultatų, tačiau šiuo atveju naudota 7 dBm galia, o gamintojas duomenis pateikia su maksimalia 30 dBm. Taip pat gali būti dėl modulio procesoriaus nepakankamų resursų, tam įvertinti reikia atlikti papildomus tyrimus.

3. Atlikti eksperimentai skraidant su bepiločiu orlaiviu fiksuojant RSSI, SNR, moduliaciją, išmatuojant duomenų pralaidumą skirtingu atstumu tam, kad būtų surinkta duomenų bazė pagal kurią sukurta programinė įranga.

4. Eksperimentiniu būdu atliktas 2,4 GHz antenos stiprinimo koeficiento nustatymas lyginant ją su etalonine 8 dBi antena. Gauta, kad tikėtinas naudojamos antenos stiprinimo koeficientas yra lygus 0 dBi.

4. RYŠIO SISTEMOS MODELIAVIMAS

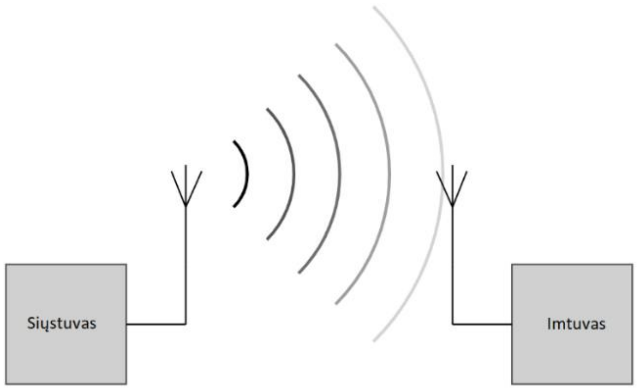
Ryšio sistemos modelis yra šiame tyrime atliktų eksperimentų pateikimas teoriniu lygmeniu. Šio modelio tikslas apskaičiuoti ir pateikti teorinius duomenis apie priimamo signalo stiprumo lygį, duomenų spartą ir duomenų perdavimo nuotolį. Šis modelis naudojamas palyginti teorinius duomenis su pateiktais eksperimentiniais rezultatais. Taip pat orientuotas į naudotojus ir pateiktas kaip programinė įranga, kuri suvedus reikiamus sistemos duomenis, apskaičiuoja ir nurodo kokiu atstumu, kokią duomenų spartą, naudojamą moduliaciją ir vaizdo kokybę galima turėti duomenis suspaudžiant „H.264“ ir „H.265“ vaizdo kodavimu.

4.1. Ryšio sistemos modelis

Ryšio sistemos modelis kuriamas atsižvelgiant, kad skrydžiai bus atliekami atvirame lauke, su tiesioginiu matomumu. Sistemą sudaro du įrenginiai: siųstuvas ir imtuvas (4.1 pav.). Signalo sklidimo modeliui naudojamas laisvosios erdvės sklidimo modelis, kuris naudojamas apskaičiuoti radijo energijos susilpnėjimą sklidimo metu, tarp siųstuvo ir imtuvo. Ryšio sistemos modelis naudoja laisvosios erdvės kelio praradimo formulę (Electronics Notes, n. d.):

$$L = 20\log(d) + 20\log(f) + 32.44 \tag{4.1}$$

čia L – laisvosios erdvės kelio praradimas (dB); d – atstumas (km); f – naudojamas dažnis (MHz).



4.1 pav. Ryšio modelio schema (sudaryta autoriaus)

Atitinkamai, naudodami laisvosios erdvės kelio praradimą, galima apskaičiuoti priimamo signalo stiprumą, kuris yra lygus (Electronics Notes, n. d.):

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \tag{4.2}$$

čia P_r – priimamo signalo stiprumas (dBm); P_t – siųstuvo galia (dBm); G_t – siųstuvo antenos stiprinimo koeficientas (dBi); G_r – imtuvo antenos stiprinimo koeficientas (dBi);

4.2. Reikalingos duomenų spartos nustatymas ir vaizdo kokybės apibrėžimas

Kuriant ryšio modelį yra svarbu apibrėžti kokia duomenų sparta reikalinga transliuoti reikiamai vaizdo kokybei. Žinodami šiuos duomenis galima, remiantis atliktais eksperimentais, sieti priimamo signalo stiprumą su duomenų sparta ir ryšio modelyje prognozuoti kokiu atstumu, kokią vaizdo kokybę galėsime turėti arba kokių parametrų mums reikia, kad gautume norimą vaizdo kokybę.

Atsižvelgiant į vartotoją, siekiant supaprastinti, svarbu apibrėžti kokia kokybė yra gera, kokia bloga, todėl 4.1 ir 4.2 lentelėse vaizdo kokybė yra suskirstyta į: *labai prasta, prasta, vidutiniška, gera, labai gera* ir *puiki*. Taip pat lentelėse pateikiamas vaizdo dydis ir reikalingas duomenų pralaidumas 30 kadrų per sekundę, suspaudžiant vaizdą „H.264“ ir „H.265“ vaizdo kodavimu. Reikalingam duomenų pralaidumui apskaičiuoti naudojamos šios formulės (Bandwidth Considerations, 2022):

$$P_{ps} = W \cdot h \cdot F \tag{4.3}$$

čia P_{ps} – pikseliai per sekundę; W – vaizdo plotis; h – vaizdo aukštis; F – kadrų skaičius;

$$V_b = B_{pp} \cdot P_{ps} \tag{4.4}$$

čia V_b – vaizdo bitų sparta (b/s); B_{pp} – bitai per pikselį; P_{ps} – pikseliai per sekundę;

Vertinant vaizdo kokybę ir jai reikalingą duomenų spartą, svarbus yra kokybės faktorius. Šį faktorių nusako bitai per pikselį, tai nurodo vaizdo failo suspaudimo tankį, kitaip tariant, B_{pp} lygus 0,1 suteiks geresnį vaizdą nei B_{pp} lygus 0,03, kuris suteiks prastos kokybės vaizdą. Atsižvelgdami į tai, ryšio modelyje pasirinkta naudoti optimalų B_{pp}, kuris „H.264“ vaizdo kodavimui yra lygus 0,125 ir 0,08 „H.265“ vaizdo kodavimui (Bandwidth Considerations, 2022).

4.1 lentelė. Duomenų sparta pagal vaizdo kokybę, „H.264“ vaizdo kodavimas (sudaryta autoriaus).

Vaizdo įrašo dydis	Reikalingas pralaidumas 30 kadrų per sekundę, H.264, B_{pp} = 0,125	Vaizdo įrašo kokybė
360p:640x360	0,86 Mb/s	Labai prasta
480p:854x480	1,5 Mb/s	Prasta
720p (HD):1280x720	3,5 Mb/s	Vidutiniška
1080p (FHD):1920x1080	7,8 Mb/s	Gera
1440p (2K):2560x1440	13,8 Mb/s	Labai gera
2160p (4K):3480x2160	28,2 Mb/s	Puiki

4.2 lentelė. Duomenų sparta pagal vaizdo kokybę, „H.265“ vaizdo kodavimas (sudaryta autoriaus).

Vaizdo įrašo dydis	Reikalingas pralaidumas 30 kadrų per sekundę, H.265, B_{pp} = 0,08	Vaizdo įrašo kokybė
360p:640x360	0,55 Mb/s	Labai prasta
480p:854x480	0,98 Mb/s	Prasta
720p (HD):1280x720	2,2 Mb/s	Vidutiniška
1080p (FHD):1920x1080	5 Mb/s	Gera
1440p (2K):2560x1440	8,8 Mb/s	Labai gera
2160p (4K):3480x2160	18 Mb/s	Puiki

Svarbu paminėti, kad šis parametras gali skirtis kiekvienoje sistemoje ir nesutapti su šiais pateiktais parametrais, kadangi kokybės faktorius priklauso nuo naudojamo vaizdo kodavimo ir koks yra naudojamas duomenų spartos valdymo režimas.

4.3. Ryšio modelio programinės įrangos kūrimas

Ryšio modelio programinės įrangos tikslas yra pateikti vartotojui prognozuojamus duomenis apie duomenų perdavimo nuotolį, duomenų pralaidumą, moduliaciją, perduodamo vaizdo kokybę ir skrydžio rekomendacijas. Programinė įranga apskaičiuoja laisvosios erdvės kelio praradimą ir priimamo signalo lygį, pagal signalo lygį pateikia duomenų pralaidumą, kurie parinkti įvertinus tyrime atliktus duomenų pralaidumo eksperimentus.

Siekiant sukurti ryšio modelį, panaudota „Visual Studio Code“ programinė įranga. Programos kodas parašytas „Python“ programine kalba. Programinis kodas naudoja dvi bibliotekas: „cmath“ matematiniams skaičiavimams atlikti ir „PIL“ skirta paveikslo atvaizdavimui (4.1 programos kodas). Programinė įranga prasideda nuo klausimo koks sistemoje naudojamas dažnis, įvedus jį, jei pasirinktas dažnis patenka į modeliuojamų dažnių ruožą (2407–2477 MHz), programa tęsiama ir užduodami kiti klausimai kurie prašo įvesti siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientus, siųstuvo naudojamą galią (4.2 programos kodas). Jei įvedamas netinkamas dažnis, tuomet gaunama klaida ir programa nutraukiama (4.3 programos kodas). Taip pat ir su siųstuvo galia, jei įvesta galia patenka į nurodytus rėžius (7–30 dBm), tai programa toliau užduos papildomus klausimus skirtus atlikti skaičiavimams, kitu atveju, programa nutraukiama (4.3 programos kodas). Įvestą siųstuvo galią programa dalina iš 2 (15 eilutė), nes įrangoje yra naudojama MIMO funkcija, kuri paskirsto siųstuvo galią dvejoms naudojamoms antenoms. Toliau užduodami klausimai apie norimą atlikti skrydį, įvedamas atstumas - kilometrais ir aukštis - metrais (4.4 programos kodas). Aukštis paverčiamas į kilometrus, nes pagal Pitagoro teoremą yra apskaičiuojamas sklidimo atstumas (19–22 eilutės). Programa naudodama šiuos duomenis toliau atlieka laisvosios erdvės kelio praradimo (23 eilutė) ir priimamo signalo lygio skaičiavimus (25 eilutė). Atlikus juos, rezultatai išvedami į ekraną.

4.1 programos kodas. Naudojamos bibliotekos.

```
1 from cmath import log10, sqrt
2 from PIL import Image
```

4.2 programos kodas. Sistemoje naudojamo dažnio, antenų stiprinimo koeficientų ir siųstuvo galios įvestis.

```
4 daznis = input ('Koks sistemoje naudojamas daznis (MHz)?\n')
5 dazn = int (daznis)
6 if 2407 <= dazn <= 2477:
7     antsiust = input ('Koks yra siustuvo antenos stiprinimas
(dBi)?\n')
8     Gt  = int (antsiust)
9      antimt = input ('Koks yra imtuvo antenos stiprinimas
(dBi)?\n')
10    Gr = int (antimt)
11    siustgalia = input ('Kokia siustuvo naudojama galia
(dBm)?\n')
12    Pt = float (siustgalia)
```

4.3 programos kodas. Klaidos įvedus netinkamą dažnį, siųstuvo galią.

```
114     else:
115         print ('Nurodyta netinkama galia, turi buti nurodoma 7-
30 dBm diapozone')
116 else:
117     print ('Netinkamas daznis, turi buti nurodomas 2407-2477
MHz diapozone')
```

4.4 programos kodas. Laisvosios erdvės kelio praradimo ir priimamo signalo lygio skaičiavimas.

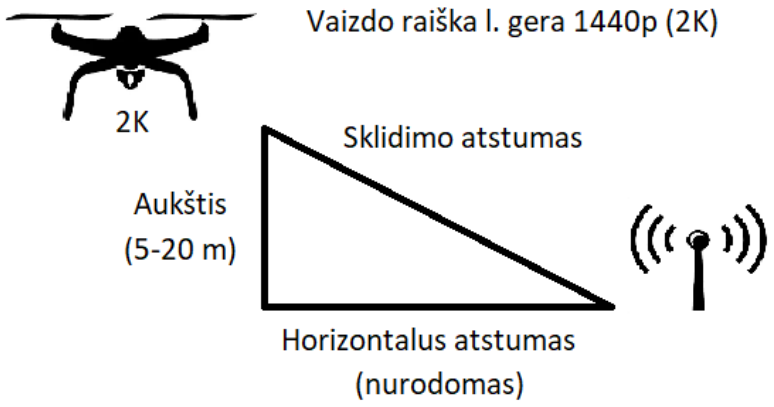
```
14     if 7 <= Pt <= 30:
15         Pt = Pt/2
16         atstumas = input ('Kokiu atstumu norima skristi (km)? \n')
17         km = float (atstumas)
18         aukstis = input ('Kokiame aukstyje planuojama skristi (m)?
\n')
19         h = int (aukstis)
20         h1 = h/1000
21         skl = sqrt((km ** 2) + (h1 ** 2))
22         skl = float(skl.real)
23         L = 32.44+20*log10(skl)+20*log10(dazn)
24         L = float(L.real)
25         Pr = Pt + Gt + Gr - L
26         L1 = "{:.0f}".format(L)
27         Pr1 = "{:.0f}".format(Pr)
28         print ('\nLaisvosios erdves kelio praradimas: ', L1, ' dB')
29         print ('RSSI: ', Pr1, ' dBm')
```

Atlikus skaičiavimus, toliau, programinė įranga, pagal apskaičiuotą priimamo signalo lygį, tikrina į kuriuos RSSI rėžius patenka (iki -65, -65–67, -67–72, -72–76, -76–79, -79–83, -83–86, -86–89,

daugiau už -90 dBm). Kai tokia surandama, vykdoma „if“ funkcija šiam priimamo signalo lygio rėžiui (4.5 programos kodas). Ši kodo dalis pateikia informaciją apie vidutinę duomenų spartą, rekomenduojamą naudoti moduliaciją, kurią parenka programa, jų tikimybes, kurios tikėtinos prie gauto signalo lygio, taip pat perduodamo vaizdo raišką esant „H.265“ ir „H.264“ vaizdo kodavimui, skrydžio atstumo ir aukščio parametrus. Taip pat šioje kodo dalyje aprašytas paveikslo atvaizdavimas (47–48 eilutės), kuris yra skirtas atvaizduoti vartotojui supaprastintus vizualinius rezultatus apie ryšio nuotolį ir perduodamo vaizdo kokybę (4.2 pav.).

4.5 programos kodas. Kodo dalis skirta rezultatams atvaizduoti.

```
40          if -65 >= Pr >= -67:
41              print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
12,6 Mb/s su 1,7 Mb/s paklaida ')
42              print ('Rekomenduojama moduliacija: 64-QAM')
43              print ('Tiketina moduliacija: 50 % - 64-QAM, 50 % -
16-QAM')
44              print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Labai gera
- 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Gera - 1080p (FHD):
1920x1080, 30 kadru/s, H.264')
45              print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
46              print ('Rekomenduojamas aukstis: 5-20 metru')
47              im = Image.open("6567rssi.png")
48              im.show()
49
50          if -67 > Pr >= -72:
51              print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
12 Mb/s su 1,9 Mb/s paklaida ')
52              print ('Rekomenduojama moduliacija: 16-QAM')
53              print ('Tiketina moduliacija: 37 % - 64-QAM, 63 % -
16-QAM')
54              print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Labai gera
- 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Gera - 1080p (FHD):
1920x1080, 30 kadru/s, H.264')
55              print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
56              print ('Rekomenduojamas aukstis: 5-20 metru')
57              im = Image.open("6567rssi.png")
58              im.show()
```

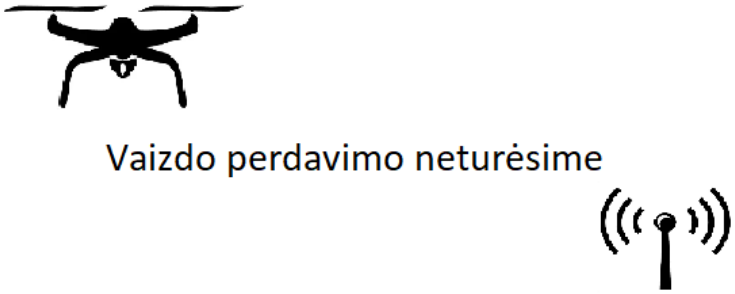


4.2 pav. Supaprastintų rezultatų atvaizdavimas grafiškai (sudaryta autoriaus)

Jei apskaičiuotas priimamo signalo lygis yra mažesnis nei -90 (4.6 programinis kodas), tai programinė įranga išveda pranešimą į ekraną, kad ryšio neturėsime (4.3 pav.).

4.6 programinis kodas. Ryšio praradimas.

```
110         if Pr<=-90:
111             print('\nRysio neturesime')
112             im = Image.open("90rssi.png")
113             im.show()
```



4.3 pav. Grafinis ryšio praradimo atvaizdavimas (sudaryta autoriaus)

Sėkmingai įvykdžius programą ekrane gausime visą informaciją susijusią su sistemoje naudojamais parametrais (4.4 pav.).

```
Koks sistemoje naudojamas daznis (MHz)?
2407
Koks yra siustuvo antenos stiprinimas (dBi)?
6
Koks yra imtuvo antenos stiprinimas (dBi)?
3
Kokia siustuvo naudojama galia (dBm)?
20
Kokiu atstumu norima skristi (km)?
0.8
Kokiame aukstyje planuojama skristi (m)?
25

Laisvosios erdves kelio praradimas:  98  dB
RSSI:  -79  dBm

Vidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad 4 Mb/s su 1,3 Mb/s paklaida
Rekomenduojama moduliacija: QPSK
Tiketina moduliacija: 25 % - 16-QAM, 75 % - QPSK
Perduodama vaizdo raiska:
Vidutiniska - 720p (HD): 1280x720, 30 kadru/s, H.265
Vidutiniska - 720p (HD): 1280x720, 30 kadru/s, H.264
Horizontalus atstumas:  0.8  km
Rekomenduojamas aukstis: 10-50 metru
```

4.4 pav. Rezultatų atvaizdavimas ekrane (sudaryta autoriaus)

Ekrane pateikiamas apskaičiuotas priimamo signalo lygis, planuojamo skrydžio duomenys, perduodamo vaizdo kokybė ir vizualinis supaprastintų rezultatų atvaizdas.

4.4. Sukurtos programinės įrangos veikimo patikrinimas realiomis sąlygomis

Siekiant patikrinti programinę įrangą naudojami „pMDDL2450“ siųstuvas–imtuvas. Siųstuvas sumontuotas ant bepiločio orlaivio, o imtuvas kaip antžeminė stotis. Šiam eksperimentui pasirinkta naudoti vienodas įvairiakryptes 2,4 GHz „TP-LINK“ 8 dbi antenas. Priimamo signalo lygis, signalo–triukšmo santykis ir moduliacija fiksuojami „pMDDL2450“ aplikacijoje, taip pat naudojamas „IPerf“ įrankis, kuris yra integruotas šiame įrenginyje, duomenų pralaidumo matavimui. Perduodamo vaizdo raiškai nustatyti naudojama „Gopro“ vaizdo kamera, kuri prijungta prie vaizdo kodavimo įrenginio „Orivision“, šis prijungtas prie siųstuvo per LAN. Atlikti du bandomieji skrydžiai: 0,5 km atstumu ir 1 km atstumu.

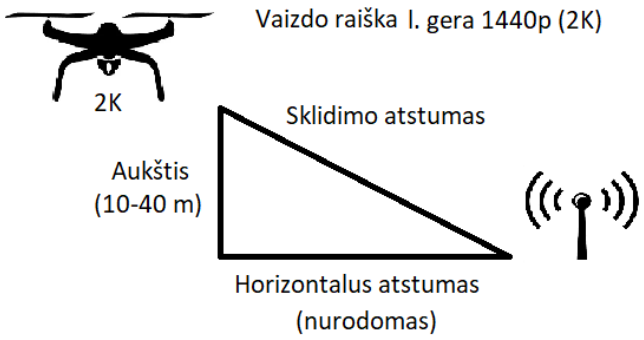
Pirmasis programinės įrangos bandymas atliekamas 1 km atstumu. Įjungus programą įvedamas sistemoje naudojamas 2477 MHz dažnis, įvedami siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientai 8 dbi, įvedama nustatyta siųstuvo galia 20 dBm, nurodomas atstumas 1 km, kurį norime skristi ir aukštis 30 m. Įvykdžius programą, gauname, kad apskaičiuotas laisvosios erdvės kelio praradimas yra 100 dB, o priimamo signalo lygis -74 dBm. Tikėtina vidutinė duomenų sparta 9,2 Mb/s su 1,5 Mb/s paklaida ir 68 % tikimybe, moduliacija 16-QAM, perduodamo vaizdo raiška 1440p (2K), 30 kadrų/s, kai naudojamas „H.265“ vaizdo kodavimas ir 1080p (FHD), 30 kadrų/s, kai naudojamas „H.264“ vaizdo kodavimas. Pateiktas rekomenduojamas aukštis skrydžiui 10–40 metrų (4.5 pav.). Grafinis programos supaprastintų rezultatų atvaizdavimas pateiktas 4.6 paveikslėlyje.

```
Koks sistemoje naudojamas daznis (MHz)?
2477
Koks yra siustuvo antenos stiprinimas (dBi)?
8
Koks yra imtuvo antenos stiprinimas (dBi)?
8
Kokia siustuvo naudojama galia (dBm)?
20
Kokiu atstumu norima skristi (km)?
1
Kokiame aukstyje planuojama skristi (m)?
30

Laisvosios erdves kelio praradimas:  100  dB
RSSI:  -74  dBm

Vidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad 9,2 Mb/s su 1,5 Mb/s paklaida
Rekomenduojama moduliacija: 16-QAM
Tiketina moduliacija: 90 % - 16-QAM, 10 % - QPSK
Perduodama vaizdo raiska:
Labai gera - 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265
Gera - 1080p (FHD): 1920x1080, 30 kadru/s, H.264
Horizontalus atstumas:  1.0  km
Rekomenduojamas aukstis: 10-40 metru
```

4.5 pav. Programinės įrangos rezultatas, kai atstumas 1 km (sudaryta autoriaus)

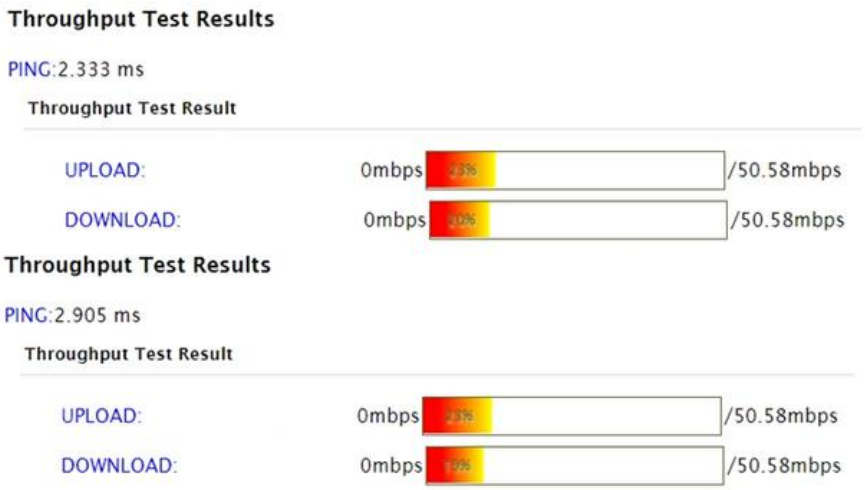


4.6 pav. Supaprastintų rezultatų grafinis atvaizdavimas, kai atstumas 1 km (sudaryta autoriaus)

Bandymui realiomis sąlygomis naudojamas šešių variklių sukasparnis, kuriame sumontuotas autopilotas. Naudojant autopilotą bepiločiame orlaivyje ir „Mission planner“ programinę įrangą kompiuteryje, nurodoma koordinatė taško, kuris yra nutolęs nuo antžeminės stoties 1 kilometro atstumu. Įjungus automatinį režimą, nurodomas pakilimo aukštis 30 metrų ir naudojant GPS bepilotis orlaivis siunčiamas į nurodytą koordinatę. Nuskridus į šį tašką, bepilotis orlaivis sustoja ir stovi vietoje išlaikydamas nurodytą atstumą ir aukštį. Tuo metu atliekamas priimamo signalo lygio, signalo–triukšmo santykio ir moduliacijos nustatymas, duomenų pralaidumo matavimas. Atlikus bandymą, užfiksuotas RSSI -73 dBm ir -74 dBm, SNR 21 – 22 dB (4.7 pav.), moduliacija 16-QAM_3/4, išmatuotas duomenų pralaidumas 10,116 Mb/s ir 9,61 Mb/s (4.8 pav.). Gauti rezultatai atitinka nurodytą paklaidą.

Tx Mod (MIMO)	Rx Mod (MIMO)	SNR (dB)	RSSI (dBm)
16-QAM FEC 3/4(On)	16-QAM FEC 3/4(On)	21	-74
Tx Mod (MIMO)	Rx Mod (MIMO)	SNR (dB)	RSSI (dBm)
16-QAM FEC 3/4(On)	64-QAM FEC 2/3(On)	22	-73

4.7 pav. RSSI, SNR ir moduliacija (sudaryta autoriaus)



4.8 pav. Duomenų pralaidumo testas (sudaryta autoriaus)

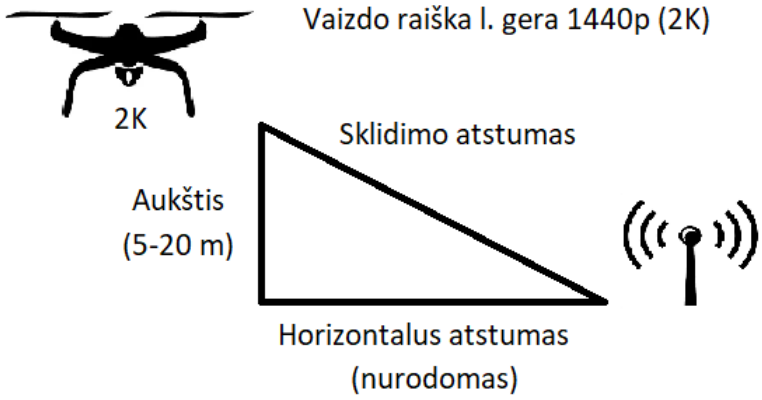
Antras bandymas atliekamas 0,5 km atstumu. Programoje įvedamas 2477 MHz dažnis, 8 dBi siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimo koeficientai, 14 dBm siųstuvo naudojama galia, 0,5 km skrydžio atstumas ir 20 m aukštis. Įvykdžius programą, gaunama, kad apskaičiuotas laisvosios erdvės kelio praradimas yra 94 dB, priimamo signalo lygis -71 dBm, tikėtinas vidutinis duomenų pralaidumas 12 Mb/s su 1,9 Mb/s paklaida ir 68 % tikimybe, moduliacija 16-QAM arba 64-QAM, vaizdo perdavimo raiška 1440p (2K), 30 kadrų/s, kai vaizdo kodavimas „H.265“ ir 1080p (FHD), kai vaizdo kodavimas „H.264“, rekomenduojamas aukštis 5–20 metrų (4.9 pav.). Grafinis programos supaprastintas rezultatų atvaizdas pateiktas 4.10 paveikslėlyje.

```
Koks sistemoje naudojamas daznis (MHz)?
2477
Koks yra siustuvo antenos stiprinimas (dBi)?
8
Koks yra imtuvo antenos stiprinimas (dBi)?
8
Kokia siustuvo naudojama galia (dBm)?
14
Kokiu atstumu norima skristi (km)?
0.5
Kokiame aukstyje planuojama skristi (m)?
20

Laisvosios erdves kelio praradimas:  94  dB
RSSI:  -71  dBm

Vidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad 12 Mb/s su 1,9 Mb/s paklaida
Rekomenduojama moduliacija: 16-QAM
Tiketina moduliacija: 37 % - 64-QAM, 63 % - 16-QAM
Perduodama vaizdo raiska:
Labai gera - 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265
Gera - 1080p (FHD): 1920x1080, 30 kadru/s, H.264
Horizontalus atstumas:  0.5  km
Rekomenduojamas aukstis: 5-20 metru
```

4.9 pav. Programinės įrangos rezultatas, kai atstumas 0,5 km (sudaryta autoriaus)



4.10 pav. Supaprastintų rezultatų atvaizdavimas, kai atstumas 0,5 km (sudaryta autoriaus)

Atlikus bandymą realiomis sąlygomis, nustatytas RSSI -71 ir -72 dBm, SNR 25 dB, moduliacija 64-QAM_2/3, išmatuotas duomenų pralaidumas lygus 11,633 Mb/s. Persiunčiamas vaizdas 1080p (FHD) sklandus, be trikdžių (4.11 pav.).



4.11 pav. Perduodamo vaizdo kadras 0,5 km atstumu (sudaryta autoriaus)

Šiam bandymui vaizdo kodavimo įrenginyje pasirinktas „H.264“ kodavimas ir 1080p (FHD) vaizdo išėjimo raiška, nes tai yra įrenginio maksimali išėjimo vaizdo raiška, todėl nebuvo galimybės atlikti bandymo su „H.265“ 1440p (2K) raiška.

4.5. Apibendrinimas ir išvados

Atlikus ryšio sistemos modelio kūrimą, galima padaryti šias išvadas::

1. Sukurtas ryšio sistemos modelis, kurį sudaro du įrenginiai: siųstuvas ir imtuvas. Šios sistemos ryšiui apibrėžti naudojama laisvosios erdvės kelio praradimo formulė ir priimamo signalo stiprumo formulė. Gautus skaičiavimų rezultatus galima lyginti su eksperimentų metu gautais priimamo signalo stiprumo rezultatais.

2. Atlikti duomenų spartos skaičiavimai kiekvienai vaizdo raiškai pagal pasirinktą kokybės faktorių – „H.265“ lygus 0,08 ir „H.264“ lygus 0,125. Vaizdo raiškos suskirstytos į grupes pagal kokybės kriterijų, nurodant žymas: *puiki, labai gera, gera, vidutiniška* ir *prasta*, kad būtų galima apibrėžti kokybę ir supaprastinti duomenis vartotojui.

3. Sukurta programinė įranga, kurioje pateiktas ryšio sistemos modelis. Programinė įranga apskaičiuoja laisvosios erdvės kelio praradimą, priimamo signalo lygį, pagal jį parenka nustatytus RSSI rėžius ir išveda į ekraną duomenis apie planuojamo skrydžio parametrus, tikėtiną vidutinį duomenų pralaidumą, moduliaciją ir vaizdo kokybę „H.264“ ir „H.265“ vaizdo kodavimo atvejais.

Atliktas sukurtos programinės įrangos testavimas realiomis sąlygomis. Įvykdžius programą pagal pasirinktus parametrus ir atlikus realų skrydį, patvirtinta, kad programos pateikiami rezultatai atitinka realius rezultatus. Apskaičiuotas priimamo signalo lygis 1 km atstumu -74 dBm, o realiomis sąlygomis užfiksuotas -73 ir -74 dBm. Duomenų pralaidumas apskaičiuotas vidutinis 9,2 Mb/s su 1,5 Mb/s paklaida, o realiomis sąlygomis išmatuotas 10,116 Mb/s ir 9,61 Mb/s.

REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

Atlikus duomenų perdavimo nuotolio tyrimą tarp bepiločio orlaivio ir antžeminės stoties, galima padaryti šias išvadas:

1. Atlikus analogiškų tyrimų apžvalgą išanalizuoti skirtingi duomenų perdavimo sprendimai. Pasirinktas metodas – dronas–žemė, kai naudojamas vienas bepilotis orlaivis ir viena antžeminė stotis. Toks sprendimas priimtas dėl sistemos paprastumo, pigumo ir pakankamo nuotolio užduočiai atlikti. Duomenims perduoti, ryšio sistemoje panaudota „Microhard pMDDL2450“ 2,4 GHz dažnio įranga, kuri pagal specifikacijas atitiko tyrime iškeltus reikalavimus, suteikė reikiamą duomenų pralaidumą, užtikrinant perduodamą aukštos raiškos vaizdą. Įranga naudoja TCP/IP protokolą, didžiausia nustatoma galia iki 30 dBm, išmatuotas didžiausias duomenų pralaidumas – 23,26 Mb/s. Taip pat įrenginio teikiama informacija panaudota RSSI, SNR, moduliacijos fiksavimui. Naudojant įrenginyje įdiegtą „Iperf“ įrankį išmatuotos duomenų spartos.

2. Apskaičiuotas reikalingas duomenų pralaidumas kiekvienai perduodamo vaizdo raiškai, kai kokybės faktorius lygus 0,08 „H.265“ ir 0,125 „H.264“ vaizdo kodavimui. Vaizdo raiškos duomenys supaprastinti ir suskirstyti pagal kokybę: *puiki*, *labai gera*, *gera*, *vidutiniška*, *prasta*. Gauta, kad persiųsti 4K raiškos vaizdą reikalinga 18 Mb/s duomenų sparta, 2K vaizdui – 8,8 Mb/s, FHD – 5 Mb/s, HD – 2,2 Mb/s, kai naudojamas „H.265“ vaizdo kodavimas.

3. Atliktas sistemos veikimo bandymas, įranga sumontuota ant bepiločio orlaivio ir atlikti eksperimentiniai skrydžiai duomenų perdavimo bandymui atlikti. Surinkta reikiama informacija apie duomenų perdavimą, RSSI, SNR. Atlikti skrydžiai skirtingu nuotoliu su bepiločiu orlaiviu, sustojant atskaitos taškuose kas 50 metrų atstumu, taip pat atliekant bandymus skirtingame aukštyje. Kiekvienu atveju fiksuoti RSSI, SNR, moduliacija ir duomenų pralaidumas. Su 7 dBm galia pasiektas maksimalus nuotolis – 750 m, 50 m aukštyje, duomenų pralaidumas – 2,023 Mb/s.

4. Eksperimentiniu būdų atliktas 2,4 GHz antenos stiprinimo koeficiento nustatymas lyginant ją su etalonine 8 dBi antena. Gauta, kad naudojamos antenos tikėtinas stiprinimo koeficientas yra lygus 0 dBi. Tyrimo eksperimentuose skirtingais atvejais panaudotos tiek 8 dBi, tiek 0 dBi antenos.

5. Sukurtas ryšio sistemos modelis, kuris pateikia atliktus eksperimentus teoriniu lygmeniu. Sistemos modelis apskaičiuoja laisvosios erdvės kelio praradimą ir priimamo signalo lygį. Palyginus apskaičiuotą -74 dBm priimamo signalo lygį su realiomis sąlygomis gautu signalo lygiu (-73 ir -74 dBm), galima teigti, kad ryšio modelis RSSI apskaičiuoja su 1–2 dBm paklaida. Remiantis ryšio sistemos modeliu, apskaičiuotomis vaizdo perdavimo duomenų spartomis ir atliktais duomenų perdavimo eksperimentais sukurta programinė įranga, kuri pateikus reikiamus duomenis (sistemoje naudojamą dažnį, antenų stiprinimo koeficientus, naudojamą siųstuvo galią, skrydžio nuotolį ir aukštį), apskaičiuoja ir pateikia laisvosios erdvės kelio praradimą, priimamo signalo lygį, parenka

RSSI rėžius, pateikia vidutinę duomenų spartą šiam scenarijui, kartu su rekomenduojama moduliacija ir perduodamo vaizdo kokybe „H.265“ ir „H.264“ atvejams.

6. Atliktas programinės įrangos testavimas realiomis sąlygomis. Atlikus skrydį gauti rezultatai patvirtina teisingą programinės įrangos veikimą, nes apskaičiuotas RSSI 1 km atstumu yra lygus -74 dBm, o realiu skrydžiu gauti RSSI lygūs -73 ir -74 dBm. Atitinkamai palyginus duomenų spartą, prognozuojama tikėtina sparta yra lygi 9,2 Mb/s su 1,5 Mb/s paklaida, o realiu atveju išmatuotas 10,116 ir 9,61 Mb/s duomenų pralaidumas.

LITERATŪRA

1. Cumino et. al. (2018). Cooperative UAV Scheme for Enhancing Video Transmission and Global Network Energy Efficiency. *Sensors*, 18(12), 41–55. https://doi.org/10.3390/s18124155
2. Costa, R., Rosario, D., Cerqueira, E. & Santos, A. (2014). Enhanced connectivity for robust multimedia transmission in UAV networks. In *2014 IFIP Wireless Days* (WD). Rio de Janeiro: IEEE.
3. *Electronics Notes: Free Space Path Loss*. (n. d.). Prieiga per internetą: https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/free-space-path-loss.php#
4. *Gopro* (n. d.). Prieiga per internetą: https://gopro.com/content/dam/help/hero4-silver/manuals/UM_H4Silver_ENG_REVA_WEB.pdf
5. Hein, D., Kraft, T., Brauchle, J. & Berger, R. (2019). Integrated UAV-Based Real-Time Mapping for Security Applications. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8(5), 219. https://doi.org/10.3390/ijgi8050219
6. Huang, S., Lin, M., Wang, R., Chen, Z & Dong, Y. (2020). A 400 MHz Single-Chip CMOS Transceiver for Long Range High Definition Video Transmission in UAV Application. *Chinese Journal of Electronics*, 29(3), 554–562. https://doi.org/10.1049/cje.2020.03.011
7. Horiuchi, M., Nishiyama, H., Kato, N., Ono, F. & Miura, R. (2016). Throughput maxximization for long-distance real-time data transmission over multiple UAVs. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Kuala Lumpur: IEEE.
8. Hosseini, N., Jamal, H., Haque, J., Magesacher, T. & Matolak, D. (2019). UAV Command and Controls, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems. In *2019 IEEE Aerospace Conference*. Montana: IEEE.
9. Yan, C., Fu, L., Zhang, J. & Wang, J. (2019). *A* Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling. *IEEE Access*, 7. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933173
10. Yanmaz, E., Hayat, S., Scherer, J. & Bettstetter, C. (2014). Experimental Performance Analysis of Two-Hop Aerial 802.11 Networks. In *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Istanbul: IEEE.
11. Kawamoto, Y., Nishiyama, H., Kato, N., Ono, F. & Miura, R. (2018). Toward Future Unmanned Aerial Vehicle Networks: Architecture, Resource Allocation and Field Experiments. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 94–99. https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700368
12. Lashari, H., Ali, H. & Laghari, A. (2020). UAV Communication Networks Issues: A Review. Archives of Computational Methods in Engineering. http://dx.doi.org/10.1007/s11831-020-09418-0
13. Naveed, M., Qazi, S., Khawaja, B. A. & Mustaqim, M. (2019). Evaluation of video streaming capacity of UAVs with respect to channel variation in 4D-LTE Surveillance Architecture. In *2019 8th International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)*. Karachi: IEEE.
14. *Orivision* (n. d.). Prieiga per internetą: https://www.orivision.com.cn/products/h265amph264-hdmi-input-video--encoder-10
15. Papic, V., Solic, P., Milan, A., Gotovac, S. & Polic, M. (2021). High-Resolution Image Transmission from UAV to Ground Station for Search and Rescue Missions Planning. *Applied sciences*, 11(5), 21–30. https://doi.org/10.3390/app11052105
16. *pMDDL2450* (n. d.). Prieiga per internetą: https://www.microhardcorp.com/pMDDL2450-2.php
17. Shi, Y., Enami, R., Wensowitch, J. & Camp, J. (2018). Measurement-based characterization of LOS and NLOS drone-to-ground channels. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Barcelona: IEEE.

18. *TP-LINK* (n. d.). Prieiga per internetą: https://www.tp-link.com/us/home-networking/antenna/tl-ant2408cl/
19. Van den Bergh, B. and Pollin, S. (2017). *Air-to-Ground and Air-to-Air Data Link Communication. In UAV Networks and Communications*. Cambridge: Cambridge University Press.
20. Zhou, W. (2017). High Definition, Low Delay, SDR-Based Video Transmission in UAV Applications. *Analog Dialogue*, 51(01). Prieiga per internetą: https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/high-definition-low-delay-sdr-based-video-transmission-in-uav-applications.html
21. Wang, A., Wang, P., Miao, X., Li, X., Ye, N. & Liu, Y. (2020). A review on non-terrestrial wireless technologies for Smart City Internet of Things. *SAGE journals*, 16(6). https://doi.org/10.1177%2F1550147720936824

PRIEDAI

A priedas. Ryšio sistemos modelio programinės įrangos kodas.
B priedas. „pMDDL2450“ duomenų pralaidumo eksperimentų rezultatai.

A priedas

Ryšio sistemos modelio programinės įrangos kodas.

```
1 from cmath import log10, sqrt
2 from PIL import Image
3
4 daznis = input ('Koks sistemoje naudojamas daznis (MHz)?\n')
5 dazn = int (daznis)
6 if 2407 <= dazn <= 2477:
7     antsiust = input ('Koks yra siustuvo antenos stiprinimas
dBi)?\n')
8     Gt  = int (antsiust)
9     antimt = input ('Koks yra imtuvo antenos stiprinimas
(dBi)?\n')
10     Gr = int (antimt)
11     siustgalia = input ('Kokia siustuvo naudojama galia
(dBm)?\n')
12     Pt = float (siustgalia)
13
14     if 7 <= Pt <= 30:
15         Pt = Pt/2
16         atstumas = input ('Kokiu atstumu norima skristi (km)?
\n')
17         km = float (atstumas)
18         aukstis = input ('Kokiame aukstyje planuojama skristi
(m)? \n')
19         h = int (aukstis)
20         h1 = h/1000
21         skl = sqrt((km ** 2) + (h1 ** 2))
22         skl = float(skl.real)
23         L = 32.44+20*log10(skl)+20*log10(dazn)
24         L = float(L.real)
25         Pr = Pt + Gt + Gr - L
26         L1 = "{:.0f}".format(L)
27         Pr1 = "{:.0f}".format(Pr)
28         print ('\nLaisvosios erdves kelio praradimas: ', L1, '
dB')
29         print ('RSSI: ', Pr1, ' dBm')
30
31         if -65 < Pr:
32             print ('\nTiketina vidutine duomenu sparta aukstesne
nei 13 Mb/s')
33             print ('Rekomenduojama moduliacija: 64-QAM')
34             print ('Tiketina perduodama vaizdo raiska: \n' +
'Puiki - 2160p 4K): 3480x2160 arba Labai gera - 1440p (2K): 2560x1440,
30 kadru/s, H.265 \n' + 'Labai gera - 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s,
H.264')
35             print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
26             print ('Rekomenduojamas aukstis: 5-20 metru')
37             im = Image.open("65irgeresne.png")
38             im.show()
39
40         if -65 >= Pr >= -67:
41             print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
12,6 Mb/s su 1,7 Mb/s paklaida ')
42             print ('Rekomenduojama moduliacija: 64-QAM')
43             print ('Tiketina moduliacija: 50 % - 64-QAM, 50 % -
16-QAM')
```

```
     44             print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Labai gera
- 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Gera - 1080p (FHD):
1920x1080, 30 kadru/s, H.264')
     45             print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
     46             print ('Rekomenduojamas aukstis: 5-20 metru')
     47             im = Image.open("6567rssi.png")
     48             im.show()
     49
     50         if -67 > Pr >= -72:
     51             print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
12 Mb/s su 1,9 Mb/s paklaida ')
     52             print ('Rekomenduojama moduliacija: 16-QAM')
     53             print ('Tiketina moduliacija: 37 % - 64-QAM, 63 % -
16-QAM')
     54             print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Labai gera
- 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Gera - 1080p (FHD):
1920x1080, 30 kadru/s, H.264')
     55             print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
     56             print ('Rekomenduojamas aukstis: 5-20 metru')
     57             im = Image.open("6567rssi.png")
     58             im.show()
     59
     60         if -72 > Pr >= -76:
     61             print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
9,2 Mb/s su 1,5 Mb/s paklaida ')
     62             print ('Rekomenduojama moduliacija: 16-QAM')
     63             print ('Tiketina moduliacija: 90 % - 16-QAM, 10 % -
QPSK')
     64             print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Labai gera
- 1440p (2K): 2560x1440, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Gera - 1080p (FHD):
1920x1080, 30 kadru/s, H.264')
     65             print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
     66             print ('Rekomenduojamas aukstis: 10-40 metru')
     67             im = Image.open("7276rssi.png")
     68             im.show()
     69
     70         if -76 > Pr >= -79:
     71             print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
6,4 Mb/s su 2,1 Mb/s paklaida ')
     72             print ('Rekomenduojama moduliacija: 16-QAM')
     73             print ('Tiketina moduliacija: 55 % - 16-QAM, 45 % -
QPSK')
     74             print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Gera -
1080p (FHD): 1920x1080, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Vidutiniska - 720p
(HD): 1280x720, 30 kadru/s, H.264')
     75             print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
     76             print ('Rekomenduojamas aukstis: 10-50 metru')
     77             im = Image.open("7679rssi.png")
     78             im.show()
     79
     80         if -79 > Pr >= -83:
     81             print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad
4 Mb/s su 1,3 Mb/s paklaida ')
     82             print ('Rekomenduojama moduliacija: QPSK')
     83             print ('Tiketina moduliacija: 25 % - 16-QAM, 75 % -
QPSK')
```

```
            print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Vidutiniska - 720p (HD): 1280x720, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Vidutiniska - 720p (HD): 1280x720, 30 kadru/s, H.264')
            print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
            print ('Rekomenduojamas aukstis: 10-50 metru')
            im = Image.open("7983rssi.png")
            im.show()

        if -83 > Pr >= -86:
            print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad 1,8 Mb/s su 0,8 Mb/s paklaida ')
            print ('Rekomenduojama moduliacija: QPSK')
            print ('Tiketina moduliacija: 67 % - QPSK, 33 % - BPSK')
            print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Prasta - 480p:854x480, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Prasta - 480p:854x480, 30 kadru/s, H.264')
            print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
            print ('Rekomenduojamas aukstis: 15-50 metru')
            im = Image.open("8386rssi.png")
            im.show()

        if -86 > Pr >= -89:
             print ('\nVidutine duomenu sparta: 68% tikimybe, kad 1,1 Mb/s su 0,6 Mb/s paklaida ')
             print ('Rekomenduojama moduliacija: BPSK')
             print ('Tiketina moduliacija: 40 % - QPSK, 60 % - BPSK')
             print ('Perduodama vaizdo raiska: \n' + 'Prasta - 480p:854x480, 30 kadru/s, H.265 \n' + 'Labai prasta - 360p:640x360, 30 kadru/s, H.264')
             print ('Horizontalus atstumas: ', km, ' km')
             print ('Rekomenduojamas aukstis: 20-50 metru')
             im = Image.open("8689rssi.png")
             im.show()

        if Pr<=-90:
             print('\nRysio neturesime')
             im = Image.open("90rssi.png")
             im.show()
    else:
        print ('Nurodyta netinkama galia, turi buti nurodoma 7-30 dBm diapozone')
else:
    print ('Netinkamas daznis, turi buti nurodomas 2407-2477 MHz diapozone')
```

B priedas.

„pMDDL2450“ duomenų pralaidumo eksperimentų rezultatai.

1 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, kai atstumas tarp modulių 25 m (sudaryta autoriaus).

Moduliacija	IPerf pralaidumas, Mb/s	Galia, dBm	RSSI, dBm
8 MHz kanalo plotis			
BPSK_1/2	3,03	7	-70
QPSK_1/2	5,49	7	-70
QPSK_3/4	8,19	7	-70
16-QAM_1/2	10,67	7	-70
16-QAM_3/4	15,29	7	-70
64-QAM_2/3	20,29	7	-70
64-QAM_3/4	21,11	7	-70
64-QAM_5/6	22,25	7	-70
4 MHz kanalo plotis			
BPSK_1/2	1,52	7	-70
QPSK_1/2	2,84	7	-70
QPSK_3/4	4,13	7	-70
16-QAM_1/2	5,4	7	-70
16-QAM_3/4	7,84	7	-70
64-QAM_2/3	10,1	7	-70
64-QAM_3/4	11,2	7	-70
64-QAM_5/6	12,18	7	-70

2 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, kai atstumas tarp modulių 50 m (sudaryta autoriaus).

Moduliacija	IPerf pralaidumas, Mb/s	Galia, dBm	RSSI, dBm	SNR, dB
8 MHz kanalo plotis				
BPSK_1/2	3,03	7	-72	27
QPSK_1/2	5,38	7	-72	27
QPSK_3/4	7,86	7	-72	27
16-QAM_1/2	10,67	7	-72	27
16-QAM_3/4	15,29	7	-72	27
64-QAM_2/3	17,8	7	-72	27
64-QAM_3/4	17,9	7	-72	27
64-QAM_5/6	18,21	7	-72	27
4 MHz kanalo plotis				
BPSK_1/2	1,52	7	-72	27
QPSK_1/2	2,79	7	-72	27
QPSK_3/4	4,13	7	-72	27
16-QAM_1/2	5,4	7	-72	27
16-QAM_3/4	7,6	7	-72	27
64-QAM_2/3	9,89	7	-72	27
64QAM_3/4	11,2	7	-72	27
64-QAM_5/6	9,13	7	-72	27

3 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, kai atstumas tarp modulių 100 m (sudaryta autoriaus).

Moduliacija	IPerf pralaidumas, Mb/s	Galia, dBm	RSSI, dBm	SNR, dB
8 MHz kanalo plotis				
BPSK_1/2	3,03	7	-79	19
QPSK_1/2	5,38	7	-79	19
QPSK_3/4	8,02	7	-79	19
16-QAM_1/2	10,45	7	-79	19
16-QAM_3/4	14,66	7	-79	19

64-QAM_2/3	7,04	7	-79	19
4 MHz kanalo plotis				
BPSK_1/2	1,52	7	-79	19
QPSK_1/2	2,90	7	-79	19
QPSK_3/4	4,13	7	-79	19
16-QAM_1/2	5,29	7	-79	19
16-QAM_3/4	7,69	7	-79	19
64-QAM_2/3	6,94	7	-79	19

4 lentelė. „pMDDL2450“ eksperimentų rezultatai, kai atstumas tarp modulių 150 m (sudaryta autoriaus).

Moduliacija	Iperf pralaidumas, Mb/s	Galia, dBm	RSSI, dBm	SNR, dB
8 MHz kanalo plotis				
BPSK_1/2	2,52	7	-84	14
QPSK_1/2	4,72	7	-84	14
QPSK_3/4	4,91	7	-84	14
16-QAM_1/2	4,36	7	-84	14
4 MHz kanalo plotis				
BPSK_1/2	1,27	7	-84	14
QPSK_1/2	2,34	7	-84	14
QPSK_3/4	3,24	7	-84	14
16-QAM_1/2	4,21	7	-84	14