



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Radijo dažnių atpažinimo technologijos panaudojimas dronų identifikavimui galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Kristupas Kidikas
Projekto autorius

Doc. Dr. Saulius Japertas
Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Radijo dažnių atpažinimo technologijos panaudojimas dronų identifikavimui galimybių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Kristupas Kidikas

Projekto autorius

Doc. Dr. S. Japertas

Vadovas

**Prof. habil. dr. Algimantas
Fedaravičius**

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Kristupas Kidikas

Radio dažnio atpažinimo technologijos panaudojimas dronų identifikavimui galimybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Kristupas Kidikas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui *Kristupas Kidikas*

1. Baigiamojo projekto tema:

Radijo dažnių atpažinimo technologijos panaudojimas dronų identifikavimui galimybių tyrimas

Research of Possibilities for Drone Identification Using Radio Frequency Fingerprinting Technology

2. Projekto tikslas:

Dronų, dirbančių WiFi tinkle, identifikavimo galimybių tyrimas panaudojant RFF technologiją.

3. Projekto uždaviniai:

1. Išanalizuoti belaidžių radijo bangas spinduliuojančių prietaisų identifikavimo problematiką;
2. Apžvelgti WiFi belaidžio ryšio standartų dažnines/spektrines charakteristikas;
3. Parengti WiFi prieigos įrenginių identifikavimo eksperimento metodiką;
4. Atlikti eksperimentus su parinktais WiFi tinklo prieigos įrenginiais ir įvertinti įrenginių radijo dažnių pėdsakus;
5. Sudaryti identifikavimo algoritmą.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Įvadas, belaidžių įrenginių identifikavimas, 802.11 standartai, identifikavimo metodika, identifikavimui naudojama įranga, eksperimentas, išvados.

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius

Kristupas Kidikas

2020-10-09

(vardas, pavardė, data)

Baigiamojo projekto vadovas

Doc. Dr. S. Japertas

2020-10-09

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)

Krypties studijų programų vadovas

Doc. Saulius Japertas

2020-10-09

Kidikas, Kristupas. Radijo dažnių atpažinimo technologijos panaudojimas dronų identifikavimui galimybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. Dr. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: RFF identifikavimas, WiFi.

Kaunas, 2022. 53 p.

Santrauka

Dronų ir bepiločių orlaivių poreikis komerciniams ar privačių vartotojų tikslams nuolat auga. Dronai jau yra naudojami įvairiems komerciniams tikslams: turto saugojimui, miškų gaisro valdymui, žemės ūkio reikmėms, karinei pramonei, komunikacijai ir daugeliui kitų sričių. Taip pat vis daugiau dronų įsigyjama privačių asmenų. Šiandien dronų saugą apibrėžia Europos aviacijos saugumo agentūra (EASA) Komisijos įgyvendinimo reglamentas (ES) 2019/947 dėl dronų ir bepiločių orlaivių naudojimo taisyklių ir tvarkos. Reglamente nurodoma, jog sistemoje užsiregistravęs asmuo gauna autentišką naudotojo registracijos numerį, kuriuo turi pažymėti visus turimus dronus ar bepiločius orlaivius. Kodas turi būti įskaitomas be optinių prietaisų pagalbos iš ne mažesnio kaip 2 metrų atstumo. Šiuo metu Europos Sąjungoje tai yra vienintelis dokumentas, kuris apibrėžia drono savininko identifikavimą.

Įsilaužimas į belaidžių įtaisų sistemą tarp drono ir drono valdymo pultelio gali pareikalauti didelių nuostolių drono valdytojui. Belaidžiame tinkle MAC adresą yra nesudėtinga suklastoti, sukuriant tinkle identišką prieigos tašką. Tai didina tikimybę neteisėtam dronų naudojimui. Suteikiant dronui ar UAV papildomą identifikavimo būdą, kuris sukuriamas naudojant RFF (*eng. Radio frequency fingerprint*) signalo pėdsakus, būtų galima išvengti piktavalių piktnaudžiavimo. Ši technologija leistų apsaugoti droną nuo įsibrovimo ir nustatyti drono ar UAV savininką per atstumą.

Šiame darbe išnagrinėti radijo dažnių pėdsakai, jų panaudojimo galimybės. Pastebėta jog matuojant ir analizuojant radijo siųstuvo siunčiamo signalo frontus, galima identifikuoti belaidį įrenginį. Darbe analizuojami dronų naudojami IEEE 802.11 standartai. Išanalizuoti taip pat dronų belaidžio tinklo kanalų veikimo dažniai ir ortogonaliojo dažninio multipleksavimo, tiesioginės sekos plėsto spektro dažninės bei spektrinės charakteristikos.

Parengta belaidžių įrenginių identifikavimo eksperimento metodika bei eksperimento algoritmas. Darbe aprašyta eksperimento rezultatų įvertinimo metodika. Atlikus eksperimentą buvo įvertinti gauti duomenys. Pasiūlytas dronų pultelių identifikavimo algoritmas, kuris remiasi signalų frontų formos įvertinimu. Šiam įvertinimui atlikti naudojamos pirmoji ir antroji išvestinės, kreivumas, nuolydžio koeficientas, frontų užimamas plotas. Gauti rezultatai parodė aiškius skirtumus tarp visų dronų pultelių signalo fronto parametrų. Visi rezultatai suvesti į eksperimento duomenų lentelę, kuri bus naudojama kaip duomenų bazė įrenginių identifikavimui. Duomenų bazėje paskaičiuota santykinė paklaida kiekvienam parametrai. Duomenų lentelė įvertina pagal 14 skirtingų parametrų kiekvieno belaidžio įrenginio identifikavimo tikimybę.

Kidikas, Kristupas. Research of Possibilities for Drone Identification Using Radio Frequency Fingerprinting Technology. Masters's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Saulius Japertas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: RFF identification, Wifi, Transient.

Kaunas, 2022. 53.

Summary

The demand for drones and unmanned aerial vehicles (UAVs) for commercial or private use is steadily growing. Drones are already being used for a wide range of commercial purposes such as: asset storage, forest fire surveillance, agricultural applications, military industry, communication and many other areas. There is also a growing number of drone purchases by private individuals. Today, drone safety is defined by the European Aviation Safety Agency (EASA) Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on rules and procedures for the use of drones and unmanned aerial vehicles. Which states that once registered in the system, a person receives an authentic user registration number, which he/she must use to mark all drones or unmanned aerial vehicles he/she owns. The code must be readable without the aid of optical devices from a distance of at least 2 metres. This is currently the only document in the European Union that defines the identification of a drone owner.

Hacking into the system of wireless devices between the drone and the drone's consoles could result in significant losses for the drone owner. In a wireless network, it is easy to spoof the MAC address by creating an identical access point on the network. This increases the likelihood of unauthorised use of the drone. Giving the drone or UAV an additional means of identification, using a radio frequency fingerprint (RFF), would help to prevent malicious misuse. This technology would make it possible to protect the drone from intrusion and to identify the owner of the drone or UAV from a distance.

This paper examines radio frequency fingerprinting and its potential applications. It has been observed that by measuring signal sent by a radio transmitter and analysing signal transients, it is possible to identify a wireless device. The work analyses the IEEE 802.11 standards used by drones. The operating frequencies of the wireless network channels of the drones are also analysed. Also analysed frequency and spectral characteristics of orthogonal frequency multiplexing , direct sequence spread spectrum.

The experimental methodology and algorithm for the identification of wireless devices were developed. The work describes the methodology for the evaluation of the experimental results. The experimental data were evaluated after the experiment. An algorithm for the identification of drone consoles is proposed, which is based on the estimation of the shape of the signal transients. The first and second derivatives, curvature, slope coefficient, and the area occupied by the fronts are used to perform this evaluation. The results obtained showed clear differences between the signal transients parameters for all the drone consoles. All the results are summarised in an experimental data table, which will be used as a database for device identification. In the database, the relative error for each

parameter was calculated. The data table estimates the probability of identification of each wireless device for 14 different parameters.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų sąrašas	11
Įvadas	12
1. Belaidžių įrenginių identifikavimo problematika	13
1.1. Radijo dažnių pėdsakai (RFF)	13
1.2. Radijo siųstuvo siunčiamo signalo frontas	14
1.3. Belaidžių tinklų saugumo problematikos sprendimas	15
2. Dronų naudojami IEEE 802.11 standartai	16
2.1. Dronų belaidžio tinklo kanalai ir veikimo dažniai	16
2.2. OFDM Ortogonalusis dažninis multipleksavimas.....	17
2.3. Tiesioginės sekos plėstas spektras DSSS	18
2.4. DSSS spektro charakteristikos	19
2.5. Ortogonaliojo dažninio multipleksavimo OFDM spektrinės charakteristikos	20
3. Eksperimento atlikimo metodika bei naudojama įranga	22
3.1. Eksperimente naudojamų dronų pagrindinės charakteristikos	22
3.2. Matavimo įranga, spektro analizatorius.....	22
3.3. Eksperimento rezultatų įvertinimo matematiniai metodai.....	23
3.4. Paklaidų įvertinimas	25
3.5. Eksperimento atlikimo metodika.....	26
3.6. Kanalo parinkimas	27
4. Darbo eiga ir signalų frontų matavimas	29
4.1. Darbo eigos algoritmas	29
5. Drono pultelio identifikavimas	31
5.1. Signalų frontų amplitudžių parametrai	31
5.2. Frontų aptikimas	35
5.3. Frontų matematinų parametrų įvertinimas	38
5.4. Eksperimentų matrica	44
5.5. Identifikavimo algoritmas	46
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50
Priedai	54
1 priedas. Rohde & Schwarz R&S®FSH4/FSH8 Spektro Analizatoriaus specifikacija	54
2 priedas. 3 dronų pultelių minimalios, maksimalios ir apskaičiuotos vidutinės priekinio ir galinio frontų vertės.....	57
3 priedas. 3 dronų pultelių frontų pasikeitimai pridėjus 101 dB (ploto skaičiavimui).....	62
4 priedas. Eksperimento rezultatų matrica su paskaičiuotomis paklaidos ribomis	66

Lentelių sąrašas

2.1 lentelė. 802.11a/g/n/ac standartų palyginimas.....	16
3.1 lentelė. Tiriamųjų dronų pultelių specifikacijos	22
5.1 lentelė. "DJI Mini" drono pultelio priekinio ir galinio frontų vertės.....	31
5.2 lentelė. Visų dronų pultelių signalo priekinio fronto vidurkiai	32
5.3 lentelė. Visų dronų pultelių signalo galinio fronto vidurkiai	33
5.4 lentelė. Eksperimento rezultatų matrica	44

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Pagrindiniai belaidžio siųstuvo komponentai, kurių trūkumai gali būti panaudoti vartotojo identifikavimui	14
1.2 pav. Teorinis signalo spektras	16
1.3 pav. Sistema RF pėdsakų pagrindu UAV aptikimui	16
2.1 pav. 2,4 GHz dažnių juosta yra padalinta į 14 persidengiančių kanalų.....	18
2.2 pav. Pagrindine OFDM Ortogonalujo dažninio multipleksavimo, koncepcija	18
2.3 pav. OFDM multiplekserio architektūra skaitmeninio signalo apdorojimui.....	19
2.4 pav. DSSS multiplekserio architektūra.....	20
2.5 pav. DSSS signalo spektro kaukė	21
2.6 pav. Persidengimas 1, 6, 11 kanalų spektrų.....	21
2.7 pav. OFDM 20MHz signalo spektro kaukė.....	22
2.8 pav. Teorinis OFDM spektro kaukių persidengimas.....	22
3.1 pav. Spektro analizatorius Rohde-Schwarz® FSH8.....	24
3.2 pav. 1 - Phantom, 2 – DJI Mini, 3 - DEVOF12E pultelių santykinė paklaida	27
3.3 pav. Spektro analizatoriaus nustatymai ir spektras, tiriant DJI Mini pultelį	28
3.4 pav. Eksperimento aplinkoje egzistuojantys belaidžiai įrenginiai.....	29
4.1 pav. Blokinė darbo schema.....	30
4.2 pav. Priekinio ir galinio fronto ribos A – B, C – D	31
5.1 pav. Trijų dronų pultų priekinių frontų galios priklausomybė nuo laiko vidurkiai.....	35
5.2 pav. Trijų dronų pultų galinių frontų galios priklausomybė nuo laiko vidurkiai	36
5.3 pav. Priekinio ir galinio frontų apibrėžimo ir aptikimo algoritmas.....	37
5.4 pav. Trijų dronų pultelių pirmosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (priekinių frontų).....	39
5.5 pav. Trijų dronų pultelių pirmosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (galinių frontų)	40
5.6 pav. Trijų dronų pultelių antrosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (priekinių frontų)	41
5.7 pav. Trijų dronų pultelių antrosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (galinių frontų).....	41
5.8 pav. Dronų pultelių priekinių frontų kreivumo priklausomybė nuo laiko.....	42
5.9 pav. Dronų pultelių galinių frontų kreivumo priklausomybė nuo laiko	43
5.10 pav. Visų dronų pultelių frontų vidutinio kreivumo priklausomybė nuo drono pultelio modelio	43
5.11 pav. Visų dronų pultelių frontų nuolydžio koeficiento priklausomybė nuo drono pultelio modelio	44
5.12 pav. Visų dronų pultelių frontų ploto priklausomybė nuo drono pultelio modelio.....	45
5.13 pav. Įrenginio identifikavimo algoritmas	47

Santrumpų sąrašas

SNR	signalo – triukšmo santykis (angl. <i>Signal-to-Noise ratio</i>)
USB	universalioji jungtis (angl. <i>Universal Serial Bus</i>)
LAN	vietinis tinklas (angl. <i>Local Area Network</i>)
WLAN	bevielis vietinis tinklas (angl. <i>Wireless LAN</i>)
RFF	radijo dažnių pėdsakai (angl. <i>Radio Frequency Fingerprinting</i>)
Bluetooth	belaidžio ryšio standartas, leidžiantis keistis informacija nedideliu atstumu
RBW	skiriamos gebos juostos plotis (angl. <i>Resolution Bandwidth</i>)
VBW	vaizdo juostos plotis (angl. <i>Video Bandwidth</i>)
VHF	radijo bangų ruožas nuo 30 iki 300 MHz (angl. <i>Very High Frequency</i>)
WIFI	bevielis tinklas (angl. <i>Wireless Fidelity</i>)

Įvadas

Oro transportas visada buvo griežtai reguliuojamas. Tai jį padarė vienu iš saugiausių susisiekimo, transportavimo priemonių. Tačiau pradėjus plisti dronų ar bepiločių orlaivių (UAV) naudojimui oro erdvėje ir esant galimybei įsigyti šiuos prietaisus bet kuriam asmeniui, neturinčiam net menkiausių išankstinių žinių ar mokymų apie saugų skrydį, atsirado pavojus reguliuojamai oro erdvei. Netinkamai naudojami dronai ar UAV gali neteisėtai kirsti jiems uždraustas zonas, susidurti su kitais statiniais ar judančiais objektais sukeldami daug žalos. Dronai gali būti nelegaliai naudojami, pavyzdžiui: norint patekti į neskraidymo zonas, trukdant ar užkertant kelią įprastinių oro erdvės naudotojų skrydžiams (gaisro gesinimo orlaiviams ar avariniams sraigtasparniams). UAV saugomos informacijos praradimas, privatumo pažeidimai, saugumo pažeidimai, teroristiniai išpuoliai, nusikalstama veikla yra tam tikra su UAV priskiriama saugumo rizika [1]. Dronui ar UAV kirtus kontroliuojamą oro erdvę, jis sukelia saugumo ir navigacijos problemų. Susidūrus su pilotuojamu lėktuvu sukeltų didžiulę riziką visų lėktuve esančių žmonių gyvybei [2-4]. Dronų ir UAV avarijoms taip pat daro įtaką komponentų gedimai ar blogos oro sąlygos. Dronui nukritus ant turto ar žmogaus, sukeliama turto nuostoliai ir sužalojimai. Viena iš jautriausių drono ar bepiločio orlaivio saugumo vietų yra trukdymo ataka (angl. *Jamming*) [39]. Piktavaliams naudojant šią ataką dronas gali nukristi. Dėl šios priežasties intensyvus dronų ir UAV naudojimo didėjimas kelia pavojų žmonių turtui ir sveikatai.

Dronų saugą apibrėžia Europos aviacijos saugumo agentūra (EASA) Komisijos įgyvendinimo reglamentas (ES) 2019/947 dėl dronų ir bepiločių orlaivių naudojimo taisyklių ir tvarkos [5]. Reglamente nurodoma, jog sistemoje užsiregistravęs asmuo gauna autentišką naudotojo registracijos numerį, kuriuo turi pažymėti visus turimus dronus ar bepiločius orlaivius. Kodas turi būti įskaitomas be optinių prietaisų pagalbos iš ne mažesnio kaip 2 metrų atstumo. Šiuo metu Europos Sąjungoje tai yra vienintelis dokumentas apibrėžiantis drono savininko identifikavimą. Toks žymėjimo būdas palieka piktavaliams galimybes išlikti neidentifikuotiems atliekant draudžiamus veiksmus.

Suteikiant dronui ar UAV papildomą identifikavimo būdą, kuris naudoja signalo pėdsakus RFF (eng. *Radio frequency fingerprint*), būtų galima išvengti UAV savininko piktnaudžiavimo įrenginiu. Ši technologija leistų nustatyti drono ar UAV savininką per atstumą ir buvimo vietą. Aptikimo sistema yra radijo dažnio (RF) jutiklis, galintis užfiksuoti signalus tiek iš drono ar UAV, tiek iš jo valdiklio [6]. Be to, RF imtuvai taip pat fiksuoja kitus aplinkos signalus, kurie egzistuoja kartu su drono ar UAV perduodamais signalais toje pačioje dažnių juostoje.

Darbo tikslas:

Dronų, dirbančių WiFi tinkle, identifikavimo galimybių tyrimas panaudojant RFF technologiją.

Darbo uždaviniai:

- Išanalizuoti belaidžių radijo bangas spinduliuojančių prietaisų identifikavimo problematiką;
- Apžvelgti WiFi belaidžio ryšio standartų dažnines/spektrines charakteristikas;
- Parengti WiFi prieigos įrenginių identifikavimo eksperimento metodiką;
- Atlikti eksperimentus su parinktais WiFi tinklo prieigos įrenginiais ir įvertinti įrenginių radijo dažnių pėdsakus;
- Sudaryti identifikavimo algoritmą.

1. Belaidžių įrenginių identifikavimo problematika

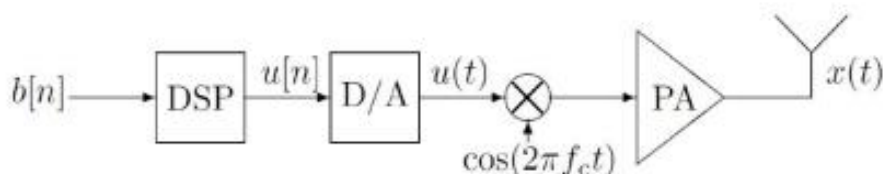
Įrenginių privatumo valdymas yra ko gero vienas iš svarbiausių bet kurio tinklo saugos ir identifikavimo sprendimo iššūkių, kadangi belaidžiam tinkle MAC adresą yra nesudėtinga suklastoti sukuriant tinkle identišką prieigos tašką. Tai galima padaryti jungiantis prie arčiau esančio arba prie stipresnio signalą turinčio prieigos taško. Per klonuotą prieigos tašką visi vartotojo duomenys keliauja piktavaliui [7]. Administratoriams reikia kitų mechanizmų, kad nustatytų įrenginio adresą ar savininką tinkle. Laidiniame tinkle jungiklių lizdai suteikia galimybę atskirti srautą pagal įeinantį prievadą, kiekvienas prievadas susietas su kiekvienu interneto lizdu sienoje. Priešingai nei laidiniame tinkle, belaidžio tinklo negalima susieti, o tai apsunkina šaltinio identifikavimą. Belaidis internetas reglamentuotas IEEE 802.11 standartais. Vartotojų autentifikavimo, duomenų šifravimo architektūros (WPS, WPA, WEP, WPA2) saugo informacijos konfidencialumą, tačiau palieka terpę ir neapsaugo nuo MAC adresų klastojimo.

Fiziniam lygmenyje piktavališkų prieigos taškų identifikavimas papildytų jau egzistuojančias saugumo sistemas. Šiame skyriuje yra analizuojami kitų autorių moksliniai darbai, kurie skirti panašiai tematikai. Susistemintos dirbančių šioje srityje mokslininkų nuomonės ir rezultatai, belaidžių įrenginių identifikavimu remiantis radijo dažnių pėdsakais fiziniame lygmenyje tematikoje.

1.1. Radijo dažnių pėdsakai (RFF)

Radijo dažnių pėdsakai (angl. *Radio Frequency Fingerprinting*, toliau *RFF*) yra technologija, kurios pirminė funkcija buvo užfiksuoti unikalias siųstuvo radijo dažnio energijos charakteristikas, kad būtų galima atpažinti mobiliuosius telefonus ir kitus įrenginius. Nepaisant to, pagrindinis principas vienodai taikomas visiems belaidžiams įrenginiams [7]. Šios technikos principas yra paprastas - atpažinti spinduliuojamo signalo charakteristikas pagal skirtingus parametrus. Tai gali būti radiometrinės charakteristikos [8, 35] ar įvairių klaidų charakteristikos [8, 9], signalo fazinės charakteristikos [10, 11].

Radijo dažnių pėdsakų (RFF) atsiradimui belaidžio įrenginio signale gali turėti įtakos įrenginio siųstuvą sudarančių komponentų nevienodumai. Belaidžio siųstuvo principinė, blokinė schema pateikiama 1.1 pav. Remiantis schema, skaitmeninį belaidžio signalo siųstuvą sudaro pagrindiniai elementai [12] visų UAV architektūrų sandaroje taip pat yra skaitmeninis signalo siųstuvas [13].



1.1 pav. Pagrindiniai belaidžio siųstuvo komponentai, kurių trūkumai gali būti panaudoti vartotojui identifikuoti [12]

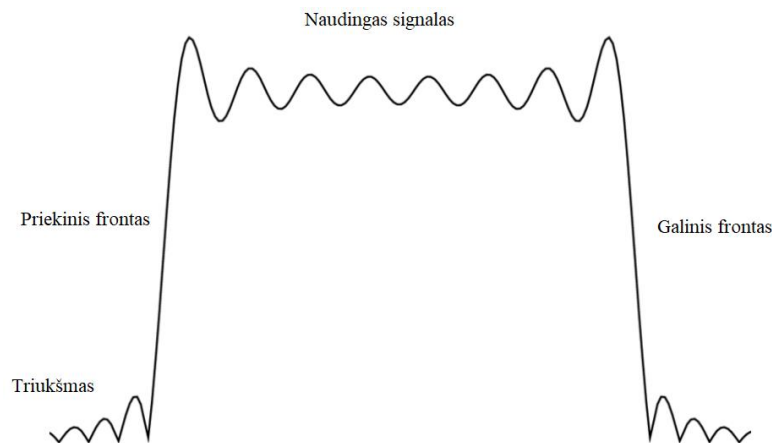
- Skaitmeninio signalo procesorius DSP (angl. *Digital signal processing*) – procesoriaus tikslas yra matuoti, filtruoti ir/arba suspausti skaitmeninius arba analoginius signalus. Tai daroma konvertuojant signalą iš realaus pasaulio analoginio signalo į skaitmeninę formą. Norint konvertuoti signalą, naudojamas skaitmeninis-analoginis keitiklis (DAC);
- Skaitmeninis – analoginis keitiklis D/A (angl. *Digital-to-analog converter*) – tai belaidžio siųstuvo dalis, kurioje generuojamas skaitmeninis signalas ir matematiškai paverčiamas į analoginį signalą;
- Modulatorius (angl. *Modulator*) – skirtas atlikti signalo dažnio keitimą. Žemo dažnio signalą moduliuoja į aukšto dažnio informacinį signalą;
- Galios stiprintuvas PA (angl. *Power amplifier*) – didina moduluoto signalo amplitudę, išlaikant pradinio signalo formą. Naudojant anteną sustiprintas signalas išsiunčiamas iš belaidžio ryšio siųstuvo.

Visų siųstuvo elemento komponentų gamybos linijos netikslumas gali daryti įtaką radijo dažnių pėdsakų atsiradimui signale, pavyzdžiui: oksido sluoksnio storis, kanalo elektronų (angl. *Channel Doping*) koncentracija, MOSFET (angl. *Metal oxide semiconductor field effect transistor*) tranzistoriai, kurie naudojami siųstuvų galios stiprintuvuose. Visi šie išvardinti parametrai gali keistis tarp galutinio produkto partijų dėl gamybos proceso [10].

1.2. Radijo siųstuvo siunčiamo signalo frontas

Kiekvienas belaidis įrenginys turi radijo bangų siųtuvą, kuris perduoda duomenis siųsdamas signalą. Kaip pavaizduota 1,2 pav., signalas sudarytas iš trijų pagrindinių dedamųjų: priekinis frontas (angl. *Transient*), galinis frontas ir naudingas signalas. Priekinis frontas yra labai trumpas ir trunka tol, kol signalas pasiekia maksimalią galią. Pasiekus maksimalią galią, signalas pakeičia formą, kuri vadinasi „stabilus signalas“ (angl. *Steady State*). Naudingas signalas yra signalo dalis, kurioje yra visi persiunčiami duomenys. Galinis frontas trunka tokią laiko dalį, kol signalas susilpnėja iki triukšmo lygio. Dauguma identifikavimo metodų yra pagrįsti signalo priekinio ir galinio frontų analize, nes būtent juose pasireiškia unikalios spinduliavimo charakteristikos.

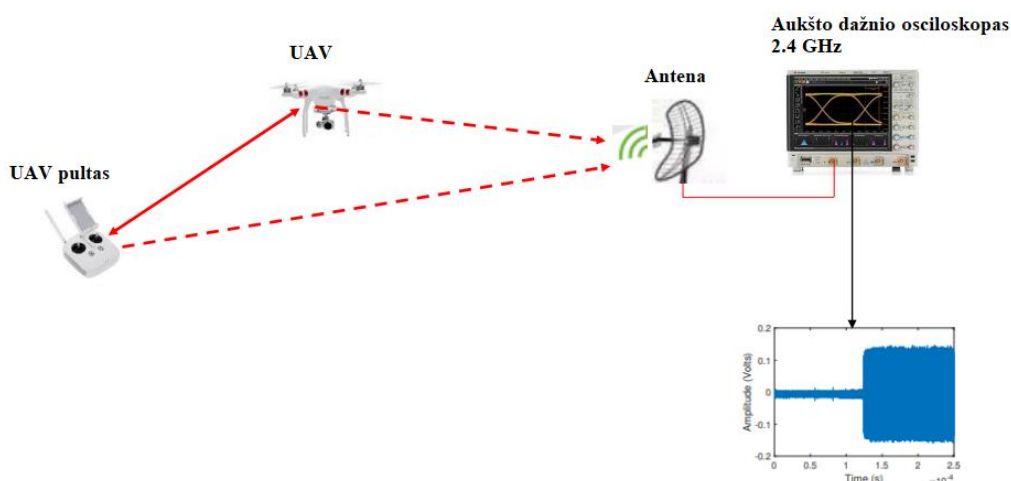
Kitų autorių šaltiniuose yra teigiama, jog siekiant atskirti frontą nuo stabilaus signalo ir norint identifikuoti belaidį įtaisą su radijo siųstuvu atsižvelgiant į jo spinduliavimo charakteristikas, reikia nustatyti fronto pradžią ir pabaigą. Signalų fronto ribų atpažinimui yra taikomi įvairūs metodai. Vienas iš įvertinimo metodų yra signalo kreivės pokyčio (angl. *Curve Fitting*) metodas. Tyrimo autoriai pasiekė 87,5 – 93,8% tikslumą naudodami signalo kreivės pokyčio metodą [14]. Kito nagrinėto autoriaus darbe naudojant signalo fazės pokyčio nustatymus [11], buvo pasiektas 89,5% įrenginių atskyrimo tikslumas. Taip pat buvo analizuojami kitų autorių darbai ir pastebėta, jog jų naudojamus metodus sudėtinga realizuoti. Pastarieji paremti siųstuvo signalo slenksčio nustatymu (angl. *Threshold*) [11], siųstuvo įjungimo metu komutuojant atsirandančiu signalo preambulės nustatymu (angl. *Power Ramped-up Preamble*) [15] naudojant Bayeso žingsnio kitimo detektorius (angl. *Bayesian Step Change Detector*) [11].



1.2 pav. Teorinis signalo spektras [10]

1.3. Belaidžių tinklų saugumo problematikos sprendimas

1.3 pav. parodyta sistema RF pėdsakų pagrindu, kuri yra skirta aptikti ir identifikuoti UAV. Aptikimo sistema yra RF jutiklis (antena), galinti užfiksuoti signalus tiek iš UAV, tiek iš jo valdiklio. Be to, RF imtuvas taip pat fiksuoja kitus signalus aplinkoje, kurie egzistuoja kartu su UAV perdavimais toje pačioje dažnių juostoje. Aplinkos triukšmo problemą galima nuslopinti naudojant kelis triukšmo mažinimo būdus, pavyzdžiui vilnelės funkcija, kuri leidžia tirti signalą atskirais laiko intervalais ir juostos pralaidumo filtravimas. Visas procesas yra padalintas į dvi pagrindines dalis: aptikimą ir klasifikavimą. Aptikimo stadijoje yra priimamas sprendimas, ar užfiksuotas RF signalas priklauso UAV, ar triukšmo lygio signalui. Jei aptinkamas UAV, algoritmas kreipiasi į klasifikavimo etapą, kuriame yra patikrinama duomenų bazė ir nustatoma ar duomenų bazėje yra informacija apie turimą signalą. Jei turima, tada priskiriamas UAV savininkas [17, 40].



1.3 pav. Sistema RF pėdsakų pagrindu, skirta aptikti UAV [17]

Studijuojant kitų autorių darbus buvo pastebėta, kad yra pasitelkiamos sudėtingos formulės, kurios apkrauna algoritmą skaičiavimais. Šiame darbe yra naudojamos paprastos matematinės formulės.

Naudojamas formules nesunku taikyti ir įdiegti į automatizuotą identifikavimo sistemą. Šis darbas remiasi fronto atpažinimu, frontų formos aprašymu, signalų diskreditacija, remiasi signalo amplitudės kreivumu ir jos forma.

2. Dronų naudojami IEEE 802.11 standartai

„WiFi“ yra plačiausiai paplitęs prieigos tinklas, užtikrinantis ryšį tarp galutinių vartotojų su belaidžiais įrenginiais. Ši technologija pagrįsta IEEE 802.11 standartu, kuris per pastaruosius metus nuolat tobulėjo, o kiekviena karta pranoko senąją. Šis ryšys turėjo kaskart didesnę greitį, mažesnę uždelsimą ir buvo pritaikomas su vis įvairesniais įrenginiais. Dronų komunikacija naudoja eilę skirtingų IEEE 802.11 standartų. 802.11a/g/n/ac protokolai yra labiausiai paplitę tarp plačiai rinkoje naudojamų komercinių dronų [18, 22, 23]. Plačiau apie šiuos standartus ir jų parametrus 1 lentelėje. Šiame darbe yra gilinama į plačiausiai naudojamus ir veikiančius 2,4 GHz dažnių diapazone standartus: IEEE 802.11g ir IEEE 802.11n. Dėl menko vartotojų 5 GHz dažnio diapazono naudojimo ir eksperimentinės įrangos trūkumo, šioje dažnių juostoje tyrimas nebus atliktas.

Abu 802.11 g/n standartai 2,4 GHz dažnių juostoje palaiko ortogonalųjį dažninį sutankinimą OFDM (angl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ir naudoja tuos pačius kanalus. Taip pat 802.11 g standartas naudoja tiesioginės sekos plėstojo spektro sutankinimo metodą. Apie sutankinimo metodus plačiau aptariama 2.3 ir 2.4 skyriuose.

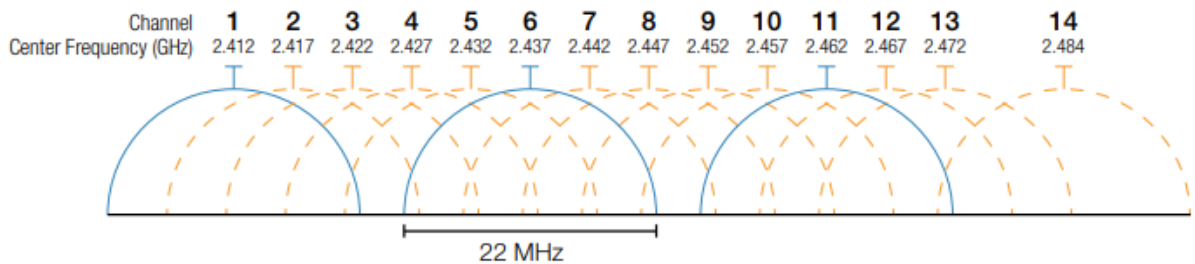
2.1 lentelė. 802.11a/g/n/ac standartų palyginimas [22, 23]

802.11 standartas	802.11 a	802.11 g	802.11 n	802.11 ac
Dažnis, GHz	5,150 – 5,250 5,250 – 5,350 5,725 – 5,825	2,4 – 2,4835	2,4 – 2,4835 5,150 – 5,250 5,250 – 5,350 5,725 – 5,825	5,150 – 5,250 5,250 – 5,350 5,725 – 5,825
Sutankinimo būdas	OFDM	DSSS, OFDM	OFDM	OFDM
Kanalo plotis, MHz	20	20	20/40	60/80
Moduliacija	QAM, QPSK, BPSK	QAM, QPSK, BPSK, CCK	QAM, QPSK, BPSK, CCK	QAM, QPSK, BPSK, CCK
MIMO	-	-	4x4	2x2

2.1. Dronų belaidžio tinklo kanalai ir veikimo dažniai

UAV masiškai naudoja 2,4 GHz ISM juostą, kai yra aktyvūs radijo pultas (RC). Tai trukdo naudoti šią konkrečią juostą bet kokiais kitais tikslais. 5,8 GHz dažnių juosta yra geresnė alternatyva, nors miesto aplinkoje matome, kad ją intensyviai naudoja namų vartotojai, kurdami „Wi-Fi“ prieigos taškus. Nė viena iš šių juostų nebuvo sukurta specialiai UAV ryšio tikslams, o tai reiškia, kad daugelis kitų konkuruojančių technologijų bet kuriuo metu gali prisijungti prie šių dažnių juostų. Dėl šios priežasties kanalo užimtumas tampa neįmanomas norint tinkamai veikti tikslinėje UAV srityje. Siaura kanalo erdvė turėtų būti skirta specialiai orlaivių ryšių poreikiams civiliniuose ir pramoniniuose sektoriuose (kadangi karinis sektorius jau naudoja kitus rezervuotus kanalus). [19, 20]

Belaidžio tinklo IEEE 802.11 2,4 GHz standartas yra išplėstas į 2,4 – 2,4835 GHz dažnių juostą. 2.1 paveikslėlyje yra pavaizduota 2,4 GHz dažnių juosta padalinta į 14 kanalų. Kanalai išdėstyti 5 MHz atstumu, pradedant nuo 1 kanalo, kurio centras yra 2,412 GHz baigiant 14 kanalu, kuris yra atskirtas 12MHz pločiu ir kurio centras yra 2,484 GHz. 14 kanalas naudojamas tik Japonijoje. Daliai kanalų taikomi papildomi apribojimai arba jie neprieinami naudoti kai kuriose šalyse [19, 20, 21]. WiFi įrenginiai naudoja 22 MHz pločio kanalus. Toks kanalų išdėstymas lemia tarpusavyo kanalų persidengimą. Taip pat 2.1 pav. parodyta, kad 2,4 – 2,4835 GHz diapazone yra trys tarpusavyje nepersidengiantys kanalai. Spektro kanalus skiria 5 MHz diapazonas. Centriniai dažniai vienas nuo kito atskirti per 25 MHz.

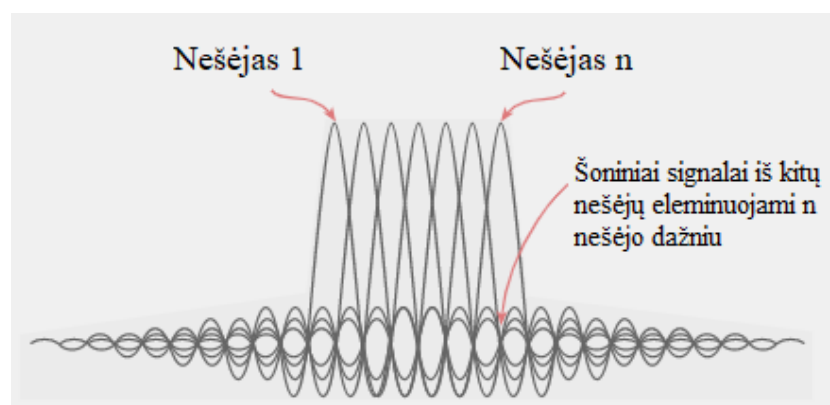


2.1 pav. 2,4 GHz dažnių juosta yra padalinta į 14 persidengiančių kanalų [20]

2.2. OFDM Ortogonalusis dažninis multipleksavimas

Ortogonalusis dažninis multipleksavimas gali būti naudojamas daugelyje technologijų. Viena iš jų yra bevielis LAN (WLAN) duomenų perdavimas. Visose belaidžiuose sistemose naudojamas OFDM, įskaitant IEEE 802.11 b/g/n/ac/ax. OFDMA pridėjimas prie „Wi-Fi 6/802.11ax“ standarto leidžia daugiau įrenginių vienu metu naudoti tą pačią bazinę stotį. OFDM taip pat naudojamas metropoliteno tinklo (MAN) IEEE 802.16 pasaulinio suderinamumo mikrobangų prieigai (WiMAX) įrenginiuose [24].

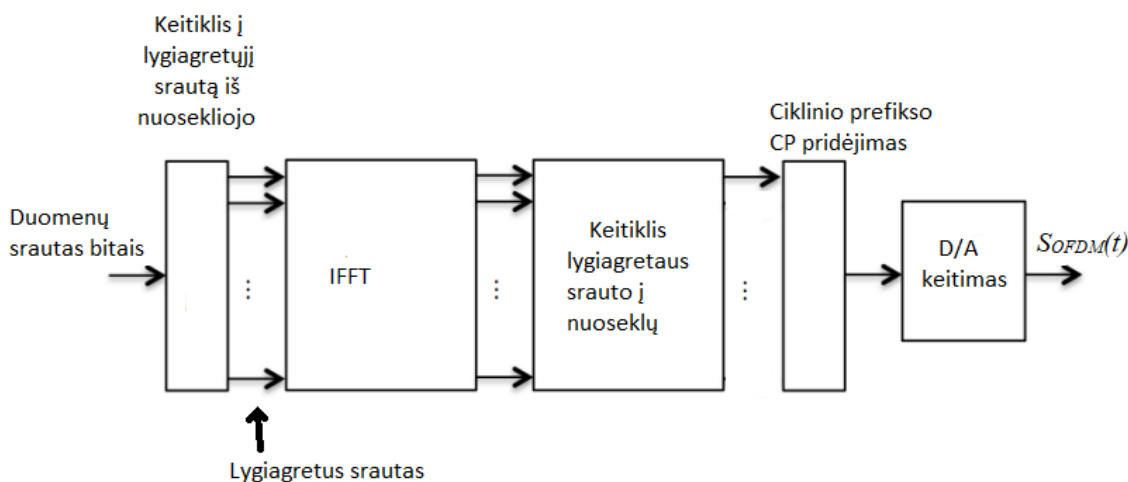
Ortogonalusis dažninis multipleksavimas yra duomenų perdavimo būdas, kai vienas informacijos srautas yra padalinamas į kelis glaudžiai išdėstytus siaurajuosčio kanalo dažnius, o ne vieną plačiąjuosčio kanalo dažnį kaip pavaizduota 2.2 pav. Jis dažniausiai naudojamas belaidžiam duomenų perdavimui, tačiau gali būti naudojamas ir laidiniam bei šviesolaidiniam ryšiui.



2.2 pav. Pagrindinė OFDM Ortogonalujo dažninio multipleksavimo, koncepcija [25]

Tradicinėje vieno kanalo moduliavimo schemoje kiekvienas duomenų bitas siunčiamas nuosekliai. OFDM multiplekserio architektūra apdorojant skaitmeninį signalą pateikta 2.3 pav. Keli OFDM bitai gali būti siunčiami lygiagrečiai arba tuo pačiu metu atskirais antriniais kanalais. Tai leidžia kiekvieno antrinio srauto duomenų perdavimo sparta būti mažesnei, nei to reiktų vienam panašaus pralaidumo srautui. Dėl šios priežasties sistema tampa mažiau jautri trikdžiams ir užtikrina efektyvesnę duomenų pralaidumą [24, 25, 26]. Trečiajame paveiksliuke pavaizduota kaip į multiplekserį patenka nuoseklus duomenų srautas, kuris pirmajame multiplekserio bloke keitiklyje išskaidomas į lygiagretųjį srautą. Antrajame iFFT bloke (angl. *Inverse Fast Fourier transform*) srautas apdorojamas lygiagrečiai atvirkštinės Furje transformacijos. Toliau srautas keitiklyje pakeičiamas į nuoseklų iš moduluoto lygiagretaus. Ketvirtajame bloke atliekamas ciklinio prefikso pridėjimas. Paskutiniame bloke iš skaitmeninės formos su cikliniu prefiksu transformuojamas į analoginę formą suformuojant OFDM signalą $S_{OFDM}(t)$ [25, 26]. Šiuo multipleksavimo metodu yra siekiama padidinti duomenų perdavimo spartą, efektyviau išnaudojant signalo spektrą.

Signalai gali būti moduluojami visais moduliacijos būdais - nešlio fazės moduliacija (BPSK, QPSK), amplitudės moduliacija AM ar kvadratinė amplitudės moduliacija QAM (angl. *Quadrature Amplitude Modulation*) [11, 14]. Taip moduluotas OFDM signalas patenka į belaidžio įrenginio galios stiprintuvą PA, po kurio signalas pereina į siųstuvą, kuriame jis yra išsiunčiamas per anteną.



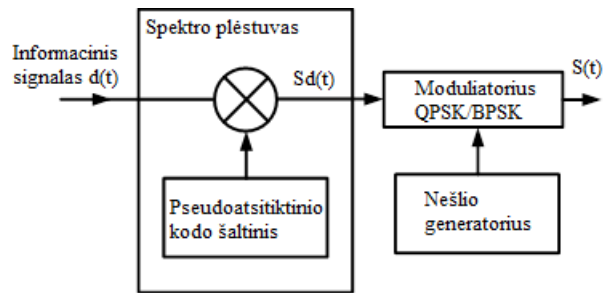
2.3 pav. OFDM multiplekserio architektūra skaitmeninio signalo apdorojimui [16]

2.3. Tiesioginės sekos plėstas spektras DSSS

Tiesioginės sekos plėsto spektro (DSSS) signalo perdavimo technologija naudojama belaidžio tinklo informacijos perdavimui. Taikant šią technologiją, duomenų signalas siuntimo stotyje yra derinamas su didelės duomenų spartos bitų seka, kuri dalija vartotojo duomenis pagal sklaidos koeficientą. DSSS naudojimo pranašumai yra atsparumas trukdžiams, vieno kanalo dalijimasis keliems vartotojams, mažesnis foninis triukšmas. Šis metodas taikomas 802.11 g bei 802.11 b standartuose [27, 28].

DSSS yra plataus spektro moduliavimo technologija, naudojama skaitmeniniam signalui perduoti radijo bangomis. Iš pradžių ji buvo sukurta kariniams tikslams ir naudojo sunkiai aptinkamus plačiajuosčius signalus, kad būtų išvengta signalo trukdymo (angl. jamming) bandymų. Ji taip pat

kuriama ir naudojama komerciniuose belaidžiuose tinkluose. Pav. 2.4 yra pavaizduota DSSS multiplekserio architektūra į kuri patekęs signalas yra plečiamas naudojant pseudoatsitiktinius PN (angl. *Pseudorandom noise*) kodus. Naudojamas kodas, kuris gali trukti iki kelių tūkstančių bitų, kurie susideda iš 64 bitų papildančio kodo moduliacijos CCK (angl. *Complementary Code Keying*) arba dvejetainių bitų *Barkerio* seka. Šiuo kodu yra moduluojamas žemadažnis signalas, naudojant QPSK (angl. *Quadrature Phase Shift Keying*) arba BPSK (angl. *Binary Phase Shift Keying*) moduliacijas. Šis signalas keliauja į galios stiprintuvą PA, po kurio signalas pereina į siūstuvą, kuriame signalas yra išsiunčiamas per anteną [27, 28].



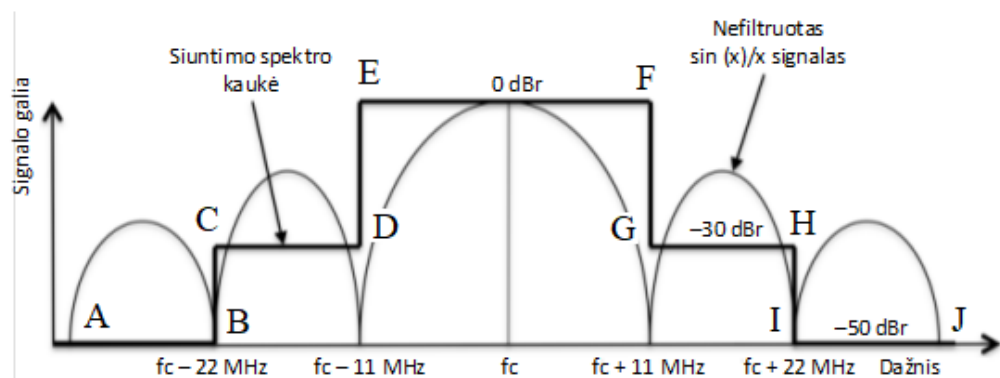
2.4 pav. DSSS multiplekserio architektūra [27]

Visi signalai apdorojami eilės elementų, kurių yra pilną belaidžiuose įrenginiuose. Įgavęs galutinę formą, signalas išsiunčiamas radijo dažniais. Kiekvienas tiesioginės sekos plėstojo spektro DSSS ar ortogonaliojo dažninio sutankinimo OFDM multiplekserio elementas gali daryti įtaką radijo dažnio signalo spektro kitimui. Tai skatina radijo dažnio antspaudų atsiradimą, kurie gali būti fiksuojami ir sekami.

2.4. DSSS spektro charakteristikos

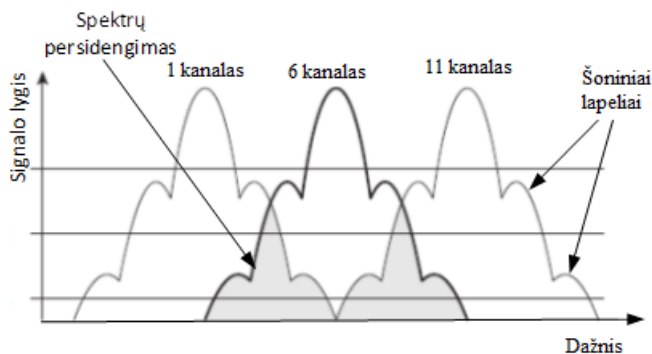
Plėstojo spektro DSSS signalo energija pasiskirsto plačioje dažnių juostoje ir neturi nustatytų ribinių dažnio reikšmių. Dėl to kiekvienas kanalas yra tarpusavyje persidengiąs. Teorinė DSSS signalo spektro kaukė nustato ribas, pagal kurias apriboja energiją nuo centrinio dažnio, t. y. 22 MHz į teigiamą ir neigiamą puses [29].

Naudojant DSSS, ties centriniu dažniu f_c yra nustatomas atskaitos taškas signalo spektro kaukėje. Šiame taške yra nustatoma maksimali signalo galios spektro tankio PSD (angl. *Power Spectral Density*) reikšmė, kuri yra 0 dB (angl. *Decibel Relative*). Šie vienetai išreiškiami santykiu iki maksimalios galios signalo tankio reikšmės. Penktajame paveikslėlyje pavaizduotas f_c taškas tarp E ir F taškų, nuo kurio nutolusi signalo galia per ± 22 MHz tarp AB ir IJ taškų, kuri negali viršyti 50 dB. Intervaluose CD ir GH signalo galia turi būti -30 dBm arba mažesnė [29].



2.5 pav. DSSS signalo spektro kaukė [36]

Teorinis kanalų spektrų persidengimas pavaizduotas 2.6 pav., kuriame šoniniai signalo spektro lapeliai persidengia intervaluose AB, CD, GH, IJ su kito kanalo spektro šoniniais lapeliais [26, 29]. Anksčiau 2.2 skyriuje analizuojant teorinį 802.11 kanalų išsidėstymą buvo pabrėžta jog dažnių juostoje 2,4 – 2,4835 GHz yra trys nepersidengiantys kanalai. Tačiau gilinantis į signalų spektro charakteristikas pastebėta jog 1, 6 ir 11 kanalai persidengia, bent jų šoniniai lapeliai. Tai įvyksta naudojant DSSS plėtimo būdą, kai siaurajuostis signalas yra išplečiamas dažninėje ašyje.

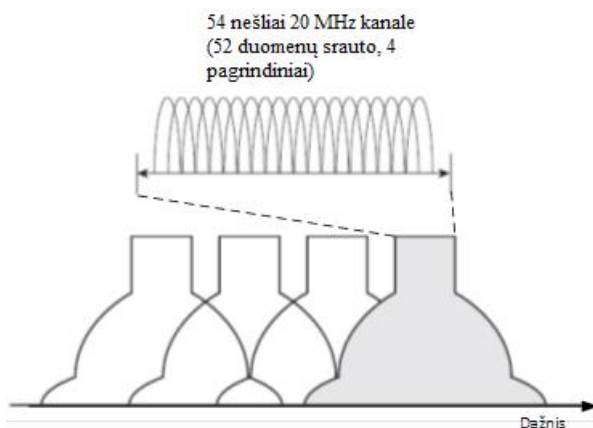


2.6 pav. Persidengimas 1, 6, 11 kanalų spektrų [29]

2.5. Ortogonaliojo dažninio multipleksavimo OFDM spektrinės charakteristikos

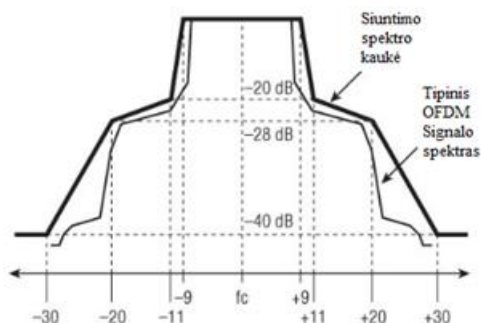
Ortogonalinis dažnio multipleksavimas (OFDM) yra viena iš populiariausių ryšių technologijų, naudojamų tiek laidiniam, tiek belaidžiam ryšiui. 802.11 standartuose OFDM naudojamas tiek 2.4 GHz tiek 5 GHz dažnių juostose. OFDM nėra plėstojo spektro technologija, nors ji turi panašių savybių kaip ir plėstojo spektro, pvz: maža perdavimo galia, naudojama daugiau pralaidumo. OFDM perduoda 52 atskirus glaudžiai ir tiksliai išdėstytus dažnius, kurie dažnai vadinami antriniais nešikliais (2.7 pav.). 52 antriniai nešėjai sunumeruoti nuo -26 iki + 26. Visų antrinių nešėjų dažnio plotis yra 312,5 KHz. Šie nešėjai perduodami mažesne duomenų perdavimo sparta. Bendra antrinių nešėjų duomenų perdavimo sparta yra didesnė. OFDM technologija yra atsparesnė nei DSSS neigiamam keletos kelių (angl. multipath) poveikiui. 52 antriniai nešėjai naudojami duomenims perduoti. Kiti keturi numeriai (-21, -7, + 7 ir + 21) yra žinomi kaip pilotiniai vežėjai (angl. pilot

carrier). Šiuos keturis vežėjus demoduliuoja kaip atskaitos fazes ir amplitudę, leidžiančią imtuvui save sinchronizuoti, kai jis demoduliuoja duomenis kituose antriniuose nešikliuose [38].



2.7 pav. OFDM teorinis spektro kaukių persidengimas [38]

OFDM naudoja du skirtingus fazės poslinkio kodavimus. Vienas iš jų yra (BPSK) koduojamas dvejetainiu kodu. Kitas (QPSK) koduojamas ketvirtainiu kodu, kuris skirtas mažesniai OFDM duomenų greičiui. Didesnė OFDM duomenų perdavimo sparta naudoja 16-QAM ir 64-QAM moduliaciją. Ketvirtainė amplitudinė moduliacija (QAM) yra fazės ir amplitudės moduliacijos hibridas [21, 26, 37].



2.8 pav. OFDM 20MHz signalo spektro kaukė [21]


Kaip matyti iš OFDM spektro kaukės 2.8 pav., šoninės juostos nešėjo dažniai labai greitai nenukrenta. Dėl šios priežasties dviejų gretimų galiojančių kanalų šoninės juostos dažniai persidengia ir dažniau sukelia trukdžius. Kad kanalai būtų laikomi nepersidengiančiais, 802.11 standartas reikalavo 20 MHz atskyrimo tarp centrinių dažnių [21, 26, 37]. Visi 20 MHz kanalai 5 GHz juostose naudoja OFDM ir turi 20 MHz atstumą tarp centrinių dažnių. Todėl IEEE laiko visus 5 GHz OFDM kanalus nepersidengiančiais. Praktikoje kai kurie šoninės juostos nešėjo dažniai sutampa tarp bet kurių dviejų gretimų 5 GHz kanalų. Išnaudojant kanalų skaičių ir atstumą tarp kanalų yra paprasta atskirti gretimus kanalus. Tai leidžia išvengti trukdžių, tinkamai taikant kanalo pakartotinius.

3. Eksperimento atlikimo metodika bei naudojama įranga

Šioje dalyje yra aprašoma eksperimento eiga, naudojama įranga ir frontų formos įvertinimo metodai. Taip pat apskaičiuojama santykinė paklaida.

3.1. Eksperimente naudojamų dronų pagrindinės charakteristikos

3.1 lentelė. Tiriamųjų dronų pultelių specifikacijos [30-32]

<i>Modelis</i>	<i>Specifikacijos</i>	<i>Išvaizda</i>
DJI Phantom GL300C	<p><i>Dažnis</i> – 2,4 GHz – 2,483 GHz</p> <p><i>Perdavimo atstumas</i> – 2000m (lauke)</p> <p><i>Vaizdo išvesties prievadas</i> – USB</p> <p><i>Darbo temperatūros diapazonas</i> – 0 – 40 °C</p> <p><i>Baterija</i> – 6000 mAh Li Po</p> <p><i>Perduodama galia</i> – FCC: 20dBm; CE 16 dBm</p> <p><i>Veikimo įtampa</i> – 1,2 V @ 7.4V</p>	
DJI Mini	<p><i>Dažnis</i> – 2,400 GHz – 2,483 GHz 5,8 GHz < 30 dBm (FCC) 5,8 GHz < 14 dBm (CE)</p> <p><i>Perdavimo atstumas</i> – 5,8 GHz: 4000 m (FCC); 2500 m (SRRC) arba 2,4 GHz: 2000 m (MIC/CE)</p> <p><i>Vaizdo išvesties prievadas</i> – USB (Type-B), USB Type-C</p> <p><i>Baterija</i> – 2600 mAh</p> <p><i>Perduodama galia</i> – 2,4 GHz: <19 dBm (MIC/CE) 5,8 GHz: <14 dBm (CE)</p>	
DEVO F12E	<p><i>Dažnis</i> –2,400 GHz – 2,483 GHz 5,8Ghz</p> <p><i>Perdavimo atstumas</i> – iki 1500m</p> <p><i>Vaizdo išvesties prievadas</i> – USB</p> <p><i>Baterija</i> –1600-3000 mAh</p> <p><i>Perduodama galia</i> –2.4 GHz: <19 dBm (CE) 5,8 GHz: <14 dBm (CE)</p>	

3.2. Matavimo įranga, spektro analizatorius

Eksperimento metu yra naudojamas spektro analizatorius Rohde&Schwarz FSH8 (žiūr. 3.1 pav.). Šis spektro analizatorius veikia nuo 9 kHz iki 8 GHz dažnių ruože, tai užtikrina didelį jautrumą. Spektro analizatoriaus veikimo galia siekia iki -141 dBm be papildomo stiprintuvo, o su stiprintuvu

iki -161 dBm. Gamintojas nurodo, kad FSH8 spektro analizatorius pasižymi labai maža paklaida < 1 dB. Visos įtaiso charakteristikos pateiktos 1 priede.



pav. 3.1 Spektro analizatorius Rohde-Schwarz® FSH8 [33]

Taip pat šis modelis turi keletą jungčių. Jungtys yra viršutinėje, kairėje arba dešinėje prietaiso pusėje. RF įvestis (antenos jungtis) yra viršutinėje įtaiso pusėje, kuri yra N tipo, gali būti jungiama tiesiogiai arba adapterio pagalba. RF įvestis yra apsaugota nuo statinių išskrovų ir įtampos impulsų ribojančia grandine. Šoninėse įtaiso dalyse yra LAN, mini USB, SD kortelės jungtys kurios yra naudojamos perkelti eksperimento duomenis iš spektro analizatoriaus į kompiuterį [33].

Gamintojas nemokamai dalinasi programine įranga „R&S InstrumentView“ kurioje duomenys perkelti į kompiuterį gali būti apdorojami. Ši programa buvo naudojama eksperimento metu analizuoti eksperimento gautus duomenis.

3.3. Eksperimento rezultatų įvertinimo matematiniai metodai

Toliau nagrinėjami matematiniai metodai gali būti panaudojami įvertinti spektro skirtumus tarp skirtingų įrenginių. Šios formulės įvertina

Pirmos ir antros išvestinių skaičiavimas leidžia įvertinti signalo frontų pradžią ir pabaigą. Nuolydžio koeficientas, kreivumas ir integralas įvertina signalo frontų formas ir plotą. Santykinė paklaida ir koreliacija įvertina rezultatų paklaidą. Pirmos išvestinės, kreivumo, nuolydžio koeficiento matavimo vienetai yra signalo lygio pagal laiką matavimo vienetai.

Pirmoji išvestinė parodo kitimo greitį skaičiuojamame taške arba keliuose taškuose [34]. Eksperimentiniuose skaičiavimuose pirmoji išvestinė parodo vykstantį pokytį tarp dviejų taškų, arba parodo kreivė kinta ar ne. Tai padės įvertinti frontų ribas, pradžią ir pabaigą.

Pirmoji išvestinė apskaičiuojama pagal (3.1) formulę [34]:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = f'(x_0) = y'(x_0) = y', \quad (3.1)$$

čia:

- Δy – y pokytis.
- Δx – x pokytis;

Antroji išvestinė parodo, ar yra perlinkimo taškas kreivės atkarpoje. Jeigu apskaičiuota antroji išvestinė kerta nulio ašį, tai reiškia tame taške yra perlenkimo taškas [34]. Antroji išvestinė neturi sisteminės dimensijos, nes yra išvestinės išvestinė pagal signalo lygį, todėl apskaičiuoti vienetai vadinami santikininiais vienetais.

Antroji išvestinė apskaičiuojama pagal (3.2) formulę [34]:

$$f''(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x) - f'(x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{x - x_0}, \quad (3.2)$$

čia:

- $f'(x_0)$ – pirmoji išvestinė nuo x_0 ;
- $f'(x)$ – pirmoji išvestinė nuo x ;
- x – funkcijos vertė sekančiame intervalo taške;
- x_0 – funkcijos vertė pradiniam taške a.

Kreivumas apskaičiuojamas pagal gautus išvestinių rezultatus. Kreivumas parodo tiesės linkimo greitį, arba kaip staigiai lenkiasi kreivė. Kai kreivumas lygus 0, reiškiasi kad tiesė yra tiesi. Skaičiuojant linijos kreivumą, kai gaunamas kreivumas didesnis už 0 tame taške linija linksta. Kuo staigesnis linkimas, tuo apskaičiuotas kreivumas didesnis.

Signalo linijos kreivumas apskaičiuojamas pagal (3.3) formule [34]:

$$K = \frac{|y''|}{[1+(y')^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (3.3)$$

čia:

- y'' – antroji funkcijos $f(x)$ išvestinė;
- y' – pirmoji funkcijos $f(x)$ išvestinė;

Apskaičiuoti signalo fronto plotą, naudojamas integralinis skaičiavimas. Integralinio ploto skaičiavimo formulė (3.4)[34].

$$\int_a^b y(x) dx, \quad (3.4)$$

čia:

- y – amplitudės lygis;
- dx – pokyčio žingsnis;
- a, b – integralo režiai, šiuo atveju fronto ilgis.

Fronto nuolydžio koeficientas parodo kaip staigiai (stačiai) kyla ar leidžiasi linija (signalo frontas) kiekviename taške. Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal (3.5) formulę [34].

$$b = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\Sigma(x-\bar{x})^2}, \quad (3.5)$$

čia:

- y – skaitinė funkcijos vertė y ašyje;
- \bar{y} – visų funkcijų verčių vidurkis;
- x – skaitinė argumento vertė x ašyje;
- \bar{x} – visų argumento verčių vidurkis.

Įvertinti visų įrenginių signalų išsibarstymo paklaidą yra skaičiuojama santykinė paklaida. Ji yra skaičiuojama procentais. Santykinės paklaidos formulė (3.6) [34].

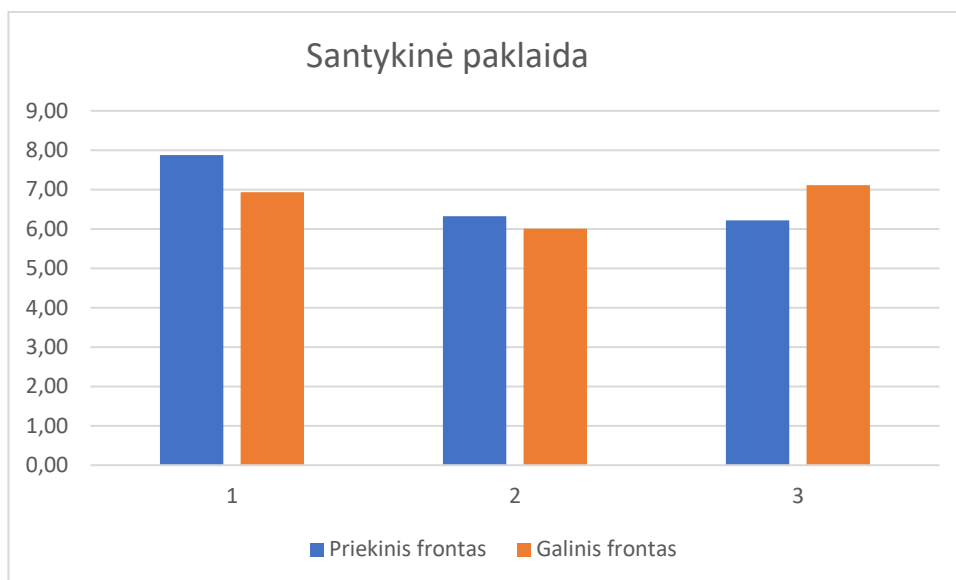
$$SP = \frac{|x-\bar{x}|}{\bar{x}} 100\%, \quad (3.6)$$

čia:

- x – x dydžio maksimali vertė;
- \bar{x} – x dydžių vidurkis.

3.4. Paklaidų įvertinimas

Atliekant 10 bandymų vienam eksperimentiniam įtaisui, automatiškai atsiranda signalo išsibarstymas. Diskredituojant gautus rezultatus (plačiau 4 skyriuje) gaunamos maksimalios ir minimalios amplitudės reikšmės viename taške. Apskaičiavus diskredituotų taškų vidurkius galima apskaičiuoti santykinę paklaidą. Santykinė paklaida parodo kiek yra išsibarstę signalo frontų maksimali ar minimali vertės tarp matavimo bandymų vidutinės vertės. Apskaičiuota santykinė paklaida kiekvienam diskredituotame fronto taške pasinaudojus (3.6) formule, gauti rezultatai pateikti 3.2 pav. grafike.



3.2 pav. 1 - Phantom, 2 – DJI Mini, 3 - DEVOF12E pultelių santykinė paklaida

3.2 pav. pavaizduotas grafikas kuriame paskaičiuota santykinė paklaida visų tiriamųjų dronų pultelių. Numeriu 1 pavaizduotas Phantom pultelis, numeriu 2 pavaizduotas DJI Mini pultelis, numeriu 3 pavaizduotas DEVOF12E pultelis. Grafike atsispindi priekinio ir galinio signalo frontų santykinė paklaida. Matyti grafike kad santykinė paklaida visų tiriamųjų pultelių, abiejų frontų neviršija 8%. Buvo pastebėta kad kur daugiausiai svyravo signalo frontų forma tarp bandymų, ten santykinė paklaida yra didesnė. Didžiausia santykinė paklaida yra Phantom „GL300C“ pultelio priekinio fronto 7,88%, kadangi eksperimento metu jo signalo forma daugiausiai kito. Būnant mažam signalo išsibarstymui išlieka maža diskreditacija, po ko pasireiškia maža santykinė paklaida. Mažiausias signalo išsibarstymas buvo DJI Mini pultelio galinio fronto, jo santykinė paklaida yra 6,01%.

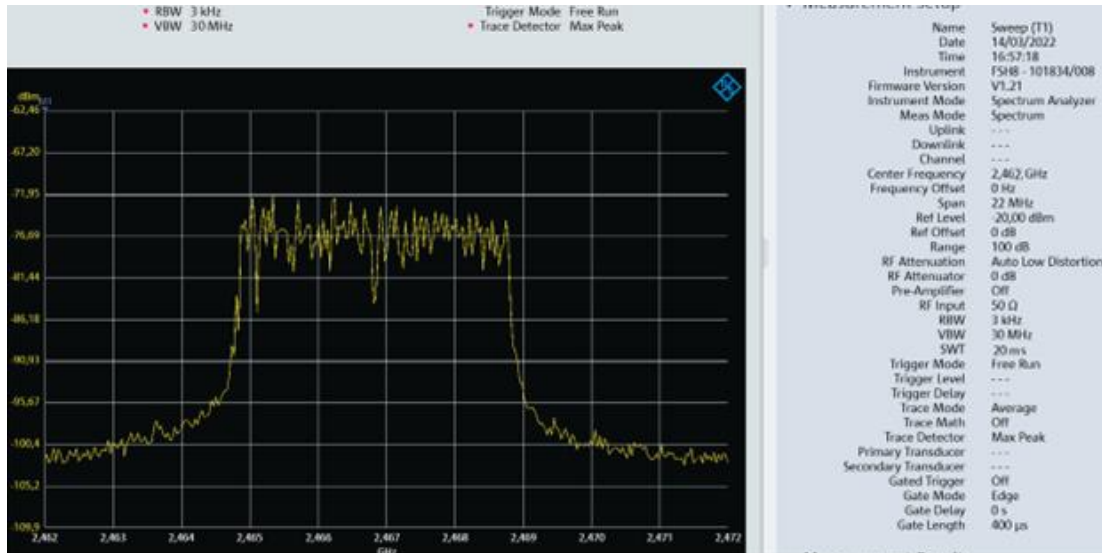
3.5. Eksperimento atlikimo metodika

Eksperimentas buvo atliktas Kauno Technologijos Universitete, Telekomunikacijų ir Elektronikos fakulteto laboratorijoje. Tyrimas buvo atliktas laikantis griežtai vienodų sąlygų, visų bandymų metu. Spektro analizatorius ir drono pultelis visais tyrimų atvejais stovėjo 3m atstumu. Spektro analizatoriaus FSH8 parametrai viso tyrimo metu išliko vienodi, pateikti žemiau.

- Matavimo tipas (angl. *Measuring mode*) - Spektro matavimas (angl. *Spectrum*)
- Centrinis dažnis (angl. *Center Frequency*) – 2,462 GHz
- Amplitudės ribos (angl. *Range*) - 100 dB
- Vaizdo juostos plotis *VBW* - 3 kHz
- Skiriamosios gebos plotis *RBW* - 3 kHz
- Detektorius tipas (angl. *Trace Mode*) - Maksimalios reikšmės (angl. *Max Hold*)
- Atnaujinimo laikas *SWT* - 20 ms

Tyrimo metu visa eksperimentinė įranga suderinta su 802.11 g standartu, jo kanalo plotis yra 20 MHz naudojant ortogonalųjį dažninį sutankinimą OFDM. Norėjus pamatyti visą belaidžio įrenginio signalo

spektrą, buvo pasirinkta 30 MHz matavimo plotis. Vaizdo juostos plotis buvo parinktas toks, kad būtų išskirta visa signalo forma išlaikant atsinaujinimo laiką. Išlaikyti signalo spektro analizės laiką (angl. *Sweep time*), buvo pasirinktas optimalus skiriamosios gebos plotis RBW.

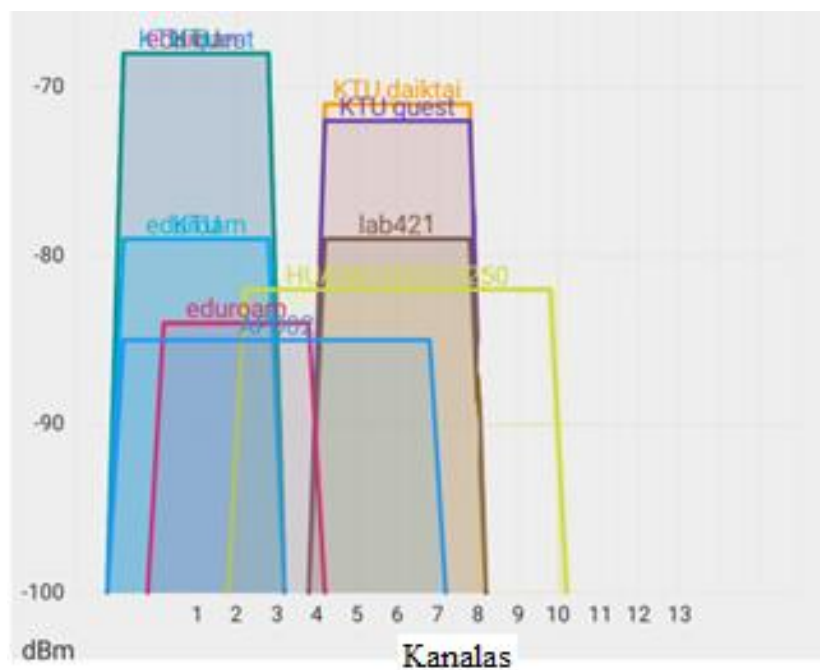


3.3 pav. Spektro analizatoriaus nustatymai ir spektras, tiriant DJI Mini pultelį

3.3 paveikslėlyje matyti vieno iš tiriamo pultelio eksperimento metu signalo spektras ir jo visi spektro analizatoriaus parametrai. Matyti kad tuščio kanalo triukšmas analizuojamam kanale yra ~ -102 dBm. Ties signalo centru galia siekia -83 dBm, o maksimali signalo galia -71,99 dBm. Atliekant tyrimą visi spektro analizatoriaus parametrai pasirinkti analizuota literatūra, bei suderinti su darbo aplinka ir tyrimo metu naudotais tyrimų pulteliais.

3.6. Kanalo parinkimas

Kadangi eksperimentas buvo atliktas privačioje Kauno Technologijos Universiteto Telekomunikacijų ir Elektronikos fakulteto laboratorijoje, kur egzistavo veikiantys kiti 802.11 standarto įrenginiai, kurių signalai galėjo interferuoti su eksperimento signalu ir turėti įtakos eksperimento tikslumui, todėl tyrimui reikėjo parinkti kanalą. Persidengiančiu kanalu veikiantys du ar keli įrenginiai gali sukelti interferavimo efektą, tai gali sukelti spektro dedamąsias kurios kelia trukdžius, o tai gali daryti įtaką radijo dažnių pėdsakų skenavime. Visi belaidžiai įrenginiai su kuriais buvo atliekamas eksperimentas veikė 2,412 – 2,472 GHz dažnių ruože, kuriame yra trys nepersidengiantys kanalai (1, 6, 11) plačiau 2.2 skyriuje. Veikiant aplinkoje kitiems tinklams yra itin svarbu pasirinkti kanalą kuriame būtų veikiamas mažiausiai kitų kanalų arba kanalas būtų tuščias.



3.4 pav. Eksperimento aplinkoje egzistuojantys WIFI įrenginiai

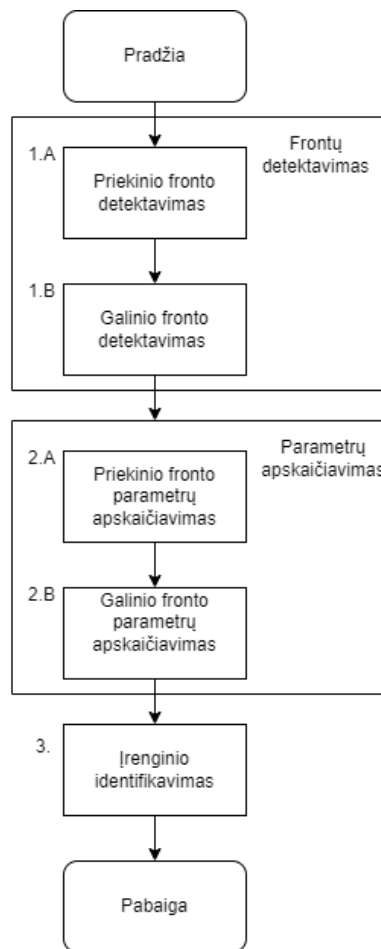
Prieš pradėdant tyrimą buvo patikrinta kokiose kanaluose veikia kiti aplinkoje esantys tinklai, buvo panaudota išmaniojo telefono programa „Net Analyzer“. Nustatyta kad daugelis kanalų veikia 1 ir 6 kanaluose, todėl eksperimentui buvo pasirinktas 11 kanalas kurio centrinis dažnis yra 4,462 GHz. 11 kanalas yra pakankamai atitolęs nuo 6, kad jo neveiktų kiti signalai. Prieš pradėdant eksperimentą, buvo įsitikinta kad kanalas tuščias pajungiant spektro analizatorių šiuo kanalo dažniu.

4. Darbo eiga ir signalų frontų matavimas

Šioje dalyje yra aprašoma tiriamoji dalis – Sudarytas darbo eigos algoritmas, pagal kurį bus atliekamas eksperimentas. Kaip naudojant laboratorinę įrangą fiksuojamas siunčiamas signalas. Kaip randamos signalo unikalios savybės.

4.1. Darbo eigos algoritmas

Šioje dalyje sudaromas algoritmas, kuriuo vadovaujantis yra atliekamas eksperimentas bei suskaičiuojami eksperimentiniai duomenys.



4.1 pav. Blokinė darbo schema

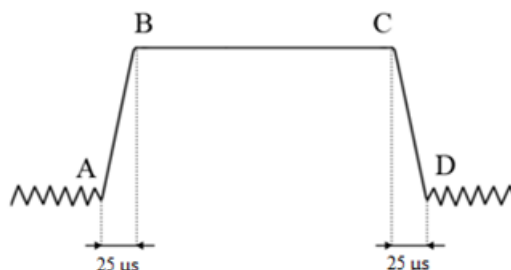
Šį algoritmą sudaro trys pagrindinės dalys:

1. Frontų išskaičiavimas iš pilno signalo;
2. Frontų duomenų suskaičiavimas;
3. Įrenginio identifikavimas iš duomenų bazės.

Darbo eigos algoritmo aprašymas:

Frontų aptikimo dalyje atliekami galinio ir priekinio frontų aptikimas. Plačiau 5.2 skyriuje.

1.A Šioje dalyje atpažįstamas ir apibrėžiamas priekinis frontas. Pirmą skenuojamas spektras ir iš jo paimama 1 ms trukmės dalis. Kiekviename taške apskaičiuojama išvestinė. Jeigu apskaičiuota išvestinė pradeda mažėti po maksimalios reikšmės ir yra lygi arba mažesnė už 0,15 (iš paimtų trijų taškų). Tada iš paimtų trijų taškų, pirmasis taškas yra B taškas. Sekančiai apibrėžiamas A taškas už 25 μ s ribos, kaip kad pavaizduota 4.2 paveiksle. 25 μ s atkarpa sudiskredituojama kas 1 μ s, kad būtų galima atlikti tolimesnius skaičiavimus. Sudiskreditavus frontą gaunami 25 taškai, kiekviename taške apskaičiuojamas visų matavimų vidurkis. Matavimų vidurkis bus naudojamas frontų parametrų skaičiavimams.



4.2 pav. Priekinio ir galinio fronto ribos A – B, C – D

1.B Šioje dalyje atpažįstamas galinis frontas tarp C ir D taškų, kaip pavaizduota 4.2 paveiksle. Iš kairės į dešinę nuo B taško iki C taško yra naudingoji signalo dalis, informacijos siuntimas. Šioje dalyje signalo forma beveik nesvyruoja (kaip tiesė), ir pirmoji išvestinė neviršija 0,15. Artėjant prie C taško prasideda galinio fronto ribos, išvestinė pradeda didėti. Panašiai kaip atpažįstą priekinį frontą, galinio fronto atpažinimui. Imami 3 taškai, juose skaičiuojamos išvestinės. Tikrinama ar dviejose iš trijų taškų išvestinė yra didesnė už 0,15. Jei tenkinama sąlyga, tada pirmas taškas (iš paimtų trijų taškų) yra C taškas. Atskaičiuojamos 25 μ s iki D taško ir apibrėžiamas galinio fronto ribos. Analogiškai diskreditavimas, kaip priekiniam frontui atliekamas ir galiniam frontui.

Sekančioje dalyje skaičiuojami galinio ir priekinio frontų parametrai:

2.A Šioje dalyje atliekami priekinio fronto parametrų skaičiavimai, kurie matematiškai įvertina fronto formą. Apskaičiuojami parametrai: pirmoji ir antroji išvestinės, nuolydžio koeficientas, plotas, kreivumas. Visi apskaičiuoti parametrai surašomi į duomenų bazę.

2.B Analogiškai kaip 2.A punkte, įvertinama fronto forma matematiškai. Apskaičiuojami parametrai: pirmoji ir antroji išvestinės, nuolydžio koeficientas, plotas, kreivumas. Kaip ir 2.A punkte, parametrai surašomi į duomenų lentelę.

Trečiojoje dalyje, kad identifikuoti įrenginį yra sudaromas identifikavimo algoritmas. Šis algoritmas remiasi punktais aprašytais aukščiau. Signalo aptikimui ir frontų atpažinime. Parametrų duomenų bazė, kurie jau apskaičiuoti ir surašyti 2.A ir 2.B punkte. Aptikus signalo frontus, apskaičiuotus parametrus šie yra lyginami su duomenų bazėje jau esančių ribomis. Atitinkančiam daugiausiai parametrų drono pultelio modeliui išvedamas jo pavadinimas.

5. Drono pultelio identifikavimas

Šiame skyriuje yra aprašomas naujas dronų pultelių identifikavimo metodas. Šis metodas remiasi fronto atpažinimo, matematinių parametru apskaičiavimų kurie parodo skirtumus tarp skirtingų dronų pultelių signalo frontų.

5.1. Signalų frontų amplitudžių parametrai

Ankstesniuose skyriuose aprašyta signalo forma nustačius minimalias ir maksimalias amplitudės vertes, tolimesni skaičiavimai atliekami skaičiavimo platformoje, kur yra galimybė naudojant matematinės formules ir metodus apskaičiuoti signalų frontų formą, kitimą ar rasti unikalių savybių iš kiekvieno skirtingo bevielio drono pultelio signalo frontų.

5.1 lentelė. "DJI Mini" drono pultelio priekinio ir galinio frontų vertės

u, s	Priekinis frontas			Galinis frontas		
	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-98,6	-103,1	-101,1	-73,25	-77,87	-74,56
2	-94,81	-99,23	-97,02	-77,88	-83,08	-79,48
3	-92,90	-98	-95,41	-72,8	-79	-75,9
4	-92,85	-99,21	-96,03	-72,92	-78,56	-75,74
5	-91,35	-98,59	-94,97	-76,03	-80,29	-78,16
6	-92,93	-99,79	-95,96	-71,91	-77,75	-74,83
7	-91,85	-98,69	-95,27	-75,94	-82,16	-79,05
8	-91,74	-97,58	-94,66	-72,97	-80,15	-76,56
9	-91,51	-97,23	-94,37	-77,04	-82,84	-79,94
10	-90,01	-98,23	-94,12	-76,01	-80,07	-78,03
11	-88,51	-96,07	-92,29	-75,63	-79,27	-77,45
12	-86,26	-91,84	-89,05	-73,1	-76,5	-74,8
13	-87,69	-92,91	-90,3	-75,81	-78,63	-77,22
14	-81,75	-85,15	-83,45	-82,2	-86	-84,1
15	-85,34	-89,50	-87,42	-86,89	-91,25	-89,07
16	-73,42	-76,26	-75,34	-87,51	-92,15	-89,83
17	-72,33	-79,15	-75,74	-88,98	-92,8	-90,89
18	-71,75	-77,97	-74,86	-90,84	-95,66	-93,25
19	-74,44	-82,3	-78,37	-90,53	-96,31	-93,42
20	-73,76	-77,38	-76,07	-92,23	-98,47	-95,35
21	-71	-73,6	-72,3	-92,82	-99,4	-96,11
22	-72,19	-78,57	-75,38	-93,6	-99,2	-96,4
23	-82,52	-88,12	-85,32	-91,92	-100,52	-96,22
24	-74,78	-79,38	-77,08	-94,02	-101,62	-97,82
25	-71,92	-77,72	-74,82	-95,17	-100,97	-98,07

1 lentelėje yra pateikiama vieno iš eksperimento metu atliktų matavimų drono pultelio „DJI Mini“ priekinio ir galinio frontų minimalias, maksimalios vertės bei suskaičiuotos vidutinės jų vertės iš 10 matavimų. Kitų eksperimente buvusių dronų pultelių signalo frontų maksimalios ir minimalios bei jų vidurkio reikšmės pateiktos 2 priede. Visų eksperimente atliktų dronų pultelių signalo amplitudės frontų įvertinama (3.5 skyriuje). Visi pagrindiniai tolimesni skaičiavimai bus atliekami su apskaičiuotu vidurkiu, kuris buvo apskaičiuotas su standartinę vidurkio formulę ir pateiktas greta maksimalios ir minimalios reikšmės. Bendri visų eksperimente buvusių dronų pultelių priekinio fronto amplitudės vidurkiai pateikiami 2 lentelėje.

5.2 lentelė. Visų dronų pultelių signalo priekinio fronto vidurkiai

u, s	Priekinis frontas		
	Phantom Vid, dBm	DJI Mini Vid, dBm	DEVOF12E Vid, dBm
1	-101,1	-101,3	-101,02
2	-100,03	-97,02	-101,38
3	-99,36	-95,41	-99,87
4	-96,03	-96,03	-95,23
5	-94,97	-94,97	-97,87
6	-92,97	-95,96	-95,96
7	-92,27	-95,27	-93,11
8	-91,56	-94,66	-91,39
9	-91,37	-94,37	-89,57
10	-92,32	-94,12	-88,42
11	-92,29	-92,29	-91,03
12	-89,89	-89,05	-89,58
13	-89,35	-90,3	-89,35
14	-88,45	-83,45	-85,48
15	-85,38	-87,42	-87,82
16	-85,11	-75,34	-82,64
17	-83,74	-75,74	-80,75
18	-82,46	-74,86	-79,86
19	-81,29	-78,37	-78,37
20	-79,47	-76,07	-78,17
21	-76,3	-72,3	-77,31
22	-75,38	-75,38	-76,39
23	-75,32	-85,32	-74,92
24	-74,28	-77,08	-75,88
25	-73,72	-74,82	-74,12

Iš apskaičiuotų priekinio fronto vidurkių pastebima jog pirmasis taškas visų pultelių atvejais prasideda ties triukšmu kurio lygis yra apie -101 dBm. Matavimų metu su spektro analizatoriumi buvo matyti kad triukšmo lygis apytiksliai yra apie -101 dBm, todėl pirmasis taškas prasideda būtent nuo triukšmo lygio. O aukščiausias taškas yra ties -74,12 dBm lygiu, tai yra siunčiamo signalo stiprumas.

Toliau 3 lentelėje yra pateikiama trijų pultelių galinio fronto amplitudės vidurkiai.

5.3 lentelė. Visų dronų pultelių signalo galinio fronto vidurkiai

u, s	Galinis frontas		
	Phantom Vid, dBm	DJI Mini Vid, dBm	DEVOF12E Vid, dBm
1	-74,3	-74,56	-74,16
2	-75,83	-79,48	-75,38
3	-74,21	-75,9	-77,56
4	-75,58	-75,74	-76,18
5	-76,34	-78,16	-75,14
6	-77,45	-74,83	-76,16
7	-76,63	-79,05	-76,02
8	-78,91	-76,56	-77,54
9	-79	-79,94	-80,94
10	-81,48	-78,03	-81,14
11	-79,25	-77,45	-82,96
12	-86,46	-74,8	-82,99
13	-87,92	-77,22	-83,32
14	-89,26	-84,1	-84,92
15	-91,46	-89,07	-85,47
16	-93,03	-89,83	-83,94
17	-94,5	-90,89	-85,47
18	-96,17	-93,25	-86,36
19	-97,38	-93,42	-87,56
20	-98,18	-95,35	-89,82
21	-96,98	-96,11	-91,13
22	-97,91	-96,4	-94,45
23	-98,25	-97,22	-98,58
24	-99,47	-98,82	-100,56
25	-101,94	-101,07	-101,96

Panašūs pastebėjimai kaip ir 2 lentelėje pastebimi 3 lentelėje, jog beprasidedant galiniam frontui ir baigiantis signalui pirmasis fronto taškas yra apie -74 dBm. O paskutinis fronto amplitudės taškas yra triukšmo lygyje apie -101 dBm. Abi lentelės 2 ir 3 parodė jog tarp signalo frontų galima pamatyti skirtumus.

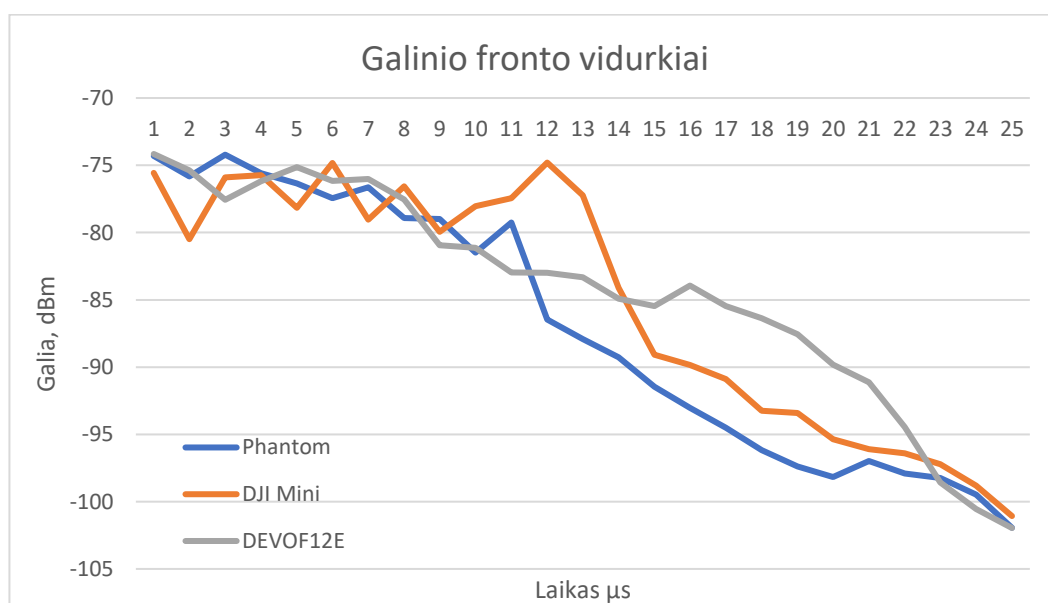
Toliau 1 ir 2 paveikslėliuose pavaizduoti 2 ir 3 lentelės vidurkiai grafiškai, paveikslėliuose pavaizduoti trijų dronų pultelių priekinio ir galinio frontų skirtumai.



5.1 pav. Trijų dronų pultų priekinių frontų galios priklausomybė nuo laiko vidurkiai

Pirmajam grafike, pateiktas 5.1 pav., tarp skirtingų dronų pultelių signalo priekinio fronto yra matomi skirtumai: kreivumas, tolygumas ar staigūs galios sumažėjimai ir padidėjimai. Pavyzdžiui bevielės „DJI Mini“ drono pultelis turi platesnę signalo fronto kreivę, taip pat aiškiai išsiskiria iš kitų savo staigiom signalo galios sumažėjimo ir padidėjimo pokyčiais. Sulyginus visus pultelių priekinio fronto vidurkius šis pultelis labiausiai vizualiai išsiskyrė iš kitų, kurį sukūrė siunčiamas signalas.

Tarp kitų dviejų pultelių „Phantom“ ir „DEVOF12E“ yra matomi tam tikri skirtumai, nors jų formos yra panašios. Tęsiant skaičiavimus, panaudojant matematinius metodus šių pultelių skirtumai išryškėja stipriau.



5.2 pav. Trijų dronų pultų galinių frontų galios priklausomybė nuo laiko vidurkiai

5.2 paveikslėlyje grafiškai pateikti visų trijų dronų pultelių galinių frontų vidurkiai. Lyginant 5.1 pav., priekinį frontą su galiniu frontu pastebima kad vėl labiausiai išsiskyrė „DJI Mini“ drono pultelis su fronto lūžio taškais.

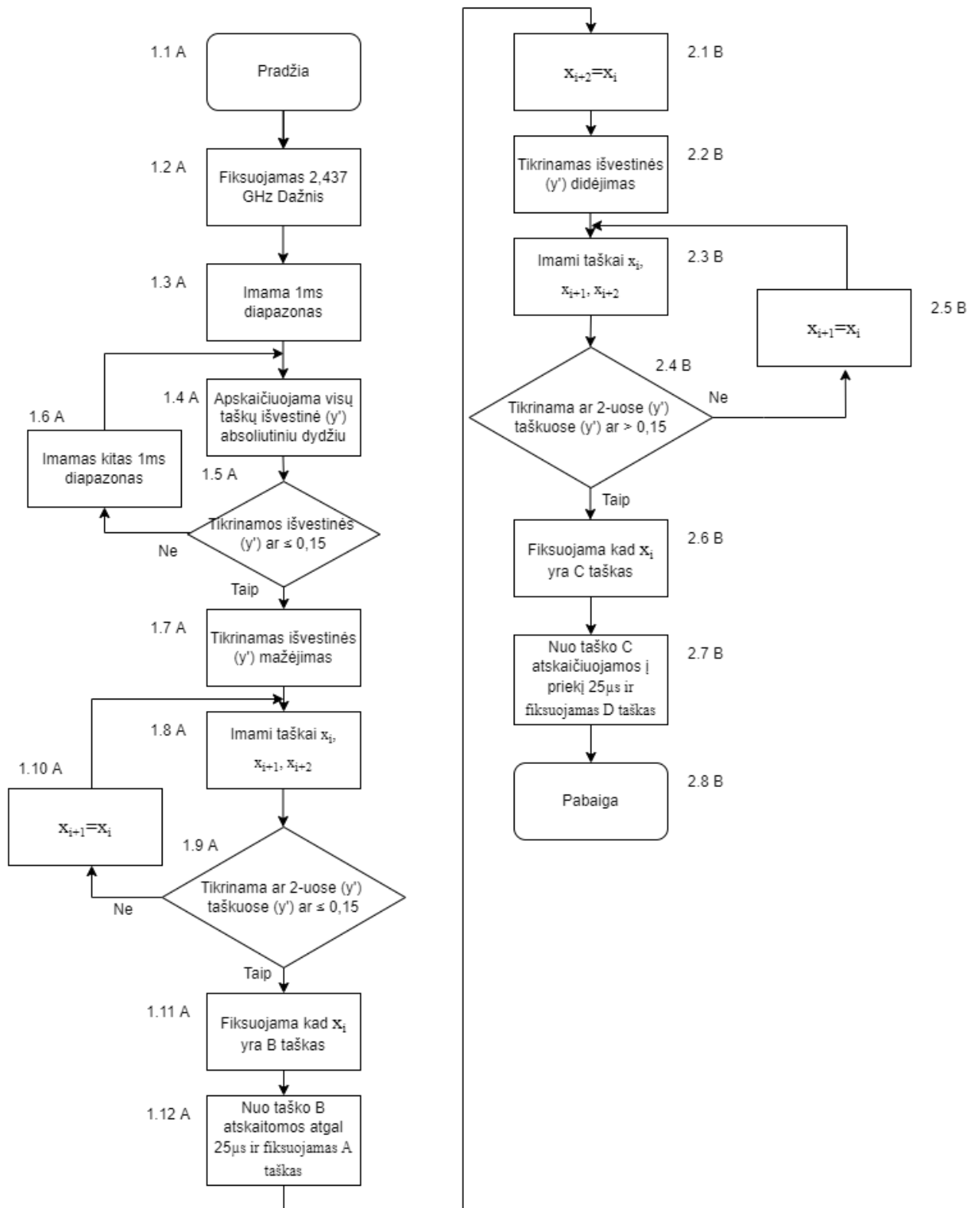
Kiti du pulteliai „Phantom“ ir „DEVOF12E“ lyginant su priekiniu frontu truputi mažiau panašūs. „Phantom“ pultelio galinis frontas išsiskyrė jog jo antra pusė fronto yra aukščiausia, ir tai lemia jog jo frontas užsibaigę stačiausiai.

Iš pateiktų duomenų 5.1 pav., ir 5.2 pav., pastebima, jog to paties pultelio priekinis ir galinis signalo frontai turi vizualių panašumų. Paimant pavyzdį „DJI Mini“ pultelį vizualiai matosi abejose frontuose jog jo kreivė labiausiai išsiskiria, bei turi staigiausius lūžio taškus t.y. staigiausius krypties pasikeitimo taškus.

5.2. Frontų aptikimas

Naudojant pirmąją išvestinę galime apibrėžti eksperimente stebimų priekinio ir galinio frontų ribas. Norint apibrėžti frontus reikia aptikti ribas, tam yra sudaromas algoritmas kuris remiasi pirmąją išvestine. Abu frontai apibrėžiami 25 μ s laiko tarpu. Naudojant 3.1 formulę (pirmoji išvestinė) apskaičiuojami visi signalo taškai, tarp kurių galime pamatyti pokytį ir aptikti frontų ribas.

Frontų aptikimo algoritmas pateikiamas 5.3 pav.



5.3 pav. Priekinio ir galinio frontų apibrėžimo ir aptikimo algoritmas

5.3 pav., pavaizduotas signalo frontų aptikimo algoritmas, jis padalintas į dvi dalis ir abiejų dalių žingsniai žymimi skirtingomis raidėmis A ir B. Pirmoje dalyje kuri yra žymima A raide visi žingsniai

apibrėžia signalo priekinį frontą, o B raide žymimi žingsniai apibrėžia galinį frontą kai signalas silpsta tol kol susilieja su aplinkos triukšmu. Priekinio ir galinio fronto ribas algoritmas apibrėžia kaip A, B, C ir D raidžių išsidėstymas kaip pavaizduota 4.5 paveikslėlyje.

Pradinio ir galinio frontų ribų algoritmo aprašymas:

1.1A: Algoritmo pradžia

1.2A: Fiksuojamas 2,4 GHz dažnis, šiuo atveju 2,437 GHz kuris atitinka 6 kanalo centrinį dažnį (plačiau aprašyta 3 skyriuje).

1.3A: Paimamas vienas iš 20 ms laiko ruožas kuriame atliekami išvestinių skaičiavimai. (plačiau aprašyta eksperimento metodikoje SWT laiko parametre).

1.4A: Šiame etape apskaičiuojama kiekvieno taško esančio parinktoje 1 ms laiko ruože pirmoji išvestinė. Suskaičiuotos išvestinės vertė imama kaip absoliutus dydis, kad išliktų vienodo teigiamo ženklo rezultatai.

1.5A: Šis žingsnis tikrina sąlygą, ar apskaičiuotos išvestinės pasirinktam laiko ruože yra mažesnės arba lygios 0,15. Jeigu pasirinktam laiko ruože yra išvestinių didesnių nei 0,15 tada pereinama į 1.7A žingsnį, jei nėra išvestinių didesnių nei 0,15 tada einama į 1.6A žingsnį.

1.6A: Šiame žingsnyje imama sekanti 1ms laiko tarpo atkarpa, ir grįžtama į 1.4A žingsnį kuriame tikrinama sąlyga iš naujo.

1.7A: Tikrinamas išvestinės mažėjimas, jei išvestinė artėja prie 0 tai reiškia jog artėjame prie priekinio fronto ribos taško B.

1.8A: Šiame žingsnyje yra paimami trys einantys iš eilės išvestinės taškai. (x_i, x_{i+1}, x_{i+2})

1.9A: Šiame žingsnyje tikrinama sekanti sąlyga. Ar iš 1.8A žingsnyje paimtų trijų taškų apskaičiuota išvestinė yra lygi arba mažesnė nei 0.15 bent dviejose iš šių taškų. Tikrinama ar išvestinė tampa beveik nesikeičianti, jei ne einama prie 1.10A žingsnio, jei taip einama prie sekančio 1.11A žingsnio.

1.10A: Šiame žingsnyje sekantys trys skaičiai pasislenka per vieną skaičių x_{i+1} .

1.11A: Šiame žingsnyje išvestinė tampa nekintanti ir x_{i+1} taškas priskiriamas B taškui.

1.12A: Šis žingsnis apibrėžia priekinio fronto ribą, nuo taško B atskaičiuojama atgal 25 μ s laiko atkarpa iki A taško.

2.1B: Šiame žingsnyje x_{i+2} taškas yra x_i taip yra imamas sekantis taškas ir ieškomas galinio fronto ribos.

2.2B: Šis etapas tikrina sekančių taškų išvestines, kai pradeda didėti išvestinės vertė, yra artėjama prie galinio fronto ribos.

2.3B: Šis etapas kaip ir 1.8A etapas ima tris iš eilės einančius išvestinės taškus.

2.4B: Šiame žingsnyje tikrinama sekanti sąlyga, ar dviejose iš trijų taškų išvestinės vertė yra didesnė už 0,15. Jei dviejose iš trijų taškų išvestinės vertė nėra didesnė už 0,15 tada pereinama prie 2.5B punkto. Jei išvestinės vertės yra didesnės už 0,15 tada yra einama prie sekančio 2.6B žingsnio.

2.5B: Šiame žingsnyje imami trys iš eilės taškai pasislenka per vieną tašką.

2.6B: Šis žingsnis aptinka galinio fronto C tašką.

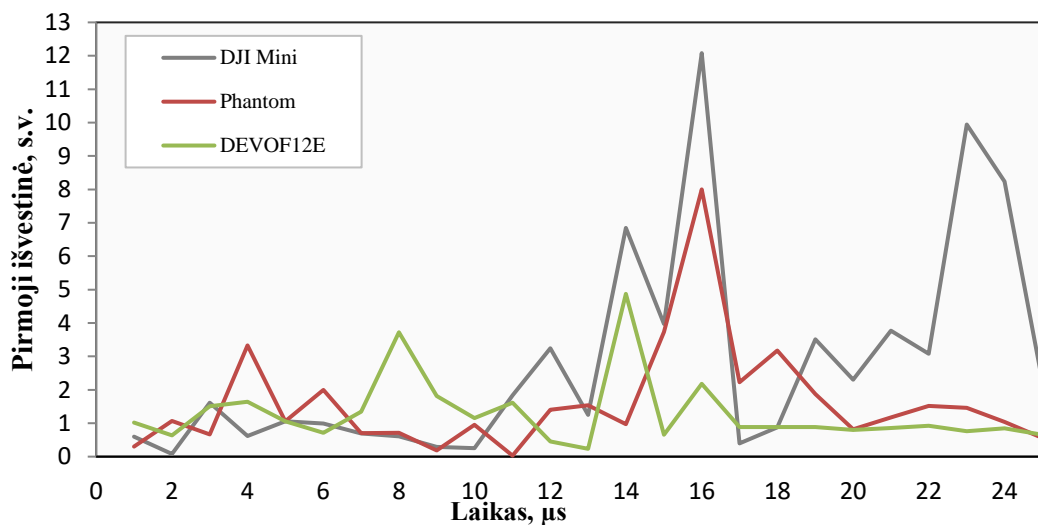
2.7B: Šis punktas apibrėžia galinio fronto ribas, nuo C taško pasislenka į priekį 25 μ s ir fiksuojamas D taškas.

2.8B: Algoritmo pabaiga.

5.3. Frontų matematinų parametrų įvertinimas

Pirmoji išvestinė

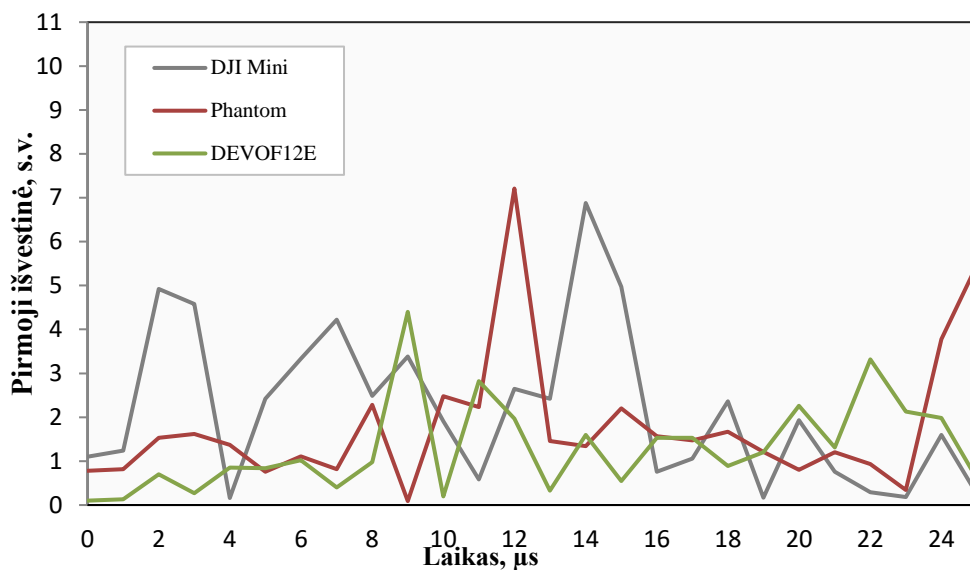
Naudojant pirmąją išvestinę, gavus jos vertes buvo apibrėžtos signalo frontų ribos. Pirmoji išvestinė įvertina kaip kinta funkcijos išvestinė dviejų taškų atžvilgiu [34]. Skaičiuojant pirmąją išvestinę buvo įvertinta kaip kinta signalo amplitudės vertė. Lyginant visas pirmosios išvestinės signalo amplitudės vertes, kuo išvestinė mažėjo t.y., artėjo prie 0 tuo frontas tampa tiesesnis arba kuo išvestinės vertė didėjo lyginant su praėjusia verte tuo frontas yra statesnis.



5.4 pav. Trijų dronų pultelių pirmosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (priekinių frontų)

5.4 paveikslėlyje pavaizduoti visų buvusių eksperimente dronų pultelių pirmosios išvestinės priekinio fronto rezultatai. Pastebima kad visi rezultatai yra unikalūs. Kiekvieno fronto maksimalios ir minimalios vertės skiriasi, bei bendra rezultatų tiesė grafike kinta ne vienodu tempu, bei skiriasi maksimalios reikšmės.

Sekančiam paveikslėlyje 5.5 pavaizduotas grafikas su visų tyrime dalyvavusių dronų pultelių pirmosios išvestinės priklausomybė nuo laiko galinio fronto rezultatai.



5.5 pav. Trijų dronų pultelių pirmosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (galinių frontų)

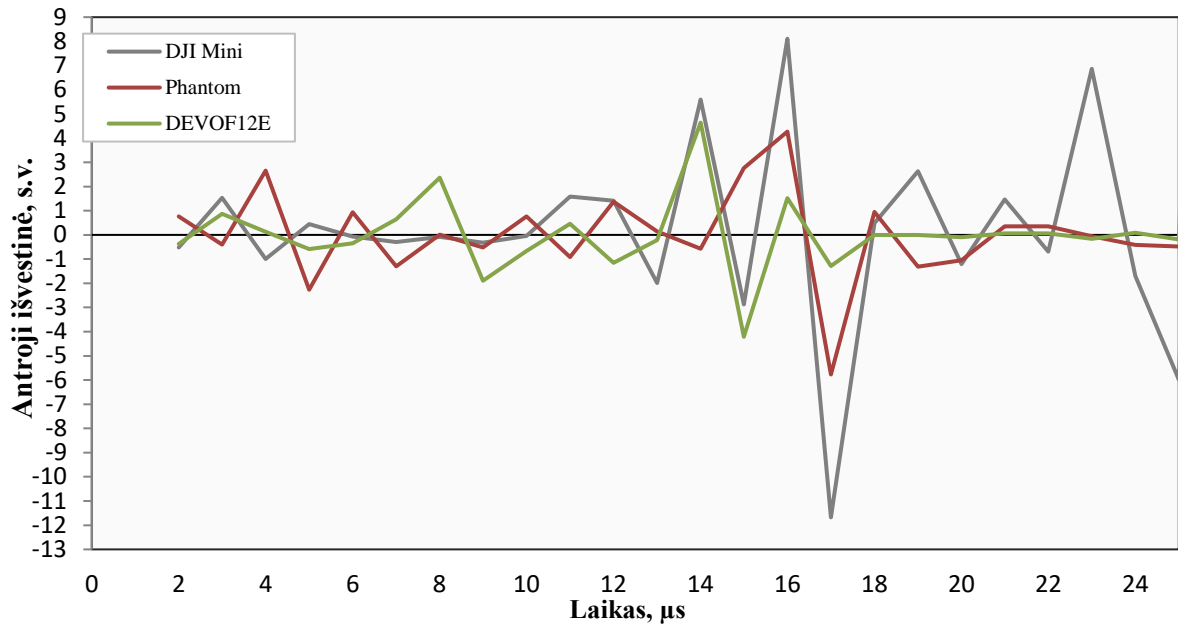
Lyginant 5.1 ir 5.2 paveikslėlius su 5.4 ir 5.5 galime pastebėti, jog „DJI Mini“ pultelio frontai išsiskiria iš kitų eksperimente dalyvavusių pultelių, taip ir paskaičiavus pirmąją išvestinę matome jog priekiniame fronte jo maksimali vertė yra didžiausia ir daugiausiai kinta funkcija laike.

Antra išvestinė

Antroji išvestinė yra lygi pirmosios išvestinės išvestinei t. y. jos vertei. Antroji išvestinė parodo ar yra persilenkimo taškas tiesės atkarpoje [A-B], ar krypties pakeitimas. Kai antroji išvestinė kerta 0 ašį, parodo kad čia yra lūžio (persilenkimo) taškas [34]. Visos apskaičiuotos antros išvestinės pateikiamos 4 priede.

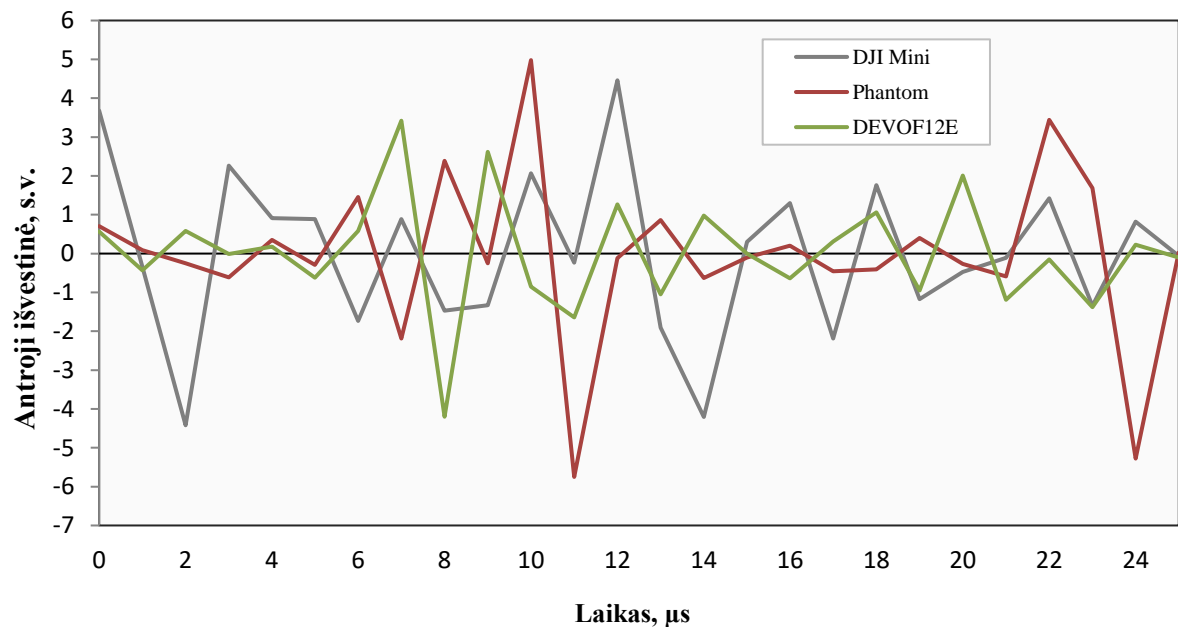
Grafike rezultatai pateikiami tik nuo antro taško, nes antrosios išvestinės pokytis skaičiuojamas nuo pirmosios išvestinės pirmojo taško ir antrojo taško, o pirmoji išvestinė skaičiuojama tarp pirmo antro taškų. Nes pirmoj išvestinėj pirmojo taško nebelieka, o antroj išvestinėj antro taško.

Kaip jau pastebėta pirmos išvestinės rezultatuose, taip ir antrosios išvestinės rezultatuose skirtingų dronų pultelių grafikai skiriasi. „DJI Mini“ pultelio šuoliai yra didžiausi į abi vertes, didžiausi šuoliai įvyksta ties 16 μs ir 17 μs . Taip pat aukštas vertes rodo ir kiti du „Phantom“ ir „DEVOF12E“ pulteliai. Antrosios išvestinės priekinio fronto rezultatai pateikiami 5.6 pav.



5.6 pav. Trijų dronų pultelių antrosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (priekinių frontų)

Sekančiame paveikslėlyje 5.7 pavaizduoti rezultatai grafike galinių frontų antrosios išvestinės priklausomybė nuo laiko. Šiame grafike labiausiai išsiskyrė „Phantom“ pultelio rezultatai, aukščiausias taškas yra ties 10 μ s, o žemiausias ties 11 μ s. Visus grafikus sieja tai, kad daug kartų keičiasi kryptis ir atsiranda daug 0 kirtimo taškų.



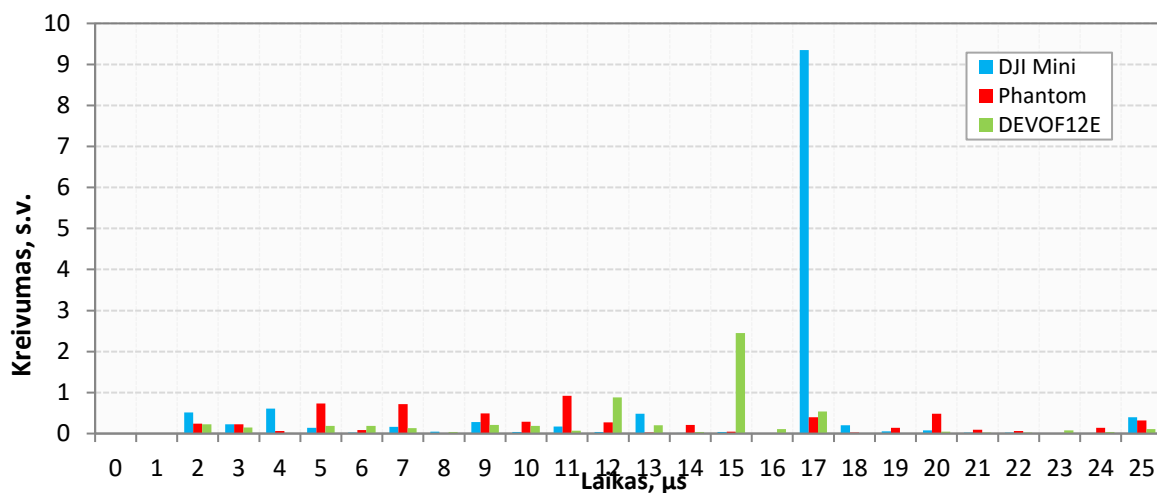
5.7 pav. Trijų dronų pultelių antrosios išvestinės priklausomybė nuo laiko (galinių frontų)

Kreivumas

Kreivumas parodo koku tempu kinta kreivė, jis apskaičiuojamas kiekviename laiko vieneto taške. Šis parametras apskaičiuojamas panaudojus pirmosios ir antrosios išvestinių rezultatus, kreivumas buvo apskaičiuotas pagal aprašytą (3.3) formulę. Taikant kreivumą signalo frontui rezultatuose galim įžvelgt kad kuo didesnis kreivumas, tuo stipresnis kreivės užlinkimas. Tai matosi signalų frontų grafikuose. Jei signalas išlieka tiesus (nekintantis), kreivumas bus lygus nuliui.

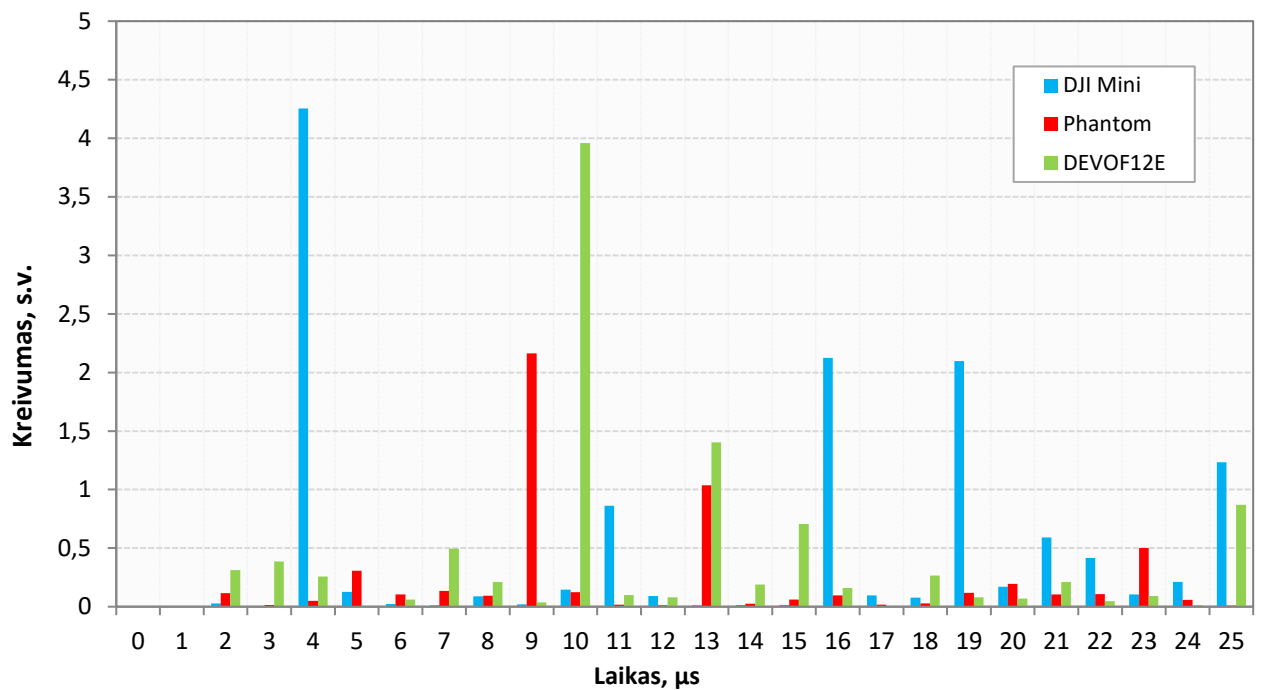
Visų dronų pultelių naudojamų eksperimente signalo frontų kreivumai apskaičiuoti ir pateikti 5.8 pav. priekinio fronto ir galinio fronto 5.9 pav. Visi dronų pulteliai pažymėti skirtinga spalva.

Iš 5.8 pav. priekinių frontų grafiko matyti tik „DJI Mini“ pultelis ties 17 μ s parodė didelį kreivumą, tai atsispindi 5.1 paveikslėlyje signalo fronte. Kitų dviejų pultelių priekinio fronto kreivumai tik keliose vietose yra pakilę, tai taip pat atsispindi 5.1 pav.



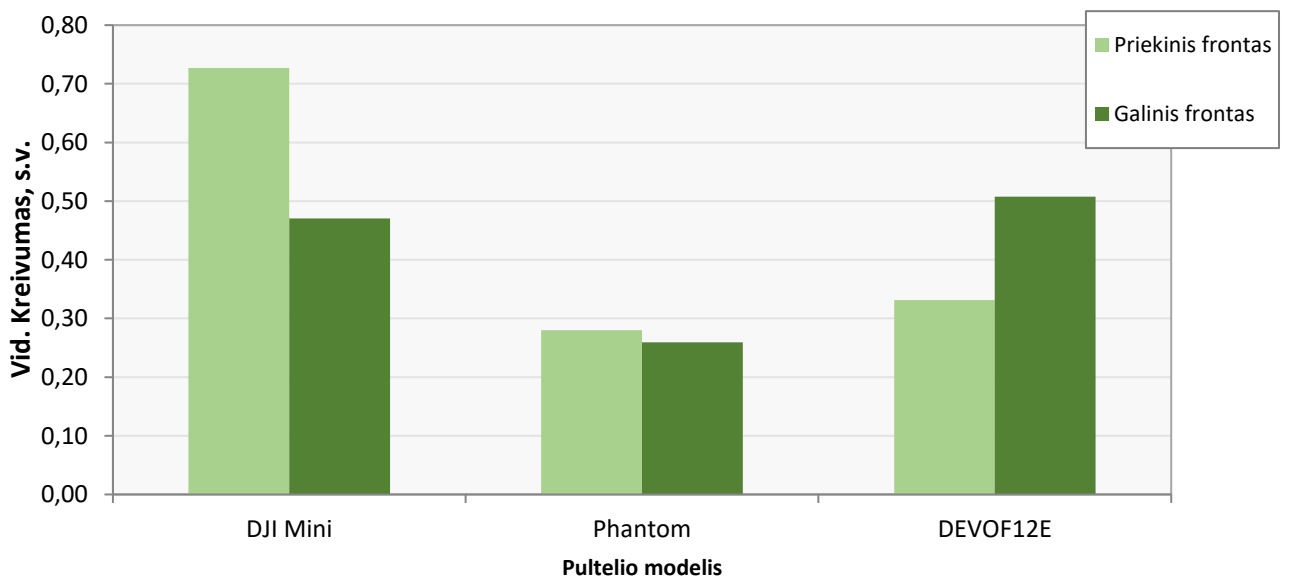
5.8 pav. Dronų pultelių priekinių frontų kreivumo priklausomybė nuo laiko

5.9 pav. pavaizduotas visų eksperimente naudojamų dronų pultelių galinių frontų kreivumo priklausomybė nuo laiko. Kaip ir priekiniam fronte taip ir galiniam fronte didžiausią kreivumą pademonstravo „DJI Mini“ pultelio signalas, didžiausias kreivumas yra ties 4 μ s. Taip pat kiti du „Phantom“ ir „DEVOF12E“ pultelių signalai galiniame fronte parodė daug didesnę kreivumą nei priekiniam fronte.



5.9 pav. Dronų pultelių galinių frontų kreivumo priklausomybė nuo laiko

5.10 pav. pateikti priekinio ir galinio frontų apibendrinti visi rezultatai. Apskaičiuojami kreivumo vidurkiai kiekvieno drono pultelio.



5.10 pav. Visų dronų pultelių frontų vidutinio kreivumo priklausomybė nuo drono pultelio modelio

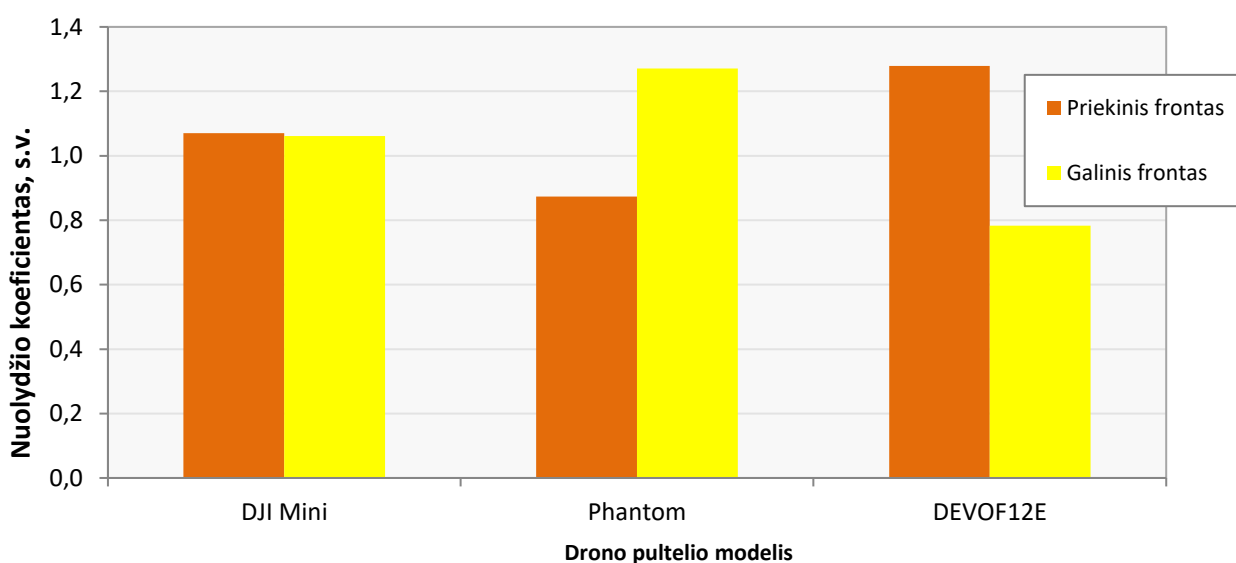
Nuolydžio koeficientas

Vienas iš matematinių parametrų kuris leidžia įvertinti frontų linijos formą yra nuolydžio koeficientas. Jis apskaičiuojamas naudojant (3.5) aprašytą formulę. Šis parametras parodo atsitiktinio

dydžio skaičiaus vidurkio priklausomybę nuo kitų kelių dydžių [34]. 5.11 Pav. pateikiami rezultatai kiekvieno drono pultelio signalo nuolydžio koeficientas.

Naudojant nuolydžio koeficientą įvertinti signalo frontus, jis parodo kaip smarkiai leidžiasi arba kyla kreivė (mūsų atveju signalo frontas), šis parametras įvertinamas koeficientu. Kuo gautas koeficientas didesnis, tuo drono pultelio frontas yra statesnis.

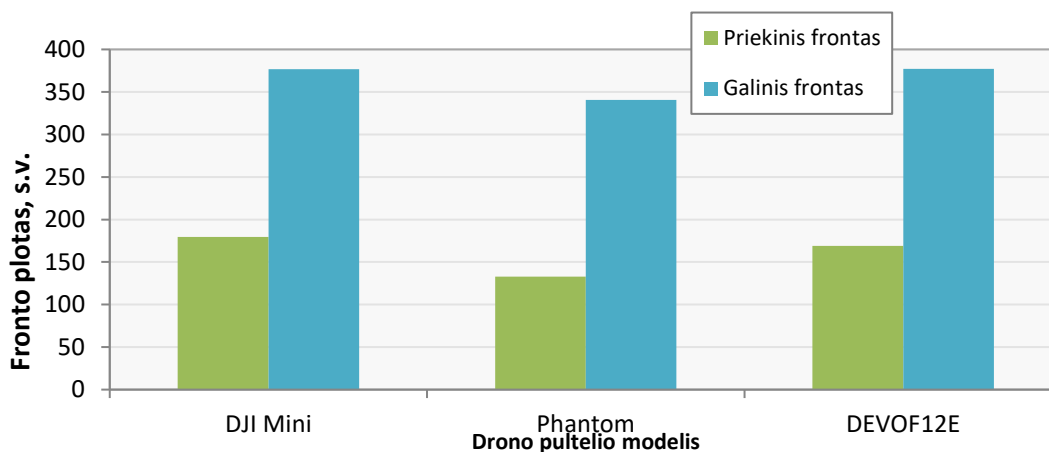
Iš gautų rezultatų matome kad „DJI Mini“ pultelio nuolydžio koeficientai priekinio ir galinio frontų yra labai panašūs. „Phantom“ pultelio priekinio fronto nuolydžio koeficientas gavosi trečdaliu mažesnis nei galinio fronto, o „DEVOF12E“ pultelio galinis frontas gavosi mažesnis. Visų dronų pultelių rezultatai labai skiriasi, kas padės geriau įvertinti kiekvieną pultelį atskirai rezultatų suvestinėje (plačiau 5.4 skyriuje).



5.11 pav. Visų dronų pultelių frontų nuolydžio koeficiento priklausomybė nuo drono pultelio modelio

Frontų ribojamas plotas

Naudojant (3.4) formulę suskaičiuojamas priekinio ir galinio frontų ribojami plotai. Visų frontų gaunamos amplitudės vertės yra su minuso ženklu triukšmo lygis apie -101 dBm, o signalo lygis apie -76 dBm, todėl naudojant integralinį skaičiavimą amplitudės vertė pakeičiama į priešingą teigiamą ženklą. Prie visų skaičiuojamo fronto taškų yra pridamas triukšmo lygio vidutinė vertė kuri yra 101 dBm. Taip beveik visi taškai įgauna teigiamą vertę. Taškuose kurie yra nukritę žemiau vidutinės triukšmo vertės, išlieka neigiama skaičiuojamoji vertė. Tai įvyksta su pradinio fronto pirmaisiais skaičiais ir su galinio fronto galutiniais skaičiais, nes būtent šiose vietose signalo frontai susilieja su aplinkos triukšmu. Visų dronų pultelių priekiniai ir galiniai frontai pridėjus 101 dBm pateikti 5 priede. Žemiau pateikiama 5.12 pav. visų dronų pultelių frontų ploto priklausomybė nuo drono pultelio modelio



5.12 pav. Visų dronų pultelių frontų ploto priklausomybė nuo drono pultelio modelio

5.12 pav. matyti kad visų dronų pultelių priekinio fronto plotai užima žymiai mažiau ploto nei galiniai frontai, tai yra todėl nes priekiniai frontai yra statesni dalis 25 mikrosekundžių pasilieka arti triukšmo lygio ar dalis mikrosekundžių būna arčiau ties signalo galingumo lygio. Daugiausiai ploto užima „DJI Mini“ pultelio galinis frontas, beveik tiek pat užima „DEVOF12E“ pultelio plotas, nes jų galiniai frontai yra plačiausi. Kiekvieno fronto matavimu gaunami skirtingi rezultatai.

5.4. Eksperimentų matrica

Suskaičiavus visus matematinius parametrus, patogu sudaryti eksperimentinių rezultatų matricą, sukelti visus rezultatus į vieną vietą. Eksperimentinių rezultatų matrica bus ir dronų pultelių duomenų bazė, kurią naudojant bus galima identifikuoti dronų pultelius esančius duomenų bazėje. Žemiau esančioje 5.4 lentelėje pateikiami visi rezultatai gauti eksperimento metu.

5.4 lentelė yra sudaryta iš 7 skirtingų sąlygų, kiekviena sąlyga skaičiuojama su visais dronų pultelių modeliais, priekiniu ir galiniu frontais. Todėl kiekvienam pulteliui yra priskiriami 14 unikalių, skirtingų parametrų. Naudojant šiuos parametrus galima pamatyti kiekvieno drono pultelio fronto skirtumus, būtent šios lentelės parametrai sudaro duomenų bazę, pagal kurią galime identifikuoti drono pultelio modelį (savininką).

5.4 lentelė. Eksperimento rezultatų matrica

Parametrai		Drono pultelio modelis		
		DJI Mini	Phantom	DEVOF12E
Pirmosios išvestinės maksimali reikšmė	Priekinis frontas	12,08	8	4,87
	Galinis frontas	6,88	7,21	4,4
Kada įvyksta pirmosios išvestinės	Priekinis frontas	16	16	14

maksimali reikšmė μ s	Galinis frontas	14	12	9
Antrosios išvestinės maksimali reikšmė	Priekinis frontas	8,11	4,27	4,64
	Galinis frontas	4,46	4,98	3,42
Kiek kartų antroji išvestinė keičia ženklą	Priekinis frontas	14	16	11
	Galinis frontas	16	17	21
Vidutinis kreivumas	Priekinis frontas	0,727	0,28	0,331
	Galinis frontas	0,47	0,259	0,508
Nuolydžio koeficientas	Priekinis frontas	1,07	0,87	1,28
	Galinis frontas	1,06	1,27	0,78
Signalų fronto plotas	Priekinis frontas	179,62	132,95	168,81
	Galinis frontas	376,61	340,75	377,13

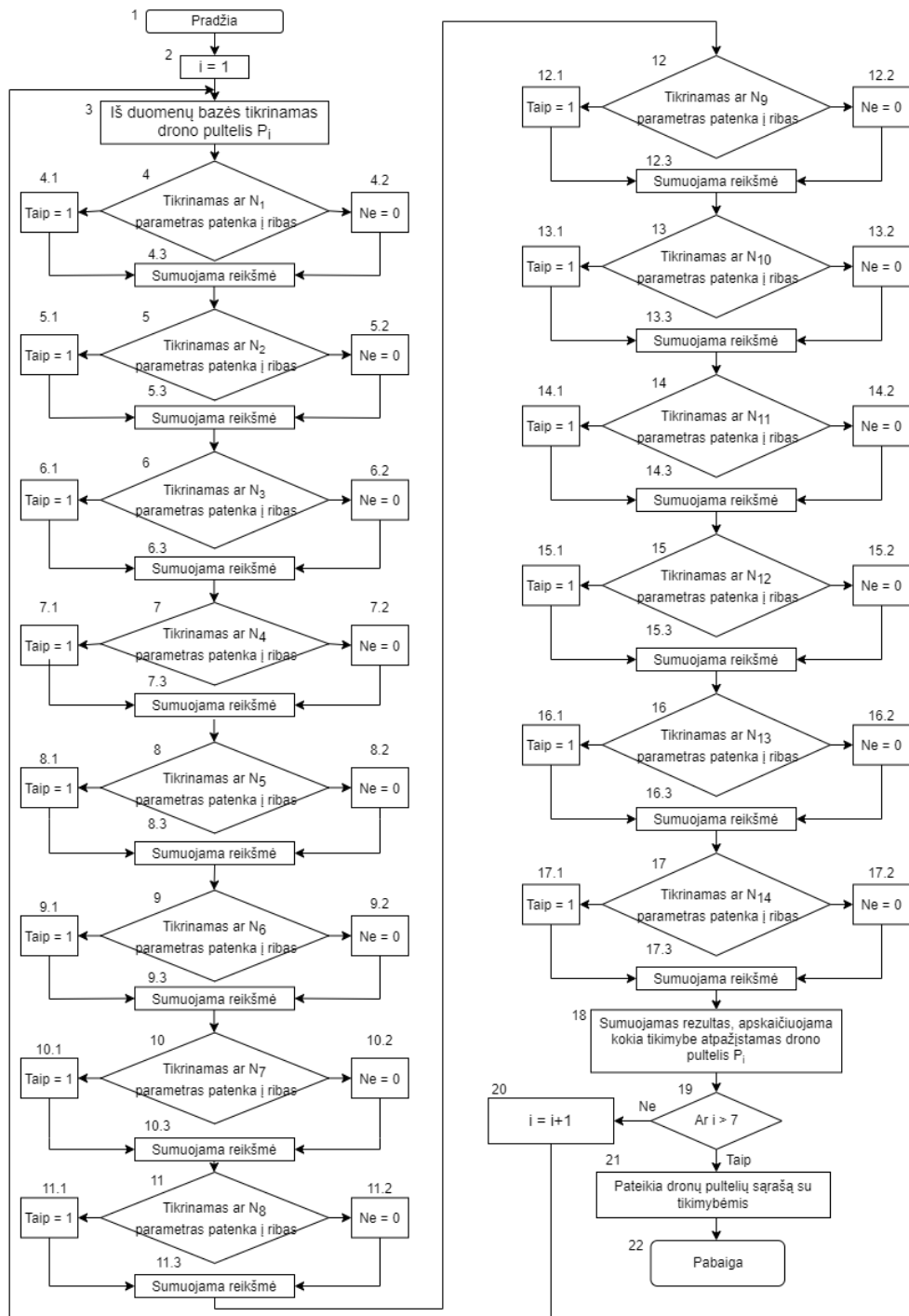
Naudojant 5.4 lentelę kaip duomenų bazę, kad identifikuoti įrenginį, kurioje yra 14 skirtingų parametrų, o santykinė paklaida yra 8% (žiūrėti 3.6 poskyrį) įrenginiui atitikus visus 14 parametrų laikoma kad tai yra aukščiausia tikimybė 0,92. Kiekvienas parametras atitinka 0,07% tikimybę, tarkim jei identifikuojant drono pultelį jis atitiko 10 parametrų, laikoma kad tai yra 0,07% tikimybė.

1.4 lentelės parametrų trumpi paaiškinimai:

- Pirmosios išvestinės maksimali reikšmė – šis parametras parodo maksimalią 5.4 pav. ir 5.5 pav. grafikų reikšmę;
- Kada įvyksta pirmosios išvestinės maksimali reikšmė μ s – šis parametras parodo kuriame 5.4 pav. ir 5.5 pav. grafikų taške yra didžiausia reikšmė;
- Antrosios išvestinės maksimali reikšmė – šis parametras parodo maksimalią 5.6 pav. ir 5.7 pav. grafikų reikšmę;
- Kiek kartų antroji išvestinė keičia ženklą – šis parametras įvertina kiek kartų signalo frontas keičia kryptį (iš teigiamos į neigiamą ar atvirkščiai);
- Vidutinis kreivumas – šis parametras parodo koks stiprus yra kreivumas signalo fronto;
- Nuolydžio koeficientas – šis parametras įvertina kaip stačiai leidžiasi (ar kyla) signalo frontas, kuo frontas yra statesnis, tuo skaičius yra didesnis;
- Signalų fronto plotas – šis parametras parodo kokio pločio yra signalo forma.

5.5. Identifikavimo algoritmas

Apibendrinus rezultatus ir pasidarius duomenų bazę, yra sudaromas identifikavimo algoritmas. Identifikavimo algoritmas naudojamas duomenų bazėje esančius duomenis gali identifikuoti drono pultelį, remiantis tikimybe kiek parametrų atitiko paskaičiuoti duomenys algoritmu ir esantys duomenų bazėje. Žemiau pavaizduotas identifikavimo algoritmas 5.13 pav. P_i



5.13 pav. Įrenginio identifikavimo algoritmas

Žemiau pateikiami 5.13 pav. algoritmo kiekvieno punkto aprašymas:

1. Algoritmo pradžia.
2. Dronų pultelių skaičių identifikuoja raidė i . Dronų pultelių numeracija duomenų bazėje prasideda skaičiumi 1 arba $i = 1$.
3. Iš duomenų bazės pasirenkamas pirmas drono pultelis P_i , jis priskiriamas $i = 1$. Tikrinama N_1 parametro ribos (kokia pirmosios išvestinės maksimali reikšmė priekiniame fronte).
- 4.1 Jei maksimali pirmosios išvestinės reikšmė atitinka N_1 ribas, priskiriama 1.
- 4.2 Jei maksimali pirmosios išvestinės reikšmė ne atitinka N_1 ribų, priskiriama 0.
- 4.3 Sumuojamas rezultatas.
- Tikrinama N_2 parametro ribos (kokia pirmosios išvestinės maksimali reikšmė galiniame fronte).
- 5.1 Jei maksimali pirmosios išvestinės reikšmė atitinka N_2 ribas, priskiriama 1.
- 5.2 Jei maksimali pirmosios išvestinės reikšmė atitinka N_2 ribas, priskiriama 0.
- 5.3 Sumuojamas rezultatas.
6. Tikrinama N_3 parametro ribos (kada įvyksta pirmosios išvestinės maksimali reikšmė μ s priekiniame fronte).
- 6.1 Jei atitinka N_3 parametro ribas, priskiriama 1.
- 6.2 Jei ne atitinka N_3 parametro ribas, priskiriama 0.
- 6.3 Sumuojamas rezultatas.
7. Tikrinama N_4 parametro ribos (kada įvyksta pirmosios išvestinės maksimali reikšmė μ s galiniame fronte).
- 7.1 Jei atitinka N_4 parametro ribas, priskiriama 1.
- 7.2 Jei ne atitinka N_4 parametro ribas, priskiriama 0.
- 7.3 Sumuojamas rezultatas.
8. Tikrinama N_5 parametro ribos (antrosios išvestinės maksimali reikšmė priekiniame fronte).
- 8.1 Jei atitinka N_5 parametro ribas, priskiriama 1.
- 8.2 Jei ne atitinka N_5 parametro ribas, priskiriama 0.
- 8.3 Sumuojamas rezultatas.
9. Tikrinama N_6 parametro ribos (antrosios išvestinės maksimali reikšmė galiniame fronte).
- 9.1 Jei atitinka N_6 parametro ribas, priskiriama 1.
- 9.2 Jei ne atitinka N_6 parametro ribas, priskiriama 0.
- 9.3 Sumuojamas rezultatas.
10. Tikrinama N_7 parametro ribos (kiek kartų antroji išvestinė keičia ženklą priekiniame fronte).
- 10.1 Jei atitinka N_7 parametro ribas, priskiriama 1.
- 10.2 Jei ne atitinka N_7 parametro ribas, priskiriama 0.
- 10.3 Sumuojamas rezultatas.
11. Tikrinama N_7 parametro ribos (kiek kartų antroji išvestinė keičia ženklą galiniame fronte).
- 11.1 Jei atitinka N_7 parametro ribas, priskiriama 1.
- 11.2 Jei ne atitinka N_7 parametro ribas, priskiriama 0.
- 11.3 Sumuojamas rezultatas.
12. Tikrinama N_8 parametro ribos (vidutinis kreivumas priekiniame fronte).
- 12.1 Jei atitinka N_8 parametro ribas, priskiriama 1.
- 12.2 Jei ne atitinka N_8 parametro ribas, priskiriama 0.
- 12.3 Sumuojamas rezultatas.

13. Tikrinama N_9 parametro ribos (vidutinis kreivumas galiniame fronte).
 - 13.1 Jei atitinka N_9 parametro ribas, priskiriama 1.
 - 13.2 Jei ne atitinka N_9 parametro ribas, priskiriama 0.
 - 13.3 Sumuojamas rezultatas.
14. Tikrinama N_{10} parametro ribos (nuolydžio koeficientas priekiniame fronte).
 - 14.1 Jei atitinka N_{10} parametro ribas, priskiriama 1.
 - 14.2 Jei ne atitinka N_{10} parametro ribas, priskiriama 0.
 - 14.3 Sumuojamas rezultatas.
15. Tikrinama N_{11} parametro ribos (nuolydžio koeficientas galiniame fronte).
 - 15.1 Jei atitinka N_{11} parametro ribas, priskiriama 1.
 - 15.2 Jei ne atitinka N_{11} parametro ribas, priskiriama 0.
 - 15.3 Sumuojamas rezultatas.
16. Tikrinama N_{12} parametro ribos (signalų fronto plotas priekiniame fronte).
 - 16.1 Jei atitinka N_{12} parametro ribas, priskiriama 1.
 - 16.2 Jei ne atitinka N_{12} parametro ribas, priskiriama 0.
 - 16.3 Sumuojamas rezultatas.
17. Tikrinama N_{13} parametro ribos (signalų fronto plotas galiniame fronte).
 - 17.1 Jei atitinka N_{13} parametro ribas, priskiriama 1.
 - 17.2 Jei ne atitinka N_{14} parametro ribas, priskiriama 0.
 - 17.3 Sumuojamas rezultatas.
18. Šiame punkte susumuojami rezultatai ir pateikiamas skaičius kuris svyruoja nuo 0 iki 14, šis skaičius atspindi kokia tikimybe atpažįstamas drono pultelis. Maksimali tikimybė 0,92 minimali tikimybė 0.
19. Šioje sąlygoje tikrinama ar $i > 3$, nes duomenų bazėje yra trys dronų pulteliai. Jei jau patikrinti visi dronų pulteliai einama į 21 punktą, o jei dar ne visi dronų pulteliai patikrinti einama į 20 punktą.
20. Šiame punkte paimama sekancio drono pultelio duomenų bazė $i = i + 1$.
21. Šiame punkte pateikiamos visų dronų pultelių esančių duomenų bazėje identifikavimo galimybės. Kaip jau minėta anksčiau, vienas algoritmo parametras atitinka 0,07 tikimybę, jei algoritmas atpažino visus parametrus tada drono pultelis surinko 14 atitikčių, kas atitinka 0,92% tikimybę.
22. Algoritmo pabaiga.

5.13 pav. algoritmas sudarytas iš kuo didesnės parametru matricos, kad būtų galima įvertinti kuo tiksliau drono pultelį. Šiame darbe buvo įvykdyti skaičiavimai iš labai riboto kiekio dronų pultelių, kas lėmė mažą duomenų matricą. Duomenų matrica galėtų būti papildyta jei būtų automatizuota belaidžių įrenginių (dronų pultelių) signalų fiksavimo sistema. Nes šiame darbe atlikti skaičiavimai rankiniu būdu, užfiksuoti trijų skirtingų dronų pultelių signalai. Šis darbas įrodo jog naudojant skirtingus matematinius parametrus: pirmąją ir antrąją išvestines, kreivumą, nuolydžio koeficientą ir signalų fronto plotą galima identifikuoti skirtingus dronų pultelių spinduliuojamus signalų frontus, taip nustatant drono pultelį iš duomenų bazės. Remiantis algoritmu, yra išplečiama eksperimento duomenų bazė pateikta 4 priede. Nustatoma dronų pultelių identifikavimo galimybė.

Išvados

1. Literatūros analizė rodo, kad belaidžiai įrenginiai gali būti atpažįstami fiziniame lygmenyje, stebint radijo dažnių spektrą, analizuojant spinduliavimo charakteristikas. Tai įvyksta todėl, kad dėl belaidžio įrenginio gamybos proceso linijoje atsirandančių netikslumų ar sudarančių komponentų skirtumų atsiranda unikalios spinduliavimo charakteristikos.
2. Šiame darbe pasiūlytas matematinis modelis, kuris remiasi priekinio ir galinio signalo frontų formos įvertinimu paprastomis geometrinėmis kreivių matematinėmis charakteristikomis: pirma išvestine, antra išvestine, kreivumu, plotu, nuolydžio koeficiento. Siūlomas modelis leidžia santykinai nesunkiai automatizuoti identifikavimą.
3. Pasiūlomas belaidžio ryšio dronų pultelių identifikavimo algoritmas. Identifikavimui naudojami priekinio ir galinio siunčiamo signalo frontų apskaičiuoti matematiniai parametrai, nustatyta kad tai leidžia identifikuoti drono pultelį su 0,92 tikimybe. Belaidžiai įrenginiai identifikuojami pagal 14 skirtingų parametrų.
4. Atliktas eksperimentas su „DJI Mini“, „Phantom“ ir „DEVOF12E“ dronų pulteliais. Signalo aptikimui buvo naudojama „Rohde & Schwarz“ FSH8 spektro analizatorius. Įvertinti eksperimentinius duomenis buvo naudojami matematiniai metodai: pirmoji ir antroji išvestinės, kreivumas, signalo plotas, nuolydžio koeficientas. Įvertintinus jų dažnių pėdsakus, buvo sudaryta eksperimento rezultatų matrica kurioje pateikta visi eksperimento metu surinkti duomenys.
5. Pasiūlomas belaidžio ryšio dronų pultelių identifikavimo algoritmas. Identifikavimui naudojami priekinio ir galinio siunčiamo signalo frontų apskaičiuoti matematiniai parametrai, nustatyta kad tai leidžia identifikuoti drono pultelį su 0,92 tikimybe. Belaidžiai įrenginiai identifikuojami pagal 14 skirtingų parametrų.

Literatūros sąrašas

1. Eulalia Balestrieri *, Pasquale Daponte, Luca De Vito , Francesco Picariello and Ioan Tudosa, „*Sensors and Measurements for UAV Safety: An Overview*“ [žiūrėta 2022-03-15] Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/356952908_Sensors_and_Measurements_for_UAV_Safety_An_Overview
2. Matthew Ayamgaa, Selorm Akabab, Albert Apotele Nyaabac, „*Multifaceted applicability of drones: A review* „, [žiūrėta 2022-03-17] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162521001098?via%3Dihub>
3. Fred Schenkelberg, „*How Reliable Does a Delivery Drone Have to Be?*„, [žiūrėta 2022-03-15] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7448054>
4. Daojing He, Hong Liu, Sammy Chan, and Mohsen Guizani, „*How to Govern the Non-Cooperative Amateur Drones?*“ [žiūrėta 2022-03-18] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8648452>
5. (ES) 2019/947 “*dėl bepiločių orlaivių naudojimo taisyklių ir tvarkos*“ [žiūrėta 2022-03-15] Prieiga per: https://www.easa.europa.eu/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems?page=0#_DxCrossRefBm1764556571
6. Martins Ezuma, Fatih Erden, Chethan Kumar Anjinappa, Ozgur Ozdemir, Ismail Guvenc „*Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques* “ [žiūrėta 2022-03-16] Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/333923767_Micro-UAV_Detection_and_Classification_from_RF_Fingerprints_Using_Machine_Learning_Techniques
7. J. Hall, M. Barbeau, E. Kranakis, „*Radio Frequency Fingerprinting for Intrusion Detection in Wireless Networks*“, 2005, [žiūrėta 2022-03-16] Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.91.6584&rep=rep1&type=pdf>
8. Andrea Candore, Ovunc Kocabas, Farinaz Koushanfar, "Robust Stable Radiometric Fingerprinting for Wireless Devices ", 2009, 1-4 [žiūrėta 2022-03-20] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5224969>
9. Boris Danev, Heinrich Luecken, Srdjan Capkun, "Attacks on Physical-layer Identification", 2010, p. 3-5. [žiūrėta 2022-03-22] Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/221551483_Attacks_on_physical-layer_identification
10. Jeyanthi Hall, Michel Barbeau, Evangelos Kranakis, „*Radio Frequency Fingerprinting for Intrusion Detection in Wireless Networks*“, 2005, p. 2, 6-7. [žiūrėta 2022-03-29] Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/221425652_Radio_frequency_fingerprinting_for_intrusion_detection_in_wireless_networks
11. Jeyanthi Hall, Michel Barbeau, Evangelos Kranakis, " DETECTION OF TRANSIENT IN RADIO FREQUENCY FINGERPRINTING USING SIGNAL PHASE", 2003, p. 1. [žiūrėta 2022-03-29] Prieiga per: <https://people.scs.carleton.ca/~kranakis/Papers/RFFPaper3.pdf>

12. Adam C. Polak, S. Dolatshahi, and Dennis L. Goeckel „*Identifying Wireless Users via Transmitter Imperfections*“, 2010, 1-2p. [žiūrėta 2022-03-28] Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.365.1441&rep=rep1&type=pdf>
13. C. Coopmans „Architecture Inertial Navigation and Payload Designs for Low-Co“, 2010, 30-33p. [žiūrėta 2022-03-29] Prieiga per: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1688&context=etd>
14. L. Huang, X. Wu, C. Zhao, M. Gao „*Identification of radio transmitters fingerprint based on curve fitting*“, Dept. of Communication Engineering - Xiamen University, 5p. [žiūrėta 2022-03-29] Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6664129>
15. H. Yuan, Z. Bao, A. Hu „*Power ramped – up preamble RF fingerprints of wireless transmitters*“, School of Electronics and Information, Nantong University, Road Seyuan. [žiūrėta 2022-02-02]. Prieiga per: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2011/11_03_703_709.pdf
16. Oktay Üreten, Nur Serinken „*Bayesian detection of radio transmitter turn – on transients*“ [žiūrėta 2022-02-12]. Prieiga per: <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/Nsip99/papers/178.pdf>
17. Martins Ezuma, Fatih Erden, Chethan Kumar Anjinappa, Ozgur Ozdemir, Ismail Guvenc „*Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques*“ p. 1-5 [žiūrėta 2022-02-16]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/333923767_Micro-UAV_Detection_and_Classification_from_RF_Fingerprints_Using_Machine_Learning_Techniques
18. Anna Vegni, Valeria Loscri, Carlos Calafate, Pietro Manzoni “*Communication Technologies Enabling Effective UAV Networks: a Standards Perspective*” psl. 5-6. [žiūrėta 2022-02-26]. Prieiga per: <https://hal.inria.fr/hal-03190494/document>
19. “*Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements*” psl. 6-7, 10-12. [žiūrėta 2022-02-21]. Prieiga per: https://download.tek.com/document/37W-29447-2_LR.pdf
20. Olexa R. „*Implementing 802.11, 802.16 and 802.20 Wireless Networks*“, Elsevier Inc., 2005. – 255p. ISBN 0-7506-7808-9 [žiūrėta 2022-03-01]. Prieiga per: <https://www.elsevier.com/books/implementing-80211-80216-and-80220-wireless-networks/olexa/978-0-7506-7808-7>
21. IEEE Computer Society Part 11: “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - IEEE Std 802.11™-2007*” The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007 [žiūrėta 2022-03-01]. Prieiga per: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/3605/>
22. Antonio Guillen-Perez , Ramon Sanchez-Iborra, Maria-Dolores Cano, Juan Carlos Sanchez-Aarnouts1 and Joan Garcia-Haro „*WiFi NETWORKS ON DRONES*” p. 2-3. [žiūrėta 2022-03-01]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/311595012_WiFi_networks_on_drones
23. Priya Sharma, „*Comparison of Wi-Fi IEEE 802.11 Standards Relating to Media Access Control Protocols*“ p. 859-860. [žiūrėta 2022-03-03]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/332174122_Comparison_of_Wi-Fi_IEEE_80211_Standards_Relating_to_Media_Access_Control_Protocols

24. Juerg Leuthold, Wolfgang Freude 2013 “*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*” p. 1-5. [žiūrėta 2022-03-11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/orthogonal-frequency-division-multiplexing>
25. What is OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/multicarrier-modulation/ofdm-orthogonal-frequency-division-multiplexing-what-is-tutorial-basics.php>
26. National instruments “*Introduction to Wireless LAN Measurements From 802.11a to 802.11ac*” p. 6-7, 10-11. [žiūrėta 2022-02-16]. Prieiga per: http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_WLAN_Testing.pdf
27. Stasys Kašėta „*Telekomunikacijų teorija*“, KTU leidykla "Technologija", 2012, 256-258p. [žiūrėta 2022-03-06]. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/646/telekomunikaciju-teorija/>
28. Eleventh Hour Security „*Direct Sequence Spread Spectrum*“, 2010, 1-3p. [žiūrėta 2022-03-21]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/direct-sequence-spread-spectrum>
29. IEEE Computer Society Part 11: “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - IEEE Std 802.11™-2007*” The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007 [žiūrėta 2022-03-12]. Prieiga per: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/3605/>
30. PHANTOM 3 W322B (DRONE) “*Manual Manual GL300C*” „, DJI Innovations Technology Co. Ltd [žiūrėta 2022-04-06]. Prieiga per: <https://fccid.io/ANATEL/05180-16-10020/Manual/6558FC27-7772-4EA1-A0C4-6F6E6A0D3630>
31. “DJI MINI user manual” [žiūrėta 2022-04-06]. Prieiga per: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_Mini/Mavic_Mini_User_Manual_v1.0_en_1.pdf
32. “Walkera DEVO F12E User Manual” [žiūrėta 2022-04-06]. Prieiga per: <https://manualzz.com/doc/53394944/walkera-devo-f12e-user-manual>
33. Rohde – Schwartz spektro analizatorius. [2022-02-10]. Prieiga per: https://82fai3h5wg8220a0l3ilfiz1-wpengine.netdna-ssl.com/wpcontent/uploads/2018/10/R_S_FSH8_08_Spec.pdf
34. Audrius Kabašinskas, Kristina Šutienė, Violeta Kravčenkienė, " *Matematika I. Tiesinė algebra ir matematinė analizė*". Kaunas: Technologija, 2001, p.139-143, 180. [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/1387/matematika-1-tiesine-algebra-ir-matematine-analize/>
35. Adam C. Polak, S. Dolatshahi, and Dennis L. Goeckel „*Identifying Wireless Users via Transmitter Imperfections*“, 2010, 12p. [žiūrėta 2022-02-13]. Prieiga per internetą: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.365.1441&rep=rep1&type=pdf>
36. National Instruments. „*Introduction to Wireless LAN Measurements*“, [žiūrėta 2022-04-01]. Prieiga per: http://download.ni.com/evaluation/rf/Introduction_to_WLAN_Testing.pdf
37. LitePoint Corporation „*Practical Manufacturing Testing of 802.11 OFDM Wireless Devices - Handbook*“, © 2010, LitePoint Corporation, [žiūrėta 2022-03-05]. Prieiga per: http://www2.litepoint.com/system/files/Testing_WIFI_OFDM.pdf

38. William C.Y. Lee, Ph.D. „*Wireless and Cellular telecommunications. Third edition*“. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2006 – P. 298 – 305. ISBN 0-07-143686-3. [žiūrēta 2022-04-13]. Prieiga per: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071436861>
39. P. Padilla, J.L. Padilla and J.F. Valenzuela-Valdés „*Radiofrequency identification of wireless devices based on RF fingerprinting*“ - ELECTRONICS LETTERS, 2013, p. 1-2. [žiūrēta 2022-04-15]. Prieiga per:
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/el.2013.2759>
40. B. Danev, S. Capkun, "*Transient-based Identification of Wireless Sensor Nodes*", 2009. ISBN 978-1-4244-5108-1. [žiūrēta 2022-04-14]. Prieiga per:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/5211943>

Priedai

1 priedas. Rohde & Schwarz R&S®FSH4/FSH8 Spektro Analizatoriaus specifikacija

Specifications

Specifications apply under the following conditions:

15 minutes warm-up time at ambient temperature, specified environmental conditions met, calibration cycle adhered to.

Data without tolerances: typical values only. Data designated as 'nominal' applies to design parameters and is not tested. Data without tolerance limits is not binding.

Frequency

Frequency range	R&S®FSH4 model .04/.14	9 kHz to 3.6 GHz
	R&S®FSH8 model .08/.18	9 kHz to 8 GHz
	R&S®FSH4 model .24	100 kHz to 3.6 GHz
	R&S®FSH8 model .28	100 kHz to 8 GHz
Frequency resolution		1 Hz
Spectral purity SSB phase noise		f = 500 MHz
Carrier offset	30 kHz	< -95 dBc (1 Hz), typ. -105 dBc (1 Hz)
	100 kHz	< -100 dBc (1 Hz), typ. -110 dBc (1 Hz)
	1 MHz	< -120 dBc (1 Hz), typ. -127 dBc (1 Hz)

Sweep time

Sweep time	span = 0 Hz	200 μs to 100 s
	10 Hz ≤ span ≤ 600 MHz	20 ms to 1000 s
	span > 600 MHz	20 ms × span/600 MHz to 1000 s
Uncertainty	span = 0 Hz	nominal 1 %
	span ≥ 10 Hz	nominal 3 %

Bandwidths

Resolution bandwidths		
Range	-3 dB bandwidth	10 Hz to 3 MHz in 1/3 sequence
Bandwidth accuracy	10 Hz ≤ RBW ≤ 300 kHz	nominal < 5 %
	RBW > 300 kHz	nominal < 10 %
Selectivity 60 dB:3 dB		nominal < 5 (Gaussian type filters)
Video filters		
Range	-3 dB bandwidth	10 Hz to 3 MHz in 1/3 sequence

Level

Display range		displayed noise floor to +30 dBm
Maximum rated input level with RF attenuation ≥ 10 dB		
DC voltage	model .04/.08/.14/.18	80 V
	model .24/.28	50 V
CW RF power		30 dBm (= 1 W)
Peak RF power	duration < 3 s	33 dBm (= 2 W)
Max. pulse voltage		150 V
Max. pulse energy	pulse width 10 μ s	10 mWs
Maximum rated input level with RF attenuation < 10 dB		
DC voltage		50 V
CW RF power		20 dBm (= 100 mW)
Peak RF power	duration < 3 s	23 dBm (= 200 mW)
Max. pulse voltage		50 V
Max. pulse energy	pulse width 10 μ s	1 mWs
Displayed average noise level		
	0 dB RF attenuation, termination 50 Ω , RBW = 100 Hz, VBW = 10 Hz, sample detector, log scaling, tracking generator OFF, normalized to 1 Hz	
	frequency	preamplifier = OFF
	9 kHz to 100 kHz (models .04/.14/.08/.18 only)	< -108 dBm, typ. -118 dBm
	100 kHz to 1 MHz	< -115 dBm, typ. -125 dBm
	1 MHz to 10 MHz	< -136 dBm, typ. -144 dBm
	10 MHz to 2 GHz	< -141 dBm, typ. -146 dBm
	2 GHz to 3.6 GHz	< -138 dBm, typ. -143 dBm
	3.6 GHz to 5 GHz	< -142 dBm, typ. -146 dBm
	5 GHz to 6.5 GHz	< -140 dBm, typ. -144 dBm
	6.5 GHz to 8 GHz	< -136 dBm, typ. -141 dBm
	frequency	preamplifier = ON
	100 kHz to 1 MHz	< -133 dBm, typ. -143 dBm
	1 MHz to 10 MHz	< -157 dBm, typ. -161 dBm
	10 MHz to 1 GHz	< -161 dBm, typ. -165 dBm
	1 GHz to 2 GHz	< -159 dBm, typ. -163 dBm
	2 GHz to 5 GHz	< -155 dBm, typ. -159 dBm

Inputs and outputs		
RF input		
Impedance		50 Ω
Connector		N female
VSWR	100 kHz \leq f \leq 1 GHz	nominal < 1.5
	1 GHz < f \leq 6 GHz	nominal < 2
	6 GHz < f \leq 8 GHz	nominal < 3
Input attenuator	RF input only	0 dB to 40 dB in 5 dB steps
AF output		
AF demodulation types		AM and FM
Connector		3.5 mm mini jack
Output impedance		nominal 32 Ω
DC voltage		50 V
CW RF power		+20 dBm (= 0.1 W)
Max. pulse voltage		50 V
Max. pulse energy (10 μ s)		1 mWs
Tracking generator (models .18 and .28 only)		
Frequency range		100 kHz to 8 GHz
Connector		N female, 50 Ω
Tracking generator attenuator		0 dB to 40 dB in 1 dB steps
Dynamic range for isolation measurements	RF attenuation = 0 dB, tracking generator attenuation = 10 dB, RBW = 1 kHz	
	100 kHz \leq f < 300 kHz	> 60 dB, typ. 80 dB
	300 kHz \leq f < 6 GHz	> 70 dB, typ. 90 dB
	6 GHz \leq f < 8 GHz	typ. > 50 dB
Reverse power		
DC voltage		50 V
CW RF power		+20 dBm (= 0.1 W)
Max. pulse voltage		50 V
Max. pulse energy (10 μ s)		1 mWs

2 priedas. 3 dronų pultelių minimalios, maksimalios ir apskaičiuotos vidutinės priekinio ir galinio frontų vertės.

Priekinio fronto „Phantom“ pultelio vertės.

u, s	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-98,3	-103,9	-101,1
2	-97,11	-102,95	-100,03
3	-96,63	-102,09	-99,36
4	-92,62	-98,44	-96,03
5	-93,65	-96,29	-94,97
6	-89,7	-94,84	-92,97
7	-88,79	-94,75	-92,27
8	-89,54	-94,58	-91,56
9	-87,25	-95,49	-91,37
10	-88,91	-95,73	-92,32
11	-88,68	-95,9	-92,29
12	-86,58	-93,2	-89,89
13	-84,1	-94,4	-89,35
14	-82,82	-94,08	-88,45
15	-80,19	-90,57	-85,38
16	-78,49	-91,73	-85,11
17	-78,8	-88,68	-83,74
18	-78,27	-86,65	-82,46
19	-77,4	-85,18	-81,29
20	-76,19	-82,75	-79,47
21	-73,5	-79,1	-76,3
22	-72,36	-78,4	-75,38
23	-72,14	-78,5	-75,32
24	-71,07	-77,49	-74,28
25	-70,53	-75,91	-73,72

Galinio fronto „Phantom“ pultelio vertės.

u, s	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-71,6	-76,8	-74,3
2	-73,34	-78,32	-75,83
3	-72,8	-75,62	-74,21
4	-73,07	-78,09	-75,58
5	-74,13	-77,55	-76,34
6	-75,52	-79,38	-77,45
7	-71,31	-81,95	-76,63
8	-75,82	-82	-78,91

9	-76,2	-81,8	-79
10	-79,05	-83,91	-81,48
11	-78,04	-80,46	-79,25
12	-82,63	-90,29	-86,46
13	-85,13	-90,71	-87,92
14	-86,27	-92,25	-89,26
15	-87,87	-95,05	-91,46
16	-89,22	-96,84	-93,03
17	-90,9	-98,1	-94,5
18	-94,19	-101,35	-96,17
19	-93,19	-101,57	-97,38
20	-94,09	-102,27	-98,18
21	-94,19	-99,77	-96,98
22	-94,32	-101,5	-97,91
23	-93,76	-102,74	-98,25
24	-90,29	-98,65	-99,47
25	-96,83	-104,05	-101,94

Priekinio fronto „DJI Mini“ pultelio vertės.

u, s	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-98,6	-103,1	-101,3
2	-94,81	-99,23	-97,02
3	-92,90	-98	-95,41
4	-92,85	-99,21	-96,03
5	-91,35	-98,59	-94,97
6	-92,93	-99,79	-95,96
7	-91,85	-98,69	-95,27
8	-91,74	-97,58	-94,66
9	-91,51	-97,23	-94,37
10	-90,01	-98,23	-94,12
11	-88,51	-96,07	-92,29
12	-86,26	-91,84	-89,05
13	-87,69	-92,91	-90,3
14	-81,75	-85,15	-83,45
15	-85,34	-89,50	-87,42
16	-73,42	-76,26	-75,34
17	-72,33	-79,15	-75,74
18	-71,75	-77,97	-74,86
19	-74,44	-82,3	-78,37
20	-73,76	-77,38	-76,07
21	-71	-73,6	-72,3
22	-72,19	-78,57	-75,38

23	-82,52	-88,12	-85,32
24	-74,78	-79,38	-77,08
25	-71,92	-77,72	-74,82

Galinio fronto „DJI Mini“ pultelio vertės.

u, s	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-73,25	-77,87	-75,56
2	-77,88	-83,08	-80,48
3	-72,8	-79	-75,9
4	-72,92	-78,56	-75,74
5	-76,03	-80,29	-78,16
6	-71,91	-77,75	-74,83
7	-75,94	-82,16	-79,05
8	-72,97	-80,15	-76,56
9	-77,04	-82,84	-79,94
10	-76,01	-80,07	-78,03
11	-75,63	-79,27	-77,45
12	-73,1	-76,5	-74,8
13	-75,81	-78,63	-77,22
14	-82,2	-86	-84,1
15	-86,89	-91,25	-89,07
16	-87,51	-92,15	-89,83
17	-88,98	-92,8	-90,89
18	-90,84	-95,66	-93,25
19	-90,53	-96,31	-93,42
20	-92,23	-98,47	-95,35
21	-92,82	-99,4	-96,11
22	-93,6	-99,2	-96,4
23	-91,92	-100,52	-97,22
24	-94,02	-101,62	-98,82
25	-95,17	-100,97	-101,07

Priekinio fronto „DEVOF12E“ pultelio vertės.

u, s	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-98,81	-104,23	-101,02
2	-98,47	-104,29	-101,38
3	-96,55	-103,19	-99,87
4	-92,45	-98,01	-95,23
5	-95,48	-100,26	-97,87
6	-92,87	-99,05	-95,96

37	-90,4	-95,82	-93,11
8	-88,98	-93,8	-91,39
9	-86,35	-92,79	-89,57
10	-85,11	-91,73	-88,42
11	-87,2	-94,86	-91,03
12	-85,97	-93,19	-89,58
13	-86,22	-93,48	-89,35
14	-82,78	-88,18	-85,48
15	-85,53	-90,11	-87,82
16	-79,56	-85,72	-82,64
17	-77,54	-83,96	-80,75
18	-77,45	-82,27	-79,86
19	-75,85	-80,89	-78,37
20	-76,06	-80,28	-78,17
21	-74,42	-80,2	-77,31
22	-74,5	-78,27	-76,39
23	-73,14	-76,7	-74,92
24	-73,29	-78,47	-75,88
25	-71,2	-77,04	-74,12

Galinio fronto „DEVOF12E“ pultelio vertės.

u, s	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm
1	-69,05	-79,27	-74,16
2	-70,67	-80,09	-75,38
3	-73,65	-81,47	-77,56
4	-72,87	-79,49	-76,18
5	-72,32	-77,96	-75,14
6	-73,87	-78,45	-76,16
7	-73,43	-78,61	-76,02
8	-74,44	-80,64	-77,54
9	-77,32	-84,56	-80,94
10	-78,83	-83,45	-81,14
11	-80,53	-85,39	-82,96
12	-81,1	-84,88	-82,99
13	-81,14	-85,5	-83,32
14	-81,11	-88,73	-84,92
15	-81,86	-89,08	-85,47
16	-81,32	-86,56	-83,94
17	-83,15	-87,79	-85,47
18	-83,05	-89,67	-86,36
19	-84,18	-90,94	-87,56
20	-87,61	-92,03	-89,82

21	-88,21	-94,05	-91,13
22	-91,03	-97,87	-94,45
23	-93,19	-99,97	-98,58
24	-98,95	-102,17	-100,56
25	-99,84	-103,08	-101,96

3 priedas. 3 dronų pultelių frontų pasikeitimai pridėjus 101 dB (ploto skaičiavimui)

DJI Mini pultelio priekinio fronto pasikeitimas pridėjus 101 dB

t, us	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm	Normal.SNR
0	-67,2	-60,1	-96,5	4,5
1	-93,6	-100,6	-97,1	3,9
2	-94,82	-99,22	-97,02	3,98
3	-92,91	-97,9	-95,41	5,59
4	-92,83	-99,23	-96,03	4,97
5	-91,37	-98,57	-94,97	6,03
6	-92,96	-99,76	-95,96	5,04
7	-91,87	-98,67	-95,27	5,73
8	-91,76	-97,56	-94,66	6,34
9	-91,52	-97,22	-94,37	6,63
10	-90,02	-98,22	-94,12	6,88
11	-88,49	-96,09	-92,29	8,71
12	-86,25	-91,85	-89,05	11,95
13	-87,68	-92,92	-90,3	10,7
14	-81,75	-85,15	-83,45	17,55
15	-85,32	-89,52	-87,42	13,58
16	-73,44	-76,24	-75,34	25,66
17	-72,34	-79,14	-75,74	25,26
18	-71,76	-77,96	-74,86	26,14
19	-74,47	-82,27	-78,37	22,63
20	-73,77	-77,37	-76,07	24,93
21	-71	-73,6	-72,3	28,7
22	-72,18	-78,58	-75,38	25,62
23	-82,52	-88,12	-85,32	15,68
24	-74,78	-79,38	-77,08	23,92
25	-71,92	-77,72	-74,82	26,18

DJI Mini pultelio galinio fronto pasikeitimas pridėjus 101 dB

t, us	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm	Normal.SNR
0	-31,6	-27,7	-74,32	26,68
1	-73,26	-77,86	-75,56	25,44
2	-77,88	-83,08	-80,48	20,52
3	-72,8	-79	-75,9	25,1
4	-72,94	-78,54	-75,74	25,26
5	-76,06	-80,26	-78,16	22,84
6	-71,93	-77,73	-74,83	26,17
7	-75,95	-82,15	-79,05	21,95
8	-72,96	-80,16	-76,56	24,44
9	-77,04	-82,84	-79,94	21,06
10	-76	-80,03	-78,03	22,97

11	-75,65	-79,25	-77,45	23,55
12	-73,2	-76,4	-74,8	26,2
13	-75,82	-78,62	-77,22	23,78
14	-82,2	-86	-84,1	16,9
15	-86,87	-91,27	-89,07	11,93
16	-87,53	-92,13	-89,83	11,17
17	-88,99	-92,79	-90,89	10,11
18	-90,85	-95,65	-93,25	7,75
19	-90,52	-96,32	-93,42	7,58
20	-92,25	-98,45	-95,35	5,65
21	-92,81	-99,41	-96,11	4,89
22	-93,6	-99,2	-96,4	4,6
23	-91,92	-100,52	-96,22	4,78
24	-94,02	-101,62	-97,82	3,18
25	-95,17	-100,97	-98,07	2,93

Phantom pultelio priekinio fronto pasikeitimas pridėjus 101 dB

t, us	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm	Normal.SNR
0	-99,5	-101,8	-100,8	0,2
1	-98,3	-103,9	-101,1	-0,1
2	-97,13	-102,93	-100,03	0,97
3	-96,66	-102,06	-99,36	1,64
4	-92,63	-98,43	-96,03	4,97
5	-93,67	-96,27	-94,97	6,03
6	-89,67	-94,87	-92,97	8,03
7	-88,77	-94,77	-92,27	8,73
8	-89,56	-94,56	-91,56	9,44
9	-87,27	-95,47	-91,37	9,63
10	-88,92	-95,72	-92,32	8,68
11	-88,69	-95,89	-92,29	8,71
12	-86,59	-93,19	-90,89	10,11
13	-84,1	-94,4	-89,35	11,65
14	-82,85	-94,05	-88,38	12,62
15	-73,18	-92,58	-92,11	8,89
16	-78,51	-91,71	-84,11	16,89
17	-78,84	-88,64	-86,34	14,66
18	-80,26	-84,66	-83,16	17,84
19	-78,39	-84,19	-81,29	19,71
20	-78,17	-80,77	-80,47	20,53
21	-75,5	-77,1	-79,3	21,7
22	-74,38	-76,38	-77,78	23,22
23	-73,12	-76,52	-76,32	24,68
24	-73,08	-75,48	-75,28	25,72
25	-72,52	-74,92	-74,72	26,28

Phantom pultelio galinio fronto pasikeitimas pridėjus 101 dB

t, us	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm	Normal.SNR
0	-31,7	-27	-75,12	25,88
1	-71,7	-76,7	-74,3	26,7
2	-73,33	-78,33	-75,83	25,17
3	-72,81	-75,61	-74,21	26,79
4	-73,08	-78,08	-75,58	25,42
5	-74,14	-77,54	-76,34	24,66
6	-75,55	-79,35	-77,45	23,55
7	-71,33	-81,93	-76,63	24,37
8	-75,81	-82,01	-78,91	22,09
9	-76,2	-81,8	-79	22
10	-79,08	-83,88	-81,48	19,52
11	-78,05	-80,45	-79,25	21,75
12	-82,66	-90,26	-86,46	14,54
13	-85,12	-90,72	-87,92	13,08
14	-86,26	-92,26	-89,26	11,74
15	-87,86	-95,06	-91,46	9,54
16	-89,23	-96,83	-93,03	7,97
17	-90,9	-98,1	-94,5	6,5
18	-94,17	-101,37	-96,17	4,83
19	-93,18	-101,58	-97,38	3,62
20	-94,08	-102,28	-98,18	2,82
21	-94,18	-99,78	-96,98	4,02
22	-94,31	-101,51	-97,91	3,09
23	-93,75	-102,75	-98,25	2,75
24	-90,27	-98,67	-94,47	6,53
25	-95,84	-104,04	-99,94	1,06

DEVOF12E pultelio priekinio fronto pasikeitimas pridėjus 101 dB

0	-66,6	-60,8	-101	0
1	-99,82	-104,22	-102,02	-1,02
2	-98,48	-104,28	-101,38	-0,38
3	-96,57	-103,17	-99,87	1,13
4	-92,43	-98,03	-98,23	2,77
5	-95,47	-100,27	-97,17	3,83
6	-92,86	-99,06	-96,46	4,54
7	-90,41	-95,81	-95,11	5,89
8	-88,99	-93,79	-91,39	9,61
9	-86,37	-92,77	-89,57	11,43
10	-85,12	-91,72	-88,42	12,58
11	-87,23	-94,83	-90,03	10,97
12	-85,98	-93,18	-89,58	11,42
13	-86,25	-93,45	-89,35	11,65

14	-82,78	-88,18	-84,48	16,52
15	-85,52	-90,12	-83,82	17,18
16	-79,54	-85,74	-81,64	19,36
17	-77,55	-83,95	-80,75	20,25
18	-77,46	-82,26	-79,86	21,14
19	-75,87	-80,87	-78,97	22,03
20	-76,07	-80,27	-78,17	22,83
21	-74,41	-80,21	-77,31	23,69
22	-74,49	-78,29	-76,39	24,61
23	-73,12	-76,72	-75,63	25,37
24	-73,28	-78,48	-74,78	26,22
25	-71,22	-77,02	-74,12	26,88

DEVOF12E pultelio galinio fronto pasikeitimas pridėjus 101 dB

t, us	Min, dBm	Max, dBm	Vid, dBm	Normal.SNR
0	-69,06	-79,26	-74,03	26,97
1	-69,06	-79,26	-74,16	26,84
2	-70,68	-80,08	-74,86	26,14
3	-73,66	-81,46	-75,13	25,87
4	-72,88	-79,48	-75,98	25,02
5	-72,34	-77,94	-75,14	25,86
6	-73,86	-78,46	-76,16	24,84
7	-73,42	-78,62	-76,56	24,44
8	-74,44	-80,64	-77,54	23,46
9	-77,34	-84,54	-81,94	19,06
10	-78,84	-83,44	-82,14	18,86
11	-80,56	-85,36	-84,96	16,04
12	-81,09	-84,89	-82,99	18,01
13	-81,12	-85,52	-83,32	17,68
14	-81,12	-88,72	-84,92	16,08
15	-81,87	-89,07	-85,47	15,53
16	-81,34	-86,54	-83,94	17,06
17	-83,17	-87,77	-85,47	15,53
18	-83,06	-89,66	-86,36	14,64
19	-84,16	-90,96	-87,56	13,44
20	-87,62	-92,02	-89,82	11,18
21	-88,23	-94,03	-91,13	9,87
22	-91,05	-97,85	-94,45	6,55
23	-93,18	-99,98	-96,58	4,42
24	-94,96	-102,16	-98,56	2,44
25	-95,86	-100,06	-97,96	3,04

4 priedas. Eksperimento rezultatų matrica su paskaičiuotomis paklaidos ribomis

Parametrai		Drono pultelio modelis			Drono pultelio modelis		
		DJI Mini	Phantom	DEVOF12E	DJI Mini ribos	Phantom ribos	DEVOF12E ribos
Pirmosios išvestinės maksimali reikšmė	Priekinis frontas	12,08	8	4,87	11,1136-13,0464	7,36-8,64	4,4804-5,2596
	Galinis frontas	6,88	7,21	4,4	6,3296-7,4304	6,6332-7,7868	4,048-4,752
Kada įvyksta pirmosios išvestinės maksimali reikšmė μs	Priekinis frontas	16	16	14	14,72-17,28	14,72-17,28	12,88-15,14
	Galinis frontas	14	12	9	12,88-15,14	11,04-12,96	8,28-9,72
Antrosios išvestinės maksimali reikšmė	Priekinis frontas	8,11	4,27	4,64	7,4612-8,7588	3,9284-4,6116	4,2688-5,0112
	Galinis frontas	4,46	4,98	3,42	4,1032-4,8168	4,5816-5,3784	3,1464-3,6936
Kiek kartų antroji išvestinė keičia ženklą	Priekinis frontas	14	16	11	12,88-15,14	14,72-17,28	10,12-11,88
	Galinis frontas	16	17	21	14,72-17,28	15,64-18,36	19,32-22,68
Vidutinis kreivumas	Priekinis frontas	0,727	0,28	0,331	0,67-0,79	0,26-0,302	0,304-0,36
	Galinis frontas	0,47	0,259	0,508	0,0376-0,5076	0,238-0,28	0,467-0,549
Nuolydžio koeficientas	Priekinis frontas	1,07	0,87	1,28	0,984-1,16	0,8-0,94	1,18-1,38
	Galinis frontas	1,06	1,27	0,78	0,976-1,15	1,17-1,37	0,72-0,84
Signalų fronto plotas	Priekinis frontas	179,62	132,95	168,81	165,3-193,99	122,3-143,59	155,31-182,31
	Galinis frontas	376,61	340,75	377,13	346,48-406,74	313,49-368,01	346,96-407,3

Įvertinus paklaidą, paskaičiuotos kiekvieno belaidžio įrenginio identifikavimo tikimybės.

Lyginant DJI Mini pultelį			Lyginant Phantom pultelį			Lyginant DEVOF12E pultelį		
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	+	-	+	+	-	-	-	+
+	+	-	+	+	-	-	-	+
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	-	-	-	+	+	-	-	+
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	+	-	+	+	-	-	-	+
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	-	+	-	+	-	-	-	+
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	-	-	-	+	-	-	-	+
+	-	+	-	+	-	+	-	+
+	-	+	-	+	-	+	-	+
14 = 0,93	3=0,21	3=0,21	3=0,21	14=0,93	1=0,07	2=0,14	0=0	14=0,93