



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Ramūnas Vaitkevičius

BEPILOČIŲ ORLAIVIŲ SKRAIDYMO ZONŲ APRIBOJIMO
BŪDŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vitas Grimaila

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA

BEPILOČIŲ ORLAIVIŲ SKRAIDYMO ZONŲ APRIBOJIMO
BŪDŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

Vadovas

Doc. dr. Vitas Grimaila

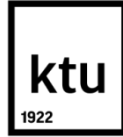
Recenzentas

Doc. dr. Saulius Japertas

Projektą atliko

Ramūnas Vaitkevičius

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Ramūnas Vaitkevičius

(Studento vardas, pavardė)

Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (kodas 621H64001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Bepiločių orlaivių skraidymo zonų apribojimo būdų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 26 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Ramūno Vaitkevičiaus** baigiamasis projektas tema „Bepiločių orlaivių skraidymo zonų apribojimo būdų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Vaitkevičius, Ramūnas. Bepiločių orlaivių skraidymo zonų apribojimo būdų tyrimas. Telekomunikacijų inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vitas Grimaila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Telekomunikacijų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *Bepilotis orlaivis, WI-FI, Priimto signalo lygis, Signalo stiprumo indikatorius.*

Kaunas, 2017. 68 p.

SANTRAUKA

Darbo tikslas – sukurti apibendrintą civilinių orlaivių (dronų) skraidymo zonų apribojimo būdą, pagrįstą radijo technologijos panaudojimu.

Analitinėje dalyje nagrinėjamos bepiločio orlaivio blokavimo technologijos, jos privalumai ir trūkumai bei pritaikymai konkrečiam Wi-Fi valdomo drono blokavimui. Taip pat įvertinamas patikimumo faktorius įrangos veiksmingumui ir braižomi algoritmai drono aptikimui ir neutralizavimui.

Tiriamajoje darbo dalyje sudaromas conceptualus drono, jo valdytojo ir neutralizatoriaus modelis, analizuojami signalo sklidimo, slopinimo rezultatai ir įvertinami kelių programinių įrangų gauti rezultatai

Vaitkevičius, Ramūnas. Investigation of Unmanned Aerial Vehicles Flying Zones Restrictions. Master's thesis in Telecommunications engineering master degree / supervisor doc. dr. Vitas Grimaila. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Telecommunications.

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

Key words: *UAV, BO, WI-FI, RSL, RSSI*

Kaunas, 2017. 68 p.

SUMMARY

The goal of this work is to create a summary of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Flying Zones Restriction method based on use radio technology.

Analysis part of this work deals with UAV jamming technologies, advantages and disadvantages, and application for the drone's restriction using Wi-Fi technology. Moreover, there is evaluated reliability for the equipment efficiency and created algorithms for the drones detections and neutralizations.

Project part of work – formed conceptual neutralization model of drone operator and jammer, and analysed results of a signal level, jammed signal. By the way, evaluated a few software solutions for plotting possibilities and concluded the results.

TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS	6
ĮVADAS	7
1. DRONŲ PARAMETRŲ IR BLOKAVIMO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ	10
1.1. Dronų blokasimas	11
1.2. Bepiločio orlaivio aptikimo galimybės	11
1.2.1. Drono neutralizavimo įvertinimas	14
1.3. Wi-Fi signalo matematinis išreiškimas	15
2. METODINĖ DALIS	19
2.1. Detektavimo sistemos ir funkcijos	19
2.1.1. Dronų kategorijos ir klasės	20
2.2. Dronų aptikimo pavyzdys	20
2.3. Bevielių tinklų slopinimas	24
2.4. Dalinis RF bangų juostos slopinimas	30
3. BO NEUTRALIZAVIMO TECHNOLOGIJOS ĮVERTINIMAS	33
3.1. Sistemos patikimumo įvertinimas	33
3.2. Laisvosios erdvės modelis ir jo įvertinimas Mathcad programinės įrangos pagalba	35
3.3. Drono blokasimo modeliavimas ir jo rezultatų įvertinimas	38
3.4. Drono blokasimo modeliavimas ir rezultatų įvertinimas Matplotlib programinės įrangos pagalba	44
3.4.1. Slopintuvo ir drono valdytojo signalų blokasimo riba	51
3.4.2. Slopintuvų projektavimas ir tam tikros jų vietos pasirinkimas teritorijoje	55
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	65
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	66
PRIEDAI	69
Priedas 1. Slopintuvo elektroniniai komponentai [18]	70
Priedas 2. Slopintuvo signalo lygio keičiantis atstumui duomenys (žr. 3.7 pav.)	71
Priedas 3. Slopintuvo ir drono valdytojo signalo lygių duomenys (žr. 3.8 pav.)	72
Priedas 4. Slopintuvo ir drono signalo lygių duomenys (žr. 3.9 pav.)	73
Priedas 5. Taško informacija - duomenys	74
Priedas 6. Sukurtas programos kodas ir realizuotas su Matplotlib įrankiu	75
Priedas 7. Dalinis slopinimas (3D) dronui esant 58 metrų aukštyje	80

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

A/D	Skaitmeninis/analogas signalo keitiklis (angl. <i>Digital/Analog signal converter</i>)
AUDS	Anti-dronų gynybos sistema
BER	Bitų klaidų rodiklis (angl. <i>Bit Error Rate</i>)
BO	Bepilotis orlaivis arba kitaip Dronas
BPF	Juostinis filtras (angl. <i>Band pass filter</i>)
D/A	Skaitmeninis/analogas signalo keitiklis (angl. <i>Digital/Analog signal converter</i>)
DoS	Ryšio atjungimo ataka (angl. <i>Denial-of-Service</i>)
EIRP	Efektyvi izotropinė spinduliavimo galia (angl. <i>Effective Isotropic Radiated Power</i>)
FEC	Klaidų korekcija (angl. <i>Forward error correction</i>)
GPS	Globali vietos nustatymo sistema (angl. <i>Global Positioning System</i>)
ID	Unikalus kodas
ISM	Pramoninė, mokslinė ir medicininė dažnių juosta (angl. <i>The industrial, scientific and medical radio band</i>)
LLC	Loginės sąsajos kontroliavimo sluoksnis (angl. <i>Logical link control</i>)
LNA	Žemų triukšmų stiprintuvas (angl. <i>Low Noise Amplifier</i>)
LO	Stiprintuvas (angl. <i>Local Oscillator</i>)
MAC	Duomenų perdavimo sluoksnis (angl. <i>Media access control</i>)
MIMO	Anteninė technologija (angl. „ <i>Multiple – input and multiple – output</i> “)
MTBF	Vidutinis laikas tarp gedimų (angl. <i>Mean Time Between Failures</i>)
MTTF	Vidutinis laikas iki gedimo (angl. <i>Mean Time To Failure</i>)
MTTR	Vidutinis gedimo šalinimo laikas (angl. <i>Mean Time To Repair</i>)
OSI	Ryšio protokolų modelis (angl. <i>Open Systems Interconnection Reference Mode</i>)
PA	Galios stiprintuvas (angl. <i>Power Amplifier</i>)
PC	Asmeninis kompiuteris (angl. <i>Personal Computer</i>)
PDR	Paketų perdavimo rodiklis (angl. <i>Packet delivery ratio</i>)
RF	Radio dažnis (angl. <i>Radio Frequency</i>)
RSL	Priimto signalo lygis (angl. <i>Received Signal Level</i>)
RSSI	Signalų stiprumo indikatorius (angl. <i>received signal strength indicator</i>)
TCP	Standartinis duomenų perdavimo protokolas (angl. <i>Transmission Control Protocol</i>)
WI-FI	Bevielio (belaidžio) ryšio technologija
UAV	Nepilotuojamas orlaivis (angl. <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
UDP	Datagramų perdavimo protokolas (angl. <i>User Datagram Protocol</i>)
λ	Gedimų dažnis (intensyvumas)

IVADAS

Šiuo metu pasaulyje pradeda populiarėti nepilotuojami skraidomi objektai, robotai, kurie jau yra įgavę drono vardą. Jie yra ir bus puikūs pagalbininkai įvairiose srityse (nuo karinės pramonės iki žemės ūkio), pagerins ekonomiką ir suteiks naujų darbo vietų. Dronai yra greitesni už žmogų, gali pasiekti daug aukštesnes vietas, funkcionuoti sunkiai pasiekiamose ekstremaliose vietovėse ir, be abejo, sumažina karinių veiksmų išlaidas. Taip pat, suregulius visą infrastruktūrą ir sukūrus įstatymus būtų realu skraidinti nedidelio svorio pašto siuntas ar stebėti gatves iš viršaus, taip padedant valstybės tarnautojams. Be to, jau Kinijoje yra sukurtas dronas skraidinantis žmogų ir sugebantis pasiekti iki 3,5 km aukštį. Jis sveria 100 kg, baterija veikia iki 23 minutes skrydžio ir yra įkraunamas per dvi valandas. Šią transporto priemonę žada pradėti pardavinėti jau šiais metais, ji bus visuomet sujungta su kontrolės centru, kad iškilus netikėtiems piloto valdymo sutrikimams, agregatas būtų sėkmingai nutupdytas valdant kontrolės centrui. Bet sugrįžtant prie nepilotuojamų orlaivių, šiuolaikiniai dronai turi šias funkcijas:

- tabilaus (vienodo) aukščio išlaikymas nepriklausomai nuo oro sąlygų;
- stabilizavimasis vienoje vietoje – tai jau nebe valdančiojo asmens funkcija, o programinės įrangos darbas;
- dvimatė kontrolė, pavyzdžiui, panaudojant žemėlapi, nurodžius skrydžio pabaigos koordinates, drono programinė įranga įvertina reljefą ir parenka optimalią skrydžio trajektoriją;
- iš anksto nustatyti maršrutai, valdomi programinėmis įrangomis. Įmanoma nustatyti maršrutą pirmyn ir atgal, taip pat nesirūpinti jo skrydžiu iki grįžimo vietos;
- saugiausio maršruto pasirinkimas, karinėje pramonėje gavus pavojaus signalą iš centrinės bazės, dronas sugebės pakeisti nustatytą maršrutą. Šiuo atveju, yra didelė tikimybė, kad priešų perimtas dronas sugebės pasprukti pasirenkant saugesnę skrydžio trajektoriją;
- ir kt.

Taigi, karinėje pramonėje nepilotuojami orlaiviai (angl. *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) bus naudojami kurti aukštomis kibernetinėms technologijoms, pavyzdžiui, vienas naujausių Šiaurės Dakotoje laikomas „Global Hawk“ dronas, gali apskrieti net pusę Žemės rutulio. Tai reiškia, jog jis sugebės puikiai atlikti cheminio ar branduolinio ginklo paieškos operacijas, pavyzdžiui, Sirijos ar Šiaurės Korėjos teritorijose (žr. *1.1 pav.*).



1.1 pav. „Global Hawk“ dronas [16]

Lietuvoje nėra sukurta priemonių draudžiančių ar blokuojančių dronus įskristi į uždraustą teritoriją. Šis klausimas yra prioritetinis, tačiau kol kas jis yra retorinis. Be to, tai yra labai svarbi problema Europos mastu, kurioje skraidančių robotų skaičius/kiekis didėja.

Šalia daugybės naudingų dalykų, kuriems galima pritaikyti dronus, patekę į piktavalių rankas jie pradeda kelti pavojų viešajam saugumui ir asmenų privatumui, todėl būtina sukurti patikimas ir nebrangias technologijas, apsaugančias nuo minėtų pavojų. Šis klausimas yra aktualus ne tik respublikiniu, bet ir visos Europos Sąjungos (ES) lygiu. Prancūzija ir Didžioji Britanija šiuo metu yra daugiausiai dronų turinčios Europos valstybės. D. Britanijos valdžia dar tik svarsto apie dronų valdytojų registravimo sistemą ir piliečių privatumo pažeidimo nuobaudų nustatymą, tuo tarpu Prancūzija jau turi dronų vartotojų registravimo sistemą ir yra numačiusi baudas už neteisėtą jų naudojimą arba net laisvės atėmimą iki 5-erių metų. Lietuvoje populiarėjančių dronų naudojimą reglamentuoja „Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės“ ir mažesniems nei 25 kg nereikalingas registravimas ar kitoks dokumentas. Tačiau yra taisyklės, kurių neturėtų peržengti vartotojas, tačiau už jų nesilaikymą dar nėra nustatytų įstatymu įteisintų nuobaudų. Vis dėlto, vartotojas privalo valdyti tokį skraidantį robotą netoliau nei per 1 km ir privalo laikytis nemažesnio nei 50 m atstumo nuo žmonių, automobilių, pastatų ar kitų kliūčių. Jei atsitiktinai dronas išskrenda iš apžvalgos lauko ribų ir dingsta, tokiu atveju turi būti informuotas artimiausias skrydžių centras [10].

Vis dėlto, reikėtų sunerimti dėl dronų suteikiamos galimybės įskristi į privačią teritoriją, galimybę fiksuoti, filmuoti, įrašyti ar kitaip registruoti ir stebėti kito žmogaus ar įmonės veiklą ir daryti blogą įtaką ar nusikaltimus. Todėl reikia sukurti sistemas fiksuojančias ir ribojančias tokių skraidančių robotų įsiveržimą į uždraustas teritorijas ar net nutupdyti tokias skraidykles, tolimesniam įrangos tyrimui ir jos valdytojo nustatymui.

Viena iš problemiškesnių vietų šiuo metu yra kalėjimai Lietuvoje, kuriuose įmetama vis daugiau ir daugiau draudžiamų daiktų (telefonų ir kitų išmaniųjų prietaisų). Marijampolės kalėjime jau yra įdiegta judriojo ryšio ir dronų blokavimo sistema, kuriai dar nepavyko perimti ir nutupdyti nei vieno drono tolimesniam jo valdytojo identifikavimui, nors bandymų ir eksperimentų metu perėmimas drono buvo vykdomas. Išvada viena – dronai nuolat tobulinami ir jų perėmimas tampa vis

sudėtingesnis, todėl ir blokavimo sistemos turi būti lygiagrečiai atnaujinamos [34].

Tad šio **darbo tikslas – sukurti bepiločių orlaivių (dronų) skraidymo zonų apribojimo būdą, pagrįstą radijo technologijos panaudojimu.**

Šiam tikslui pasiekti būtina:

1. Išanalizuoti šiuolaikinių dronų ir jų slopintuvų galimybes;
2. Atlikti mokslinių darbų susijusių su dronų blokavimu, neutralizavimu, perėmimu technologijų analizę;
3. Sudaryti dronų skraidymo zonų apdorojimo algoritmus apimančius stebėjimą, aptikimą, neutralizavimą ir modeliavimą;
4. Atlikti drono, veikiančio nelicencijuotame dažnyje blokavimo sistemos modeliavimą ir rezultatų analizę, pasinaudojant keliomis programinėmis įrangomis;
5. Pasiūlyti slopintuvų išsidėstymo schemą pasirinktai teritorijai apsaugoti.

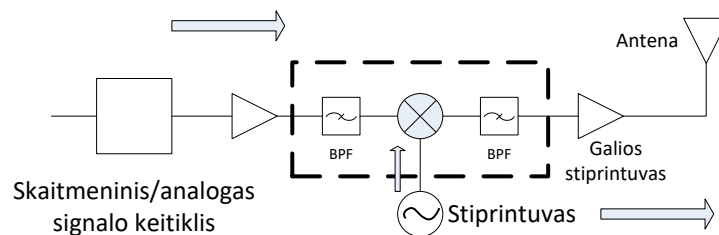
1. DRONŲ PARAMETRŲ IR BLOKAVIMO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ

Dažniausiai dronai naudoja USB ir WiFi 802.11b/g sąsajas dėl mobiliųjų prietaisų paprastesnio prisijungimo prie jų, tačiau šias sąsajas įmanoma paveikti ar perrinti, įsilaužus į sistemą ar į ryšio traktą. Todėl svarbu sujungti dronus su valdymo prietaisais kuo sunkesniu šifravimo ir kriptografijos metodu. Ryšio sąsaja vyksta per UDP protokolą (kuris yra iš OSI modelio transporto lygmenio). Į jį panašus yra TCP protokolas, naudojamas IP technologijose internete. UDP protokolas yra paprastesnis, tačiau negaunamas atsakymas ar išsiųsti duomenys nukeliavo adresatui ar ne, tik matomas nusiųstos informacijos rezultatas. Taip pat nėra žinoma kokia tvarka priimama informacija ar tiesiog ji yra prarandama, nes šis protokolas neturi sujungimo seanso, tiesiog imtuvas priima paketus ir elgiasi pagal nurodymus. Jam nustatytas pirminis IP adresas 192.168.1.1. Drono sąsajoje yra trys UDP tipo prievadai:

- navigacijos prievadas = 5554
- vaizdo prievadas = 5555
- AT komandinis prievadas = 5556

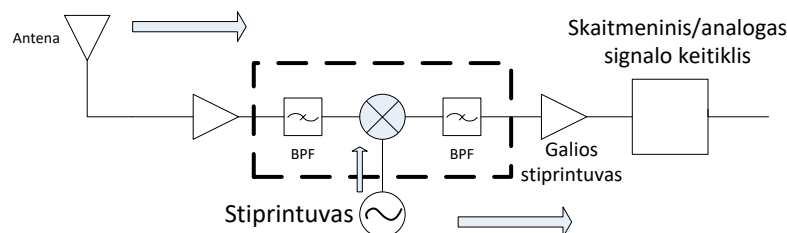
Pastarasis prievadas naudojams įvairioms komandoms siųsti, o navigacijos prievadas – atgauti saugomą informaciją iš drono į kompiuterį (bazinę stotį).

Siųstuvas (žr. 1.2 pav.) sudarytas iš maitinimo šaltinio, generatoriaus, modulatoriaus, stiprintuvo ir antenos, spinduliuojančios signalą tam tikru dažniu.



1.2 pav. Siųstuvo schema [15]

Imtuvas (žr. 1.3 pav.) sudarytas iš demodulatoriaus, generatoriaus, kvadratūrinio mikserio ir antenos, kuri priima siųstuvo signalą. Šiuo atveju, naudojama OFDM moduliacija, kuri perduoda duomenis naudojant skirtingas technologijas: BPSK, QPSK, QAM ir t.t.



1.3 pav. Imtuvo schema [15]

1.1. Dronų blokavimas

Mokslininkai Pietų Korėjoje įrodė, jog dronas gali būti paveikiamas ir garsu, t. y. pasitelkus garsą-triukšmą drono giroskopai yra išbalansuojami ir jis praranda skrydžio efektyvumą arba nukrenta ant žemės. Tai naujas ir perspektyvus būdas sustabdyti dronų invaziją į uždraustą zoną.

Nauja „Battelle“ inovacija sukūrė kitą dronų nukenksminimo prietaisą angl. „DroneDefender“. Tai padaro radijo bangų impulsais, 400 m spinduliu, įsiterpusios radijo bangos į drono ryšio sistemą, numalšina esamus kitus ryšius su drono valdytoju ir tuomet perima kontrolę. Šis radijo bangų ginklas tuo metu gali atlikti susinaikinimo ar kitas užprogramuotas funkcijas, nes tuo metu jau dronas tapo konfiskuotas ir jo valdymas perimtas. Praėjusiais metais prasidėjo šių prietaisų pardavimai, o šiuo metu planuojama plėsti pardavimus, nes yra jau keletas naujų kompanijų susidomėjusių tokiu ginklu, kaip apsauga nuo dronų invazijos ir informacijos nutekėjimo.

Jungtinės Karalystės „Brighter“ kompanija sukūrė anti-dronų gynybos sistemą (AUDS), kuri gali net 8 km atstumu aptikti skraidantį droną savo teritorijoje ir per 15 sekundžių perimti jo valdymą, be jokio fizinio kontakto, visas procesas nuo aptikimo, perėmimo ir neutralizavimo trunka apytiksliai 25 s. Ji susideda iš elektroninio skanavimo radaro, skenuojančio teritoriją visą parą (24/7), kuris aptinka objektus ore su infraraudonomis ar dienos šviesos kameromis ir galiausiai blokuoja drono ryšio sistemas ir sėkmingai jį nutupdo. Sistema skenuoja didesnę teritorijos plotą negu yra reikalinga, kad aptiktų artėjantį nepageidaujamą „skraiduolį“ ir įvertinant vėlavimus ir sistemos veikimo laikus, laiku nukenksmintų ar sustabdytų informacijos šnipą – droną.

1.2. Bepiločio orlaivio aptikimo galimybės

Tarkime, tikslo funkcija – aptikti ir neutralizuoti civilinį droną valdomą tik 2,4 GHz dažniu (Wi-Fi technologija) kalėjimo teritorijoje, 120 m spinduliu nuo centrinio taško. Iš pradžių būtų vykdomas jų aptikimas (3 būdais) vėliau vykdomi neutralizavimo sistemos ir prižiūrinčiojo operatoriaus veiksmai. Blokuojami civiliniai dronai būtų valdomi kaip ir buvo paminėta nelicenzijuotu dažniu ir jie papildomai galėtų perduoti duomenis (vaizdo, padėties ir kt.). Šie papildomi duomenų perdavimo kanalai nebūtų blokuojami, dėl reikiamų leidimų ir papildomų problemų sumažinimo, susijusių su įrangos veikimu.

Sistema įvertinama ir charakterizuojama šiais pagrindiniais parametrais:

A. Drono aptikimo tikimybe:

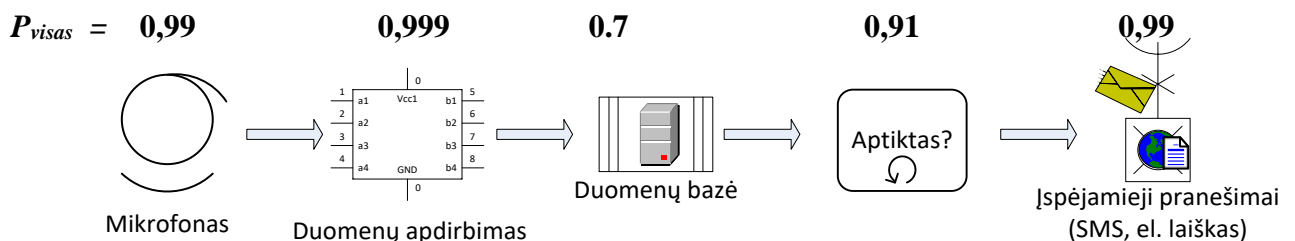
- Garsu (žr. 1.4 pav.) – naudojant mikrofoną (20%)
- Vaizdu (žr. 1.5 pav.) – naudojant kamerą (40%)
- RF imtuvu (žr. 1.6 pav.) – naudojant spektroanalizatorių (40%)

- B. Drono neutralizavimo tikimybe;
- C. Sistemos patikimumo rodikliais (*MTBF*);
- D. Žmogiškojo patikimumo faktoriumi.

Aptikimo parametrai yra vienas nuo kito nepriklausomi, sistema suveiktų pati, jei visi 3 aptikimo būdai identifikuotų ieškomą objektą vienu metu, tačiau ji taip pat informuos operatorių jeigu bent vienas iš trijų sistemos aptikimo būdų aptiktų bepilotį orlaivį (toliau BO). Todėl operatorius galėtų įvertinti situaciją ir atlikti tolimesnius veiksmus. Šiuo atveju, įmanomi keli kombinuoti variantai:

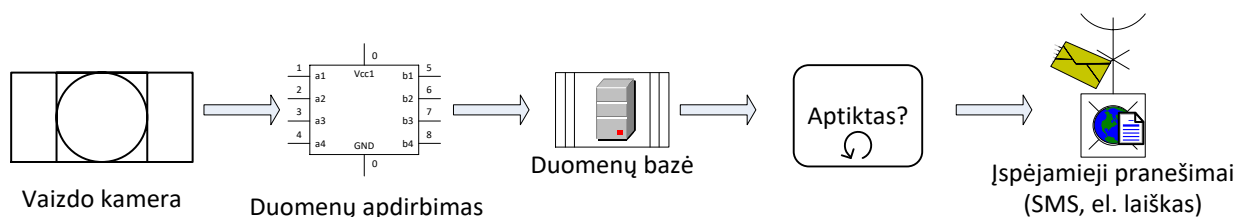
- garsas + vaizdas + RF imtuvas = 100% – idealus aptikimas;
- vaizdas + Garsas = 60% – dalinis aptikimas, kur sprendimą priima operatorius, todėl jo įtaka 40%;
- garsas + RF imtuvas = 60% – dalinis aptikimas, taip pat 40% operatoriaus įtaka;
- vaizdas + RF imtuvas = 80% – dalinis aptikimas, tik 20% lemia operatoriaus sprendimas;
- visi trys atsitiktiniai atvejai, kai operatoriaus maksimali įtaka gali būti 80% – pasinaudojant mikrofonu.

Garso aptikimo atveju didžiausią patikimumo vaidmenį atliks įrangos patikimumas, todėl jos tikimybė, kad sisteminė dalis atpažins droną apskaičiuota apačioje (žr. 1.4 pav.)

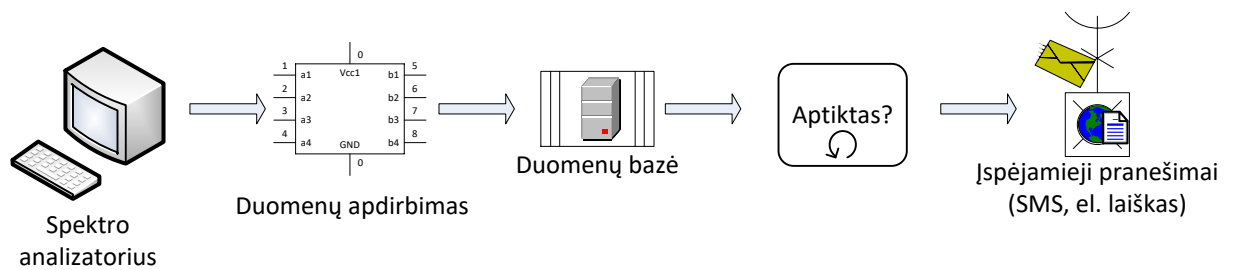


1.4 pav. Dronų aptikimo garsu loginė – funkcinė schema [17]

$P_{visas} = 0,6237$



1.5 pav. Dronų aptikimo vaizdu loginė – funkcinė schema [17]



1.6 pav. Dronų aptikimo spektro analizatoriumi loginė – funkcinė schema [17]

Šiuo atveju, galime apibrėžti konkrečias sąlygas prie kurių sistema įsijungtų pati ir prie kurių prireiks operatoriaus įsikišimo. Jei

$$P_A > 60\%$$

P_A – aptikimo tikimybė.

Sistema nesuveiktų automatiškai ir pateiktų rezultatus operatoriui, kai:

$$P_A \leq 60\%$$

Kai neutralizavimo sistema suveiktų, operatorius turėtų galimybę atjungti ją esant klaidingai informacijai. Čia atsiranda ir kitas aspektas – žmogiškasis faktorius. Šiuo atveju, įvertinant operatoriaus poilsio pertraukėles įvedama sąlyga, jog įrangai prižiūrėti reikalingi minimaliai 2 operatoriai vienu metu, kurie kompensuos vienas kito kavos pertraukėles ir tokiu atveju įranga būtų prižiūrima visą laiką. Norint, kad būtų išpildyta 24/7 sąlyga, neužtenka 2 darbuotojų, todėl minimaliai jų reikia bent 10. Bet žinoma, kad darbuotojo darbo efektyvumas mažėja dirbant kuo daugiau valandų. Nustatyta, kad darbo patikimumas – pastabumas pastebimai mažėja per dieną dirbant virš 6 h, o jau viršijus 10 – 11 h efektyvumas tampa artimas 50% (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė Darbuotojo rodikliai (%) pagal darbo valandų kiekį per parą [39]

	Darbo laikas (val.)					
	1 – 6	7	8	9	10	11
Darbingumas (% pagal normą)	1	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
Klaidų kiekis (%)	0,04	0,1	0,15	0,22	0,29	0,36
Realus laikas, įvertinant klaidų taisymą	6,25	1,11	1,18	1,28	1,4	1,56
Rezultatų patikimumas, įvertinant loginį tikrinimą ir klaidų taisymą (%)	0,999	0,996	0,994	0,991	0,988	0,985
Patikimumo viršutinė riba (%)	0,9995	0,998	0,997	0,995	0,993	0,991
Patikimumo apatinė riba (%)	0,997	0,993	0,991	0,987	0,983	0,979

1.2.1. Drono neutralizavimo įvertinimas

Po aptikimo suveiks radijo bangų slopintuvas ir nuolatos veiks aptiktą BO pagal rekomenduotinas signalo galios ribines normas. Tokiu atveju, neutralizavimo tikimybė P_N , o pilna sistemos neutralizavimo tikimybė:

$$P = P_A \cdot P_N; \quad (1.1)$$

čia P_N – neutralizavimo tikimybė;

$$P_A = P_G \cdot P_V \cdot P_{WiFi}; \quad (1.2)$$

čia P_G – Aptikimo garsu tikimybė;

P_V – Aptikimo vaizdu tikimybė;

P_{WiFi} – Wi-Fi aptikimo vaizdu tikimybė;

$$P_N = P_I \cdot P_{Power} \cdot P_{PC} \cdot P_{Cloud} \cdot P_{\check{z}} \cdot P_S; \quad (1.3)$$

čia P_I – Imtuvo veikimo tikimybė;

P_{Power} – Stiprintuvo veikimo tikimybė;

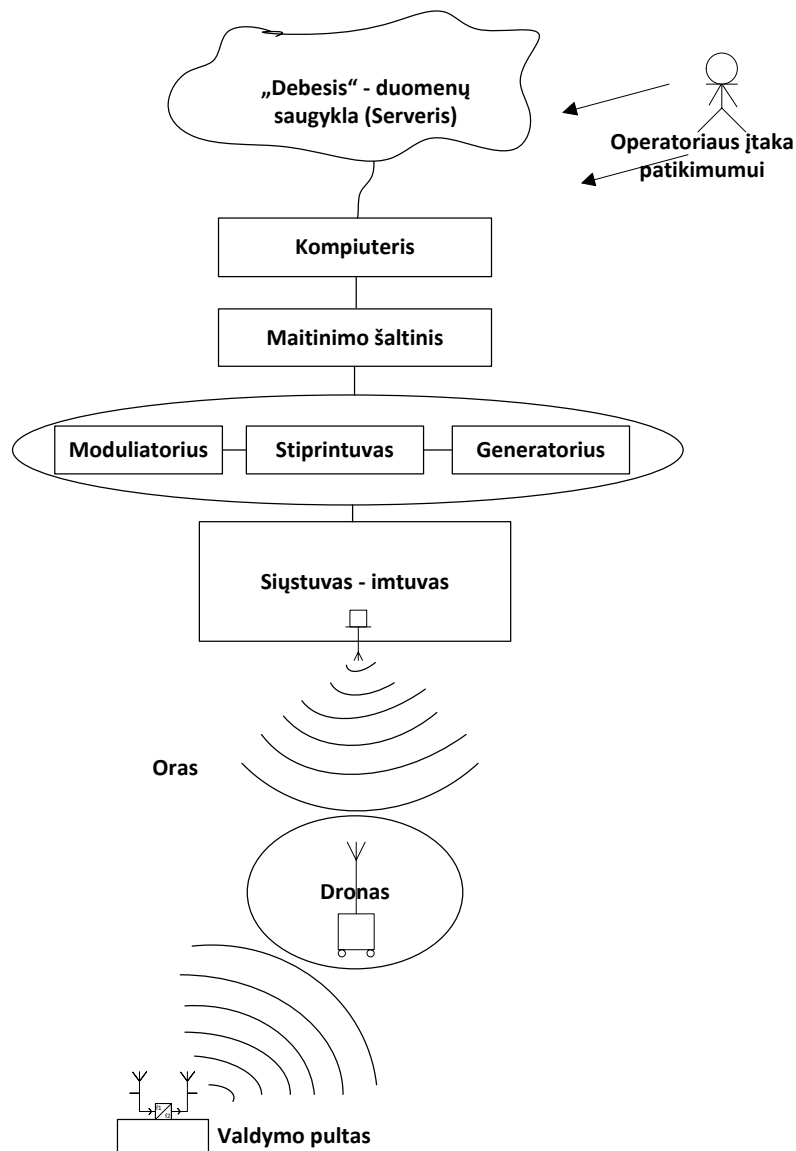
P_{PC} – Kompiuterio veikimo tikimybė;

P_{Cloud} – „Debesies“ veikimo tikimybė;

$P_{\check{z}}$ – Operatoriaus patikimumo tikimybė;

P_S – Siųstuvo veikimo tikimybė;

Sistema privalo veikti patikimai, todėl būtina įvertinti jos patikimumą, nes nukenksminus netikrą droną – bus teisminiai ginčai. Kiekvienos funkcinės dalies efektyvumas – tai kiekvienos dalies betarpišas veikimas, kuo didesnę laiko tarpą apimantis parametras $MTTF$, $MTBF$, $MTTR$ – priklausys nuo sistemos projektavimo, įrangos, komponentų, programinės įrangos ir žmogiškųjų faktorių.

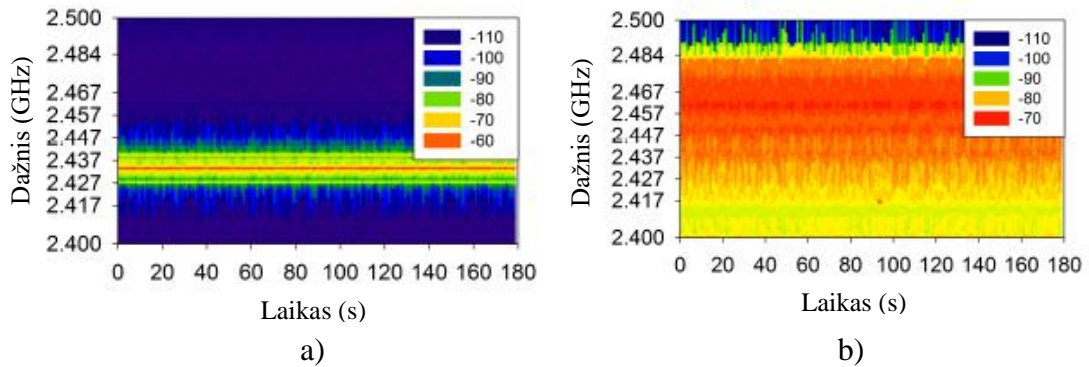


1.7 pav. Dronų neutralizavimo teorinė blokinė schema

1.3. Wi-Fi signalo matematinis išreiškimas

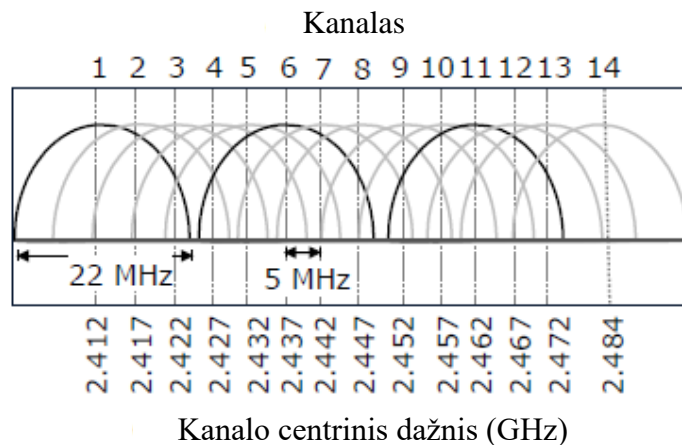
Kadangi Wi-Fi turi net 14 skirtingų perdavimo persidengiančių kanalų, o kiekvienas iš jų yra 22 MHz kanalo pločio, tai pirmasis, šeštasis ir vienuoliktas kanalai yra pagrindiniai – ortogonalūs. [27]

Pavyzdys – palyginimas video kameros ir slopintuvo spektrų, kaip signalai tarpusavyje pasiskirsto 2,4 GHz dažnio ruože. Iš slopintuvo signalo spektro galima nesunkiai nuspręsti, jog jis sėkmingai paveiks ne tik video kameros veikimą, bet ir kitų prietaisų darbą, tokių, kurie dirba šiame dažnių diapozone. [37]



1.8 Pav. a) Bevielės video kameros spektras ir b) bevielio slopintuvo spektras [37]

Kadangi tarp tokių pačių ar artimų kanalų vyksta signalų interferencija, todėl stengiamasi jos išvengti juos atskiriant bent 22 MHz dažnio kanalu. Pagal 1.9 paveikslą sprendžiame, kad iš vienuolikos populiariausių Wi-Fi kanalų galime sudaryti tokius kanalų junginius, kurie neinterferuotų tarpusavyje: {1,6,11}, {2,7}, {3,8}, {4,9} ir {5,10}. Populiariausiai iš jų naudojamas yra pirmasis su trimis kanalais, kadangi galimas efektyvesnis panaudojimas rinkoje. [37]



1.9 Pav. Wi-Fi kanalų struktūra 2,4 GHz dažnio ruože [37]

Apskritai, bevieliai ryšiai susiduria su įvairiomis kliūtėmis, tokiomis kaip bevielio signalo sklaidimo silpninimas didėjant atstumui, signalo nebuvimas dėl didelių pastatų gabaritų, daugelio kelių signalo silpnėjimas, kai priimama keletas tokių pačių signalų (angl. multipath fading), tinklų interferencija, šiluminiai triukšmai – baltasis Gausinis triukšmas (AWGN). Kuriant tinklo infrastruktūrą, svarbu įvertinti ryšio infrastruktūros nuostolių įtaką sklindančiam bevieliumi signalui, kuris interferuoja su kitais sklindančiais signalais ir taip sumažinant sklindančio signalo galią tarp siųstuvo ir imtuvo. Čia taip pat veikia bevielio signalo sklaidimo charakteristikos dėl aplinkos veiksnių, įvertinus juos, signalo galią P_{rx} imtuve galime apskaičiuoti pagal formulę: [28]

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \prod_k Z_k}{R^{2b}}; \quad (1.4)$$

čia P_{tx} – galios vidurkis apskaičiuotas 1 metro atstumu nuo siųstuvo; b – amplitudinė nuostolių eksponentė; Z_k – nepriklausomi atsitiktiniai kintamieji (RVs), kurie randami priklausomai nuo sklidimo efektų tokių kaip fedingų; R – atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo.

Išraiška $1/R^{2b}$ apsprendžia nuostolius dėl atstumo, čia b yra priklausoma nuo aplinkos sąlygų ir gali būti nuo 0,8 (pastato viduje) iki 4 (didelėse apgyvendintose teritorijose). Kai $b=1$, įvertinamas sklidimas laisvąja erdve. Šis modelis (1.4) leidžia įvertinti įvairius sklidimo scenarijus įskaitant:

- Trajektorijos ilgis yra $Z_l = 1$;
- Trajektorijos ilgis ir Nakagami skirstinio fedingas: $Z_l = \alpha^2$, $\alpha^2 \sim G(m, 1/m)$;
- Trajektorijos ilgis ir lognormalinis pasiskirstymas: $Z_l = e^{2\sigma G}$, kur $G \sim N(0, 1)$, σ – jautrio koeficientas;
- Trajektorijos ilgis, Nakagami – fedingas, ir lognormalinis pasiskirstymas: $Z_l = \alpha^2$ su $\alpha^2 \sim G(m, 1/m)$ ir $Z_l = e^{2\sigma G}$ su $G \sim N(0, 1)$.

Tuo atveju, kai reikia rasti žemo dažnio išraišką (ELP), pasinaudojame kompleksiniais dydžiais:

$$Y(t) = \frac{\prod_k \sqrt{Z_k}}{R^b} \int h(t, \tau) X(t - \tau) d\tau; \quad (1.5)$$

čia $h(t, \tau)$ – kompleksinis kintamasis laike iš daugiarežinio žemo dažnio kanalo; $X(t)$ – ELP perduodamas signalas; h – vėlinimo linijos modelis randamas:

$$h(t, \tau) = \sum_q h_q(t) e^{-j2\pi f_c \tau_q(t)} \delta(\tau - \tau_q(t)); \quad (1.6)$$

čia f_c – nešlio dažnis; $h_q(t)$ ir $\tau_q(t)$ – laiko kintamieji nuo amplitudės ir vėlinimo susijusiu su daugkanaliu; $\sigma(t)$ – pažymi Dirako – delta funkciją.

Nakagami pasiskirstymas artimas Gama skirstiniui, turi du pagrindinius parametrus formos (m) ir kontroliuojamo skleidimosi (Ω) koeficientus, įvertinamas ir analizuojamas pasinaudojus išraiškomis: [29]

- Tikimybinė tankio funkcija:

$$f(x; m, \Omega) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}x^2} \quad (1.7)$$

- Kumuliatyvinė pasiskirstymo funkcija:

$$F(x; m, \Omega) = P\left(m, \frac{m}{\Omega}x^2\right); \quad (1.8)$$

čia P nepilna Gama funkcija.

c) Diferencialinė lygtis:

$$x\Omega f'(x) + f(x) \cdot (2mx^2 - 2m\Omega + \Omega) = 0, f(1) = \frac{2m^m e^{-\frac{m}{\Omega}} \Omega^{-m}}{\Gamma(m)} \quad (1.9)$$

d) Niutono – Rafsono metodas:

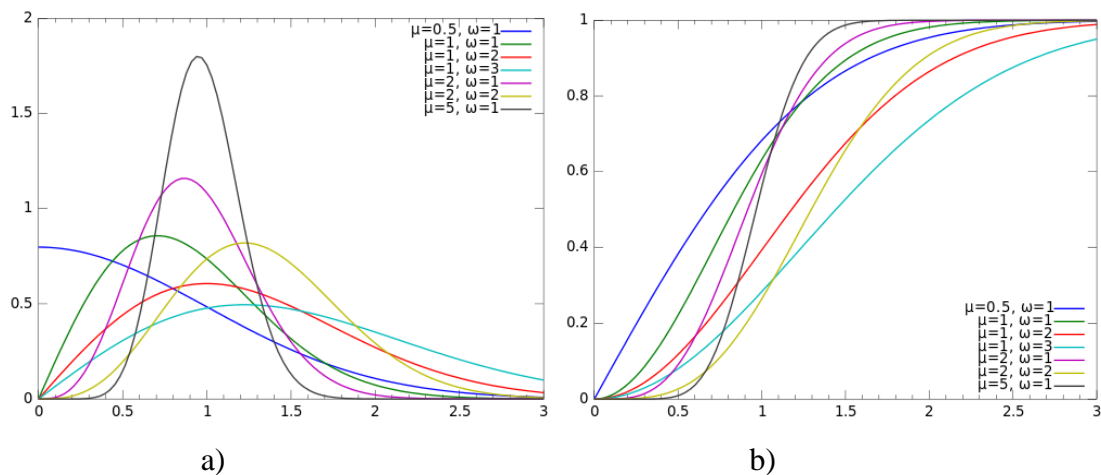
$$\Gamma(m) = \frac{x^{2m}}{\sigma^m} \quad (1.10)$$

$$\sigma = \frac{x^2}{m} \quad (1.11)$$

Pagrindinių parametru skaičiavimo formulės:

$$m = \frac{E^2[X^2]}{Var[X^2]} \quad (1.12)$$

$$\Omega = E[X^2] \quad (1.13)$$



1.10 pav. a) Tikimybinės tankio funkcijos pasiskirstymas ir b) kumuliatyvinės pasiskirstymo funkcija [29]

Apibendrinimas

Bepiločių orlaivių skraidymo zonų ribojimo būdai sukurti pirmiausiai reikia išnagrinėti dronų kategorijas ir klases, jų galimybes, ateities tendencijas. Be to, svarbu išanalizuoti jau esamas blokavimo technologijas, ypatingai pasinaudojant radijo ryšiu. Duotuoju atveju, bus nagrinėjami pirmos klasės mikro dronai, kurie gali gabenti iki pusės kilogramo svorį ir įprastai gali pakilti iki 120 metrų. Svarbu atkreipti dėmesį į patikimumo faktorių, nes prastos kokybės įranga ar netgi komponentas, gali sutrikdyti visos blokavimo sistemos veikimą. Rekomenduotina sukurti apibendrintus teritorijos stebėjimo, blokavimo, perėmimo algoritmus – įvertinti sistemos veikimo etapus ir silpnąsias vietas, taip sumažinant drono praleidimo į uždraustą teritoriją spragas.

2. METODINĖ DALIS

Norint sustabdyti – neutralizuoti droną reikalinga sudaryti būdą, pagrįstą radijo bangų panaudojimu. Jo veikimas bus pagrįstas radijo bangų blokavimu, tam tikrame dažnių diapazone. Radijo bangų slopintuvas (angl. *jammer*) blokuos GPS ir Wi-Fi signalus, mobilųjų ryši, nors ir kol kas Jungtinėse Amerikos valstijose šis prietaisas yra uždraustas komerciniam ar asmeniniam naudojimui. Jį testuoja, tobulina universiteto dėstytojai ir studentai. Slopintuvas yra skirtas blokuoti RC nuotolinius ryšius tokiuose radijo dažnio diapazonuose dviejuose dažnio juostose:

Pirmoji: 2,4 MHz, Wi-Fi b/g/n: = 2.4 – 2.5 GHz

Antroji: 43 MHz, ISM dažnių juosta: 433,05 – 434,79 MHz

RF grandinė susideda iš įtampa valdomo stiprintuvo, signalo generatoriaus ir įtampos transformatoriaus.

Reikalavimai: Kadangi maksimali leidžiama ISM dažnių juostos galia yra 36 dBm *EIRP* ir minimalus signalo triukšmo santykis 4 dB, tuomet elementari aritmetika įrodo, jog slopintuvo signalo lygis turi būti nemažesnis nei 32 dBm *EIRP*. Vis dėlto, pirmojoje dažnių juostoje realizuoti slopintuvą reikalingas 40 dBm lygio sugeneruotas signalas, nes papildomai prisideda antenos stiprinimas 8 dBi. O sugeneruoti antrąjį slopinimo signalą reikalinga 35 dB stiprintuvo galia ir 2 dBi antenos stiprinimas. Šiuo atveju, veiks civilinių dronų radijo ryšio slopintuvas, kurio elektroniniai komponentai pateikti priede.

2.1. Detektavimo sistemos ir funkcijos

Egzistuoja keletas daiktų interneto pritaikymo skirtingų būdų, bepiločių orlaivių (dronų) skraidymo zonų aptikimui. Dažniausiai jie realizuojami pasitelkus kompaktiškus mikrokontrolerius *Arduino Uno*, o jeigu technologija ir veikimo principas sudėtingesni – naujausią *Raspberry PI 3* mini kompiuterį su integruotu 802.11 b/g/n bevieliu ryšiu ir Bluetooth 4.1 versija. Jie realizuojami atitinkamai prijungus dar papildomus komponentus: mikrofoną, infraraudonųjų spindulių ar vaizdo kamerą, spektro analizatorių, anteną ir pan. Egzistuoja tokie detektavimo būdai:

- Garso aptikimas → Rotoriaus garsas
- GPS aptikimas → Padėties nusatymo sąsaja
- Radijo dažnių aptikimas → Ryšio sąsaja
- Vaizdo aptikimas → Matomumas
- Šiluminis aptikimas → Padidėjusi temperatūra
- Aptikimas radaro pagalba → Sklaida ir atspindys

Žinoma, nei vienas detektavimo būdas nėra universalus ir nėra efektyvus kai sistema veikia tik vienu detektavimo režimu. Anti-dronų detektavimo sistema yra daugiafunkcinė ir skenuoja įvairius aplinkos kitimo parametrus: garsą, vaizdą, temperatūrą, dažnį ir sugeba užtikrinti teritorijos saugumą. Ši sistema iš esmės susideda iš debesies tinklo ir įvairių sensorių, kurie stebi aplinką ir identifikuoja pakitimus. Pastebėjus nepageidaujamą bepilotį orlaivį sistema nesistengia kuo greičiau jo nutupdyti, kas būtų nesunku su didelės galios dažnio spinduliavimu (angl. *jamming*). Jos pagrindinis tikslas surasti drono valdytoto buvimo vietą ir jį patį. Ši sistema jau yra produkcijoje, tereikia, kad įmonės investuotų į ją, taip apsisaugojų savo oro erdvę.

2.1.1. Dronų kategorijos ir klasės

Norint charakterizuoti dronus labiau dėl apsisaugojimo tikslų BO yra suskirstyti pagal svorį, atstumą ir galimą gabenti apkrovą į keletą kategorijų. Tiesa, didieji dronai (antros klasės) yra naudojami kariuomenės tikslais, todėl jų detaliam nagrinėjimui ir juos priskirsime prie taktinių kategorijos grupės. Kitos trys komercinių dronų kategorijos (tarp jų ir pirmą klasę) pateiktos 2.1 lentelėje [35]:






2.1 lentelė BO kategorijos ir klasės [35]

Klasė	Kategorija	Veikimo aukštis	Užduoties įvykdymo nuotolis	Galima apkrova
1 Klasė (<150 Kg)	Mikro (<2 kg)	iki 120 m	5 km	0,2 – 0,5 kg
1 Klasė (<150 Kg)	Mini (2 – 20 kg)	iki 900 m	25 km	0,5 – 10 kg
1 Klasė (<150 Kg)	Nedideli (20 – 150 kg)	iki 1500 m	50 – 100 km	5 – 50 kg
2 Klasė (150 – 600 Kg)	Taktiniai	iki 3000 m	200 km	25 – 200 kg

2.2. Dronų aptikimo pavyzdys

Jau greitai, įsivyravus dronų skraidymo erai, iškilis poreikis dronus stebėti namų artimoje zonoje. IoT sprendimai šį klausimą jau sprendžia – Vašingtono DC inžinieriai kuria dronų skydą, kuris įmontuoto mikrofono pagalba, su Wi-Fi technologija aptinka drono skleidžiamas garso bangas (dažnį ir jo spektrą) ir mažojo kompiuterio pagalba (*Raspberry PI*) išsiunčia sms ir el. paštu pavojaus signalą namo šeimininkui, dėl pastebėto bepiločio orlaivio (žr. 1.4 pav.). Bet atsiranda ir iššūkių testuojant šią įrangą – tokių kaip pašalinių garsų ignoravimas (atpažinimas), todėl įrangos kūrėjai privalo prisirinkti įvairių aplinkos triukšmo garsų, kad būtų pagal ką atpažinti UAV. Todėl pirmiausiai reikėtų palyginti įvairius populiariausius BO modelius, jų galimybes ir tik tuomet taikyti kuo universalesnį metodą – technologiją apsaugai. Keletas populiariausių dronų pateikti lentelėje (žr. 2.2 lentelę).

2.2 lentelė Dronų palyginamoji lentelė

Pavadinimas	Phantom 4	Parrot Bebop	Solo 3DR	Skybotix Coax	Md4-1000
Nuotrauka					
Greitis	iki 72 km/h	39 km/h	iki 89 km/h		54 km/h
Svoris	1380 g	420 g	1800 g	340 g	2650 g
Maksimalus krovinio svoris			420 g		1200 g
Maksimalus aukštis	6000 m		600m jūros lygio		4000 mm
Maksimali skrydžio trukmė	28 min	22 min	25 min	20 min	88 min
Baterijos talpa	5350 mAh	1200 mAh	5200 mAh	1350 mAh	
Maksimalus skrydžio nuotolis	3,5 km		8 km		
Valdymo atstumas	iki 5 km	250 m			
Galia	23 dBm	21 dBm			118 N
Variklis	Baterijos	Baterijos	Baterijos		Baterijos
Ginkluotė/įranga					Fotokamera Sony Nex 7
Antena	2.400 GHz iki 2.483 GHz	MIMO 2,4 ir 5 GHz	2,4 GHz	2,4 ir 5,8 GHz	
Video įrašymas	FHD, 4K, UHD			-	
Lokacijos nustatymo sistema	GNSS (GPS + GLONASS)	GNSS (GPS + GLONASS)	GNSS (GPS + GLONASS)		
Kaina	1200 EUR	~400 EUR	~900 EUR	2000 EUR	1700 EUR
Operacinė sistema	iOS & Android	iOS & Android	iOS & Android	iOS & Android	iOS & Android
Naudojami protokoliai	TCP/IP			L2CAP, RFCOMM, SDP	

Pagal apžvelgtus dronus galima būtų pasirinkti įrangą, kuri būtų veiksmi neutralizuoti dronus tam tikru atstumu. Atsižvelgiant į ateities perspektyvas, protingiausia pasirinkti įrangą ne su ribiniais parametrais pagal planuojamą slopinimo atstumą, o netgi su papildomomis galimybėmis slopinti Wi-Fi tipo signalus, taip pat slopinimo atstumas bus reguliuojamas ir didesnis už planuojamą (dėl didesnės teritorijos slopinimo aprėpties ir dėl įrangos nusidėvėjimo). Vienas iš realių sprendimų – BO nuotolinio slopinimo sistema *CPB-4030C*, kuri bus įdiegta telekomunikacinio bokšto viršūnėje arba jei nėra tokios galimybės – ant pastato stogo įrengus dar papildomas konstrukcijas, dėl įrangos stabilumo išlaikymo.



2.1 pav. BO nuotolinio slopinimo sistema CPB-4030C [30]

2.3 lentelė Sistemos CPB-4030C parametrai [30]

Maitinimo šaltinis	AC220V/ 110V DC27-28 V ar 12 V
Energijos sunaudojimas	100/200 W
Slopinimo atstumas	100–500 metrų, kai signalo stiprumas ≤ -75 dBm
Veikimas	24 h / 7 dienos per savaitę
Dydis	72 x 45 x 32 cm
Svoris	42 Kg.
Įrangos diegimo standartas	UL (E190582) CSA (LR 112971 Level 3)
CS-4030C sistema: neutralizuoja 4 Wi-Fi ir 4 GPS dažnio kanalus vienu metu	
CS-4030C-A ID01	CS-4030C-B ID02
Vaikiškas nuotolinis valdiklis: 72 MHz: 50 W	GPS L5 & Glonass L1: 1570 – 1620 MHz: 30 W
Wi-Fi 11, b, g: 2300 – 2500 MHz: 30 W	GPS L2 & Glonass L2: 1220 – 1260 MHz: 30 W
Wi-Fi 11.a: 5100 – 5500 MHz: 10 W	GPS L3 & L4: 1370 – 1390 MHz: 30 W
Wi-Fi 11.a: 5500 – 5900 MHz: 10 W	GPS L5: 1170 – 1180 MHz: 30 W
100 W	120 W

Ši bevielė slopinimo kontroliavimo sistema valdoma nuotoliniu būdu per belaidę sąsają. Jai taip pat priklauso ir kompiuteris su programine įranga, kurios pavyzdys apačioje (žr. 2.2 pav.). Jos bruožai:

- Kiekviena sistemos dalis turi kontroliavimo relę, kontroliuojamą programiniu būdu PC pagalba;
- Kiekviena sistemos dalis siunčia perspėjimo pranešimą į PC darbo vietą, jeigu kažkuri sistemos komponentė neveikia;
- Kiekviena sistemos dalis turi unikalų ID, dėl lengvesnio identifikavimo;
- Bevieliai duomenys konvertuojami per RS232 sąsają, kad galėtų komunikuoti su PC;
- Programinė įranga gali valdyti kiekvieną dažnio kanalą ar visą neutralizavimo sistemą;
- Neutralizavimo sistemos korpusas nepraleidžia vandens ir yra atsparus karščiui.



2.2 pav. Programinės įrangos vaizdas per PC ekraną [30]

Dronų neutralizavime egzistuoja tokie pagrindiniai parametrai:

- **Signalų stiprio kitimas (angl. *signal strength [SS] variation*)** – naudojamas kaip aptikimo (nustatymo) parametras. Galimi du metodai: signalo stiprio vidurkio reikšmė laiko mastelyje ir spektrinė diskriminacijos technika;
- **Priimto signalo impulso plotis (angl. *pulse width [PW] of the received signal*);**
- **Paketų pristatymo rodiklis (angl. *packet delivery ratio [PDR]*)** – tai teisingų gautų paketų ir visų gautų paketų santykis;
- **Nešlio jutimo laikas (angl. *carrier sensing time [CST]*)** – tai laikas, po kurio atsilaisvins kanalas;

- **Paketų siuntimo rodiklis (angl. *packet sent ratio*)** – nustatomas siųstuve, tai gautų ir išsiųstų paketų santykis.

Perduodant paketus, slopintuvas siunčia aukštos galios plačius impulsus, kurie perima dalį bitų, todėl klaidų korekcija (FEC) nebesugeba atpažinti bitų sekos ir kontrolinė suma nebeperduodama į MAC (duomenų perdavimo) sluoksnį. Taip paketai yra išmetami ir siuntėjas nebegaus patvirtinimo, todėl bus pakartotinai persiunčiami paketai.

Taip pat kiekvienas paketas perduoda simbolius. Duomenų bitas kiekviename simboliuje priklauso nuo perdavimo greičio. Perdavimo laikas kiekvieno simbolio T_{symbol} randamas taip:

$$T_{symbol} = \frac{N_b}{DR}; \quad (2.1)$$

čia N_b – kiekvieno simbolio duomenų kiekis; DR – duomenų perdavimo sparta.

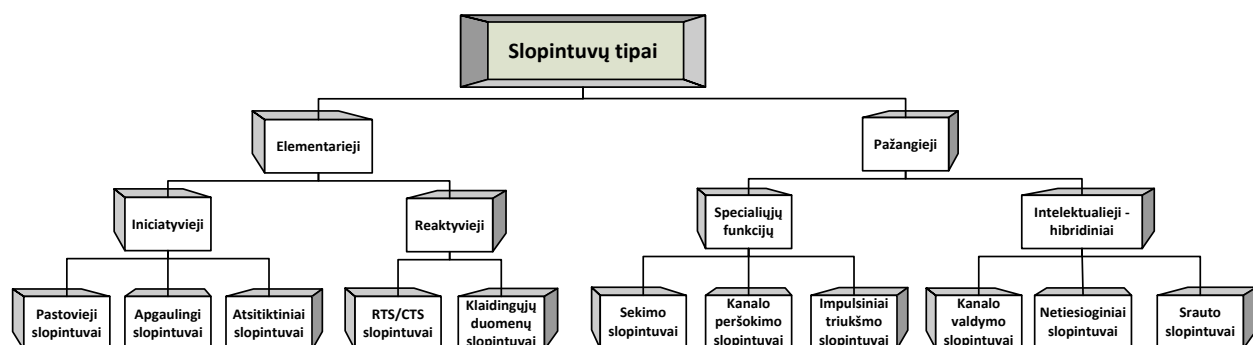
IEEE 802.11b standartas nenaudoja jokių klaidų korekcijų (FEC) fiziniame sluoksnyje išskyrus kanalo kodus. Tai reiškia, kad sugadinus vieną simbolį paketų perdavime bus sunaikintas visas paketas. Idealiu atveju, ribinis laikas (TH) reikalingas sugadinti paketą apskaičiuojamas:

$$TH = (2 \cdot T_{symbol}) + GI; \quad (2.2)$$

čia GI apsaugos intervalas tarp dviejų iš eilės einančių simbolių pakete.

2.3. Bevielių tinklų slopinimas

Priklausomai nuo egzistuojančių dronų galimybių, BO slopintuvai skirstomi į elementarius ir pažangius, pagal funkcionalumą ir galimybes. Kiekvienas iš jų atitinkamai dar skirstomas į iniciatyvius ir reaktyvius bei specialiųjų funkcijų ir intelektualiuosius – hibridinius. Detali jų pasiskirstymo schema pateikta 2.3 pav.



2.3 pav. Bevielių tinklų slopinimo tipų schema [36]

Populiariausi šie slopinimo tipai:

- a) Pastovus slopinimas
- b) Atsitiktinis slopinimas
- c) Apgaulingas slopinimas
- d) Reaktyvus slopinimas
- e) Kanalo triukšmo pagrindu pagrįstas intelektualus slopinimas

Pastovus slopinimas – vykdomas be jokio MAC protokolo stebėjimo, kanalo jautrumo ar užimtumo stebėjimo, tiesiog paleidžiant aukštos galios triukšmą su atsitiktinai parinktais bitais.

Atsitiktinis slopinimas – veikia tik nustatytais laiko momentais, per tylėjimo režimą neveikia, nepriklausomai, kad kanalas užimtas, o per darbo režimą veikia (pagal nustatytus intervalus). Šis slopinimas taip pat nestebi MAC protokolo ir yra priklausomas nuo nustatytų veikimo intervalų.

Apgaulingas slopinimas – siunčia neteisingus paketus imtuvui ir kanalas tampa užimtas tarsi siunčiama naudinga informacija. Tai ir yra pagrindinis skirtumas nuo pastovaus slopintuvo. Be to, šio slopintuvo siunčiami protokolai padidina nešlio jautrumo laiką tinklo mazgams iki neapibrėžto.

Reaktyvus slopinimas – suveikia tuomet, kai aptinka paketų perdavimą tinkle. Nuo tada siunčiama informacija su pakankamu triukšmo lygiu ir teisingo paketo kontrolinė suma nėra atkurama loginės sąsajos kontroliavimo (LLC) sluoksnyje ir paketas yra prarandamas.

Išmanus slopinimas – tai teisingų paketų siuntimo slopintuvai, kurie sugadina tiesioginės klaidų korekcijos schemą naudojamą MAC sluoksnyje, ir paketai yra išmetami kaip neatpažinti.

Paketų pristatymo rodiklį (PDR) yra nesunku įvertinti ir rasti pagal formulę:

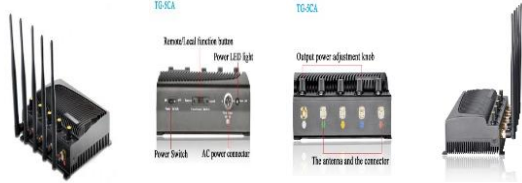


$$PDR = (1 - P_j) \cdot (1 - P_c); \quad (2.3)$$

čia P_j – slopinimo tikimybė, tinkanti įvairiems neutralizavimo metodams ir P_c – paketų kolizijos pasireiškimo tikimybė, kai yra bent keletas siunčiamų paketų tuo pačiu metu. Žinoma, kai yra tik siųstuvai ir imtuvai formulė supaprastėja.

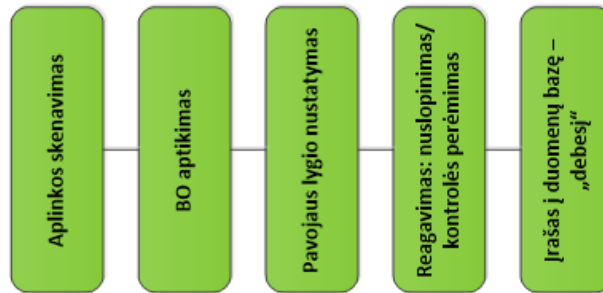
Neutralizavimo sistemų kūrėjai varžosi dėl šių parametru pagerinimo:

- a) Suvartojamas energijos kiekis;
- b) Sumažinta aptikimo tikimybė;
- c) Nematomumas – slaptumas;
- d) Sustiprinta ryšio atjungimo ataka (DoS);
- e) Sutapatintas neutralizavimo signalas ar labai artimas naudingam signalui;
- f) Vartotojų autentifikavimas;
- g) Sustiprinti veiksmai prieš klaidų taisymo algoritmus.

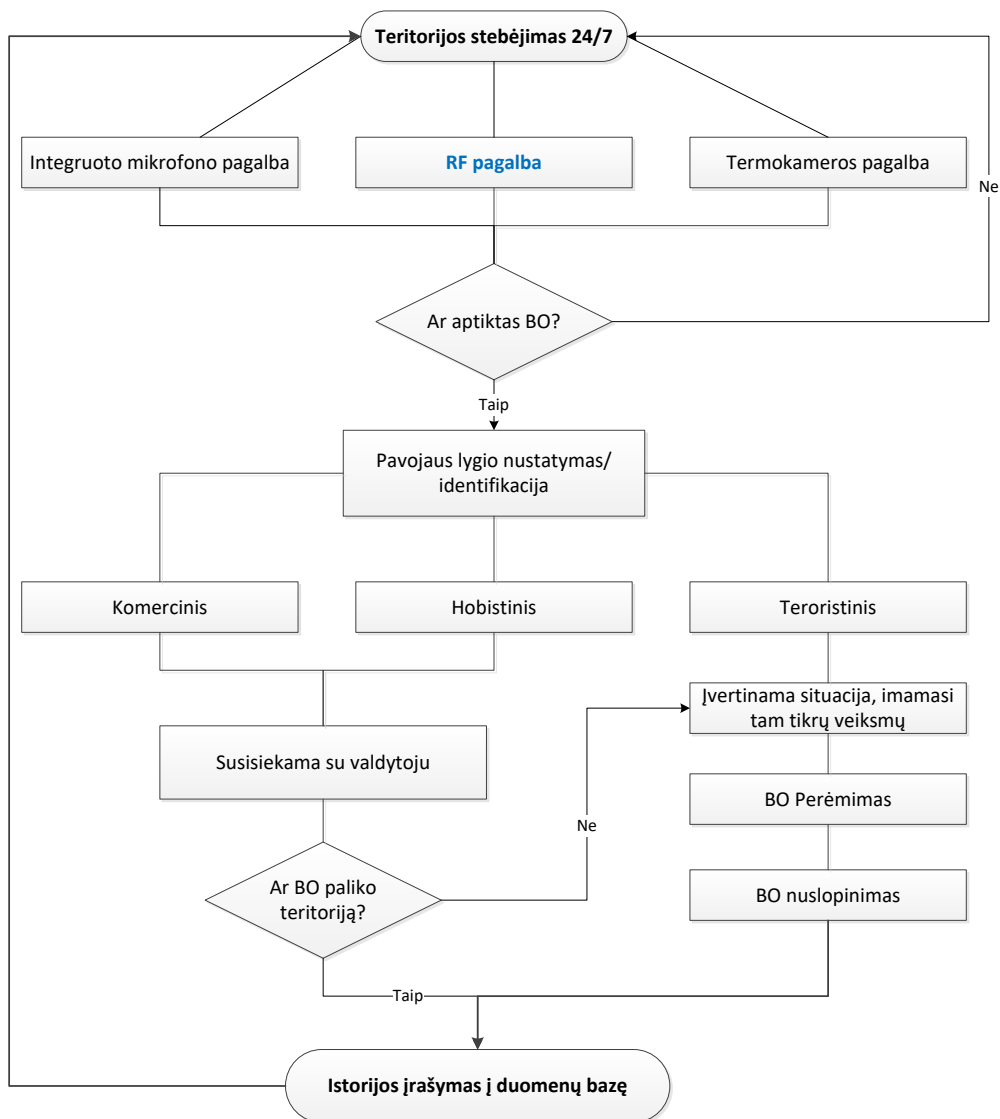
2.4 lentelė Slopintuvų palyginamoji lentelė

Modelis	TG - 5CA			KJ 1020 (nešiojamas)			Drone Killer 6		
Nuotrauka									
Slopinimo atstumas	iki 40 m, signalo stiprumas < -75 dBm			iki 10 m, signalo stiprumas -85 dBm			iki 10 m, signalo stiprumas - 85 dBm		
Svoris	1,75 kg			0,3 kg			10 kg		
Galia	12 W						120 W (300 - 600 m)		
Slopinami dažniai	<u>Dažnio juosta</u>	<u>Vidutinė išėjimo galia (dBm)</u>	<u>Kanalo išėjimo galia (W)</u>	<u>Dažnio juosta</u>	<u>Vidutinė išėjimo galia (dBm)</u>	<u>Kanalo išėjimo galia (W)</u>	<u>Dažnio juosta</u>	<u>Vidutinė išėjimo galia (dBm)</u>	<u>Kanalo išėjimo galia (W)</u>
ISM							<u>433 MHz</u>		<u>20</u>
CDMA800	850 - 894 MHz	35	3				868 - 912 MHz		25
GSM900	925 - 960 MHz	35	3	925 - 960 MHz	25	0,3	925 - 960 MHz	25	0,3
DCS/PHS/GSM1800 - 1900	1805 - 1990 MHz	32	2	1805 - 1880 MHz	25	0,3	1805 - 1880 MHz	25	0,3
3G	2110 - 2170 MHz	32	2						
GPS	1500 - 1600 MH	31	2				1227MHz (GPS L2) 1570 - 1620MHz (GPS L1 + Glonass L1)		15 40
WIFI	2400 - 2500 MHz	31	1,8	2400 - 2500 MHz	25	0,3	2400 - 2500MHz (WiFi 11.b,g ir Bluetooth) 5,8GHz (WiFi11.a)	25	20 2
Maitinimo šaltinis, baterija	AC:110/220 V; DC 5 V, srovė: 12 A			DC12V/1600mA/h, Ni-MH baterija			AC110 or 220 - 240V /DC 27 V		
Dydis	21x17x6 cm			11x6,2x3 cm			550 x 190 x 60 mm		
Darbo laikas	24/7/365			90 min			24/7/365		
Kaina, EUR	180			240			2470		
Oro drėgmė				90%					

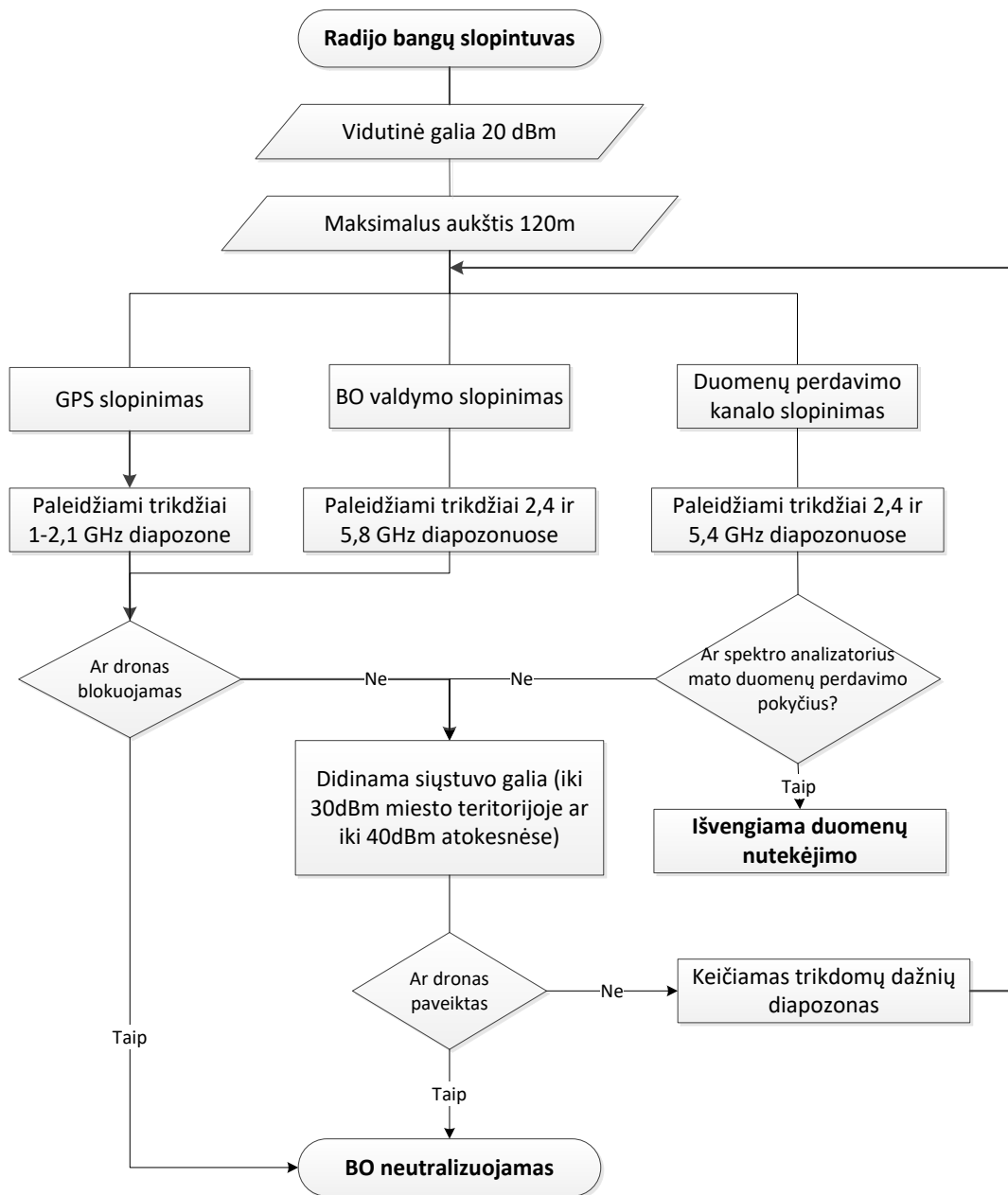
Norint sudaryti metodą, pagrįstą radijo bangų panaudojimu, pirmiausiai reikia sukurti blokinę schemą ir keletą algoritmų, pagal kuriuos ir bus galimas teorinis metodo tyrimas ir realizavimas (žr. 2.5–2.7 pav.)



2.5 pav. Blokinė schema



2.6 pav. Teritorijos stebėjimo algoritmas



2.7 pav. RF slopintuvo algoritmas

Metodo teorinei analizei naudojamas būdas pagrįstas radijo bangų slopintuvo parametrams suskaičiuoti. Vienas iš pagrindinių parametru skaičiuojamas visoje dažnių juostoje – BO įėjimo signalas $r(t)$ susidedantis iš naudingo $S(t)$ ir plačiajuosčio triukšmo signalo $n(t)$:

$$r(t) = S(t) + n(t) \quad (2.4)$$

arba galima išreikšti kitaip:

$$r(t) = S(t) + \sqrt{2}n_I(t) \cos 2\pi ft - \sqrt{2}n_Q(t) \sin 2\pi ft; \quad (2.5)$$

čia $n_I(t)$ ir $n_Q(t)$ yra du nepriklausomi gauso triukšmai su dvipusiu galios spektro tankiu $(N_0 + N_{jm})/2$, čia N_0 žymi šiluminio triukšmo vienpusį galios spektro tankį, o N_{jm} RF slopintuvo vienpusį galios spektro tankį. Taip pat, tarpinis dažnis po koreliacijos yra:

$$H(t) = \sum_{\lambda=1}^M \left\{ \rho_{\lambda} \left(t - \frac{\lambda T_S}{M} \right) \cos[\omega_{IF} t + \theta_d(t)] + [\sqrt{2}n_I(t) \cos \omega_{\lambda} t - \sqrt{2}n_Q(t) \sin \omega_{\lambda} t] \cdot \right. \\ \left. 2 \cos[(\omega_{\lambda} + \omega_{IF})t + \theta_s(t)] \right\}; \quad (2.6)$$

čia q_{λ} yra koreliacijos funkcija stačiakampiam kodui λ skaičiaus kanalui, o $\theta_s(t)$ – atsitiktinai parinkta moduliacijos fazė.

Imtuve kiekvieno kanalo galio spektras apskaičiuojamas:

$$S_R(f) = \frac{2}{W_S} \text{Sinc}^2 \left[\frac{2}{W_S} (f - f_{\lambda} - f_{IF}) \right] + \frac{2}{W_S} \text{Sinc}^2 \left[\frac{2}{W_S} (f + f_{\lambda} + f_{IF}) \right]; \quad (2.7)$$

čia W_S yra kanalo pralaidumas, f_{λ} – stačiakampio signalo dažnis λ eilės, f_{IF} – trikdžių dažnis. Kuomet dažnio komponentai išskyrus f_{IF} yra išfiltruoti, ketvirtoji formulė tampa:

$$N(f) \cdot S_R(f) \approx \frac{N_{jm} + N_0}{W_S} \int_{f_{\lambda} - \frac{W_S}{2}}^{f_{\lambda} + \frac{W_S}{2}} \text{Sinc}^2 \left[\frac{2}{W_S} (f - \lambda + f_{\lambda} + f_{IF}) \right] d\lambda + \\ + \frac{N_{jm} + N_0}{W_S} \int_{-f_{\lambda} - \frac{W_S}{2}}^{-f_{\lambda} + \frac{W_S}{2}} \text{Sinc}^2 \left[\frac{2}{W_S} (f - \lambda - f_{\lambda} - f_{IF}) \right] d\lambda \quad (2.8)$$

Pasinaudojant išraiška $\gamma = f - \lambda - f_{\lambda} - f_{IF}$ [2.8] formulė gali būti išreikšta:

$$N(f) \cdot S_R(f) \approx \frac{N_{jm} + N_0}{W_S} \int_{f - f_{IF} - \frac{W_S}{2}}^{f - f_{IF} + \frac{W_S}{2}} \text{Sinc}^2 \frac{2\gamma}{W_S} d\gamma \quad (2.9)$$

Ir dvejų pusių galios spektro tankis su sąlyga $f = \pm f_{IF}$ yra:

$$\frac{N_n}{2} = N(f_{IF}) \cdot S_R(f_{IF}) \approx \frac{N_0}{2} + \frac{N_{jm}}{2} \quad (2.10)$$

Iš (2.10) formulės, kai sistemos trikdžiai yra visame juostos plotyje, triukšmo juostos plotis yra daug platesnis negu pusės kanalo ir $N_0/2$ ar $N_{jm}/2$, tai reiškia, kad plačiajuosčio ryšio triukšmai turi panašias ypatybes, kaip ir imtuvo vidiniai trikdžiai.

2.4. Dalinis RF bangų juostos slopinimas

Šiuo atveju, šio metodo realizavimas yra paprastesnis nei pilnos dažnių juostos su aukštos galios spektro tankiu. Priimant, kad W yra radijo dažnio pralaidumas, W_{jm} trikdžių pralaidumas, W_S pusės kanalo pralaidumas, P_{jm} trikdžių galia, η yra W_S ir W_{jm} rodiklis, N_p trikdžių juostos tankis, N_0 vienos pusės temperatūrinio triukšmo spektro tankis. Taigi, galutinis triukšmo spektro tankis būtų $N_0 + N_p$ ir tik vienintelio N_0 kintamojo poveikis į esančią dalinę dažnio juostą. Tuomet, imtuvo signalas randamas taip:

$$r'(t) = S(t) + n(t) + n_{jm}(t); \quad (2.11)$$

čia $S(t)$ yra spinduliuojamas signalas, $n(t)$ šiluminis triukšmas ir $n_{jm}(t)$ dalinės juostos trikdžiai.

Pirmasis atvejis, kai $W_{jm} < W_S$, pavyzdžiui, vienas iš kanalų yra sutrikdytas, tai kitam išėjimo kanalui nespektrinio mikserio bus:

$$H_1(t) = \rho \cos[\omega_{IF}t + \theta_d(t)] + n(t)\{2c \cos[(\omega_\lambda + \omega_{IF})t + \theta_s(t)]\} + n_{jm}(t)\{2c \cos[(\omega_\lambda + \omega_{IF})t + \theta_s(t)]\}; \quad (2.12)$$

čia ρ – stačiakampio kodo koreliacijos funkcija vienam kanalui.

Galios spektro tankis generuojamas trikdžių yra sudarytas iš trikdžių spektro tankio ir išplėsto spektro bangos tankio. Pagal panašumo linijas galima nustatyti, jog išėjimo signalo spektro tankis apskaičiuojamas:

$$S(\pm f_{IF}) = \frac{N_p}{W_S} \int_{f_{jm} - \frac{W_{jm}}{2}}^{f_{jm} + \frac{W_{jm}}{2}} \text{Sinc}^2 \left[\frac{2}{W_S} (f_\lambda - x) \right] dx; \quad (2.13)$$

čia $\lambda = 1, 2, \dots, M$.

Tokiu atveju, imtuvas gali priimti $M - 1$ koreliuotas reikšmes ir gauti duomenis įprastai tol kol veikia vienas kanalas.

Antrasis atvejis, kai $W_{jm} > W_S$, naudojamas dėl supaprastintos analizės, jeigu kanalo centrinis dažnis sutrinka, tuomet yra užbaigiamas trikdžių siuntimas. Taip pat, kuomet kanalas nėra trikdžių slopinimo juostoje, triukšmo dvipusis spektrinis tankis iš nespektrinės koreliacijos išėjime yra $N_0/2$, kitu atveju yra $(N_0 + N_p)/2$ ir klaidų vidurkis BER :

$$P_a = (1 - \eta)P_b \left(\frac{E_b}{N_0}\right) + \eta P_b \left(\frac{E_b}{N_0 + N_{i,jm}}\right) \quad (2.14)$$

čia P_b yra:

$$P_b = \frac{1}{M-1} \left\{ 1 - [\operatorname{erf}(\sqrt{E_b/N_0})]^{M-1} \right\}. \quad (2.15)$$

Šiuo atveju, imtuvas gali priimti daug koreliuotų duomenų ir atkurti juos tokio ilgumo kokie buvo interferuoti kanalai iki tol kol kanalų skaičius bus nemažesnis nei pusė kanalų.

Nuostoliai RF bangų sklidimo bus įvertinti naudojantis klasikine formule:

$$L_{fs} = 32,45 + 20\operatorname{Log}(f) + 20\operatorname{Log}(D); \quad (2.16)$$

čia f – dažnis, MHz; D – atstumas, km.

Teorinė nuostolių išraiška galima taikyti tuomet kai tiesioginė matomumo zona tarp antenos imtuvo ir siųstuvo nemažesnė nei 60%, tuomet Frenelio zona bus skaičiuojama šia išraiška:

$$F_n \cong \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}; \quad (2.17)$$

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

Bendras signalo slopinimas randamas:

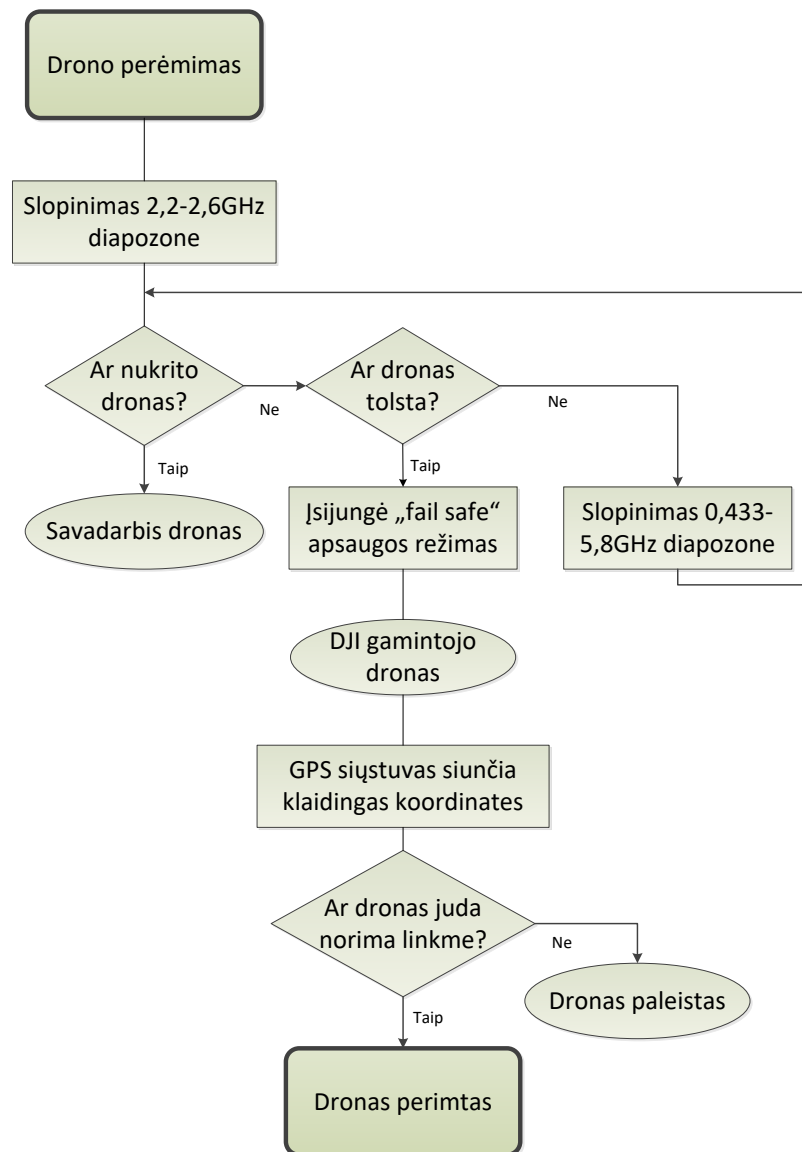
$$L_{\Sigma} = L_{fs} + L_R + L_{at} + L_0 + L_m; \quad (2.18)$$

čia L_R – slopinimas dėl kritulių poveikio, L_{at} – atmosferos slopinimas, L_0 – realios vietovės kliūtys, L_m – signalo silpnėjimas dėl atspindžių ir interferencijos.

Signalų lygis imtuve bus randamas:

$$P_i = P_S + G_t(\alpha) - L_{\Sigma} + G_r(\alpha) \quad (2.19)$$

čia P_S – galia siųstuve, dBm; $G_r(\alpha)$ – antenos stiprinimas imtuve α kryptimi, dB; $G_t(\alpha)$ – antenos stiprinimas siųstuve, α kryptimi, dB.



2.8 pav. Drono perėmimo algoritmas

Apibendrinimas

Bepiločių orlaivių (dronų), skraidyklių atsiradimas ir plėtra netik pagreitina gyvenimo ritmą, gelbsti stichinių nelaimių metu, atsiunčia nesunkius užsakymus, bet ir tuo pačiu iššaukia naujų prietaisų, jų oponentų – slopintuvų poreikį, dėl piktadarių veiksmų. Todėl kuriant slopintuvus būtina turėti tikslią išanalizuotą problemą, ypač kai reikalinga slopinti tik tam tikrais laiko tarpais.

Sudaryti drono skraidymo zonų apribojimo algoritmai leidžia identifikuoti dronus pagal jų tipą, klases ir net pagal populiariausią drono gamintojo vardą – DJI. Taip pat, išskirti trys valdymo – kontroliavimo kanalai, kuriuos galime paveikti skirtinguose dažnių diapozonuose su atitinkama įtaka.

3. BO NEUTRALIZAVIMO TECHNOLOGIJOS ĮVERTINIMAS

Drono blokavimo sistema dirbs pastoviu režimu. Kai tik dronas įskris į teritoriją, iškart jis bus slopinamas. Teoriškai tai gali būti ir 24/7 per parą, bet praktiškai tai – retas atvejis (per ilgą laiko tarpą). Todėl būtina įvertinti įrangos veikimo patikimumą. Šiuo atveju, aktualus siųstuvas ir imtuvas bei perdavimo terpėje esantys signalo sklaidimo sutrikimo faktoriai, dėl signalų interferencijos, atspindžių ir panašių faktorių. Siųstuvo ir imtuvo patikimumą įvertinsiu tikimybiniais dydžiais.

3.1. Sistemos patikimumo įvertinimas

Kuriant bet kokią sistemą ar tai būtų telekomunikacinė ar agrokultūrinė ar teisinė stengiamasi gauti kuo didesnį patikimumą. Tokiu atveju ji būna brangesnė ir jos eksploatacijos kaštai sumažėja iki minimumo. Pagrindinės tokių sistemų dalys yra trys: aparatinė įranga, programinė įranga ir žmogiškasis faktorius. Šiame darbe bus aktualūs visi ir jų patikimumas bus randamas iškeliant svarbiausius faktorius – tezes lemiančias sistemos veikimo patikimumą. Kadangi sistema bus pagrįsta Wi-Fi signalo slopinimu, tai ji susidės iš siųstuvo ir imtuvo, kiekvienas turės antenas ir papildomai dar bus instaliuotas radaras ar spektro analizatorius, kuris fiksuos BO įskrendančius į stebimą teritoriją. Taigi, stebint tam tikrą teritoriją, šiuo atveju, įkalinimo įstaigą adaptyvusis spektro analizatoriaus patikimumas apsprendžiamas aparatinės, programinės įrangos ir žmogiškojo faktoriaus tikimybiniais parametrais. Jeigu programos kodas, skenuojantis tam tikro dažnio ar dažnio juostos skleidžiamus signalus neaptinka BO dėl netinkamo dažnio parinkimo tai jau yra žmogiškasis ir programinis sistemos patikimumo faktorius, o sugedus įrangai – techninis aparatinis trūkumas. Todėl tikimybė, kad sistema aptiks droną priklausys nuo šių faktorių ir jos patikimumas priklausys nuo žmogiškojo faktoriaus. Kalbėdami apie siųstuvą, jo pagrindinės dalys: generatorius, modulatorius, stiprintuvas, antena priklauso nuo maitinimo šaltinio veikimo, nustojus jam veikti, siųstuvas visiškai sustabdomas ir jo veikimas lygus 0%. Tačiau sugedus kitai siųstuvo daliai – pavyzdžiui, stiprintuvui, sistema dalinai veiks, tik jos efektyvumas ir veikimo nuotolis bus nedideli. Tie patys faktoriai atsispindi ir imtuve. Galima teigti, kad kiekvienas Wi-Fi signalo lygis ir veikimo kanalas turi skirtingą veikimo patikimumą, dėl aplinkos veiksnių, interferencijos, difrakcijos.

OSI lygmenys turi taip pat įtakos patikimumui įvertinti. Wi-Fi pagrinde veikia dvejuose OSI sluoksniuose – fiziniame ir duomenų perdavimo. Jie yra naudojami dėl duomenų formatavimo ir kontrolės atitinkant 802.11 standartą. Šie du sluoksniai sukuria pagrindines duomenų priėmimo ir perdavimo funkcijas maršrutizatoriams. Taigi, pirmasis fizinis sluoksnis yra atsakingas už komunikacijos užtikrinimą, kokybę. Tačiau, priešingai nei laidinis tinklas, jis nėra gerai apsaugotas ir patikimas nuo atsitiktinių trikdžių ar tyčinių sutrikimų. Antrasis – duomenų perdavimo sluoksnis

susideda iš dviejų dalių: Loginės sąsajos kontroliavimo (LLC) ir prieigos kontrolės sluoksnių (MAC). Loginis sluoksnis gavęs IP paketus iš viršutinio tinklo sluoksnio juos įvertina su turima adresine ir kontroline informacija ir uždėjęs antraštes perduoda juos į prieigos kontrolės dalį. Čia yra modifikuojama kontrolinė ir adresinė informacija antraštėse tam, kad užtikrinti teisingą paketų kelią į fizinių sluoksnį, o fizinis sluoksnis moduliuoja atsižvelgiant į fizinius standartus (DSSS, OFDM). Tokiu būdu duomenys (bitai) yra perduodami kaip radijo bangos tam tikru dažniu.

Pagrindinės Wi-Fi signalo per OSI sluoksnių modelį funkcijos:

Duomenų perdavimo sluoksnis:

- Kanalo prieiga (CSMA/CA);
- Adresavimas;
- Antraštės validacija;
- Klaidų detekcija;
- Apsaugos mechanizmai.

Fizinis sluoksnis:

- Bitų išsiuntimas į imtuvą (perdavimo terpė oras)

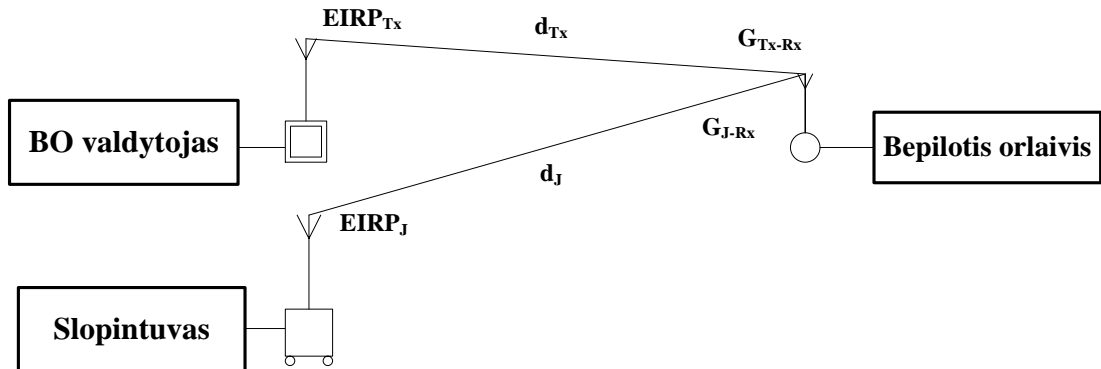
802.11 standartas veikia dviejuose pagrindiniuose spektruose, 2,4 – 2,485 GHz spektre, bei 5GHz dažnių juosta. ISM juosta yra suskirstyta į 14 skirtingų kanalų su skirtingais dažniais. Kiekvienas yra atskirtas 10 MHz juosta todėl yra didelis spektro persidengimas tarp gretimų kanalų. Šio standarto pagerinimas (kopijos) 802.11a – naudojamas izoliuoti tinklus ir išvengti 2,4 GHz spektro perpildymo. Jis naudojamas ligoninėse ar pacientų stebėjime. 802.11g yra energijos taupymo standartas (ne tik) pilnai suderinamas su n tipo standartu. 802.11n naudojamas dėl didelio duomenų pralaidumo perduoti vaizdinę informaciją, naudojant MIMO technologiją. 802.11 a/b/g/n standartų pagrindiniai parametrai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Wi-Fi standartų palyginamoji lentelė

802.11 protokolas	Dažnis	Moduliacija	Dažnių juostos plotis	Duomenų perdavimo sparta (Mb/s)	MIMO srautai	Komentarai
a	5 GHz	OFDM	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	1	Aukštas dažnis sumažina veiksmingumą
b	2.4 GHz	DSSS	20 MHz	1, 2, 5.5, 11	1	Daugelis IT skyrių jau nebe naudoja tokių prieigos taškų
g	2.4 GHz	OFDM ir DSSS	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	1	Tik universaliai modulio schemai. Prieigos taškai sumažina paketų klaidų kiekį
n	2.4 GHz ir 5 GHz	OFDM	20 MHz ir 40 MHz	7.2, 14.4, 21.7, 28.9, 43.3, 57.8, 65, 72.2 (per srautą)	4	Privalo pagerinti MIMO technologiją ir per 40 MHz dažnio kanalą gauti maksimalią 600 Mbit/s duomenų spartą

3.2. Laisvosios erdvės modelis ir jo įvertinimas Mathcad programinės įrangos pagalba

Nagrinėjama sistema sudaro BO valdytojas (siųstuvas), dronas (imtuvas) ir slopintuvas. Dronas praktiškai visą laiką juda, bet yra pasirinkta suskaičiuoti laisvos erdvės modelį prie skirtingų atstumų, kai visi trys tinklo elementai nejuda. Principinė slopinimo schema pavaizduota 3.1 pav.



3.1 pav. Slopinimo schema, kai visi trys elementai fiksuoti [33]

Slopintuvo signalo lygis imtuve (drono) apskaičiuojamas:

$$J = EIRP_J - 32 - 20 \log f - 20 \log d_J + G_{J-Rx}; \quad (3.1)$$

čia $EIRP_J$ – slopintuvo efektyvi izotropinė spinduliavimo galia [dBm];

f – spinduliuojamas dažnis [MHz];

d_J – atstumas nuo slopintuvo iki drono [km];

G_{J-Rx} – imtuvo (drono) antenos stiprinimas slopintuvo kryptimi [dBi].

Siųstuvo signalo lygis:

$$P_{Rx} = EIRP_{Tx} - 32 - 20 \log f - 20 \log d_{Tx} + G_{Tx-Rx}; \quad (3.2)$$

čia $EIRP_{Tx}$ – siųstuvo efektyvi izotropinė spinduliavimo galia [dBm];

f – spinduliuojamas dažnis [MHz];

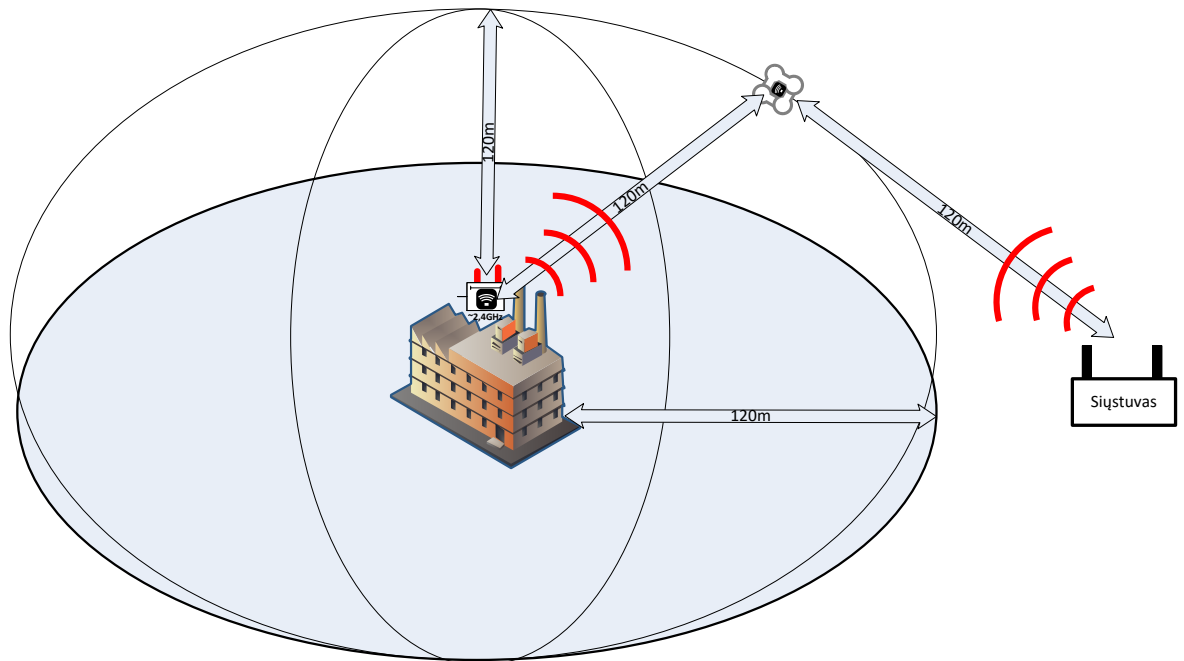
d_{Tx} – atstumas tarp siųstuvo ir drono [km];

G_{Tx-Rx} – siųstuvo antenos stiprinimas slopintuvo kryptimi [dBi].

Tuomet slopintuvo ir naudingo signalų lygių skirtumas gaunamas:

$$J - P_{Rx} = EIRP_J - EIRP_{Tx} - 20 \log d_J + 20 \log d_{Tx} + G_{J-Rx} - G_{Tx-Rx} \quad (3.3)$$

Tiriamuoju atveju maksimalus drono slopinimo aukštis yra 120 m, tuomet priimkime sąlygą, jog ir drono valdytojas bus už 120 m (žr. 3.2 pav.)



3.2 pav. Drono slopinimas už maksimalaus atstumo (120 m)

Tuomet randame slopintuvo signalo lygį esant 120 metrų iki drono:

Duomenys:

$$EIRP_J = 100 \text{ W}; \quad EIRP_J = 50 \text{ dBm}; \quad f = 2400 \text{ MHz}; \quad d_J = 0,12 \text{ km};$$

$$G_{J_Rx} = 8 \text{ dBi};$$

$$J_{Rx} = EIRP_J - 32 - 20 \log f - 20 \log d_J + G_{J_Rx} \quad (3.4)$$

Slopintuvo signalo lygis (J_{Rx}):

$$J_{Rx} = -23,188 \text{ dBm}$$

Slopintuvo signalo lygis esant 60 metrų iki drono, kai siųstuvo atstumas išliko toks pats:

$$d_J = 0,06 \text{ km};$$

$$J_{Rx} = -17,167 \text{ dBm}$$

Slopintuvo signalo lygis esant 20 metrų iki drono, siųstuvo atstumas nepakito:

$$d_J = 0,02 \text{ km};$$

$$J_{Rx} = -7,625 \text{ dBm}$$

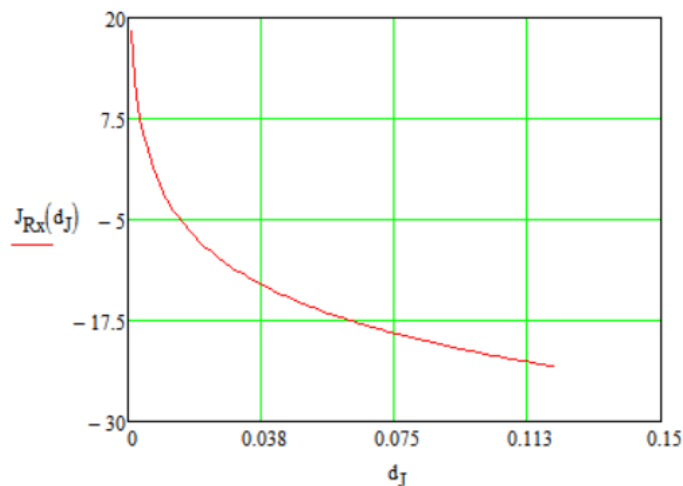
Slopintuvo signalo lygis esant 5 metrų iki drono, siųstuvo atstumas nepakito:

$$d_J = 0,005 \text{ km};$$

$$J_{Rx} = -4,416 \text{ dBm}$$

Teorinę slopintuvo signalo lygio priklausomybę nuo atstumo atvaizduosime pasinaudodami *Matcad* programine įranga:

$$d_J = 0,0.0001..0,12 \text{ m}$$



3.3 pav. Slopintuvo – drono signalo lygio kitimas iki maksimalaus 120 m slopinimo atstumo

BO valdytojo signalo lygis esant 5000 metrų iki drono:

Duomenys:

$$EIRP_{Tx} = 10 \text{ W}; \quad EIRP_{Tx} = 40 \text{ dBm}; \quad f = 2400 \text{ MHz}; \quad d_{Tx} = 0,5 \text{ km};$$

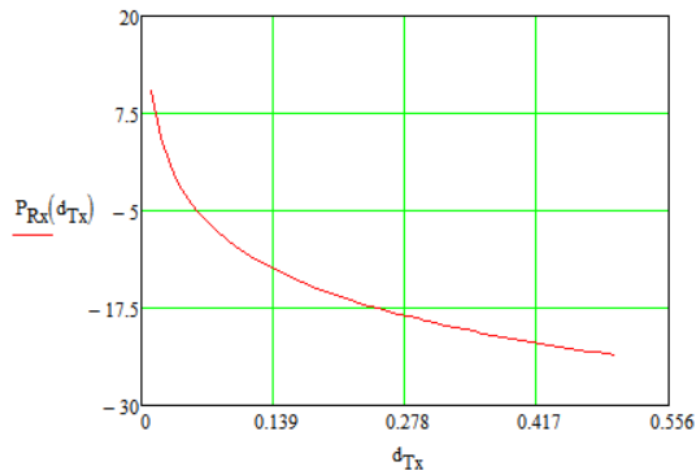
$$G_{Tx_Rx} = 30 \text{ dBi};$$

$$P_{Rx} = EIRP_{Tx} - 32 - 20 \log f - 20 \log d_{Tx} + G_{Tx-Rx} \quad (3.5)$$

Drono valdytojo (operatoriaus) signalo lygis (P_{Rx}):

$$P_{Rx} = -23,584 \text{ dBm}$$

$$d_J = 0,0.0001..0,12 \text{ m}$$



3.4 pav. Siųstuvo – drono signalo lygio kitimas 500 m spindulio atstumu

BO valdytojo signalo lygis esant 250 metrų iki drono:

$$d_{Tx} = 0,25 \text{ km};$$

$$P_{Rx} = -17,563 \text{ dBm}$$

BO valdytojo signalo lygis esant 120 metrų iki drono:

$$d_{Tx} = 0,12 \text{ km};$$

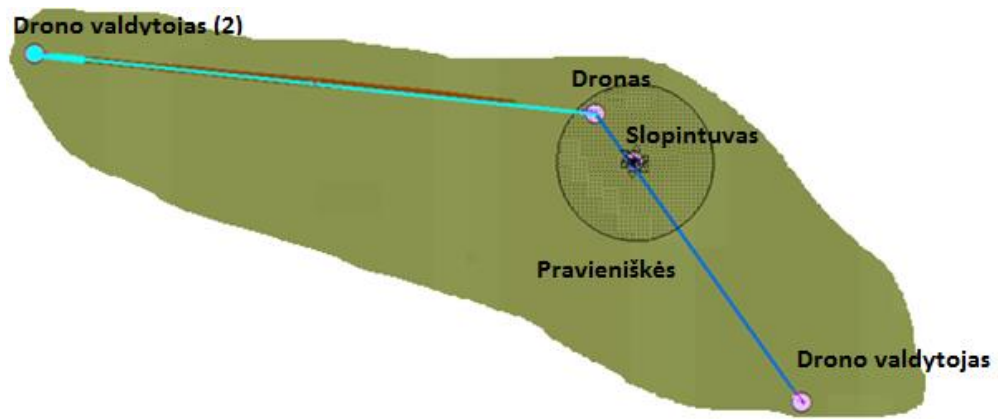
$$P_{Rx} = -11,188 \text{ dBm}$$

3.2 lentelė. Apibendrinta signalo lygio palyginamoji lentelė nuo atstumo

Atstumas, m	Signalas lygis, dBm	
	Slopintuvas – dronas	Siųstuvas – dronas
5	4.416	16.416
20	-7.625	4.375
60	-17.167	-5.167
120	-23.188	-11.188
250	–	-17.563
500	–	-23.584

3.3. Drono blokavimo modeliavimas ir jo rezultatų įvertinimas

Sumodeliuotas BO jo valdytojo ir slopintuvo modelis Pravieniškųjų pataisos namų teritorijoje ir atitinkamai pasirinkus drono kitą skridimo vietą įvertinama blokatoriaus įtaka drono veikimui uždraustoje teritorijoje. Modeliavimui panaudojame Cellular Expert (CE) programinę įrangą.



3.5 pav. Sumodeliuota topologija realioje lokacijoje

Kadangi teritorijoje veikia sloopintuvas ~120 metrų spinduliu, todėl jos plotas atitinkamai gaunamas pasinaudojus matematinėmis apskritimo ploto (S) ir ilgio (L) formulėmis:

$$S = \pi r^2; \tag{3.6}$$

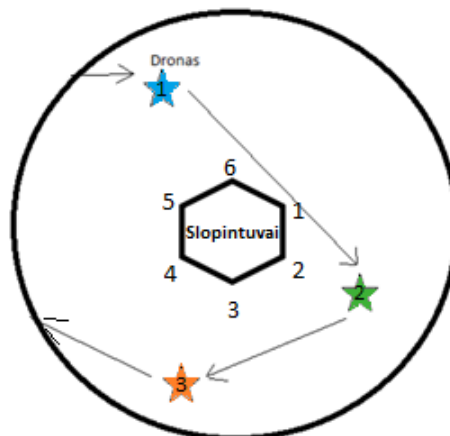
čia r – Apskritimo spindulys, m ;

$$\pi = 3,14.$$

$$L = 2\pi r \tag{3.7}$$

3.3 lentelė. Praveniškių topologijos teritorijos duomenys

OBJECTID	SHAPE *	Pavadinimas	SHAPE_Length	SHAPE_Area
12	Polygon	Praveniskes	749,414845	44692,507294

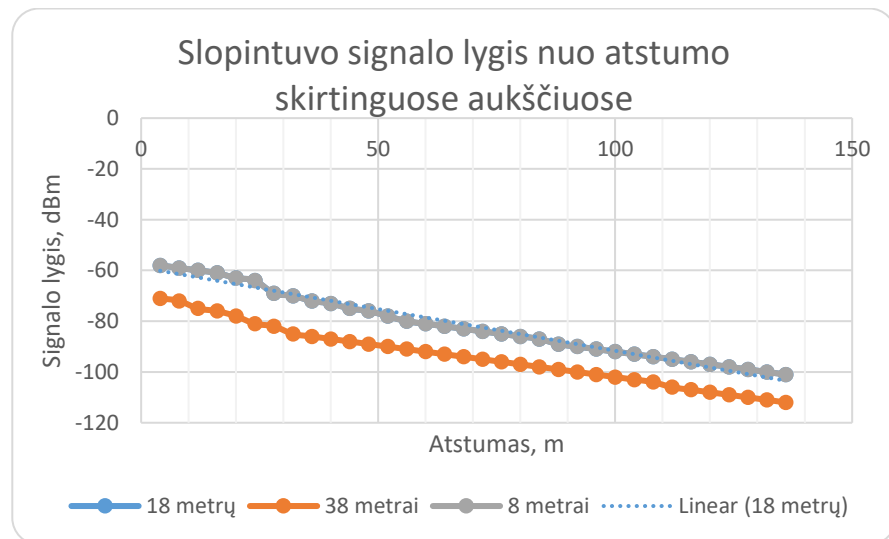


3.6 pav. Drono judėjimo trajektorija ir atitinkamuose trijuose taškuose surinkta informacija (3.10 – 3.12 pav.)

3.4 lentelė. Kiekvieno iš taškų koordinatės:

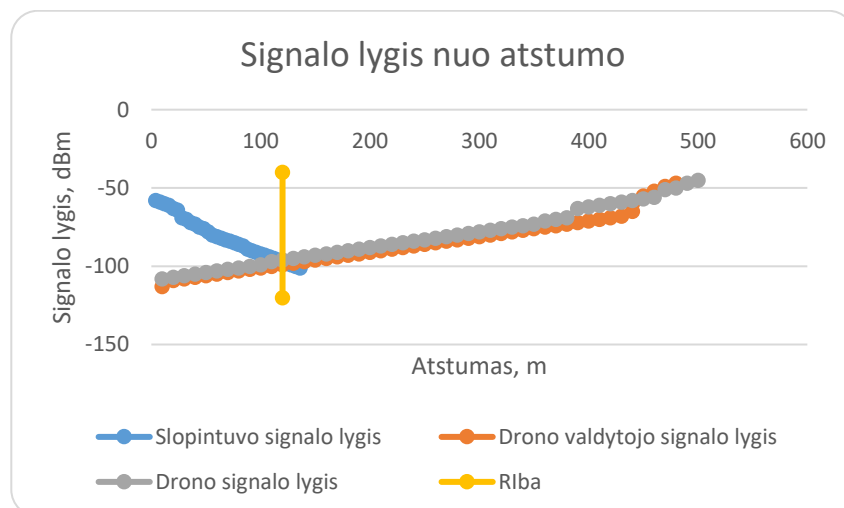
	Rytų kryptimi	Šiaurės kryptimi
1 taškas	513133.1333	6087351.378
2 taškas	513245.8983	6087249.695
3 taškas	513162.819	6087176.882

Šioje vietoje dronas jau yra patekęs į uždraustą teritoriją todėl privalo būti blokuojamas slopintuvo, todėl jo signalo lygis turi būti didesnis už BO. Signalo lygis nuo atstumo pavaizduotas apačioje (žr. 3.7 pav.):



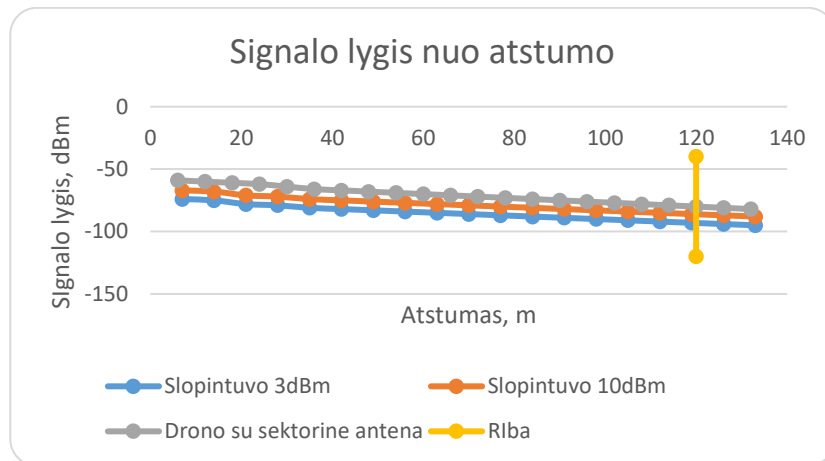
3.7 pav. Slopintuvo signalo lygio tendencija keičiantis atstumui

Kadangi BO apsaugota teritorija apibrėžta 120 metrų spinduliu, todėl tokiam atstume turi blokatoriaus signalo lygis būti didesnis už drono. Realūs modeliavimo rezultatai pavaizduoti 3.8 paveikslėlyje:



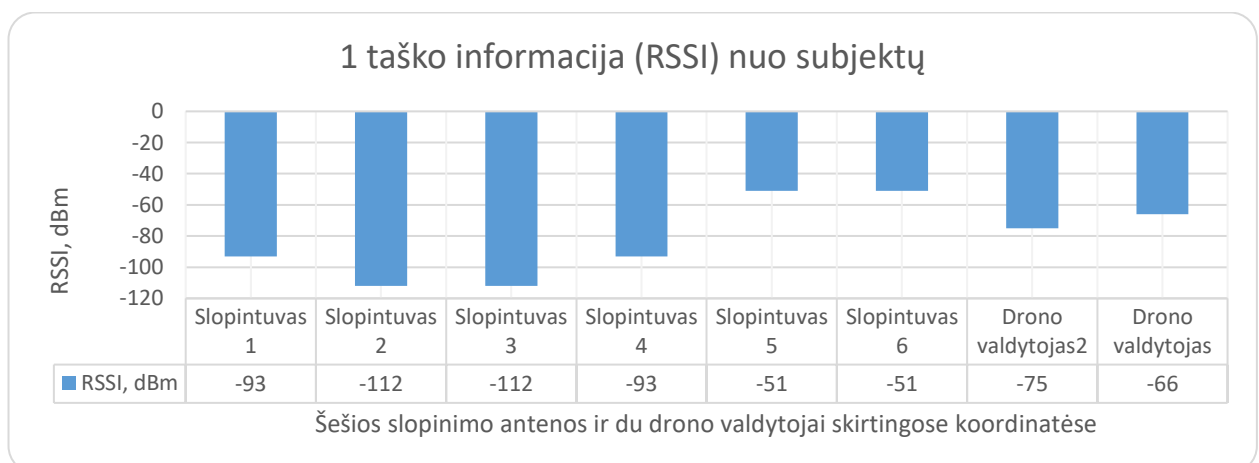
3.8 pav. Slopintuvo ir drono valdytojo signalo lygių priklausomybės

Jeigu neužtenka slopintuvo siunčiamos signalo galios, ją padidiname ir pastebime koks atsiranda poveikis esant 3 dBm ir 10 dBm (žr. 3.9 pav.):



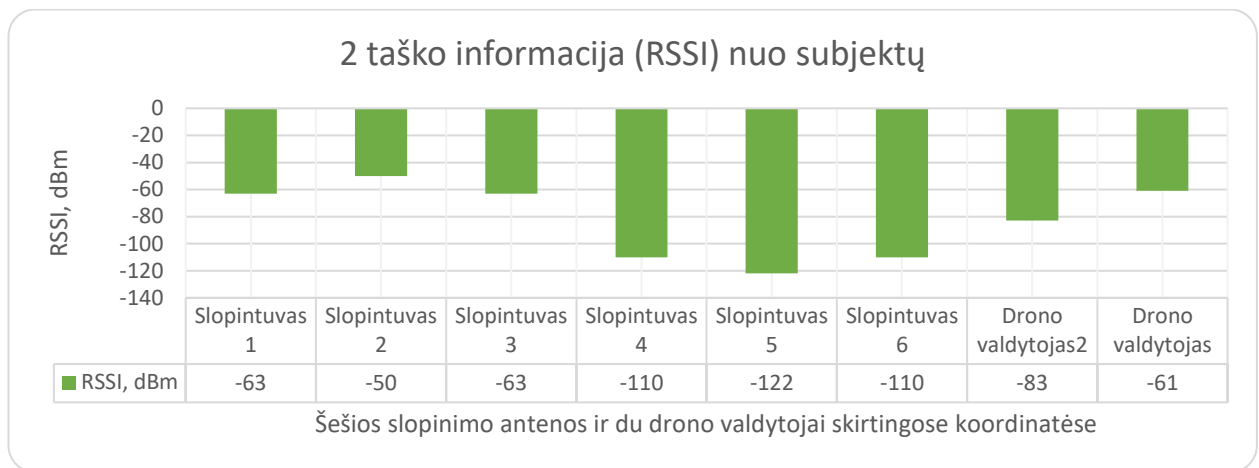
3.9 pav. Slopintuvo ir drono signalo lygių priklausomybės

Taip pat, pasirinktinai nustatytas signalo *RSSI* trijuose skirtinguose stebimos teritorijos vietovėse ir skirtinguose aukščiuose. Šiame modelyje yra slopintuvas su šešiomis antenomis, kurios sumodeliuotos aprėpti visą teritoriją t.y. kas 60 laipsnių spinduliu. Jame yra du drono valdytojai – operatoriai koordinatėse pagal 3.4 paveikslėlį. Taigi, pirmojo taško informacija (*RSSI*) nuo visų ryšio prietaisų:



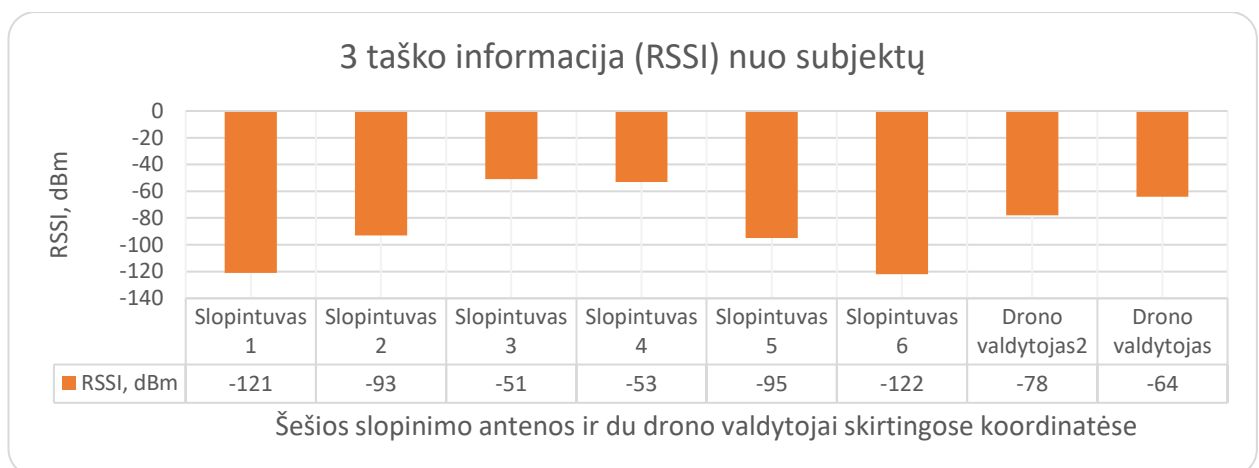
3.10 pav. Slopintuvo ir drono valdytojų *RSSI* 18m aukštyje 1-ame taške

Pirmuoju atveju, buvo galima teigti, kad slopinimas įvyks, nes penktojo ir šeštojo slopintuvų signalų lygiai yra didesni už abiejų drono valdytojų, todėl dronas neturės kitos išeities kaip tik prisijungti prie stipresnio lygio signalo. Toliau tikrinamas antrojo taško *RSSI*:



3.11 pav. Slopintuvo ir drono valdytojų *RSSI* 18m aukštyje 2-ame taške

Antrajame pasirinktame taške dėl pakitusių atstumų, drono skridimo vietos, tik antrasis slopintuvas blokuos droną. Bet to pakaks nuslopinti droną, žinoma, jeigu neatsiras kitų priežasčių trikdančių blokavimo signalo lygį.



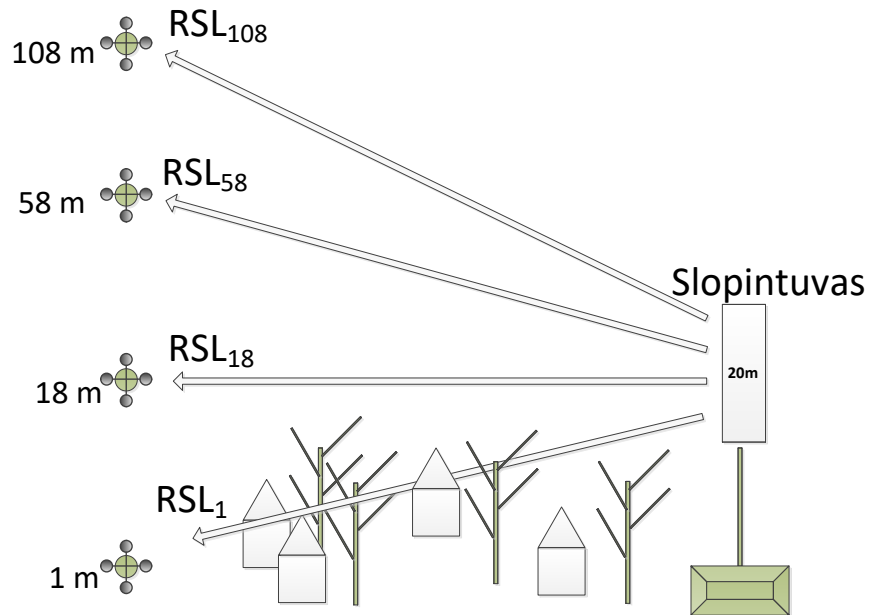
3.12 pav. Slopintuvo ir drono valdytojų *RSSI* 18m aukštyje 3-ame taške

Trečiajame taške drono blokavimas pasireiškia iš trečiojo ir ketvirtojo slopintuvo, nes jų nukreiptos antenos tiesiogiai veikia toje vietoje skrendantį droną, bet tai įtakoja netik antenos tipas ar spinduliavimo galia, bet ir siųstuvo galia, antenų stiprinimas, slopintu pakėlimo aukštis ir kliutys signalo sklidimo trajektorijoje. Grafikų duomenys pateikti penktame priede.

Kadangi kituose aukščiuose nėra fizinių trukdžių (pastatų, medžių), todėl signalo lygis išlieka pastovus, tai įrodo ir [38] atlikti tyrimai su dronu. Šiuo atveju, signalo lygio priklausomybė nuo aukščio pavaizduota 3.13 paveikslėlyje bei aprašyta tokia išraiška:

$$RSL_1 < RSL_{18} \approx RSL_{58} \approx RSL_{108}; \quad (3.8)$$

čia RSL –priimto signalo lygis, dBm.

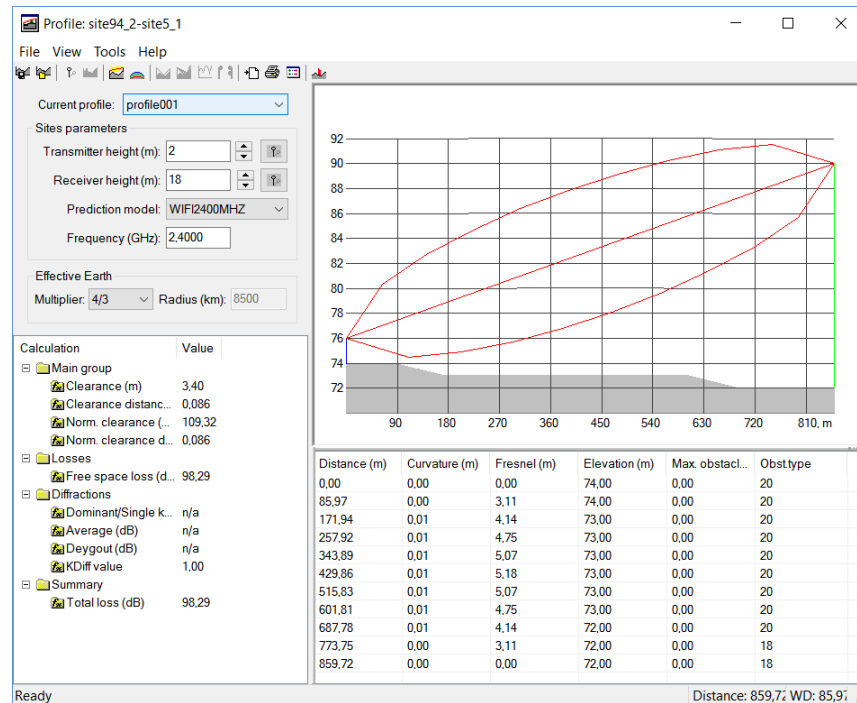


3.13 pav. Slopintuvo ir drono RSL skirtinguose aukščiuose [38]

Įvertinant minėtus tyrimus ir išvadas [38] signalo lygio kitimo grafikai skirtingiems aukščiams nebus pateikti.

Tarp drono ir valdytojo bei slopintuvo gali būti nevysiškai tiesioginis matomumas dėl kliūčių, signalo sklidimo netobulumo, atspindžio, difrakcijos ir kt., todėl Frenelio zonomis atvaizduosiu netik signalo sklidimą bet ir drono, jo valdytojo ir slopintuvo aukščius.

3.14 pav. Drono valdytojas – dronas koordinatės su kitais pagrindiniais parametrais



3.15 pav. Drono valdytojas – dronas frenelio zona

Iš Frenelio zonos brėžinio nustatyta, kad šioje atkarpoje pastatų, augalų ar kitų objektų įtakančių signalo sklidimą nėra, todėl jų poveikis ir nebus vertinamas. Bus pasinaudota laisvosios erdvės modeliu skaičiuojant, analizuojant slopinimą sekančiuose modeliavimuose.

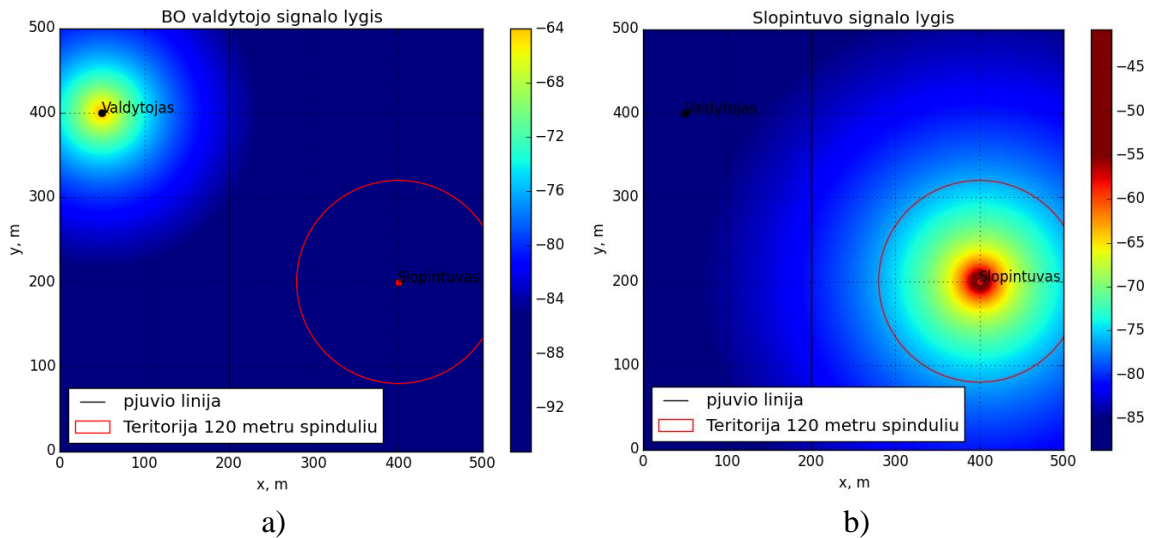
3.4. Drono blokavimo modeliavimas ir rezultatų įvertinimas Matplotlib programinės įrangos pagalba

Signalų lygio skaičiavimui pasinaudosime laisvosios erdvės modelio išraiškomis slopintuvui ir siųstuvui (BO valdytojui). Modeliavimui panaudosime Python, Matplotlib programines įrangas.

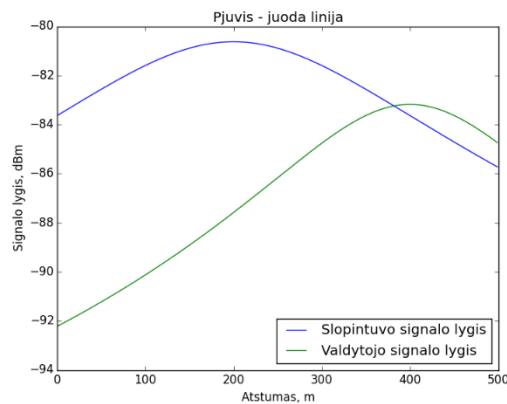
Pradiniai duomenys:

- $EIRP_J = 50$ dBm;
- $EIRP_V = 40$ dBm;
- $G_{J-Rx} = 15$ dBi;
- $G_{Tx-Rx} = 20$ dBi;
- $f = 2400$ MHz;
- Nagrinėjama teritorija 500x500m;
- Slopintuvo koordinatės (400;200;20);
- Pradinės drono valdytojo koordinatės (50;400;1,5).

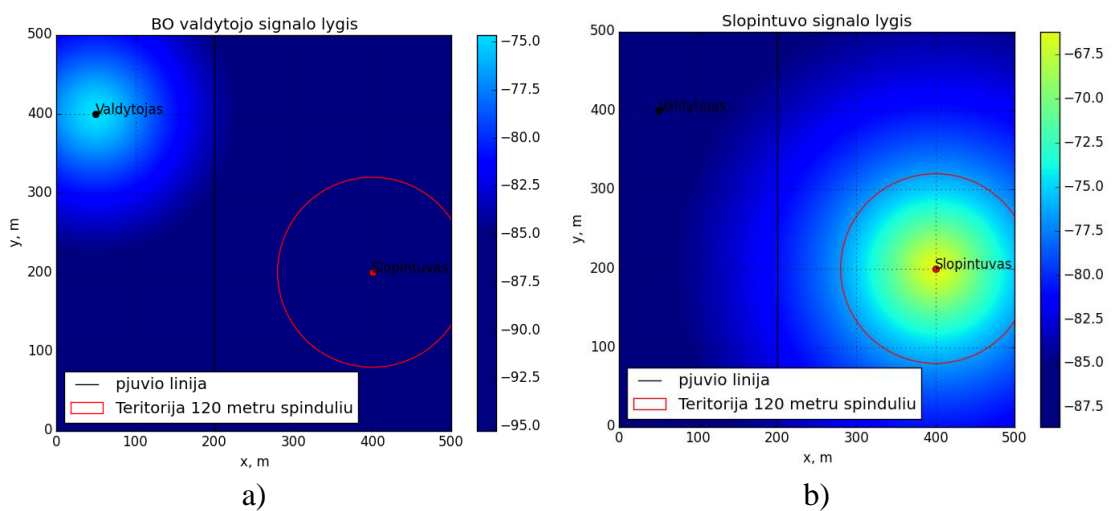
Pagal pradinis duomenis ir laisvosios erdvės modelį buvo suprogramuota slopintuvas – drono valdytojas sistema ir padarytas pjūvis pagal koordinatas:



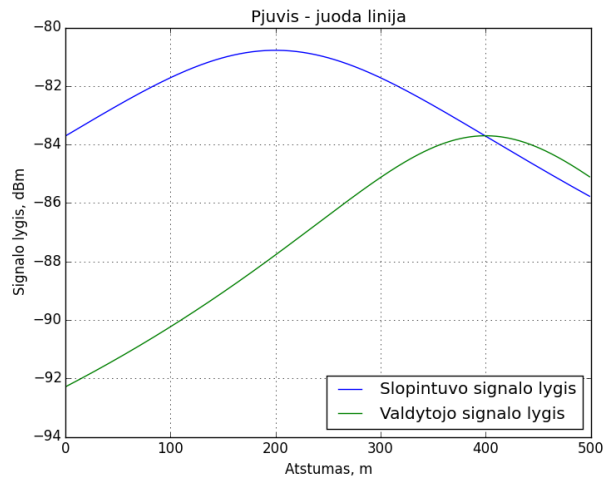
3.16 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 18 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis



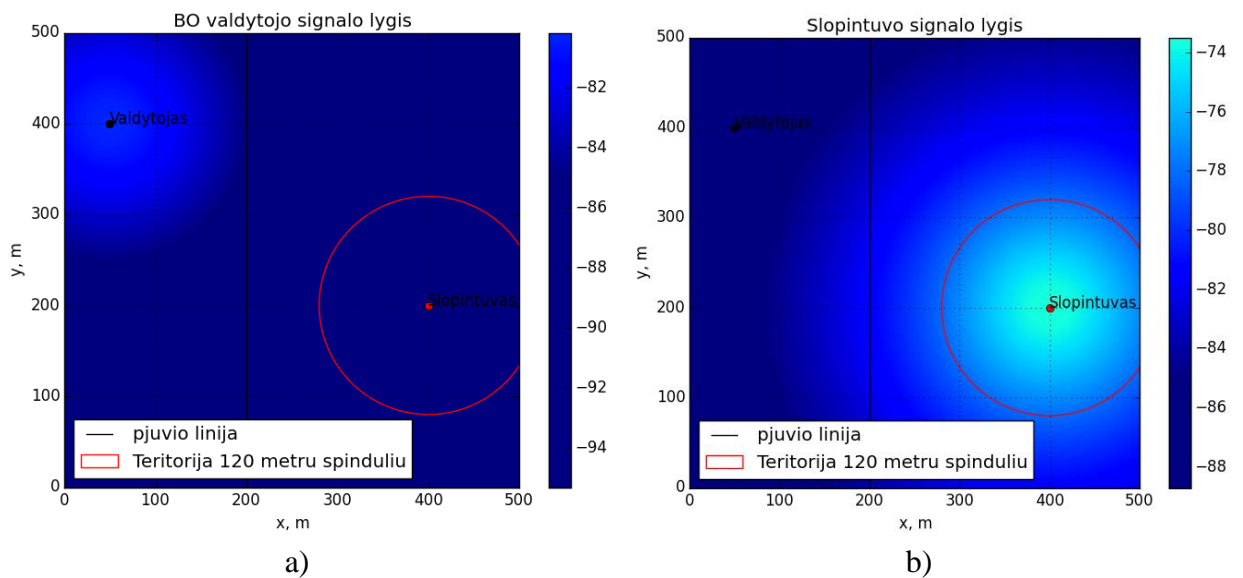
3.17 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 18 metrų aukštyje



3.18 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 58 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

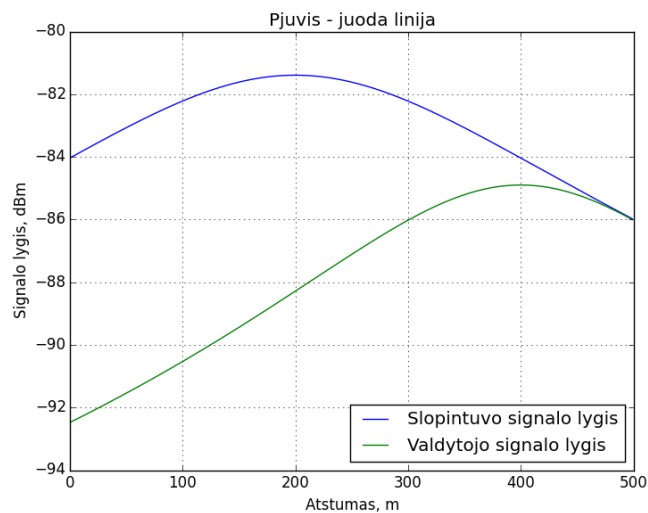


3.19 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 58 metrų aukštyje



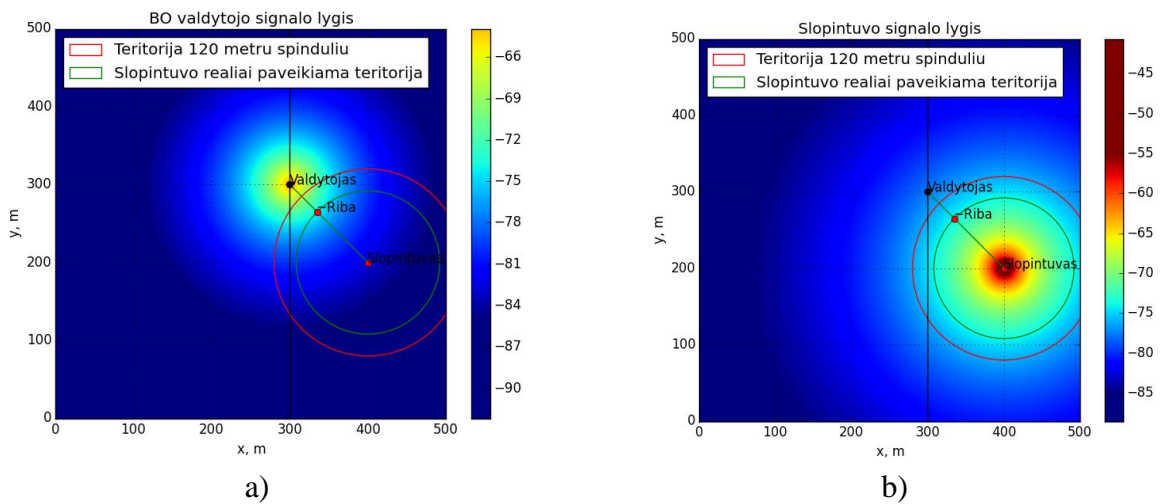
3.20 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 108 metrų aukštyje:

a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

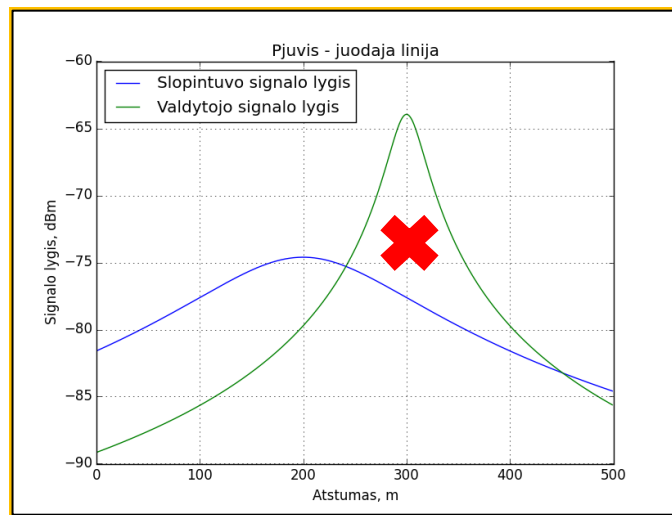


3.21 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 108 metrų aukštyje

Pagal analizuotus duomenis, dronas slopins visa teritoriją. Pakeičiame BO valdytojo buvimo vietą į artimą ribai su slopinama zona ir toliau tiriamo signalo slopinimo galimybes. Šiuo atveju, drono valdytojo koordinatės yra (300;300;1,5), o dronas pirmiausiai skrenda 18 metrų aukštyje.

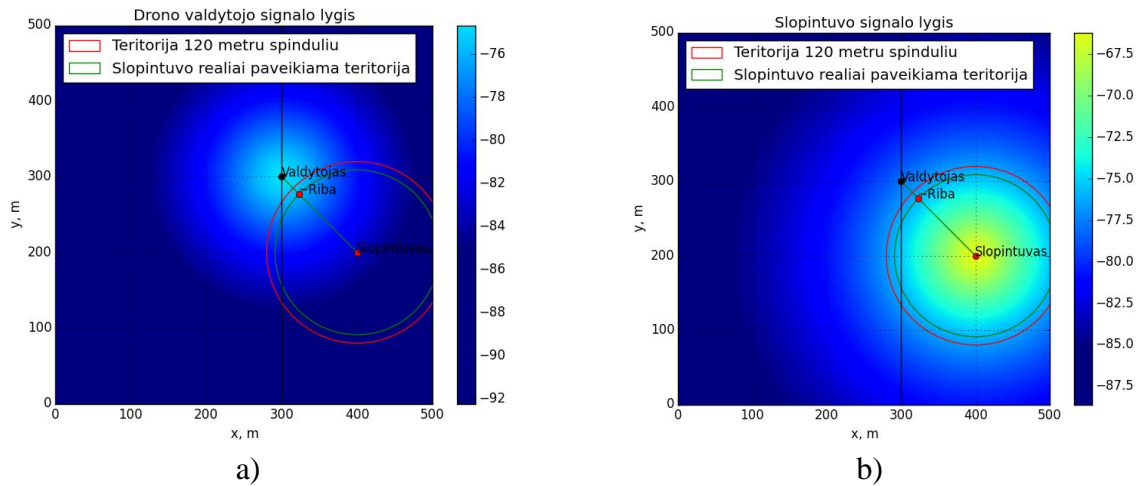


3.22 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 18 metrų aukštyje: o valdytojas yra 141,42 metrų atstumu nuo drono a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

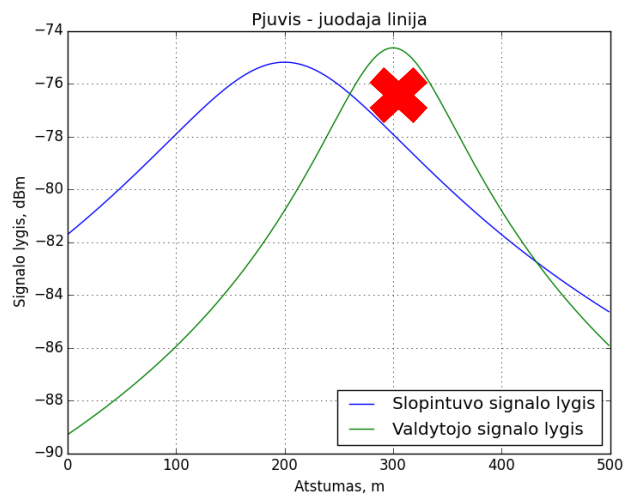


3.23 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 18 metrų aukštyje

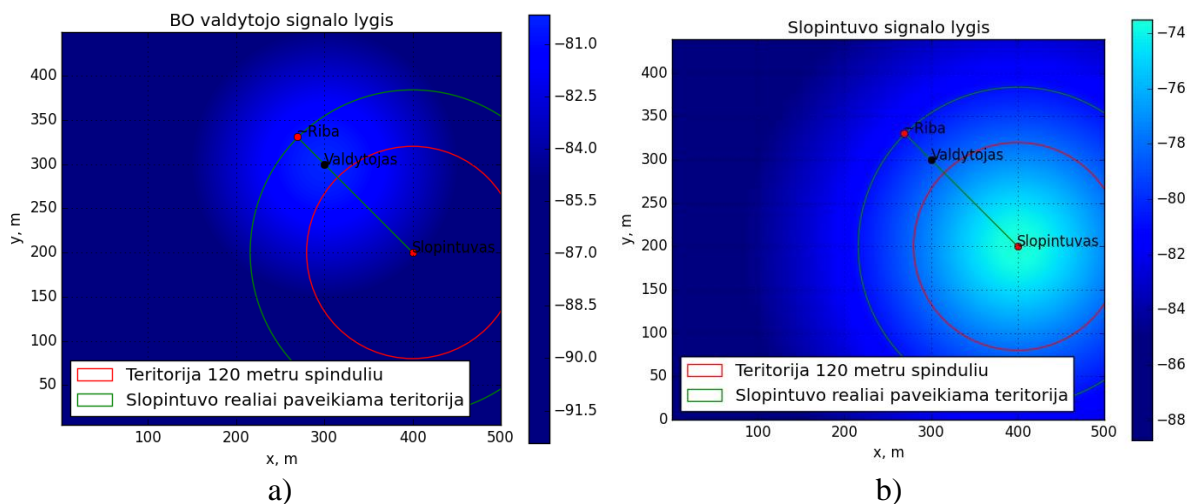
✘ – Neslopinama sritis



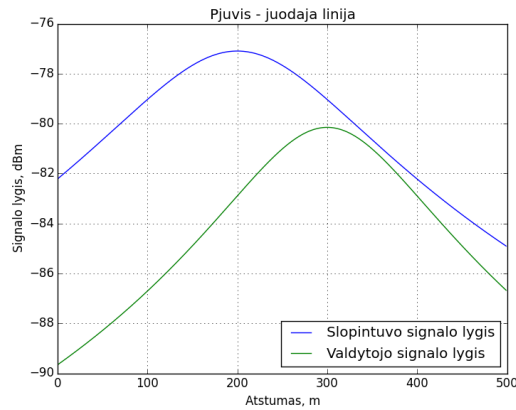
3.24 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 58 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis



3.25 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 58 metrų aukštyje

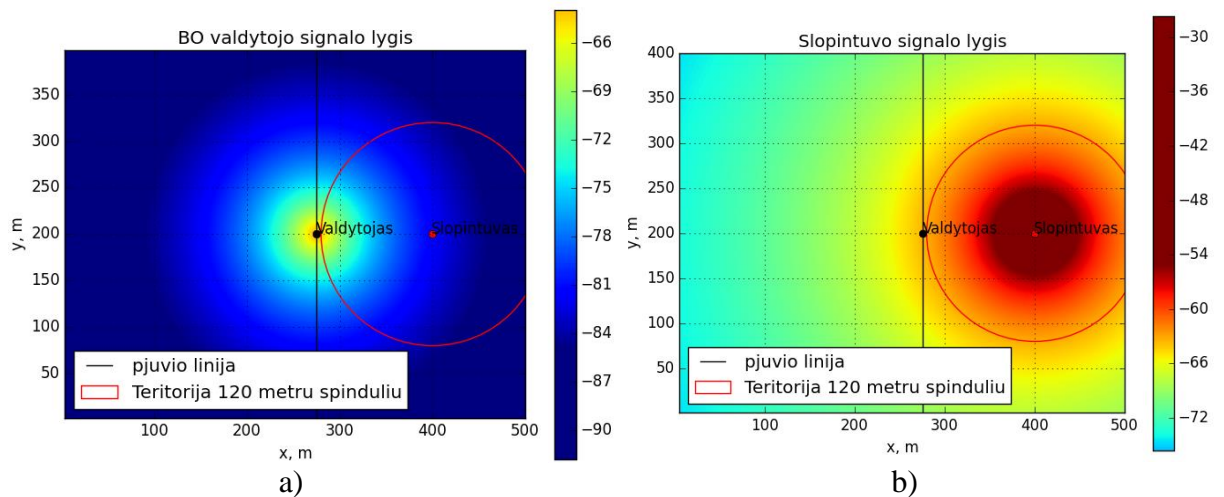


3.26 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 108 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis



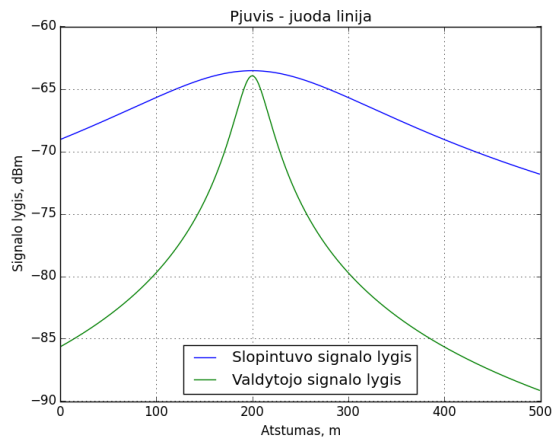
3.27 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 108 metrų aukštyje

Artimiausia vieta kurioje gali atsidurti BO valdytojas – 120 metrų nuo slopintuvo, nes tokioje aptvortoje teritorijoje slopintuvas veiks. Todėl norint įvertinti slopintuvo veikimo efektyvumą, sumodeliuojame valdytojo lokaciją reikiamoje vietoje (pirmiausiai tarkime dronas skrenda 18 metrų aukštyje) ir palyginam signalų lygius tarpusavyje.



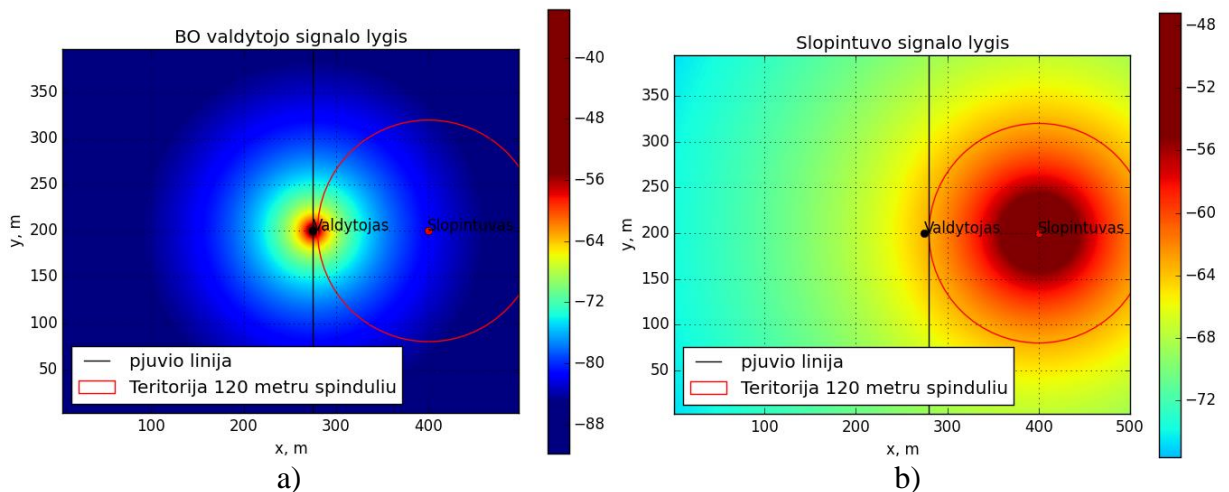
3.28 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 18 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

Iš gautų rezultatų pastebėta, jei drono valdytojas bus būtent tokiu atstumu nuo slopintuvo tai jo valdomam dronui nuslopinti reiks didinti slopintuvos galią, todėl šiuo atveju, pakeisime anteną ir slopintuvo antenos galia bus 20 dBi, o slopintuvo efektyvioji izotropinė galia – 58 dBm. Gautų rezultatų pjūvis apačioje.

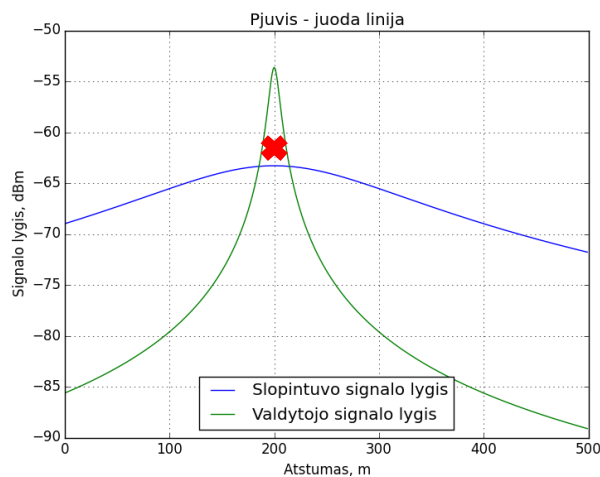


3.29 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 18 metro aukštyje

Iš čia galime pamatyti, jog slopintuvas apdengia (slopina) visą reikiamą teritoriją. Tačiau BO gali skristi ir žemiau nei 18 metrų, todėl patyrinėsime signalų lygius BO esant vieno metro aukštyje ir šiuo atveju rasime mažiausią reikalingą stiprinimą efektyviam slopinimui.



3.30 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 1 metro aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis



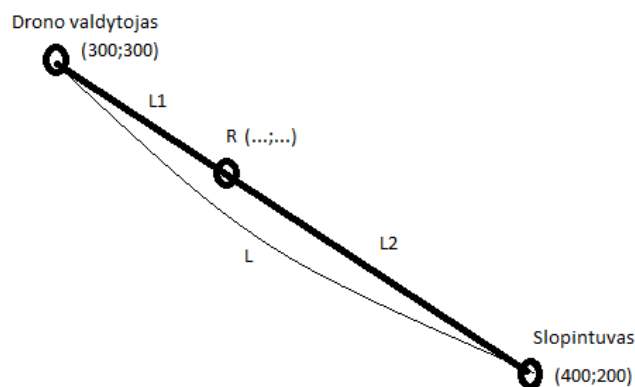
3.31 pav. Slopintuvo ir BO valdytojo signalų lygių pjūvis 1 metro aukštyje

Šiuo atveju jau slopintuvai nepajėgus slopinti pilnai visos teritorijos, todėl nors ir pakeitėme slopintuvo anteną, gauti rezultatai netenkina, t.y. visa teritorija nebuvo padengiama didesniu slopinamo signalo lygiu lyginant su užsaiduotu drono valdytoju. Išvada: būtina priimti kitokią sprendimą artimųjų zonų stebėjimui, pavyzdžiui, suprojektuoti slopintuvus visoje teritorijoje ir taip parenkant reikiamą stiprinimą ir lokacijas slopinti visą sritį. Nes stipriai didinti vien centrinio slopintuvo antenos galią nei nėra efektyvu energijos prasme, nei saugu (sveika) žmonių sveikatos atžvilgiu bei įrangos gyvavimo laikas ir patikimumas sumažėja.

Taip pat, buvo atlikti skaičiavimai ir modeliavimai dažniuose artimuose 2.4 GHz, rezultatai ir priklausomybės išliko tokios pačios, tik atitinkamai signalų lygio reikšmės buvo minimaliai arba didesnės arba mažesnės priklausomai nuo esamo dažnio, todėl nėra būtinybės rezultatus pateikti su skirtingais dažniais kai yra kalbama apie 2400 MHz dažnio valdymo kanalus.

3.4.1. Slopintuvo ir drono valdytojo signalų blokavimo riba

Nustatysime ribą kurioje dronas yra paveikiamas slopintuvo prie tam tikrų parametrų ir įvertinę duomenis rezultatai bus pateikti procentine dalimi nuo teritorijos ilgio (atstumo tarp slopintuvo ir BO valdytojo). Taigi, tegul įrangos parametrai būna tokie patys kaip ir anksčiau tyrinėtų teritorijų, vienodas 18 metrų aukštis, objektų koordinatės pagal 3.32 paveikslėlį, kai drono valdytojas yra arti draužiamos teritorijos (300;300).



3.32 pav. Drono valdytojo – slopintuvo atstumų su koordinatėmis schema

R – ribos taškas su koordinatėmis (335;265);

L – atstumas tarp slopintuvo ir drono valdytojo;

L_1 – atstumas tarp drono valdytojo ir R taško;

L_2 – atstumas tarp slopintuvo ir R taško.

Pagal slopintuvo ir BO valdytojo koordinates randame atstumą tarp jų:

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.9)$$

$$L = \sqrt{(400 - 300)^2 + (200 - 300)^2} = \sqrt{100^2 + 100^2} \approx 141.42 \text{ (m)}$$

Iš formulės aukščiau randame L2:

$$L_2 = \sqrt{(400 - 335)^2 + (200 - 265)^2} = \sqrt{65^2 + 65^2} \approx 91.92 \text{ (m)}$$

Randame procentinę dalį (l_2) viso atstumo, kuri slopina sudarydami proporciją:

$$141,42 \rightarrow 100$$

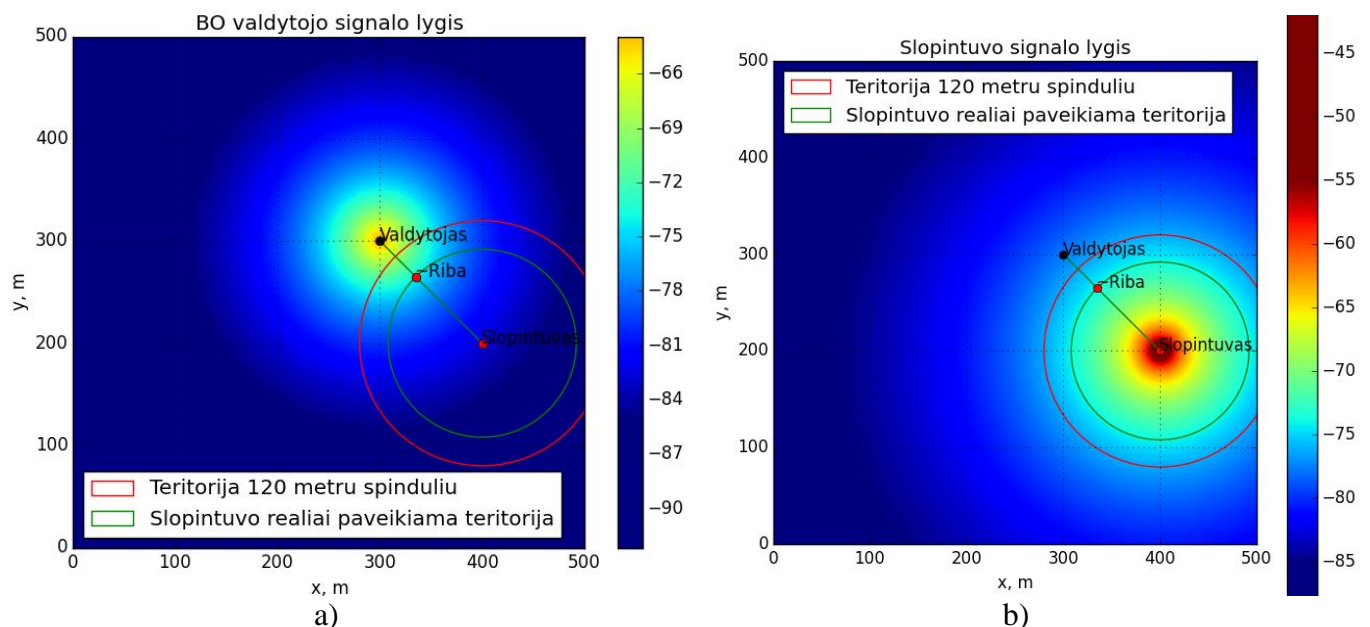
$$91,92 \rightarrow x_2$$

$$l_2 = \frac{91.92 \cdot 100}{141.42} \approx 65(\%)$$

Atitinkamai: $l_1 = 100 - x_2 = 100 - 65 = 35(\%)$

O signalų lygiai taške R prie nurodytų sąlygų yra:

$$P_j \approx P_D \approx -74$$

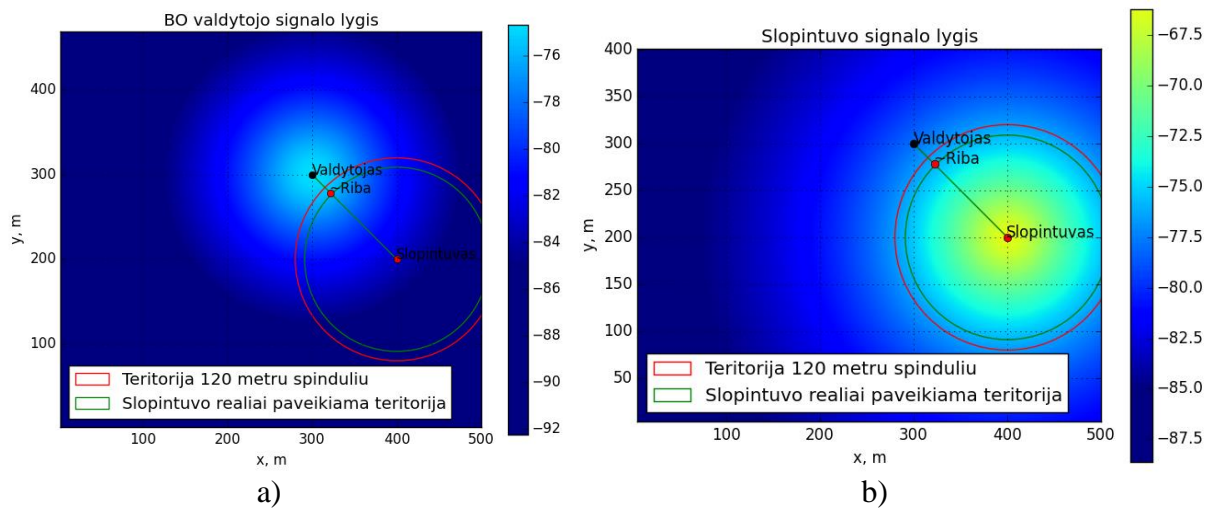


3.33 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 18 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

Iš suskaičiuotų rezultatų ir nubraižytų grafikų nustatyta, jog esant tokiems parametrams

slopintuvas atliks savo darbą 65% teritorijos ilgio iki drono valdytojo, atitinkamai dronas bus kontroliuojamas 35% kelio skrendant tiesia atkarpa nuo valdytojo, kur toliau dėl slopintuvo didesnio signalo lygio įvyks drono perėmimas. Slopintuvo ir drono valdytojo signalų lygiai pažymėtame taške *Riba* siekia kiek daugiau nei -74 dBm. O toliau atitinkamai dideja arba mažėja priklausomai nuo drono skrydžio trajektorijos.

Dabar panagrinėsime slopinamą teritoriją dronui skrendant 58 metrų aukštyje, kiti parametrai išlieka tie patys, skaičiavimai analogiški ankstesniems. Ribos taško koordinatės (323;277):

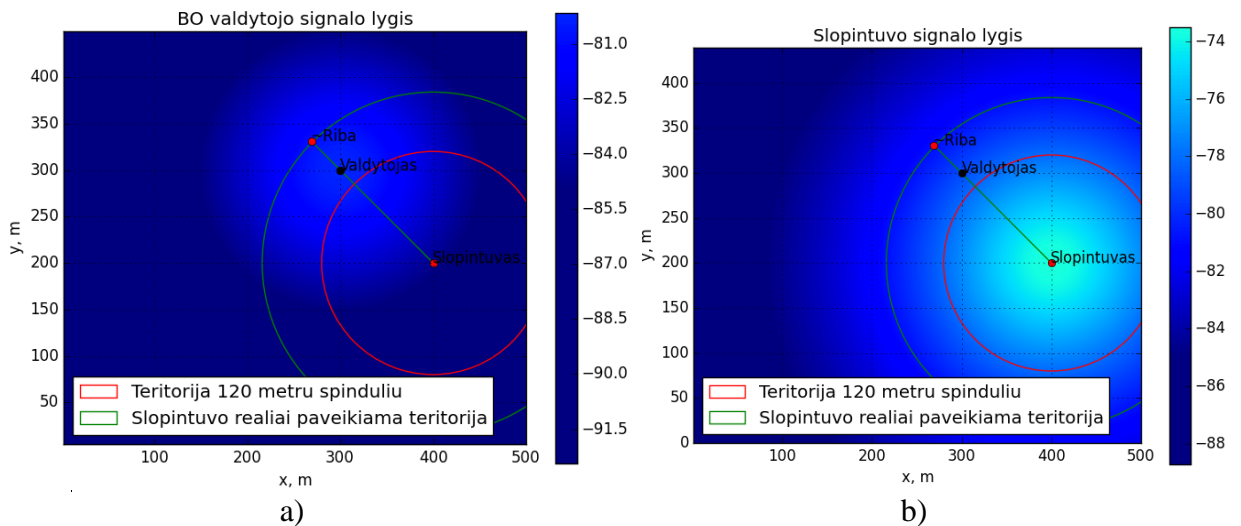


3.34 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 58 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

Iš suskaičiuotų rezultatų ir nubraižytų grafikų nustatyta, jog esant tokiems parametrams slopintuvas atliks savo darbą 77% teritorijos ilgio iki drono valdytojo, atitinkamai dronas bus kontroliuojamas 23% kelio skrendant tiesiai nuo valdytojo, kur toliau dėl slopintuvo didesnio signalo lygio įvyks drono perėmimas. Slopintuvo ir drono valdytojo signalų lygiai pažymėtame taške *Riba* siekia beveik -76 dBm. O toliau atitinkamai dideja arba mažėja priklausomai nuo drono skrydžio trajektorijos.

Nagrinėjant drono skrydį 108 metrų aukštyje, jis bus slopinamas visą atstumą tarp slopintuvo ir drono valdytojo, kuris siekia kiek daugiau nei 141 metrą, todėl rasime atstumą už kurio dronas nebus paveikiamas.

Ribos taško koordinatės (270;330)



3.35 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 108 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

Tiesioginis atstumas nuo slopintuvo yra >183.85 metrų. Slopintuvo ir drono valdytojo signalų lygiai pažymėtame taške *~Riba* siekia:

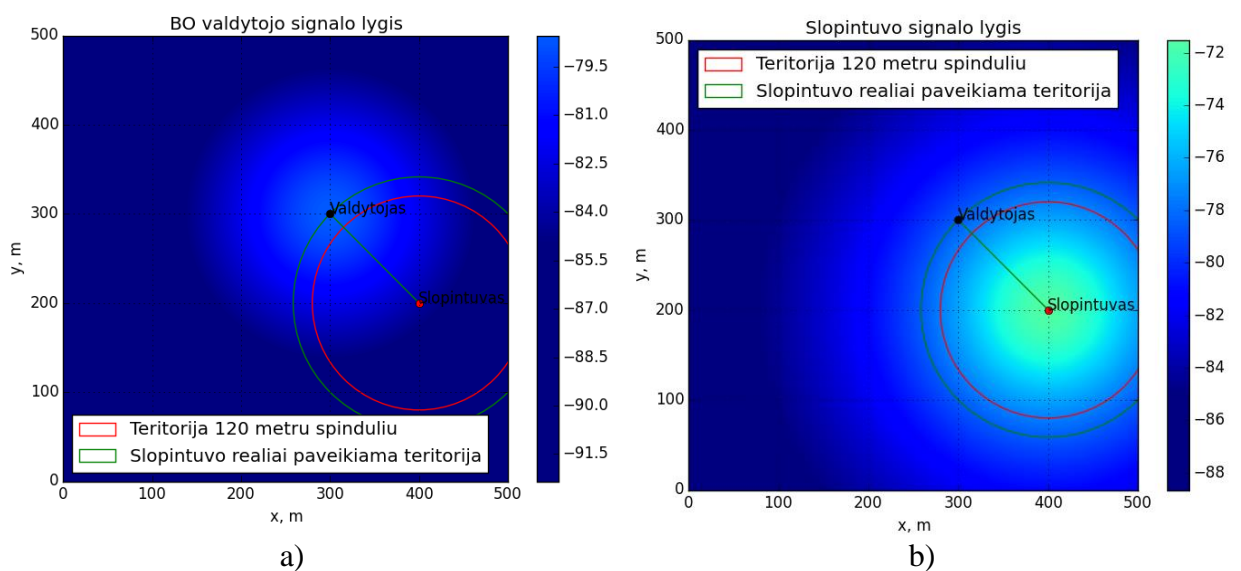
$$P_J = -80.79 \text{ dBm};$$

$$P_D = -80.79 \text{ dBm};$$

Rasime drono aukštį, kuriame jis nebus slopinamas, valdytojui esant toje pačioje vietoje. Sumažinus aukštį nuo 108 iki 90 metrų BO valdytojo signalo lygis tampa didesnis nei slopintuvo. Tame aukštyje abiejų prietaisų signalų lygiai:

$$P_J = -78.57 \text{ dBm};$$

$$P_D = -78.54 \text{ dBm};$$



3.36 pav. Drono valdytojo – slopintuvo signalų lygiai, kai BO skrenda 90 metrų aukštyje: a) valdytojo signalo lygis; b) slopintuvo signalo lygis

Galime daryti išvadą, jog dronui esant mažesniame nei 90 metrų aukštyje prie pasirinktų stiprinimų, jis nebus paveiktas, tačiau jeigu BO skridimo kryptis bus link slopintuvo tuomet neužteks ir 18 metrų aukščio, nes slopintuvo signalo lygis bus didesnis nei valdytojo ir dronas taps nebevaldomas. Apibendrinti rezultatai visuose modeliuotuose aukščiuose, su ribiniu perimamo signalo lygiu, atstumais ir kitais duomenimis pateikti lentelėje apačioje.

3.5 lentelė. Apibendrinti duomenys ir rezultatai

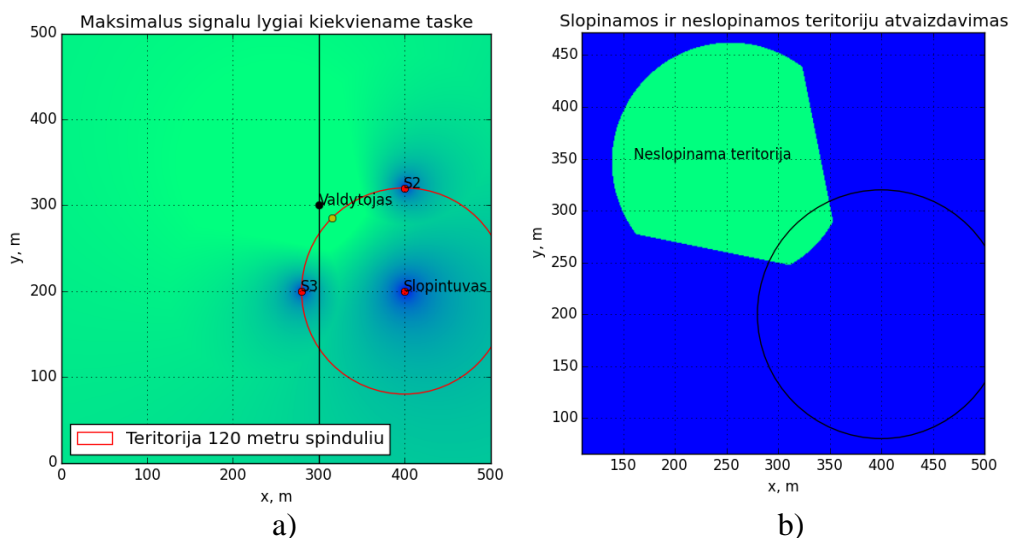
BO skridimo aukštis, m	Koordinatės	$P_J = P_D$, dBm	L , m	$L1$, m	$L2$, m	I_1 , %	I_2 , %
1	(337;263)	-73.8	141.42	52.32	89.1	37	63
18	(335;265)	-73.91	141.42	49.5	91.92	35	65
58	(323;277)	-75.87	141.42	32.53	108.89	23	77
90	(300;300)	-78.56	141.42	0	141.42	0	100
108	(270;330)	-80.79	141.42	–	183.85	–	130

Kaip ir buvo paminėta: norint užtikrinti blokavimą visoje teritorijoje ~100%, reikalinga instaliuoti daugiau slopintuvų teritorijoje. Taip pat naudinga būtų įdiegti vaizdo kameras su tam tikrais sensoriais identifikuojančiais dronus. Šiuo atveju, aptikus BO draudžiamoje teritorijoje, jį nuslopinti būtų įmanoma visoje teritorijoje tolimesniam jo identifikavimui ir tyrimui.

3.4.2. Slopintuvų projektavimas ir tam tikros jų vietos pasirinkimas teritorijoje

Kadangi ankstesniuose modeliavimuose teritorija nebuvo visiškai slopinama, atsižvelgus į užsiduotus parametrus ir teritoriją pridedame du slopintuvus (S2 ir S3) ir stebime teritorijos slopinimą. Drono valdytojas lieka toje pačioje vietoje (300;300), priimame, kad dronas skrenda 18 metrų aukštyje, o slopintuvus projektuojame proporcingai teritorijos skirties linijoje. Papildomų slopintuvų pakoreguoti parametrai:

- $EIRP_J = 40$ dBm
- $G_{J-Rx} = 20$ dB
- Spalvų paletė– *winter_r*

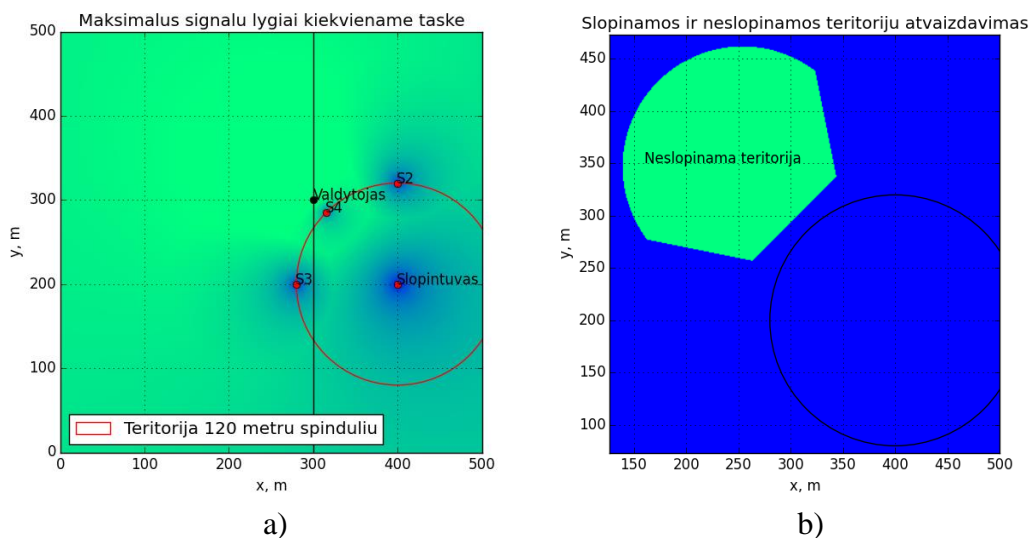


3.37 pav. Dviejų slopintuvų išdėstymas teritorijoje ir jos slopinimas: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

3.6 lentelė. Kiekvieno slopintuvo signalo lygis geltonajame taške

Taškas	Signalo lygis, dBm
Slopintuvas	-81,2
S2	-78,87
S3	-78,87
Valdytojas	-68,19

Iš rezultatų grafikuose ir lentelėje matome, kad dalis teritorijos nėra slopinama ir dronas gali patekti į ją, todėl projektuojame, dar vieną slopintuvą (S4), kuris bus tarp anksčiau pridėtųjų ir slopins likusią teritoriją, jo parametrai tokie patys.

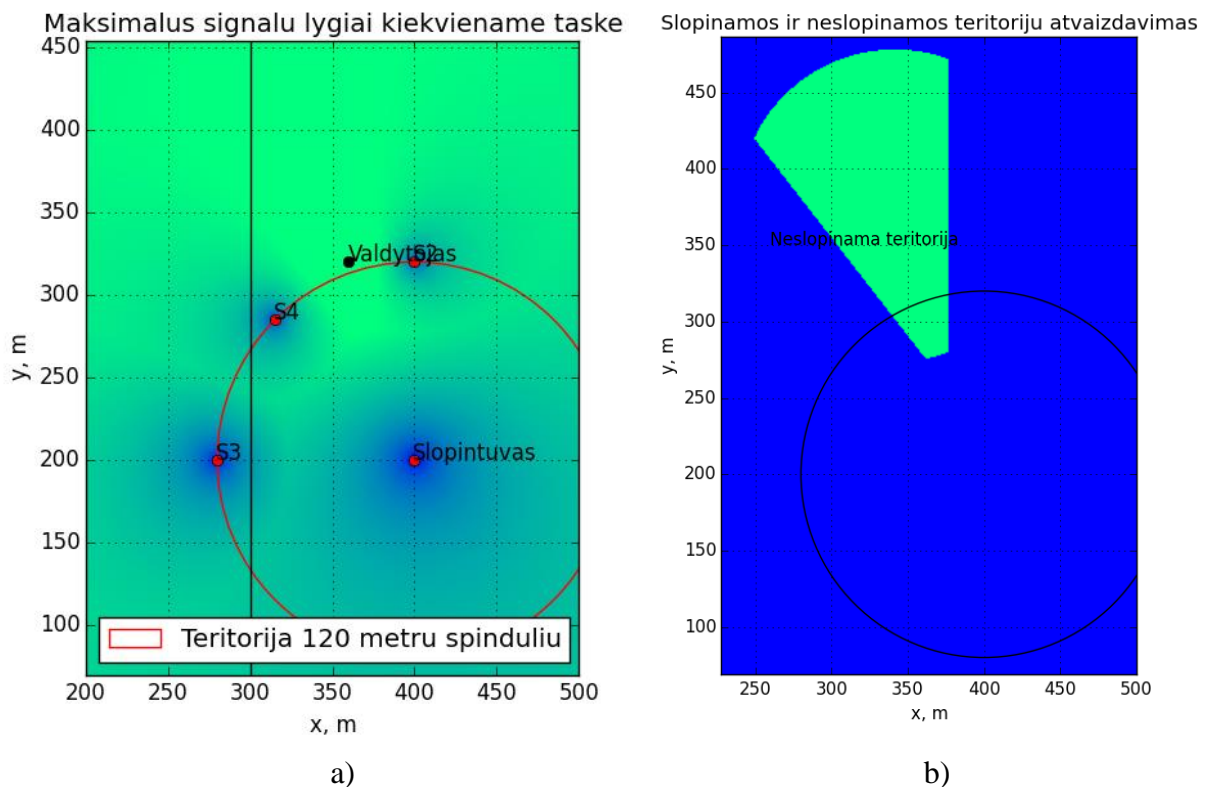


3.38 pav. Trijų slopintuvų išdėstymas teritorijoje ir jos slopinimas: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

3.7 lentelė. Kiekvieno slopintuvo signalo lygis geltonajame taške

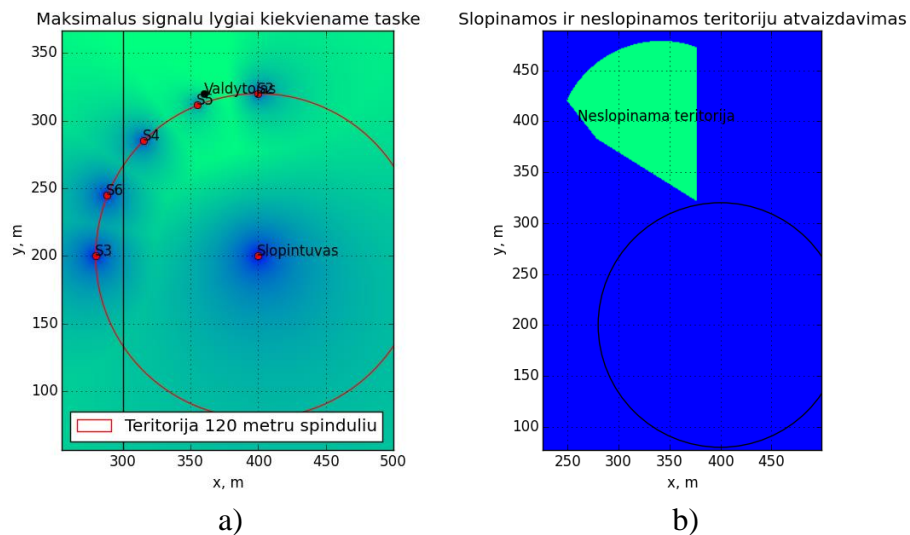
Taškas	Signalo lygis, dBm
Slopintuvas	-81,2
S2	-78,87
S3	-78,87
Valdytojas	-68,19
S4	-45,62

Šiuo atveju, teritorija sėkmingai slopinama. Dronas gali skristi tik neslopinamoje teritorijoje. Bet pakeitus drono valdytojo lokaciją įsitikinsime ar tikrai trys slopintuvai toje teritorijos dalyje užtikrina dronų blokavimą, valdytojo koordinatės (360;320):



3.39 pav. Trijų slopintuvų išdėstymas teritorijoje ir jos slopinimas: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

Iš gautų grafikų akivaizdu, jog atsirado poreikis vėl modeliuoti naujus slopintuvus proporcingai išdėsčiusius teritorijos tarpuose. Bus pridėti du papildomi slopintuvai S5 (355;315) ir S6 (288;245), o jų specifikacijos tokios pačios kaip ir ankstesnių slopintuvų.

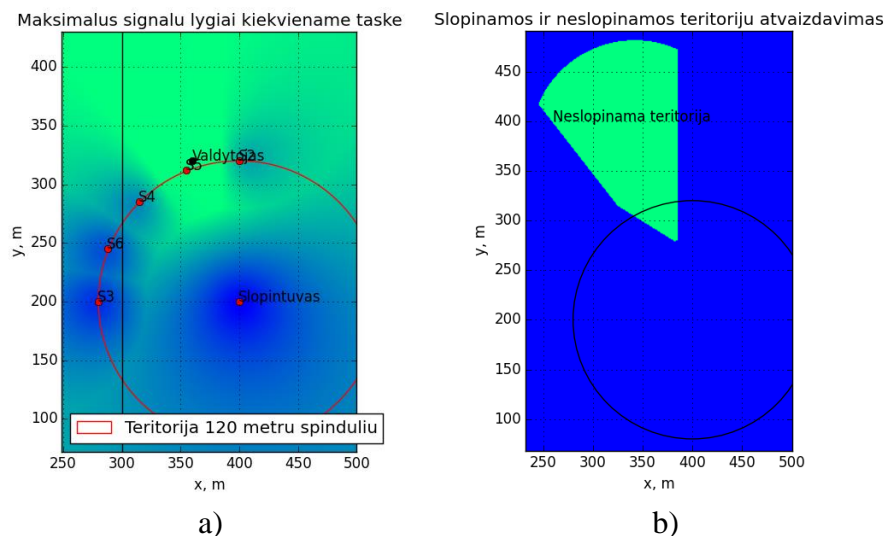


3.40 pav. Penkių slopintuvų išdėstymas teritorijoje ir jos slopinimas: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

3.8 lentelė. Kiekvieno slopintuvo signalo lygis S5 taške

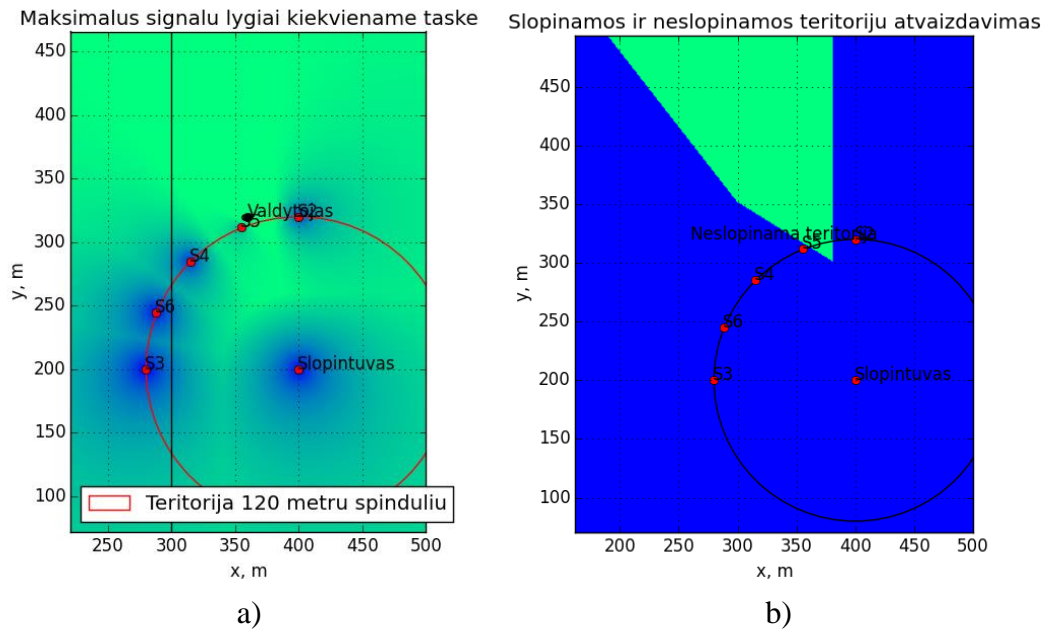
Taškas	Signalų lygis, dBm
Slopintuvas	-81,24
S2	-72,81
S3	-82,2
Valdytojas	-65,18
S4	-73,28
S5	-45,62
S6	-79,14

Teritorija slopinama sėkmingai. Tačiau taip pat reikia įvertinti ir drono skrydžio aukštį, kuris kuo mažesnis tuo pavojingesnis blokuojamai teritorijai, todėl įvertinsime šių suprojektuotų slopintuvų veikimą dronui skrendant 1 metro aukštyje:

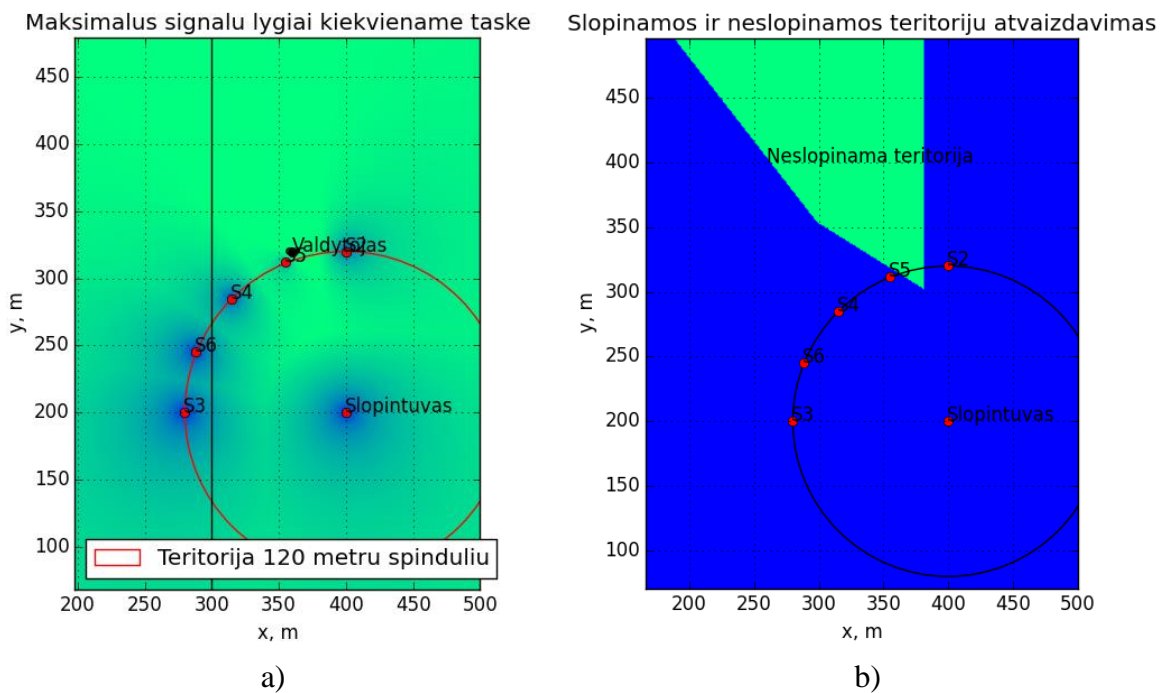


3.41 pav. Penkių slopintuvų išdėstymas teritorijoje ir jos slopinimas dronui skrendant vieno metro aukštyje: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

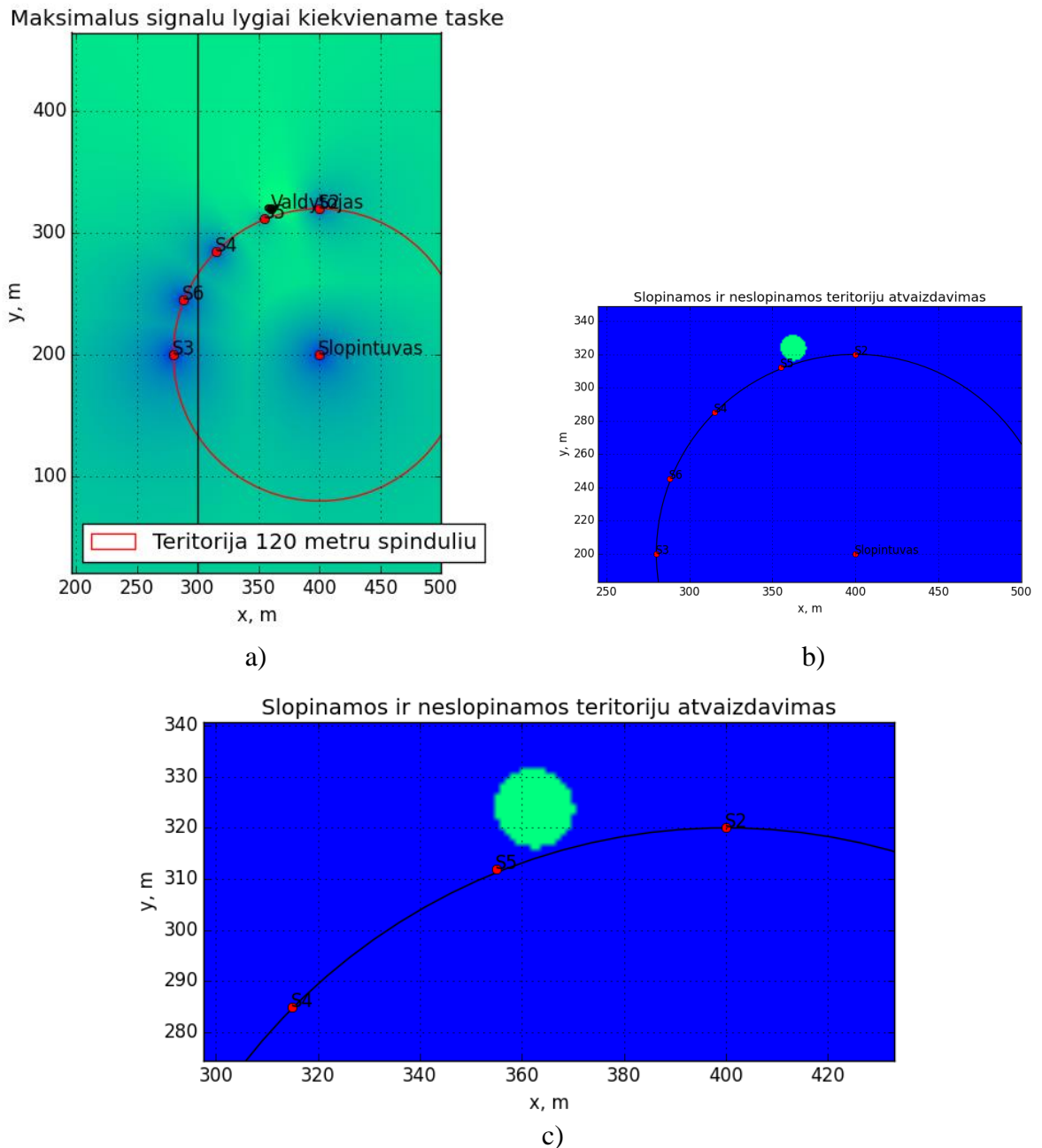
Nėra slopinama teritorija, todėl mažiname slopintuvų aukščius iki 5 metrų ir tikriname slopinamą teritoriją:



Nėra slopinama teritorija, todėl mažiname slopintuvų aukščius iki 2 metrų ir vėl tikriname slopinamą teritoriją:

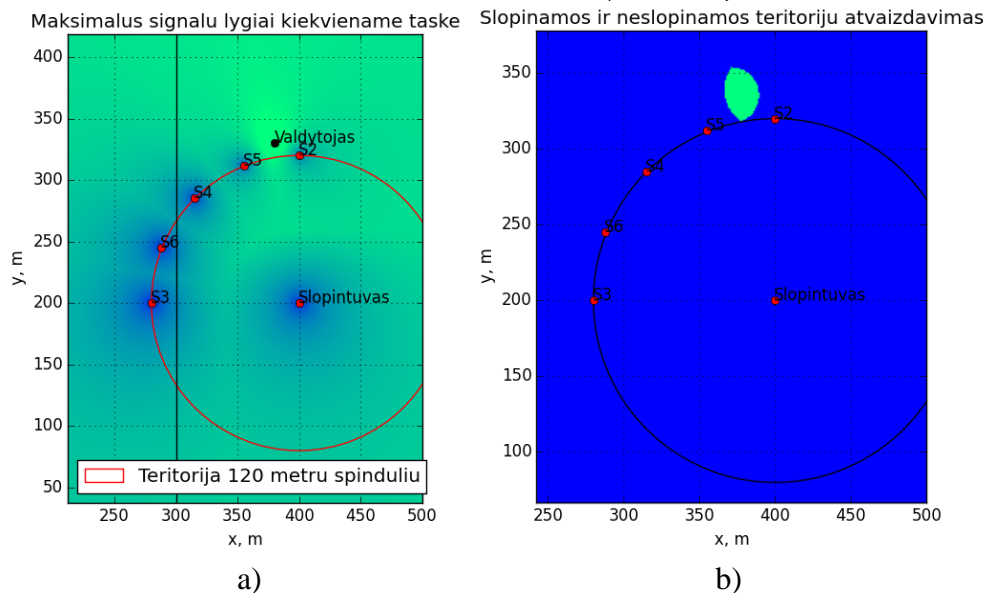


Nėra slopinama teritorija, todėl keičiame slopintuvo antenas taip padidindami slopintuvų signalų lygius:



3.44 pav. Teritorijos blokavimas slopintuvams pakeitus antenas su didesne spinduliavimo galia: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija; c) neslopinamos teritorijos pakeistas mastelis

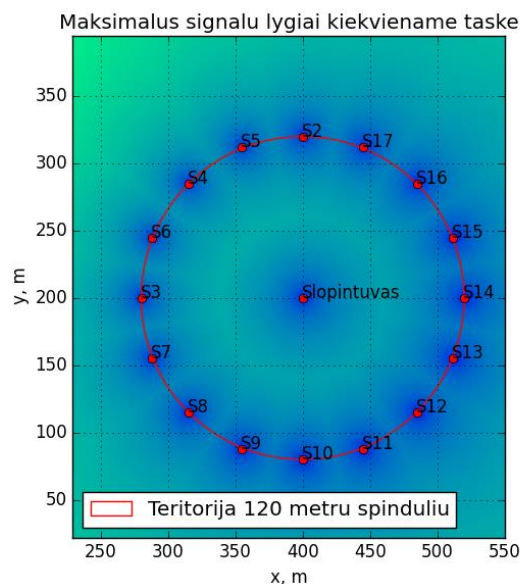
Pakeitus drono valdytojo buvimo vietą į tolimesnę nuo slopintuvo (S5), bet artimą teritoriją žymimai linijai įsitikinsime, ar teritorija yra efektyviai slopinama.



3.45 pav. Teritorijos blokavimas valdytoją perkėlus į tarpą tarp S5 ir S2 slopintuvų: a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

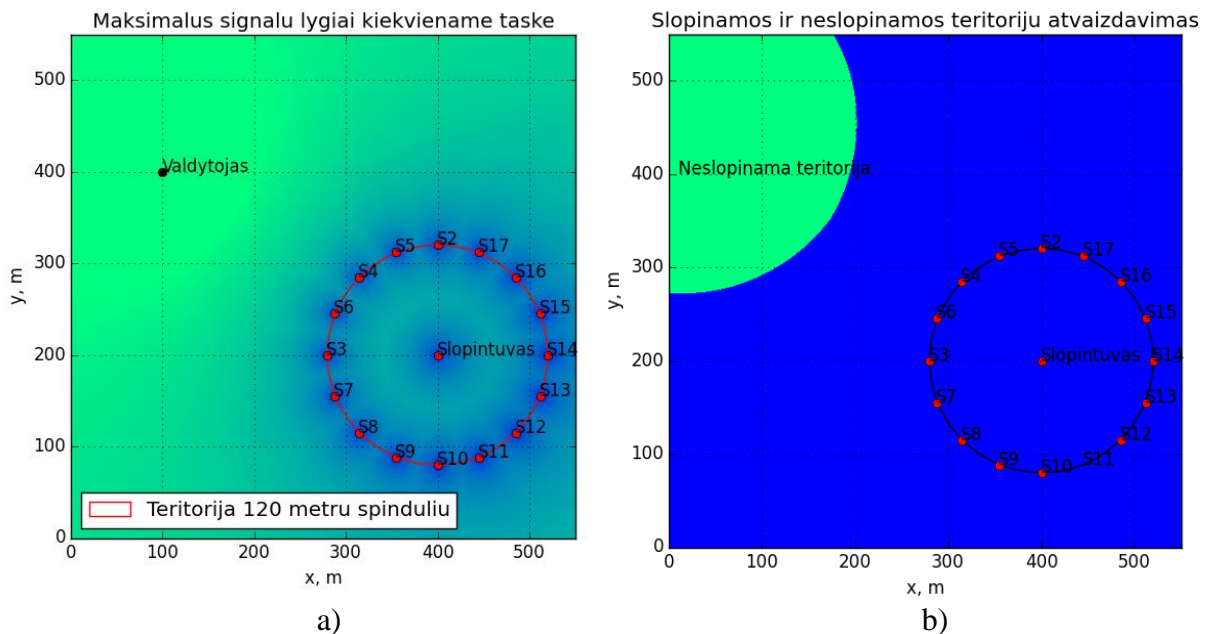
Teritorija 120 metrų spinduliu slopinama visiškai. Iš modeliavimo rezultatų galima spręsti, jog slopintuvus statyti efektyviau yra kuo žemiau, žinoma nežemiau nei drono valdytojo vidutinis aukštis (1.5 metrų), tokiu atveju 2–5 metrų aukštis būtų pats optimaliausias skleidžiamo signalo lygio prasme bei antenų instaliavimų kaštais. Be to, ryšio reguliavimo tarba stebi ir draudžia slopinti ryšį viešojoje erdvėje, už slopinamos teritorijos ribų.

Apsaugoti visą teritoriją efektyviai nuo dronų įskridimo būtina suprojektuoti slopintuvus proporcingai aplink visą teritoriją ties raudona teritorijos ribą žyminčia linija. Koordinates padidiname (550;550), visą 17 slopintuvų išdėstymą pavaizduojame apačioje:

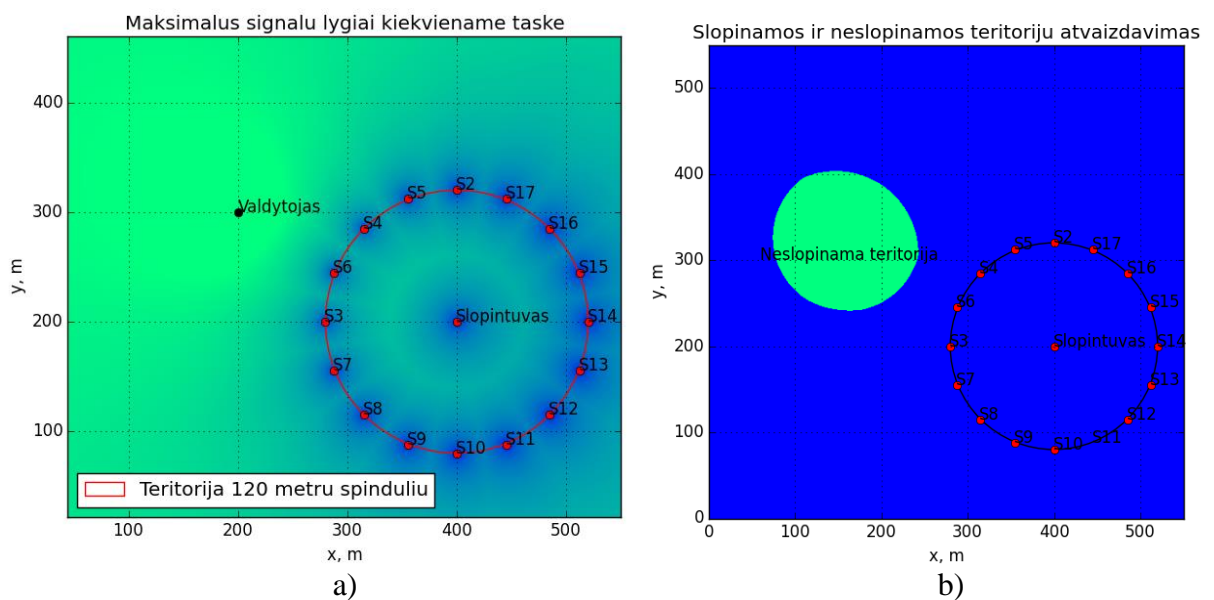


3.46 pav. Papildomų slopintuvų išdėstymas aplink teritoriją

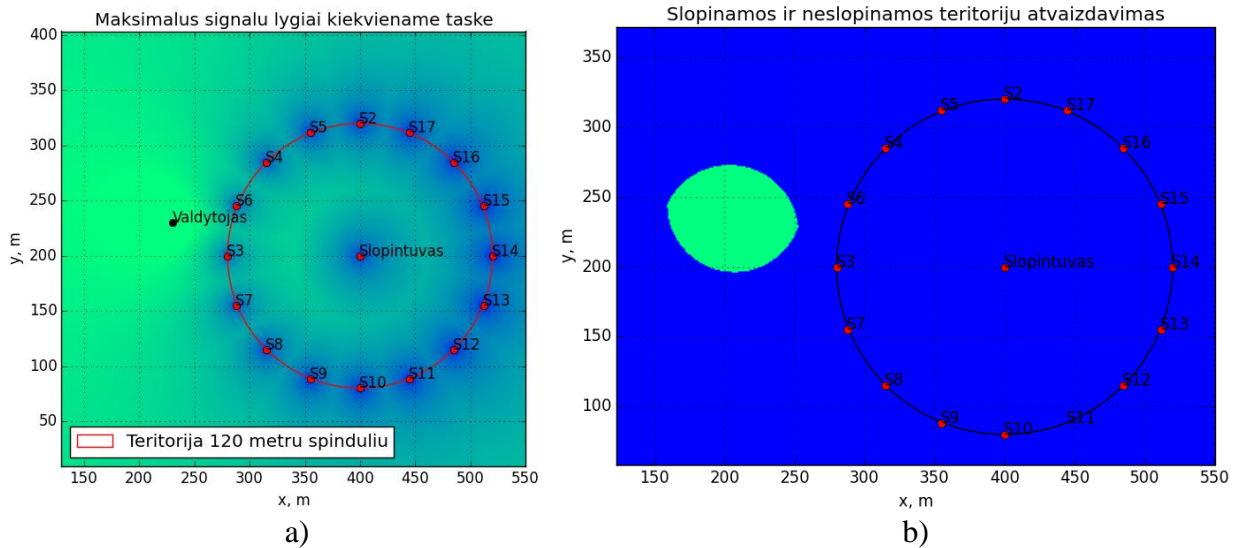
Pavaizduosime keletą drono valdytojo veikimo vietų, kad įvertinti teisingą teritorijos apsaugą nuo dronų įskridimų:



3.47 pav. Signalų lygiai ir slopinimas, kai drono valdytojo koordinatės (100;400): a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

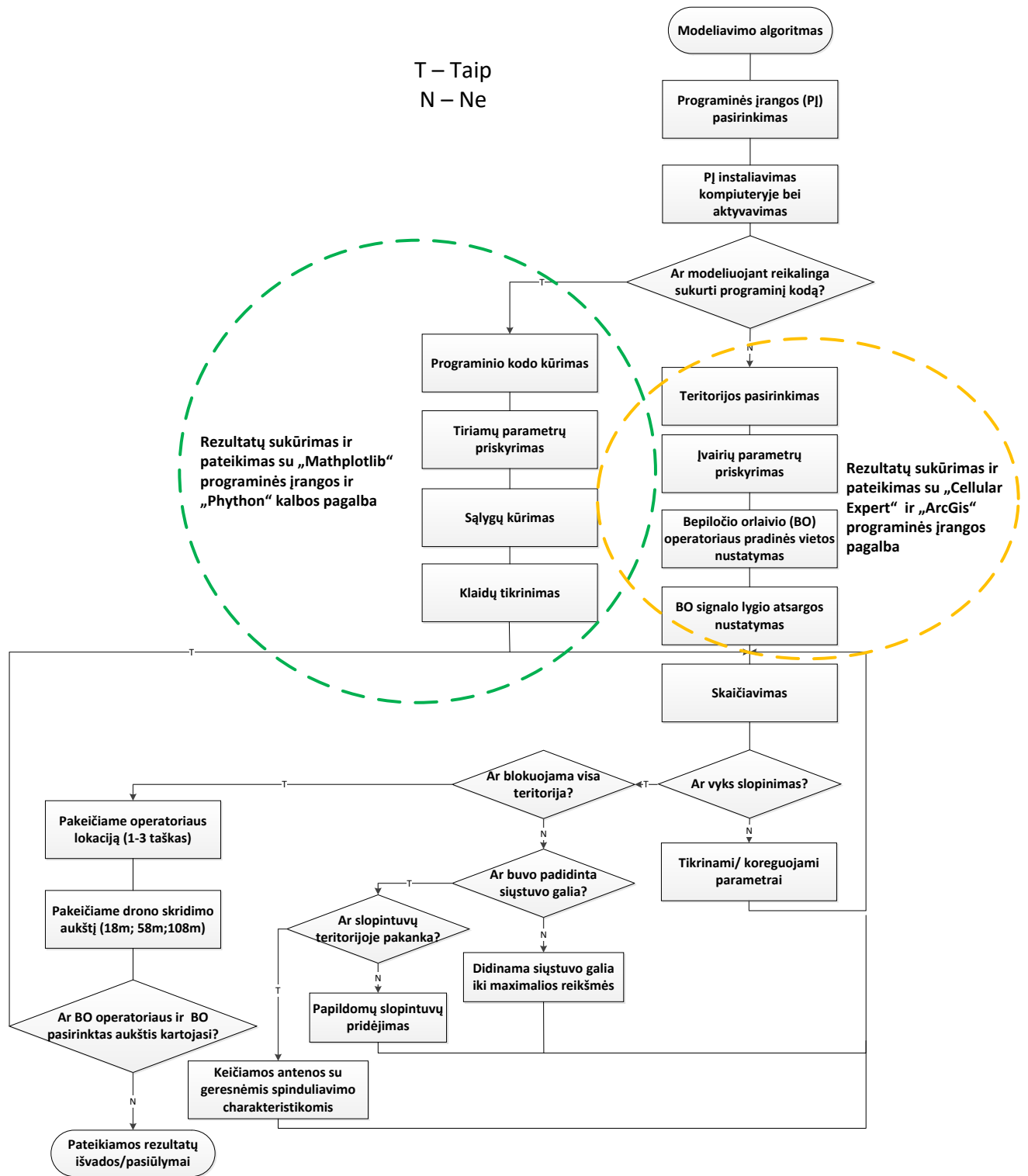


3.48 pav. Signalų lygiai ir slopinimas, kai drono valdytojo koordinatės (200;300): a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija



3.49 pav. Signalų lygiai ir slopinimas, kai drono valdytojo koordinatės (230;230) : a) maksimalūs signalų lygiai kiekviename teritorijos taške; b) neslopinama teritorija

Taigi, modeliuojant efektyvų slopinimą kalėjimo teritorijoje būtinos korekcijos: slopintuvų auksčių mažinimas, antenų keitimas, siųstuvo galios didinimas, slopintuvų skaičiaus didinimas, BO valdytojo lokacijos keitimas. Keisdami šiuos parametrus atitinkamai pagal poreikį, rastas slopintuvų skaičius, reikalingas apdengti visą teritoriją nepriklausomai nuo drono valdytojo vietos. Sukurtas programos kodas patalpintas penktame priede, o visus analizės – modeliavimo etapus pavaizduojame algoritme apačioje:



3.50 pav. Modeliavimo algoritmas

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Darbe atlikti tyrimai su pastoviais slopintuvais ir pirmosios klasės mikro dronais, kurie gali gabenti iki pusės kilogramo svorį ir pakilti iki 120 metrų;
2. Apibendrintam BO blokavimui realizuoti pasirinktas nelicenzijuotas dažnis 2.400 MHz (Wi-Fi technologija), nes yra labiausiai paplitęs komerciniuose dronuose ir gali būti kontroliuojamas ilgesnėse distancijose su didesnėmis kliūtimis;
3. Informaciją apie slopinimo sistemos užfiksuotus dronus rekomenduojama saugoti tiek teritorijoje esančiame fiziniame serveryje, tiek virtualioje erdvėje – „debesyje“, tolimesniam dronų analizavimui, įvertinimui ir blokavimo būdų pagerinimui;
4. Pasinaudojus sukurtais algoritmais, Matplotlib programa ir Python programavimo kalba sukurtas kodas, pagal kurį keičiant įvairius blokavimo sistemos parametrus galima įvertinti pasirinktos teritorijos slopinimą esant skirtingiems BO valdytojo signalo lygio pokyčiams (+3 dB, +6 dB ir kt.);
5. Atlikus modeliavimą pasirinktoje teritorijoje nustatyta, jog 120 metrų spinduliu slopinti reikės 17 vienodų slopintuvų iš kurių vienas bus centre, o kiti išdėstyti proporcingais atstumais sandūroje su neslopinama teritorija.
6. Įvertinus modeliavimo rezultatus nustatyta, jog efektyviausia slopintuvų antenas diegti mažesniame ~5 metrų aukštyje, prieš tai atsižvelgus į kliūtis esančias erdvėje, nes drono operatoriaus pultas dažniausiai būna ~1,5 metrų aukštyje, o RRT stebi ir draudžia slopinti ryšį viešoje erdvėje, už slopinamos teritorijos ribų.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. HODGKINS, K. *Anti-drone shoulder rifle lets police take control of UAVs with radio pulses* [interaktyvus]. Digital Trends (2015). [Žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/battle-innovations-anti-drone-gun/>
2. DIMC, F. and MAGISTER, T. *MINI UAV COMMUNICATION LINK SYSTEMS* [interaktyvus]. ResearchGate (2006). [Žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/244477850_MINI_UAV_COMMUNICATION_LINK_SYSTEMS
3. RT International. *Gone in 15 seconds: \$1.2mn system disables drones simply by blocking radio signals* [interaktyvus], (2016), [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.rt.com/news/318297-system-disables-drones-radio/>
4. Futurism, (2015). *New anti-drone device can freeze drones in mid-air - Futurism* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://futurism.com/links/beam-weapon-jams-drones-in-mid-flight/>
5. KHANDELWAL, S. (2016). *First Ever Anti-Drone Weapon that Shoots Down UAVs with Radio Waves* [interaktyvus]. The Hacker News, [Žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://thehackernews.com/2015/10/drone-defender-gun.html>
6. Kas vyksta Kaune, (2016). *Priemonių kontroliuoti bepiločių orlaivių skraidymo Lietuva kol kas neturi* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://kaunas.kasvyksta.lt/2015/11/22/politika/priemoniu-kontroliuoti-bepilociu-orlaiviu-skraidymo-lietuva-kol-kas-neturi/>
7. www.zulus.lt, (2016). *Naujų technologijų pavojai – Dronai žudikai* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.zulus.lt/lt/story/nauj%C5%B3-technologij%C5%B3-pavojai-%E2%80%93-dronai-%C5%BEudikai>
8. Robotika.lt, (2015). *Korėjos mokslininkai prieš dronus pasitelkė garsą - Robotika.lt*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://robotika.lt/korejos-mokslininkai-pries-dronus-pasitelke-garsa/>
9. Mokslas.it, (2016). *Kinai pristatė pirmąjį droną, kuris gali skraidinti žmones* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.15min.lt/mokslasit/straipsnis/technologijos/kinai-pristate-pirmaji-drona-kuris-gali-skraidinti-zmones-646-565057>
10. Manoteises.lt, (2016). *Dronai: naujų technologijų pranašumai ir mūsų privatumas* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://manoteises.lt/straipsnis/dronai-naujuju-technologiju-pranasumai-ir-musu-privatumas/>
11. Knowledgefoundation.com, (2016). *Next Gen Drones 2015* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.knowledgefoundation.com/drones/>
12. Objc.io, (2016). [Interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.objc.io/issues/8-quadcopter/communicating-with-the-quadcopter/>
13. Ti.arc.nasa.gov, [Interaktyvus], (2016), [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://ti.arc.nasa.gov/publications/4861/download/>
14. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. mult. WERNER WIESBECK, LS telcom Summit (2015). *Unmanned Aerial Vehicles – UAV, Drones Detection, Tracking, Control*. [Interaktyvus], (2016), [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.lstelcom.com/fileadmin/content/events/ls_summit_15_presentations/Summit2015_Wiesbeck.pdf

15. MAHMOOD Shahid, *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Communications*, [interaktyvus]. Master of Science in Electrical Engineering (2007). Blekinge Institute of Technology, Sweden. [Žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:831685/FULLTEXT01.pdf>
16. Mokslasplius.lt (2015) *Dronai – grėsmės ir galimybės*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://is.mokslasplius.lt/dronai-gresmes-ir-galimybes/>
17. Cnx-software.com. (2013). *DroneShield – Raspberry Pi Powered Drone Detector*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. gegužės 23 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cnx-software.com/2013/05/02/droneshield-raspberry-pi-powered-drone-detector/>
18. Drones jammer, AHMAD Jisrawi (2016). [Interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.qrz.ru/schemes/contribute/security/jammers/drone-jammer.pdf>
19. Google Books. (2016). *Modern Communications Jamming Principles and Techniques*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <https://tinyurl.com/ydz8xo6q>
20. Tinyurl.com. (2016). *Vaizdas: „DJI Care (Phantom 4) 1-Year Plan – Camrise“*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://tinyurl.com/zvczaoz>
21. 3DR | Drone & UAV Technology. (2015). *Solo Specs: Just the facts | 3DR | Drone & UAV Technology*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <https://3dr.com/solo-gopro-drone-specs/>
22. Excaliburdrones.com. 2016, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://excaliburdrones.com/wp-content/uploads/2016/01/3DR-Solo-Drone.jpg>
23. WENZHUN, H., YONGSHENG, W. ir XIANGYANG, Y. (2008). *Studies on Novel Anti-jamming Technique of Unmanned Aerial Vehicle Data Link*, [interaktyvus]. Chinese Journal of Aeronautics, 21(2), pp.141-148. [Žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936108600187/>
24. GRMAILA V. ir ŠILANSKAS E. *Plačiajuostės bevielės priegigos aprėpties planavimo ypatumai*, [interaktyvus]. Telekomunikacijų inžinerija (2003). [Žiūrėta 2016 m. birželio 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ee.ktu.lt/journal/2003/6/Grimaila.pdf>
25. Controleng.com. (2017). *Wi-Fi and the OSI model*, [interaktyvus]. Control Engineering. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.controleng.com/single-article/wi-fi-and-the-osi-model/8b71b0494b6b7fd5291856d02e104eb4.html>
26. Microchip.wikidot.com. (2017). *Where does 802.11 fit in the OSI Model? - Developer Help*, [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://microchip.wikidot.com/Wi-Fi:80211-osi>
27. MALONE, David. *What maths can tell us about WiFi (and vice versa)?*, [interaktyvus], (28, January 2009), [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.maths.tcd.ie/~dwmalone/p/mathsoc2009.pdf>
28. WIN, Z. Moe. *A Mathematical Theory of Network Interference and Its Applications*, [interaktyvus], (2, February 2009), [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://wgroup.lids.mit.edu/publications/moewin/Network-Interference-PIEEE-02-09.pdf>
29. En.wikipedia.org. (2017). *Nakagami distribution*, [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Nakagami_distribution

30. Clear sky. *UAV Drone Jammer CPB-4030C with remote control Wireless*, [interaktyvus], (2017), [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.hypercable.fr/images/stories/mobirake/jammers%20e-Rake.pdf>
31. SUFYAN, N., SAQIB, N. ir ZIA, M. *Detection of jamming attacks in 802.11b wireless networks*, [interaktyvus], (2017), [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://jwcn.eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2013-208>
32. DAVID J. Thuente and MITHUN Acharya. *Intelligent Jamming in Wireless Networks with Applications to 802.11b and Other Networks*. [Interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <https://tinyurl.com/n67r6m4>
33. JAPERTAS Saulius ir SLANYNS Ričardas. *Belaidžių telekomunikacijų tinklų uždavinynas*, mokomoji knyga 1-2 ps., KTU leidykla „Technologija“ 2013.
34. Marijampolės pataisos namai. 2015 M. *PROGRAMOS VYKDYMO ATASKAITA*, [Interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. vasario 08 d.]. Prieiga per internetą: <https://tinyurl.com/zmjvwq3>
35. BIRCH Gabriel C., GRIFFIN John C. ir ERDMAN Matthew K. *UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015*, [Interaktyvus]. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550. [Žiūrėta 2017 m. kovo 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2015/156365.pdf>
36. Int. J. Ad Hoc and Ubiquitous Computing. *Jamming and Anti-jamming Techniques in Wireless Networks: A Survey 2012*, [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. kovo 19 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.cs.montana.edu/yang/paper/jamming.pdf>
37. MAHANTI Aniket. *Ambient Interference Effects in Wi-Fi Networks*, [interaktyvus]. Department of Computer Science, University of Calgary, Canada. 2010, [žiūrėta 2017 m. kovo 19 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ida.liu.se/~nikca89/papers/networking10b.pdf>
38. DARASEVIČIUS, Mantautas. „*Mobiliųjų ryšio tinklų aprėpties tyrimas dideliame aukštyje*“. Telekomunikacijų inžinerijos bakalauro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vitas Grimaila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir Elektronikos fakultetas. Kaunas, 2016. 54 psl.
39. Moodle.ktu.edu. (2016). *KTU vieningo prisijungimo sistema*, [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. gruodžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <https://moodle.ktu.edu/course/view.php?id=2809>

PRIEDAI

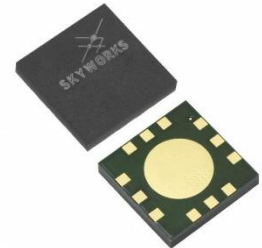
Priedas 1. Slopintuvo elektroniniai komponentai [18]

1. ANTENNA: 7 dBi 2.4 GHz Rubber Duck Antenna from L-COM

Band 2 (433 MHz) Jammer RF Circuit main parts:

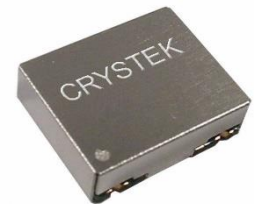
The following are the main parts, the rest can be found on the design schematics.

- Linear Power Amplifier: the Skyworks SKY65116:
390-500 MHz power amplifier. With internal matching impedance to 50 ohms.



- Voltage controlled oscillator:
CRYSTEK CVCO45CL-0421-0441 VCO which covers the frequencies 421 to 441 MHz

Voltage tuning input for the VCO is from 0Vdc to 3Vdc, output power of 0 dBm at 3Vdc and output Impedance of 50 ohms which is matched to the input impedance of the power amplifier.



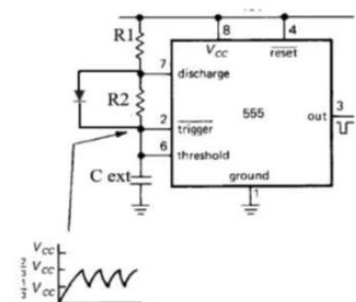
2. ANTENNA: ¼ WAVE WHIP, SMA – right angle, 433 MHZ



Tuning Circuits main parts:

The following are the main parts, the rest can be found on the design schematics.

- 555 Timer: To generate square wave which will be converted to triangular wave to tune the VCO
- Zener Diode with power amp: to generate white noise signal



Priedas 2. Slopintuvo signalo lygio keičiantis atstumui duomenys (žr. 3.7 pav.)

Atstumas	Signalų lygis 18m	Signalų lygis 38m	Signalų lygis 8m
136	-101	-112	-101
132	-100	-111	-100
128	-99	-110	-99
124	-98	-109	-98
120	-97	-108	-97
116	-96	-107	-96
112	-95	-106	-95
108	-94	-104	-94
104	-93	-103	-93
100	-92	-102	-92
96	-91	-101	-91
92	-90	-100	-90
88	-89	-99	-89
84	-87	-98	-87
80	-86	-97	-86
76	-85	-96	-85
72	-84	-95	-84
68	-83	-94	-83
64	-82	-93	-82
60	-81	-92	-81
56	-80	-91	-80
52	-78	-90	-78
48	-76	-89	-76
44	-75	-88	-75
40	-73	-87	-73
36	-72	-86	-72
32	-70	-85	-70
28	-69	-82	-69
24	-64	-81	-64
20	-63	-78	-63
16	-61	-76	-61
12	-60	-75	-60
8	-59	-72	-59
4	-58	-71	-58

Priedas 3. Slopintuvo ir drono valdytojo signalo lygių duomenys (žr. 3.8 pav.)

Atstumas	Slopintuvo signalo lygis	Atstumas	Drono valdytojo signalo lygis	Atstumas	Drono signalo lygis
136	-101	10	-113	10	-108
132	-100	20	-109	20	-107
128	-99	30	-108	30	-106
124	-98	40	-107	40	-105
120	-97	50	-106	50	-104
116	-96	60	-105	60	-103
112	-95	70	-104	70	-102
108	-94	80	-103	80	-101
104	-93	90	-102	90	-100
100	-92	100	-101	100	-99
96	-91	110	-100	110	-97
92	-90	120	-99	120	-96
88	-89	130	-98	130	-95
84	-87	140	-97	140	-94
80	-86	150	-96	150	-93
76	-85	160	-95	160	-92
72	-84	170	-94	170	-91
68	-83	180	-93	180	-90
64	-82	190	-92	190	-89
60	-81	200	-91	200	-88
56	-80	210	-90	210	-87
52	-78	220	-89	220	-86
48	-76	230	-88	230	-85
44	-75	240	-87	240	-84
40	-73	250	-86	250	-83
36	-72	260	-85	260	-82
32	-70	270	-84	270	-81
28	-69	280	-83	280	-80
24	-64	290	-82	290	-79
20	-63	300	-81	300	-78
16	-61	310	-80	310	-77
12	-60	320	-79	320	-76
8	-59	330	-78	330	-75
4	-58	340	-77	340	-74
0	37	350	-76	350	-73
		360	-75	360	-71
		370	-74	370	-70
		380	-73	380	-69
		390	-72	390	-63
		400	-71	400	-62
		410	-70	410	-61
		420	-69	420	-60
		430	-68	430	-59
		440	-65	440	-58
		450	-55	450	-57
		460	-52	460	-56
		470	-49	470	-51
		480	-47	480	-50
				490	-47
				500	-45

Priedas 4. Slopintuvo ir drono signalo lygių duomenys (žr. 3.9 pav.)

Atstumas	Slopintuvo 3dBm	Atstumas	Slopintuvo 10dBm	Atstumas	Drono su sektorine antena 2400
133	-95	133	-88	132	-82
126	-94	126	-87	126	-81
119	-93	119	-86	120	-80
112	-92	112	-85	114	-79
105	-91	105	-84	108	-78
98	-90	98	-83	102	-77
91	-89	91	-82	96	-76
84	-88	84	-81	90	-75
77	-87	77	-80	84	-74
70	-86	70	-79	78	-73
63	-85	63	-78	72	-72
56	-84	56	-77	66	-71
49	-83	49	-76	60	-70
42	-82	42	-75	54	-69
35	-81	35	-74	48	-68
28	-79	28	-72	42	-67
21	-78	21	-71	36	-66
14	-75	14	-68	30	-64
7	-74	7	-67	24	-62
				18	-61
				12	-60
				6	-59

Priedas 5. Taško informacija - duomenys

Pirmojo taško informacija

Site	Sector	Cell ID	RSSI	X koordinatė	Y koordinatė
Slopintuvas1	1	WI-FI1	-93	513133,1333	6087351,378
Slopintuvas2	2	WI-FI1	-112	513133,1333	6087351,378
Slopintuvas3	3	WI-FI1	-112	513133,1333	6087351,378
Slopintuvas4	4	WI-FI1	-93	513133,1333	6087351,378
Slopintuvas5	5	WI-FI1	-51	513133,1333	6087351,378
Slopintuvas6	6	WI-FI1	-51	513133,1333	6087351,378
Drono valdytojas2	1	2.4GHz	-75	513133,1333	6087351,378
Drono valdytojas	1	2.4GHz	-66	513133,1333	6087351,378

Antrojo taško informacija

Site	Sector	Cell ID	RSSI	X koordinatė	Y koordinatė
Slopintuvas1	1	WI-FI1	-63	513245,8983	6087249,695
Slopintuvas2	2	WI-FI1	-50	513245,8983	6087249,695
Slopintuvas3	3	WI-FI1	-63	513245,8983	6087249,695
Slopintuvas4	4	WI-FI1	-110	513245,8983	6087249,695
Slopintuvas5	5	WI-FI1	-122	513245,8983	6087249,695
Slopintuvas6	6	WI-FI1	-110	513245,8983	6087249,695
Drono valdytojas2	1	2.4GHz	-83	513245,8983	6087249,695
Drono valdytojas	1	2.4GHz	-61	513245,8983	6087249,695

Trečiojo taško informacija

Site	Sector	Cell ID	RSSI	X koordinatė	Y koordinatė
Slopintuvas1	1	WI-FI1	-121	513162,819	6087176,882
Slopintuvas2	2	WI-FI1	-93	513162,819	6087176,882
Slopintuvas3	3	WI-FI1	-51	513162,819	6087176,882
Slopintuvas4	4	WI-FI1	-53	513162,819	6087176,882
Slopintuvas5	5	WI-FI1	-95	513162,819	6087176,882
Slopintuvas6	6	WI-FI1	-122	513162,819	6087176,882
Drono valdytojas2	1	2.4GHz	-78	513162,819	6087176,882
Drono valdytojas	1	2.4GHz	-64	513162,819	6087176,882

Priedas 6. Sukurtas programos kodas ir realizuotas su Matplotlib įrankiu

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

def FSPL(f, d):

    c = 2.99792458e8

    return 20*np.log10(4*np.pi*d**f/c)

def PJ(f, d):

    EIRP = 50

    GJ = 15

    if d != 0:

        return EIRP-32-20*np.log10(f)-20*np.log10(d)+GJ

    else:

        return 0

def PJ1(f, d):

    EIRP = 50

    GJ = 15

    if d != 0:

        return EIRP-32-20*np.log10(f)-20*np.log10(d)+GJ

    else:

        return 0

def PD(f, d):

    EIRP = 40

    GD = 20

    if d != 0:

        return EIRP-32-20*np.log10(f)-20*np.log10(d)+GD

    else:

        return 0

def Distance(x,y, xs,ys):

    return np.sqrt(((x-xs)**2)+((y-ys)**2))

def Distance3D(x1,y1,z1, x2,y2,z2):

    dxy = np.sqrt(((x1-x2)**2)+((y1-y2)**2))

    return np.sqrt(((dxy)**2)+((z1-z2)**2))

xs = 200

ys = 400

zs = 5

xs2 = 320

ys2 = 400

zs2 = 5

xs3 = 200

ys3 = 280

zs3 = 5

xs4 = 285

ys4 = 315

zs4 = 5

xs5 = 312

ys5 = 355

zs5 = 5
```

```
xs6 = 245
ys6 = 288
zs6 = 5
xs7 = 155
ys7 = 288
zs7 = 5
xs8 = 115
ys8 = 315
xs9 = 88
ys9 = 355
xs10 = 80
ys10 = 400
xs11 = 88
ys11 = 445
xs12 = 115
ys12 = 485
xs13 = 155
ys13 = 512
xs14 = 200
ys14 = 520
xs15 = 245
ys15 = 512
xs16 = 285
ys16 = 485
xs17 = 312
ys17 = 445
xv = 80
yv = 278
zv = 1.5
zd = 1
xlim = 550
ylim = 550
f = 2400
a = np.zeros([xlim,ylim])
b = np.zeros([xlim,ylim])
c = np.zeros([xlim,ylim])
d = np.zeros([xlim,ylim])
for x in xrange(xlim):
    for y in xrange(ylim):
        #print Distance(x,y, xs,ys)
        Pj = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs,ys,zs))
        Pj2 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs2,ys2,zs))
        Pj3 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs3,ys3,zs))
        Pj4 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs4,ys4,zs))
        Pj5 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs5,ys5,zs))
        Pj6 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs6,ys6,zs))
        Pj7 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs7,ys7,zs))
        Pj8 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs8,ys8,zs))
```

```

Pj9 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs9,ys9,zs))
Pj10 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs10,ys10,zs))
Pj11 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs11,ys11,zs))
Pj12 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs12,ys12,zs))
Pj13 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs13,ys13,zs))
Pj14 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs14,ys14,zs))
Pj15 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs15,ys15,zs))
Pj16 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs16,ys16,zs))
Pj17 = Pj1(f, Distance3D(x,y,zd, xs17,ys17,zs))

Pv = PD(f, Distance3D(x,y,zd, xv,yv,zv))+5

a[x,y] = Pj
b[x,y] = Pv

if Pj > Pv or Pj2 > Pv or Pj3 > Pv or Pj4 > Pv or Pj5 > Pv or Pj6 > Pv or Pj7 > Pv or Pj8 > Pv or Pj9 > Pv or Pj10 > Pv or Pj11 > Pv or Pj12 > Pv or Pj13 >
Pv or Pj14 > Pv or Pj15 > Pv or Pj16 > Pv or Pj17 > Pv:

c[x,y] = max(Pj-Pv, Pj2-Pv, Pj3-Pv, Pj4-Pv, Pj5-Pv, Pj6-Pv, Pj7-Pv, Pj8-Pv, Pj9-Pv, Pj10-Pv, Pj11-Pv, Pj12-Pv, Pj13-Pv, Pj14-Pv, Pj15-Pv, Pj16-Pv, Pj17-
Pv)

d[x,y] = 1

plt.rcParams['image.cmap'] = 'winter_r'

fig, ax = plt.subplots()

im = ax.imshow(c)

#plt.plot([300,300],[0,ylim],'k')

#plt.plot([300,400],[300,200],'g')

#cbar = fig.colorbar(im)

plt.grid()

plt.xlabel("x, m")

plt.ylabel("y, m")

plt.title("Maksimalus signalu lygiai kiekviena taske")

plt.grid()

circle=plt.Circle((400,200),120, edgecolor = ('r'), fill=False, label = 'Teritorija 120 metru spinduliu')

plt.gca().add_patch(circle)

#circle=plt.Circle((400,200),89.1, edgecolor = ('g'), fill=False, label = 'Slopintuvo realiai paveikiama teritorija')

#plt.gca().add_patch(circle)

plt.plot(ys,xs, 'ro')

plt.text(ys,xs, 'Slopintuvas')

plt.plot(ys2,xs2, 'ro')

plt.text(ys2,xs2, 'S2')

plt.plot(ys3,xs3, 'ro')

plt.text(ys3,xs3, 'S3')

plt.plot(ys4,xs4, 'ro')

plt.text(ys4,xs4, 'S4')

plt.plot(ys5,xs5, 'ro')

plt.text(ys5,xs5, 'S5')

plt.plot(ys6,xs6, 'ro')

plt.text(ys6,xs6, 'S6')

plt.plot(ys7,xs7, 'ro')

plt.text(ys7,xs7, 'S7')

plt.plot(ys8,xs8, 'ro')

plt.text(ys8,xs8, 'S8')

plt.plot(ys9,xs9, 'ro')

```

```
plt.text(ys9,xs9, 'S9')
plt.plot(ys10,xs10, 'ro')
plt.text(ys10,xs10, 'S10')
plt.plot(ys11,xs11, 'ro')
plt.text(ys11,xs11, 'S11')
plt.plot(ys12,xs12, 'ro')
plt.text(ys12,xs12, 'S12')
plt.plot(ys13,xs13, 'ro')
plt.text(ys13,xs13, 'S13')
plt.plot(ys14,xs14, 'ro')
plt.text(ys14,xs14, 'S14')
plt.plot(ys15,xs15, 'ro')
plt.text(ys15,xs15, 'S15')
plt.plot(ys16,xs16, 'ro')
plt.text(ys16,xs16, 'S16')
plt.plot(ys17,xs17, 'ro')
plt.text(ys17,xs17, 'S17')
plt.plot(yv,xv, 'ko')
plt.text(yv,xv, 'Valdytojas')
#plt.plot(315,285, 'ro')
#plt.text(315,285, '~Riba')
#plt.text([300,400],[300,200], 'Slopintuvas')
plt.xlim(0,xlim)
plt.ylim(0,ylim)
#cbar.set_clim(-85,-55)
plt.legend()
plt.legend(loc = 'lower left')
plt.grid()
plt.show()
print PJ(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs,ys,zs))
print PJ(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs2,ys2,zs))
print PJ(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs3,ys3,zs))
print PD(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xv,yv,zv))
print PJ(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs4,ys4,zs))
print PJ(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs5,ys5,zs))
print PJ(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs6,ys6,zs))
#print PJ1(f, Distance3D(xs5,ys5,zd, xs7,ys7,zs7))
#plt.plot(a[:,300], label = 'Slopintuvo signalo lygis')
#plt.plot(b[:,300], label = 'Valdytojo signalo lygis')
#plt.plot([320,320],[-90,-60], 'r', label = 'Slopintuvo 120 metru riba')
#plt.legend()
#plt.legend(loc = 'lower right')
#cbar = fig.colorbar(im)
#plt.grid()
#plt.xlabel("Atstumai, m")
#plt.ylabel("Signalų lygis, dBm")
#plt.title("Pjuvis - juodąja linija")
#plt.grid()
```

```
#plt.show()

fig, ax = plt.subplots()

im = ax.imshow(d)

#plt.text(10,50, 'Neslopinama teritorija')

circle=plt.Circle((400,200),120, edgecolor = ('k'), fill=False, label = 'Teritorija 120 metru spinduliu')

plt.gca().add_patch(circle)

#cbar = fig.colorbar(im)

plt.grid()

plt.xlabel("x, m")

plt.ylabel("y, m")

plt.title("Slopinamos ir neslopinamos teritoriju atvaizdavimas")

plt.plot(ys,xs, 'ro')

plt.text(ys,xs, 'Slopintuvas')

plt.plot(ys2,xs2, 'ro')

plt.text(ys2,xs2, 'S2')

plt.plot(ys3,xs3, 'ro')

plt.text(ys3,xs3, 'S3')

plt.plot(ys4,xs4, 'ro')

plt.text(ys4,xs4, 'S4')

plt.plot(ys5,xs5, 'ro')

plt.text(ys5,xs5, 'S5')

plt.plot(ys6,xs6, 'ro')

plt.text(ys6,xs6, 'S6')

plt.plot(ys7,xs7, 'ro')

plt.text(ys7,xs7, 'S7')

plt.plot(ys8,xs8, 'ro')

plt.text(ys8,xs8, 'S8')

plt.plot(ys9,xs9, 'ro')

plt.text(ys9,xs9, 'S9')

plt.plot(ys10,xs10, 'ro')

plt.text(ys10,xs10, 'S10')

plt.text(ys11,xs11, 'S11')

plt.plot(ys12,xs12, 'ro')

plt.text(ys12,xs12, 'S12')

plt.plot(ys13,xs13, 'ro')

plt.text(ys13,xs13, 'S13')

plt.plot(ys14,xs14, 'ro')

plt.text(ys14,xs14, 'S14')

plt.plot(ys15,xs15, 'ro')

plt.text(ys15,xs15, 'S15')

plt.plot(ys16,xs16, 'ro')

plt.text(ys16,xs16, 'S16')

plt.plot(ys17,xs17, 'ro')

plt.text(ys17,xs17, 'S17')

plt.grid()

plt.xlim(0,xlim)

plt.ylim(0,ylim)

plt.show()
```

