Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Dronų aptikimo naudojant SDR technologiją metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Rokas Noreikis

Projekto autorius

Doc. dr. Mindaugas Knyva

Vadovas

Kaunas, 2026

Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Dronų aptikimo naudojant SDR technologiją metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Rokas Noreikis

Projekto autorius

Doc. dr. Mindaugas Knyva

Vadovas

Prof. Darius Gailius

Recenzentas

Kaunas, 2026

Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Rokas Noreikis

Dronų aptikimo naudojant SDR technologiją metodų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis 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 sąraše;

3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;

4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Rokas Noreikis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Autoriaus Noreikis, Rokas. Dronų aptikimo naudojant SDR technologiją metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Knyva; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: SDR, dronų aptikimas, radaras, amplitudinis krypties nustatymas, CFAR, monopulsinis krypties nustatymas, FMCW radaras.

Kaunas, 2026. 62 p.

Santrauka

Darbe nagrinėjamas dronų aptikimas naudojant programiškai apibrėžto radijo (SDR) technologiją. Atlikta pasyvių ir aktyvių dronų aptikimo metodų analizė, įvertinant jų privalumus, trūkumus ir pritaikymo galimybes.

Eksperimentinėje dalyje atlikti trijų tipų matavimai: drono valdymo signalo krypties nustatymas pagal signalo stiprumą, monopulsinis krypties nustatymas bei atstumo iki objekto matavimas naudojant FMCW principu veikiantį radarą.

Gauti rezultatai parodė, kad SDR technologija gali būti efektyviai taikoma tiek pasyviam, tiek aktyviam dronų aptikimui, tačiau metodų veikimas priklauso nuo aplinkos sąlygų ir naudojamos įrangos apribojimų.

Noreikis, Rokas. Investigation of Drone Detection Methods Using SDR Technology. Master's Final Degree Project / supervisor, Assoc. Prof. Mindaugas Knyva; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: Software Defined Radio (SDR), drone detection, radar systems, amplitude-based direction finding, Constant False Alarm Rate (CFAR) algorithm, monopulse direction finding, FMCW radar.

Kaunas, 2026, 62 p.

Summary

The thesis investigates drone detection using Software Defined Radio (SDR) technology. An analysis of passive and active drone detection methods is performed by evaluating their advantages, disadvantages, and application possibilities. The experimental part includes three types of measurements: direction finding of the drone control signal based on signal strength, monopulse direction finding, and distance measurement to a target using an FMCW-based radar. The obtained results demonstrate that SDR technology can be effectively applied for both passive and active drone detection; however, the effectiveness of the investigated methods depends on the parameters of the RF equipment, antenna characteristics, and the applied signal detection algorithms.

The aim of the thesis is to investigate the applicability of Software Defined Radio (SDR) technology for drone detection and to experimentally evaluate the effectiveness of the selected methods.

The objectives of the thesis are:

1. To analyze passive and active drone detection methods and their application possibilities.
2. To investigate the application of SDR technology for drone signal detection.
3. To experimentally evaluate direction finding of the drone control signal based on signal strength.
4. To investigate the monopulse direction finding method and evaluate its accuracy.
5. To implement an FMCW-based radar and experimentally evaluate its distance measurement capabilities.

Turinys

Lentelių sąrašas **7**
Paveikslų sąrašas **8**
Santrumpų ir terminų sąrašas **9**
Įvadas **10**
1. Literatūros apžvalga **12**
1.1. Programiškai apibrėžta radijo sistema (SDR) 12
1.2. Dronų aptikimo metodai 13
1.2.1. Pasyvūs dronų aptikimo metodai 14
1.2.2. Aktyvūs dronų aptikimo metodai 22
1.2.3. Radijo įrangos parinkimas 32
1.3. Eksperimentinė dalis 34
1.3.1. Pasyvus aptikimas pagal signalo stiprumą 34
1.3.2. Pasyvaus krypties nustatymas pagal dviejų kanalų fazių palyginimą 44
1.3.3. Aktyvus aptikimas panaudojant FMCW signalą atstumui iki objekto nustatyti 48
Išvados **59**
Literatūros sąrašas **60**

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Drono aptikimo technologijų palyginimas [4] 13
2 lentelė. Skirtingų radarų dažnių juostų palyginimas 31
3 lentelė. Aptiktų siųstuvo signalų suminė galia, atstumas10 m 42
4 lentelė. Aptiktų siųstuvo signalų suminė galia, atstumas 50 m 42
5 lentelė. Aptikto signalo galia, kai antenos išdėstytos stacionariai, šaltinis priešais vieną iš antenų už 100 m 43
6 lentelė. Aptikto signalo galia naudojant Wi-Fi anteną, atstumas 100 m 43
7 lentelė. Atliktų matavimų su tiesiogine antenų padėtimi rezultatų lentelė 51
8 lentelė. Matavimai vietovėje Nr. 1, pirma diena 57
9 lentelė. Matavimai vietovėje Nr. 1, antra diena 57
10 lentelė. Matavimai vietovėje Nr. 2, trečia diena 57

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sraigtasparnio ir drono susidūrimo padariniai 10
2 pav. SDR architektūra: a) dalis – siųstuvas; b) dalis – imtuvas 12
3 pav. Nulinio dažnio I ir Q signalų gavimo schema 13
4 pav. DJI „Phantom 3 Advanced“ drono signalo ir aplinkos elektromagnetinio triukšmo spektras 15
5 pav. Signalo spektras su pritaikytu CFAR apdorojimu 15
6 pav. Bazinė CFAR skaičiavimo architektūra 16
7 pav. Drono signalo aptikimo eksperimentinė schema 17
8 pav. Drono valdymo stoties šokinėjimo per dažnius fragmentas 18
9 pav. Vienodo linijinio antenų masyvo schema 19
10 pav. RAD-DAR sistemos blokinė schema 24
11 pav. Antenos pjūvis 25
12 pav. FMCW išspinduliuotas ir priimtas signalai 26
13 pav. FMCW išspinduliuotas ir priimtas signalai 28
14 pav. „Turnigy“ TGY 9X siųstuvas imtuvas 34
15 pav. „Ettus research“ USRP B210 35
16 pav. „Analog Devices“ „Adalm Pluto“ 35
17 pav. „Skyworks“ „SKY13418-485LF-EVB“ radijo jungiklio plokštė 36
18 pav. „Walfront“ logoperiodinė antena 36
19 pav. „Tbest“ kryptinė Yagi tipo antena 36
20 pav. Pulto įjungimo momento įrašas laiko srityje 37
21 pav. Pulto dažnių srities vaizdas, gauta naudojant USRP B210 38
22 pav. Pulto dažnių srities vaizdas, gautas „Adalm Pluto“ 39
23 pav. Pasyvaus dronų aptikimo bandymo fizinė įranga ir schema 39
24 pav. Įrašyto signalo fragmentas ir CFAR slenkstinė kreivė 40
25 pav. Pasyvaus dronų aptikimo rezultatas 41
26 pav. Signalo galios, slankiojo vidurkio gaubtinės ir CFAR slenkstinės kreivės palyginimas 41
27 pav. Monopulsinio signalo maksimumo paieškos pavyzdys 44
28 pav. Eksperimentui panaudotas „ImmersionRC“ 600mW galios vaizdo siųstuvas 45
29 pav. Eksperimentui naudotas antenų stendas 46
30 pav. Monopulsiniu metodu grįsto kampo matavimo rezultatai 47
31 pav. Signalo daliklio ir slopintuvų panaudojimas radaro bandymuose nuotrauka ir schema 50
32 pav. Etaloninis ir priimtas signalai tiesioginio kelio antenos bandymuose 51
33 pav. Aptiktos signalo viršūnės po dečirpavimo 51
34 pav. Siunčiamo, etaloninio ir priimto FMCW signalų simuliacija 52
35 pav. Aplinkos signalų išvalymo ir atstumo iki objekto aptikimo simuliacija 52
36 pav. Matavimai: vietovė 1 (kairėje), vietovė 2 (dešinėje) 53
37 pav. Antenos su RF absorbcine medžiaga: TX (kairėje), RX (dešinėje) 53
38 pav. Priimtas signalas etaloniniame (mėlynas) ir antenos (oranžinis) kanaluose 54
39 pav. Priimtas signalas po vieno fono atėmimo, vietovė 1 55
40 pav. Priimtas objekto už 10 m nuo RX antenos, dvigubas fono atėmimas, vietovė 2 56
41 pav. Priimtas objekto už 12 m nuo RX antenos, dvigubas fono atėmimas, vietovė 2 56
42 pav. Priimtas objekto už 16 m nuo RX antenos, dvigubas fono atėmimas, vietovė 2 56

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ADC – analoginis-skaitmeninis keitiklis (angl. analog-to-digital converter).

AM – amplitudinė moduliacija (angl. amplitude modulation).

BPSK – dvejetainė fazinė manipuliacija (angl. binary phase shift keying).

CFAR – pastovaus klaidingų aptikimų dažnio metodas (angl. constant false alarm rate).

DAC – skaitmeninis-analoginis keitiklis (angl. digital-to-analog converter).

FFT – greitoji Furjė transformacija (angl. fast Fourier transform).

FHSS – dažnių šokinėjimo skleistasis spektras (angl. frequency hopping spread spectrum).

FM – dažninė moduliacija (angl. frequency modulation).

FMCW – dažniu moduliuota nepertraukiamoji banga (angl. frequency-modulated continuous wave).

FPGA – lauke programuojama loginių vartų matrica (angl. field-programmable gate array).

GNSS – palydovinė padėties nustatymo sistema (angl. global navigation satellite system).

IF – tarpinis dažnis (angl. intermediate frequency)

ISM – pramoninė, mokslinė ir medicininė dažnių juosta (angl. industrial, scientific and medical band).

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos.

LiDAR – objekto aptikimas naudojant lazerinius jutiklius (angl. light detection and ranging).

PRF – pulsų pasikartojimo dažnis (angl. pulse repetition frequency).

QPSK – kvadratūrinė fazinė manipuliacija (angl. quadrature phase shift keying).

RF – radijo dažnis (angl. radio frequency).

RX – priėmimo kanalas (angl. receive).

STFT – trumpojo laiko Furjė transformacija (angl. short-time Fourier transform).

TX – siuntimo kanalas (angl. transmit).

Wi-Fi – belaidžio vietinio tinklo technologija (angl. wireless local area network, WLAN, IEEE 802.11).

Įvadas

Dronų, dar vadinamų bepiločiais orlaiviais, populiarėjimą lėmė kelios svarbios priežastys: mikrovaldiklių duomenų apdorojimo galimybių augimas, padėties nustatymo ir belaidžio ryšio sprendimų kainos mažėjimas bei sparčiai auganti dronų entuziastų bendruomenė. Dronai vis dažniau naudojami įvairiose ekonominės veiklos srityse, tokiose kaip fotografija, prekių pristatymas, teritorijų stebėjimas ir duomenų rinkimas naudojant įvairius jutiklius. Ši paklausa skatina tolesnę dronų plėtrą, pažangesnių modelių kūrimą ir jų prieinamumo didėjimą.

Tačiau kartu su dronų skaičiaus augimu kyla ir naujų saugumo iššūkių. Dronai vis dažniau tampa potencialia grėsme įvairiems sektoriams. Net ir nedidelio bepiločio orlaivio susidūrimas su lėktuvu gali turėti katastrofiškų pasekmių, kaip parodyta **1 pav.** pateiktame sraigtasparnio ir drono susidūrimo pavyzdyje.

1 pav. Sraigtasparnio ir drono susidūrimo padariniai

JAV Federalinės aviacijos administracijos duomenimis (angl. Federal Aviation Administration) kas mėnesį fiksuojama daugiau kaip 100 pranešimų apie pastebėtus neautorizuotus dronus, kuriuos pateikia pilotai, civiliai ar teisėsaugos pareigūnai.

Pagrindiniai sektoriai, kuriems kelia grėsmę nekontroliuojamas dronų naudojimas:

- Aviacijos saugumas – nesankcionuotas dronų buvimas oro erdvėje kelia pavojų susidūrimams su orlaiviais.
- Kritinė infrastruktūra – elektrinės, transformatorinės, komunikacijos mazgai, naftos ir dujų tiekimo punktai, kariniai ar valstybiniai objektai.
- Privatumo pažeidimai – dronai gali būti naudojami slaptam stebėjimui, informacijos rinkimui.
- Viešasis saugumas – dronai gali būti naudojami kaip platformos pavojingiems kroviniams ar ginklams.
- Karinės operacijos – dronai jau tapo neatsiejama šiuolaikinio mūšio lauko dalimi, skirti žvalgybai, kinetiniam poveikiui, ugnies koregavimui, logistikai.

Atsižvelgiant į šias grėsmes, atsirado poreikis patikimiems dronų aptikimo sprendimams. Tačiau tokios sistemos dažniausiai yra brangios, nes yra specializuotos ir skirtos ribotoms taikymo sritims. Tuo tarpu programiškai apibrėžtų radijo sistemų technologija leidžia kurti lanksčius ir santykinai nebrangius sprendimus radijo signalų analizei ir apdorojimui.

Darbo tikslas – ištirti SDR technologijos taikymo galimybes dronų aptikimui ir eksperimentiškai įvertinti pasirinktų metodų efektyvumą.

Darbo uždaviniai:

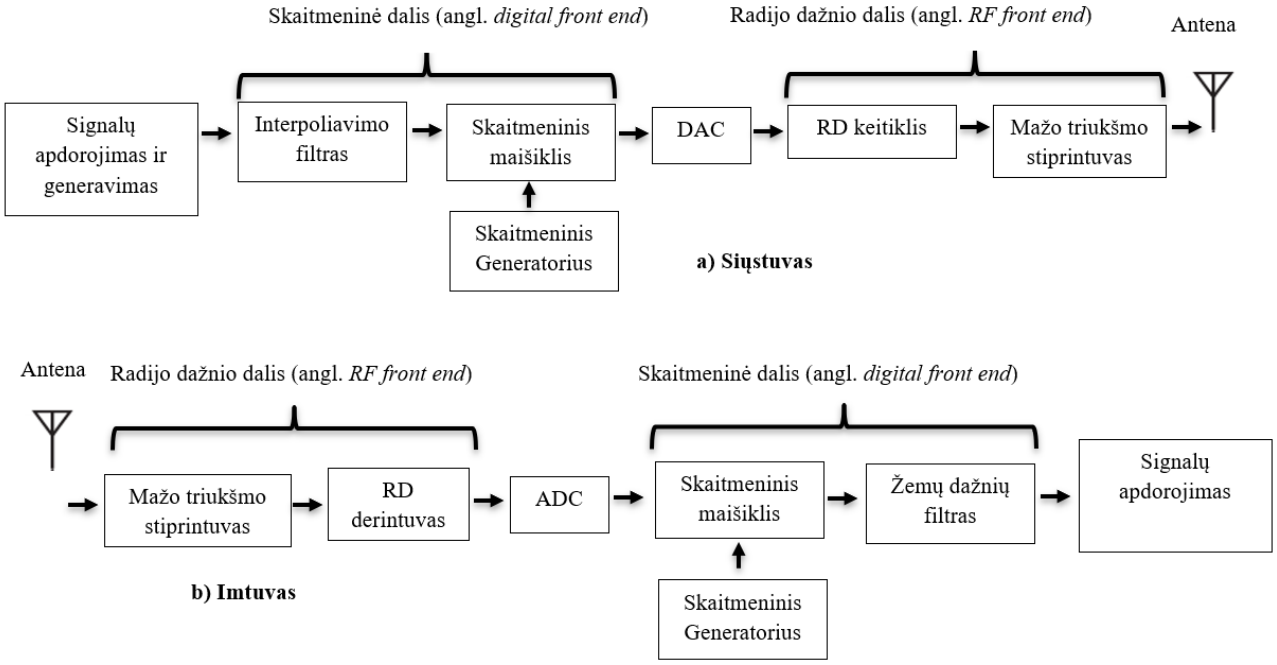
1. Išanalizuoti pasyvius ir aktyvius dronų aptikimo metodus bei jų taikymo galimybes.
2. Ištirti SDR technologijos pritaikymą dronų signalų aptikimui.
3. Eksperimentiškai įvertinti drono valdymo signalo krypties nustatymą pagal signalo stiprumą.
4. Ištirti monopulsinį krypties nustatymo metodą ir įvertinti jo tikslumą.
5. Realizuoti FMCW principu veikiantį radarą ir eksperimentiškai įvertinti atstumo nustatymo galimybes.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Programiškai apibrėžta radijo sistema (SDR)

SDR yra ryšio sistema, kurioje dauguma įprastinėms radijo sistemoms būdingų funkcijų, tokių kaip moduliacija, demoduliacija, filtravimas ir kanalų kodavimas, įgyvendinamos programinėmis priemonėmis, naudojant programuojamus procesorius, tokius kaip centrinis procesorius (angl. *central processing unit*), skaitmeninio signalo procesorius (angl. *digital signal processor*) ir FPGA. Toks sprendimas skiriasi nuo tradicinių radijo sistemų, kurios daugumai funkcijų atlikti naudoja analogines grandines.

SDR siųstuvas generuoja bazinį signalą, kuris skaitmeniniu–analoginiu keitikliu (DAC) paverčiamas į analoginį signalą. Toliau signalas perkeliamas į radijo dažnių sritį ir išspinduliuojamas siųstuvo grandinėmis. Priimtas signalas iš pradžių apdorojamas analoginėje dalyje, o vėliau analoginiu–skaitmeniniu keitikliu (ADC) paverčiamas skaitmeniniu, po kurio gali būti toliau apdorojamas skaitmeninėmis priemonėmis. SDR architektūrai įprastai būdingos keturios pagrindinės pakopos: antena, radijo dažnių grandinė, skaitmeninė įranga ir skaitmeninio signalo apdorojimo grandinė (**2 pav.**) [1].



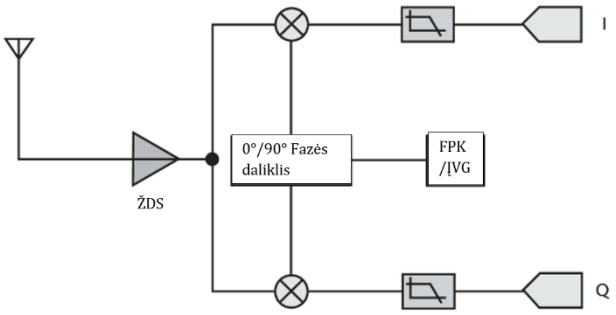
2 pav. SDR architektūra: a) dalis – siųstuvas; b) dalis – imtuvas [1, p. 3]

SDR privalumas yra galimybė lengvai pritaikyti tą pačią aparatinę įrangą skirtingiems ryšio tipams – pakanka pakeisti programinę įrangą, todėl sistema tampa lanksti ir universali.

Esminis SDR elementas yra I ir Q signalų naudojimas – du ortogonalūs signalo komponentai (**3 pav.**), gaunami maišant priimtą radijo signalą su osciliatoriaus signalu ir 90° fazės poslinkį turinčiu signalu. Taip gaunama signalų pora, kuri sudaro kompleksinį priimto signalo atvaizdą, išsaugant tiek amplitudės, tiek fazės informaciją. Tai leidžia SDR sistemai įgyvendinti įvairias moduliacijos schemas, tokias kaip AM, FM, BPSK ir QPSK.

Be to, I ir Q signalų naudojimas leidžia sumažinti reikalingą skaitmeninimo dažnį ir naudoti lėtesnius, tačiau tikslesnius analoginius–skaitmeninius keitiklius. Nulinio tarpinio dažnio (angl. *Zero-IF*)

architektūroje signalas maišymo metu perkeliamas tiesiai į bazinę juostą (0 Hz), todėl nereikia tarpinio dažnio pakopos. I ir Q signalai taip pat leidžia išvengti dviprasmybių, atsirandančių naudojant vienkanalį signalą, ir yra viena iš pagrindinių SDR technologijos savybių [2]



3 pav. Nulinio dažnio I ir Q signalų gavimo schema [2, p. 12]

SDR sistemos leidžia pakeisti tradicinius analoginius komponentus skaitmeniniais sprendimais, įgyvendinamais SSA ir FPGA platformose. Tokios sistemos gali būti lengvai perprogramuojamos, todėl jų parametrai gali būti keičiami be papildomos aparatinės įrangos. SDR veikimu grindžiami FMCW radarai naudoja nuolat siunčiamą dažniu moduliuotą signalą, kuris pasižymi dideliu energijos kiekiu ir leidžia pasiekti aukštą signalo ir triukšmo santykį bei didelį aptikimo nuotolį esant mažesnei siuntimo galiai. Tačiau nuolatinis signalo siuntimas ir priėmimas sukelia tiesioginio signalo prasiskverbimo į imtuvą problemą (angl. *direct signal leakage*) [3].

1.2. Dronų aptikimo metodai

Dronai – tai nuotoliniu būdu arba autonomiškai valdomos skraidančios platformos. Drono sistemą paprastai sudaro skraidanti platforma (dronas) ir valdymo pultas. Įprastai dronas turi energijos šaltinį (bateriją arba kuro baką), ryšio ir valdymo elektroniką, vieną ar keletą variklių (dažniausiai propelerinius) bei įvairius jutiklius, tokius kaip inercijos matavimo įrenginys, magnetometras, giroskopas, GNSS, slėgio jutiklis ir vaizdo kamera. Šios sistemos leidžia dronui atlikti skrydį, kilimą ir tūpimą, saugų nusileidimą, maršruto sekimą, objektų aptikimą bei informacijos perdavimą.

Dronų aptikimo ir klasifikavimo technologijos skirstomos į kelias pagrindines kategorijas: akustinio aptikimo, radijo signalų aptikimo, radarinius, vaizdo analizės bei hibridinius metodus. SDR technologija yra skirta radijo signalų priėmimui ir apdorojimui, todėl šiame darbe nagrinėjami du pagrindiniai dronų aptikimo metodai, tinkami SDR technologijos pritaikymui: radijo signalų aptikimas ir radaras (1 lentelė) [4].

1 lentelė. Drono aptikimo technologijų palyginimas [4]

Technologija	Metodas	Privalumai	Trūkumai
RF pasyvus metodas	Drono ir valdymo signalų aptikimas. Kitų RF šaltinių signalų atspindžių nuo drono aptikimas.	1. Leidžia efektyviai aptikti signalą spinduliuojantį droną. 2. Galimas signalą spinduliuojančio drono valdytojo aptikimas.	1. Didelė klaidingų aptikimų tikimybė. 2. Neefektyvi aptinkant autonominius dronus.

Technologija	Metodas	Privalumai	Trūkumai
RF aktyvus metodas	Skleidžiamo radijo signalo atspindžio apdorojimas siekiant išskirti krypties, atstumo bei Doplerio duomenis.	1. Dronas aptinkamas įvairiomis oro sąlygomis. 2. Efektyvus aptinkant ir klasifikuojant dronus.	1. Aptikimas priklauso nuo atspindėto signalo stiprumo.

Pateikta analizė rodo, kad pasyvūs metodai yra tinkami signalą spinduliuojančių dronų aptikimui, tuo tarpu aktyvūs metodai leidžia aptikti ir autonominius objektus, nepriklausomai nuo jų ryšio aktyvumo.

1.2.1. Pasyvūs dronų aptikimo metodai

Dronų valdymo technologijų tyrimai parodė, kad dauguma komercinių dronų naudoja 2,4 GHz dažnių juostą valdymo signalų perdavimui, o 5,8 GHz dažnių juostą – vaizdo signalų perdavimui. Ryšio protokolai dažnai yra šifruoti ir ne visada lengvai atpažįstami dėl taikomų ryšio patikimumo didinimo metodų, tokių kaip FHSS.

Analizė rodo, kad SDR technologijos (pvz., USRP X310, galinčios dirbti iki 100 MS/s mėginių ėmimo dažniu) leidžia atlikti plačiajuostį 2,4 GHz ISM dažnių juostos skenavimą ir įrašyti signalus tolimesnei analizei. Tokie duomenys gali būti naudojami neuroninių tinklų pagrindu veikiančioms sistemoms, skirtoms dronų signalų aptikimui ir klasifikavimui [5].

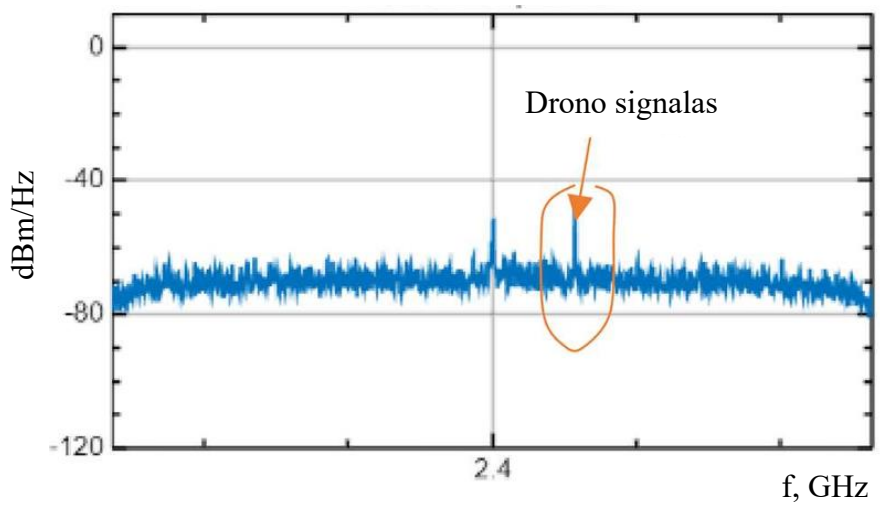
Hibridinėse dronų aptikimo sistemose SDR gali būti naudojama kaip pirminis skenuojantis įrenginys, gebantis aptikti dronų valdymo signalus, nustatyti naudojamą ryšio protokolą bei apytikslę geolokaciją (kryptį, atstumą ir, tam tikrais atvejais, aukštį). Nors SDR pagrindu veikiantys RF pasyvūs metodai priklauso nuo drono skleidžiamų signalų, SDR taip pat gali būti naudojama aktyviuose radaro sprendimuose, leidžiančiuose aptikti dronus nepriklausomai nuo jų ryšio aktyvumo.

Dėl šios priežasties SDR dažniausiai integruojama į hibridines aptikimo sistemas kartu su kitais jutikliais, tokiais kaip akustiniai jutikliai, optinės ar infraraudonosios kameros. Nustačius apytikslę drono vietą, elektrooptinės sistemos gali būti nukreipiamos tiksliam drono sekimui, identifikavimui ir klasifikavimui. Toks metodų derinimas leidžia kompensuoti atskirų technologijų trūkumus ir padidina bendrą aptikimo sistemos patikimumą [6].

Informacijos išgavimui iš priimto signalo dažnai taikoma trumpojo laiko Furjė transformacija (angl. short-time Fourier transform, STFT), leidžianti analizuoti signalo dažninę sudėtį laiko atžvilgiu.

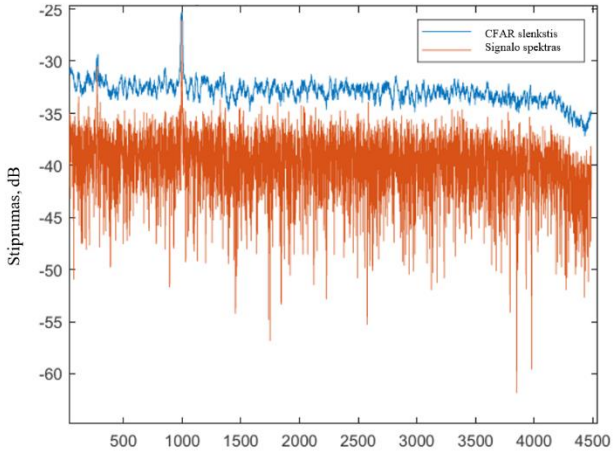
1.2.1.1. Drono valdymo signalo aptikimas

Valdymo signalo aptikimas yra vienas paprasčiausių metodų, leidžiantis nustatyti netoliese veikiantį droną ir (arba) jo valdymo įrenginį. Toks metodas buvo pademonstruotas aptinkant DJI „Phantom 3 Advanced“ drono valdymo signalą [7]. Užfiksuotas šio drono valdymo signalo spektras aplinkos elektromagnetinio triukšmo fone pateikiamas **4 pav.**



4 pav. DJI „Phantom 3 Advanced“ drono signalo ir aplinkos elektromagnetinio triukšmo spektras [7, p. 4]

Signalo išskyrimui iš aplinkos triukšmo šiame darbe naudojama Furjė transformacija (FFT), leidžianti gauti signalo spektrą dažnių srityje, ir pastovaus klaidingo aptikimo lygio algoritmas (angl. Constant False Alarm Rate, CFAR), skirtas aptikti spektrinius maksimumus. CFAR algoritmas nustato adaptacinį slenkstį, leidžiantį patikimai identifikuoti signalus triukšmingoje aplinkoje [7].



5 pav. Signalo spektras su pritaikytu CFAR apdorojimu [7, p. 4]

Straipsnio eksperimentiniai rezultatai rodo, kad drono valdymo signalas spektre pasireiškia kaip aiškiai išreikštas maksimumas ties maždaug 2,401 GHz dažniu (**5 pav.**). Be to, spektrogramos analizė leidžia stebėti šio signalo pastovumą laike, tai yra būdingas drono ryšio požymis.

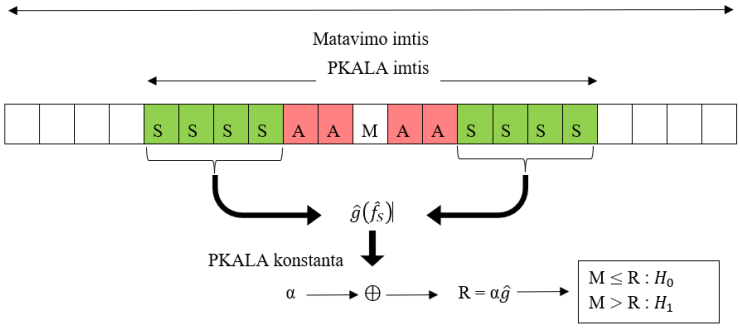
Svarbu pažymėti, kad šis metodas yra efektyvus aptinkant radijo ryšiu valdomus dronus, tačiau jo veiksmingumas ribotas autonominių dronų atveju.

CFAR metodu triukšmo ar interferencijos lygis įvertinamas naudodamas vadinamąsias referencines celes (angl. *reference cells*), o apsauginės celės (angl. *guard cells*) naudojamos siekiant išvengti tiriamo signalo įtakos triukšmo įvertinimui. Gautas statistinis įvertis naudojamas slenkstinei reikšmei apskaičiuoti, kuri išreiškiama kaip:

$$R = \alpha \hat{g} \tag{1}$$

čia: $\hat{g}$ yra triukšmo lygio įvertis, o α– konstanta, nustatoma pagal norimą klaidingo aptikimo tikimybę.

Paprasčiausias celių vidurkio (angl. *Cell Averaging, CA*) aptikimo metodas pateikiamas **6 pav**. Celės, pažymėtos raide „A“, yra apsauginės. Celės, pažymėtos raide „S“ – referencinės celės, o celė „M“ yra tiriamoji (angl. *cell under test*), kurios reikšmė lyginama su apskaičiuotu slenksčiu.



6 pav. Bazinė CFAR skaičiavimo architektūra [7, p. 11]

Celių vidurkio metodas geriausiai veikia vienalytėje aplinkoje, kai triukšmas yra statistiškai tolygus. Tačiau esant keliems taikiniams arba stipriems atspindžiams, triukšmo įvertinimas gali būti iškreiptas, dėl ko padidėja slenkstis ir tikrasis taikinys gali būti neaptiktas (taikinio maskavimo efektas).

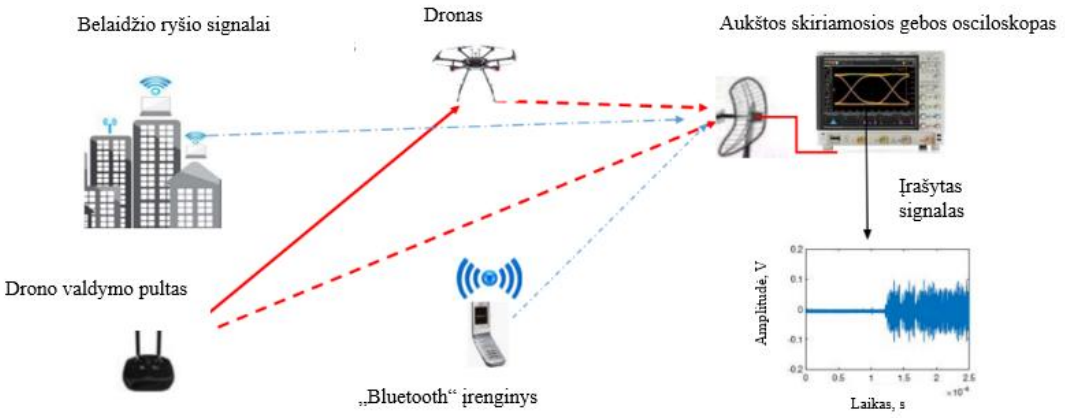
Šiai problemai spręsti naudojami kiti CFAR metodai. Sutvarkytos statistikos metodas (angl. Order Statistics, OS-CFAR) naudoja surikiuotas referencinių celių reikšmes ir slenksčiui apskaičiuoti parenka tam tikrą eilės statistiką. Didžiausio vidurkio metodas (angl. Greatest Of, GO-CFAR) taikomas nehomogeniškoje aplinkoje, kai triukšmo lygis kinta, o mažiausio vidurkio metodas (angl. Smallest Of, SO-CFAR) padeda sumažinti kelių taikinių tarpusavio užmaskavimo efektą. Taip pat naudojamas apkarpyto vidurkio metodas (angl. Trimmed Mean, TM-CFAR), kai atmetamos kraštinės reikšmės ir skaičiuojamas vidurkis iš likusių duomenų [8]. Tokiu būdu CFAR leidžia palaikyti pastovią klaidingo aptikimo tikimybę nepriklausomai nuo triukšmo lygio pokyčių. Šiame darbe CFAR metodas taip pat buvo pritaikytas eksperimentiniams duomenims analizuoti, kurių rezultatai pateikiami eksperimentinių tyrimų skyriuje.

Keletas kertinių savybių daro SDR technologiją tinkamą mobiliam dronų aptikimui. Tokios sistemos gali veikti plačiame dažnių diapazone (70–6000 MHz), pasižymi pakankamai plačia momentine dažnių juosta (apie 56 MHz) ir leidžia lanksčiai keisti stebimus dažnius. Be to, signalų apdorojimas gali būti atliekamas SDR įrenginyje arba išoriniame skaičiavimo bloke, todėl sistema išlieka kompaktiška ir tinkama mobilioms aplikacijoms [9].

SDR pagrindu veikiančios dronų aptikimo sistemos dažniausiai realizuoja tris pagrindines funkcijas: aptikimą, vietos nustatymą ir poveikį (slopinimą). Aptikimas atliekamas naudojant dažnių skenavimą

ir spektrinę analizę, vietos nustatymas – naudojant signalo fazių skirtumus arba krypties nustatymo algoritmus, o poveikis – generuojant slopinantį signalą toje pačioje dažnių juostoje [9].

Vienas iš pagrindinių iššūkių aptinkant dronų signalus 2,4 GHz ISM juostoje yra didelis kitų įrenginių (pvz., Wi-Fi ir Bluetooth) signalų kiekis, dėl kurio sudėtinga atskirti drono signalą nuo foninio triukšmo [10].



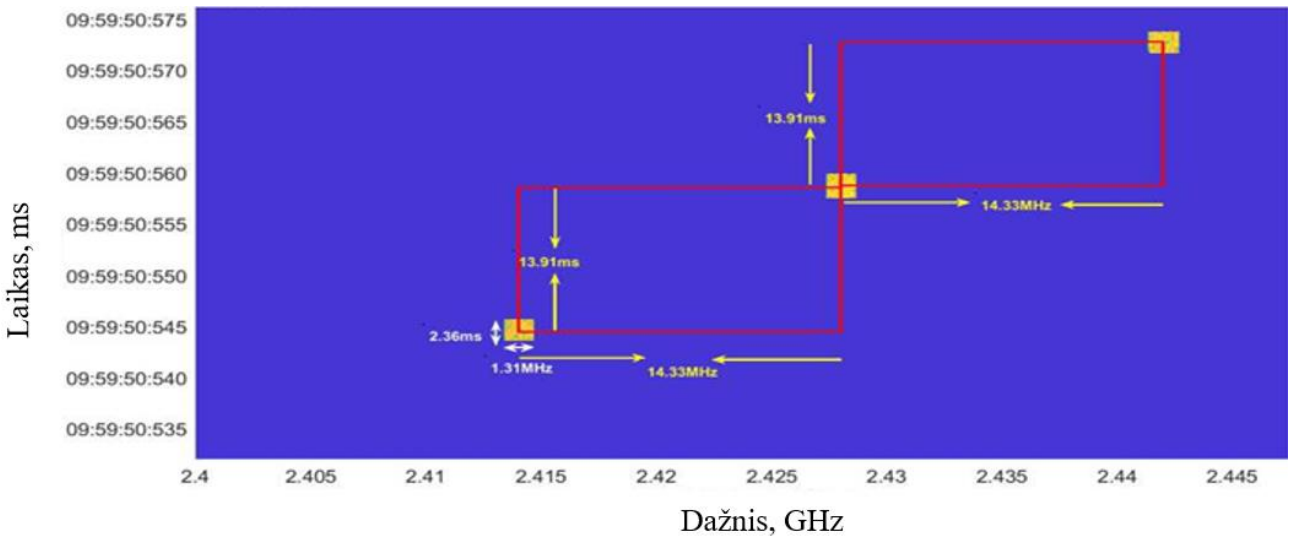
7 pav. Drono signalo aptikimo eksperimentinė schema [10, p. 4]

Šiai problemai spręsti siūlomas pasyvus aptikimo metodas, pagrįstas priimto signalo analize naudojant aukštos raiškos matavimo įrangą . Metodas apima signalų apdorojimą taikant diskretinę Haar bangelių transformaciją bei dviejų būsenų Markovo modelį, leidžiantį atskirti triukšmą nuo naudingo signalo [10].

Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad parinkus optimalią slenkstinę reikšmę ($\delta = 3.5\sigma$), galima pasiekti apie 99,8 % aptikimo tikslumą esant 10 dB signalo ir triukšmo santykiui, su maždaug 2,8 % klaidingų aptikimų tikimybe [10].

Papildomai signalai klasifikuojami pagal jų juostos plotį, kas leidžia atskirti Wi-Fi, Bluetooth ir galimus drono valdymo signalus [10].

Šokinėjimo per dažnius (angl. frequency hopping) technologija iš pradžių buvo naudojama karinėse ryšių sistemose siekiant padidinti atsparumą trukdžiams. Šiuo metu ši technologija plačiai taikoma ir dronų valdymo sistemose, kurios dažniausiai veikia 2,4–2,4835 GHz ir 5,47–5,725 GHz dažnių juostose. Analizė rodo, kad skirtingų dronų valdymo stočių signalai pasižymi skirtingais dažnio šokinėjimo intervalais, tačiau tos pačios sistemos signalai išlaiko pastovią šokinėjimo seką ir trukmę (**8 pav.**) [11].



8 pav. Drono valdymo stoties šokinėjimo per dažnius fragmentas [11, p. 4]

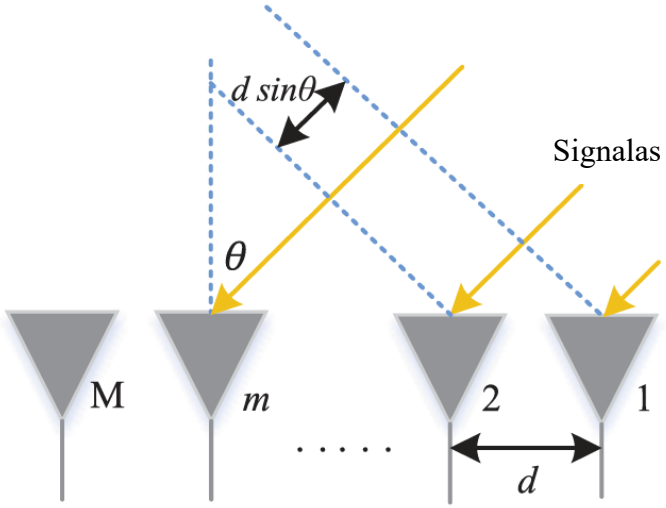
Spektro stebėjimo metu svarbus parametras yra dažninė skiriamoji geba (angl. *resolution bandwidth*), kuri apibrėžia sistemos gebėjimą atskirti arti esančius signalus dažnių spektre. Taip pat aptikimo kokybei įtakos turi skenavimo greitis ir duomenų perdavimo pajėgumai, nes didelis duomenų kiekis gali lemti dalies signalų praradimą [11].

Dar vienas svarbus aspektas yra tinkamas aplinkos triukšmo lygio nustatymas. Netikslus triukšmo įvertinimas gali lemti klaidingus aptikimus arba signalo praleidimą. Vienas iš siūlomų metodų yra triukšmo lygio nustatymas naudojant histogramų analizę ir tikimybinės tankio funkcijos (ang. probability distribution function) įvertinimą, leidžiantį parinkti tinkamą slenkstinę reikšmę [11].

Siekiant nustatyti kryptį į signalą, kai naudojamas FHSS komunikacijos metodas, taikomas toks algoritmas: pirmiausia nustatoma, ar signalas yra drono valdymo signalas; tuomet išskiriami valdymo signalo požymiai, tokie kaip pulso trukmė ir dažnių juosta. Valdymo signalas iškerpamas iš viso įrašo ir sujungiamas į vieną, taip sukuriant ekvivalentišką valdymo signalą. Toliau atliekama signalo analizė krypties nustatymui naudojant MUSIC arba Root-MUSIC algoritmus. Fazės pagrindu veikiantys metodai, tokie kaip MUSIC, leidžia pasiekti didesnį krypties nustatymo tikslumą nei amplitudiniai metodai.

Šokinėjimo sekai nustatyti ir atskirti ją nuo triukšmo naudojama ciklostatinė analizė (angl. cyclostationary analysis). Signalo reikšmės pakeliamos kvadratu ir apskaičiuojama autokoreliacijos funkcija. Jei signalas yra periodinis, tai atsispindi autokoreliacijos funkcijoje. Autokoreliacijos Furjė transformacija leidžia nustatyti šokinėjimo per dažnius dažnį. Drono šokinėjimo dažnis paprastai yra apie 100–200 Hz, tuo tarpu Bluetooth technologijoje jis siekia apie 1600 Hz. Todėl 100–200 Hz dažniu kintantis signalas gali būti priskiriamas drono valdymo signalui [12].

Krypčiai į droną nustatyti naudojamas vienodas linijinis antenų masyvas (angl. *uniform linear array*, ULA) (**9 pav.**) [12].



9 pav. Vienodo linijinio antenų masyvo schema [12, p. 4]

Papildomas kelias, kurį nukeliauja signalas nuo pirmos antenos:

$$s = d \cdot \sin(\theta) \tag{2}$$

Laikas reikalingas papildomam atstumui įveikti:

$$\tau = \frac{(m-1) \cdot d \cdot \sin(\theta)}{c} \tag{3}$$

Priimtas m elemento signalas gali būti apibūdintas:

$$y_m(t) = e^{-j\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} d \cdot (m-1) \cdot \sin(\theta)} \cdot x(t) \tag{4}$$

Kai antenoje yra M elementų, priimančių signalą:

$$y(t) = A(\theta) \cdot x(t) + n(t) \tag{5}$$

$y(t) \epsilon C^{M \times 1}$ – t laiko momentu priimtas vektorius;

$A(\theta) = [a(\theta_1), \cdots, a(\theta_P)]$: krypties matrica; $a(\theta) = [1, e^{-j\frac{2\pi d}{x} sin\theta}, \dots, e^{-j\frac{2\pi d}{x}(M-1) sin\theta}]^T$ (6)

$x(t)$ – signalas

$n(t)$ – triukšmo signalas.

1.2.1.2. Pasyvaus radaro principu veikiantis dronų aptikimo metodas

Dronų aptikimas naudojant pasyvų valdymo ir vaizdo signalų stebėjimą leidžia nustatyti drono buvimą esant pasyviam priėmimo režimui. Tačiau tokie metodai turi apribojimų, nes dronai gali veikti autonominiu režimu, taip pat egzistuoja dronai, kurių valdymo ir vaizdo signalai perduodami optinio pluošto ryšiu. Tokiais atvejais dronas ir valdymo pultas neskleidžia radijo dažnių signalų, todėl tradiciniai RF signalo aptikimo pagrindu veikiantys metodai tampa neefektyvūs.

Dėl šios priežasties nagrinėjami pasyvaus radaro principu veikiantys dronų aptikimo metodai, kuriuose išnaudojami aplinkoje jau egzistuojantys radijo signalų šaltiniai, tokie kaip televizijos, radijo transliavimo ar mobiliojo ryšio siųstuvai. Tokios sistemos leidžia aptikti dronus analizuojant šių signalų atspindžius nuo objekto, nereikalaujant aktyvaus signalo siuntimo.

Pasyvaus radaro sistemos, naudojančios DVB-T2 signalus, gali būti efektyviai taikomos mažų bepiločių orlaivių aptikimui. Tokios sistemos paprastai susideda iš dviejų priėmimo kanalų: referencinio kanalo, kuris priima tiesioginį signalą iš siųstuvo, ir stebėjimo kanalo, kuris fiksuoja nuo objektų atsispindėjusius signalus. Vienas iš pagrindinių iššūkių yra stipraus tiesioginio signalo komponento pašalinimas iš stebėjimo kanalo, nes jis gali maskuoti silpnus nuo drono atsispindėjusius signalus, todėl taikomi adaptaciniai filtravimo metodai [13].

Drono aptikimas atliekamas sudarant nuotolio–Doplerio (angl. range-Doppler) matricą, kuri leidžia nustatyti objekto atstumą ir greitį. Galutinis aptikimas vykdomas naudojant CFAR detektorių, leidžiantį palaikyti pastovią klaidingo aptikimo tikimybę. Eksperimentų metu naudojant DVB-T2 signalą su 778 MHz centriniu dažniu buvo aptiktas „DJI Inspire 1“ dronas. Atstumas iki siųstuvo siekė apie 38,4 km, siųstuvo galia buvo 600 W, o naudojamų antenų stiprinimas – apie 10–12 dBi. Dronas buvo aptiktas maždaug 1 km atstumu, o maksimalus stebėjimo nuotolis siekė apie 1,5 km [13].

Be to, nustatyta, kad drono sraigtų sukelti mikro-Doplerio efektai yra matomi nuotolio–Doplerio matricoje, todėl gali būti naudojami objekto identifikavimui [13].

Kadangi nedidelių dronų ir paukščių radaro atspindžiai yra panašūs, jų atskyrimui naudojamas mikro-Doplerio efekto analizės metodas. Mikro-Doplerio efektas atsiranda dėl besisukančių drono propelerių, kurie sukelia papildomus dažnio poslinkius, vadinamus mikro lygmens Doplerio komponentais. Šie komponentai leidžia identifikuoti objekto judėjimo pobūdį ir atskirti dirbtinius objektus nuo natūralių, tokių kaip paukščiai.

Eksperimentiniuose tyrimuose naudota kelių antenų sistema: kelios antenos buvo skirtos atspindėtam signalui iš drono priimti, o viena antena – tiesioginiam signalui iš signalo šaltinio fiksuoti. Gauti signalai buvo skaitmeninami ir apdorojami, taikant intensyvų tiesioginio signalo bei triukšmo (angl. clutter) slopinimą, siekiant išryškinti silpnus mikro-Doplerio komponentus [14].

Po signalo išvalymo atliekama nuotolio–Doplerio analizė ir objekto aptikimas, dažniausiai naudojant CFAR algoritmą. Nustačius objekto padėtį, iš signalo pašalinamas pagrindinis (korpuso) atspindys, o likęs signalas analizuojamas mikro-Doplerio spektro srityje. Tokia analizė leidžia nustatyti propelerių sukimosi dažnius ir jų spektrines charakteristikas [14].

Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad skirtingi objektai turi skirtingas mikro-Doplerio charakteristikas: dronai pasižymi sudėtingu spektru dėl kelių rotorių su skirtingais sukimosi greičiais,

paukščiai – žemo dažnio komponentais, susijusiais su sparnų mostais, o transporto priemonės dažniausiai turi tik vieną ryškų Doplerio komponentą be mikro-Doplerio struktūros [14].

Remiantis atliktais bandymais, naudojant DVB-T pagrindu veikiančią pasyvaus radaro sistemą, pavyko sėkmingai aptikti ir atskirti dronus, paukščius bei transporto priemones iki maždaug 5 km atstumu. Šis metodas laikomas perspektyviu tolimesniam vystymui, ypač derinant mikro-Doplerio analizę su pažangiais klasifikavimo algoritmais.

Televizijos signalai yra stiprus elektromagnetinių bangų šaltinis, tačiau jų patikimumas yra ribotas, nes sutrikus elektros energijos tiekimui gali būti prarandamas svarbus pasyvaus radaro sistemos elementas. Dėl šios priežasties Europoje pradėta nagrinėti atsparaus energijos tiekimo sutrikimams LTE450 tinklo panaudojimo galimybė kaip nebendradarbiaujančio apšvietimo šaltinio pasyvaus radaro sistemose. LTE450 tinklas veikia 450 MHz dažnių juostoje ir yra projektuojamas taip, kad išliktų funkcionalus net elektros tiekimo sutrikimų metu, todėl laikomas patikimesniu sprendimu kritinės infrastruktūros apsaugai [15].

Eksperimentiniuose tyrimuose pasyvaus radaro sistema buvo realizuota naudojant SDR imtuvą „USRP X310“ su keliais priėmimo kanalais. Vienas kanalas skirtas tiesioginiam signalui iš LTE bazinės stoties priimti (referencinis kanalas), o kitas – nuo taikinio atsispindėjusiam signalui fiksuoti (stebėjimo kanalas). Signalo apdorojimas apima tiesioginio signalo ir stacionaraus triukšmo slopinimą, dažnai naudojant tokius metodus kaip vėlinimo linijos filtrai [15].

Toliau atliekamas nuotolio–Doplerio apdorojimas, taikant dvimačius FFT metodus, ir objektų aptikimas naudojant CFAR detektorių, kuris leidžia nustatyti slenkstinę reikšmę pagal pasirinktą klaidingo aptikimo tikimybę. Eksperimente naudotas „DJI Matrice M210“ dronas, o rezultatai parodė, kad esant $P_{fa} = 0{,}01$ klaidingo aptikimo tikimybei, dronas gali būti patikimai aptiktas iki maždaug 2,7 km bistatinio nuotolio [15].

Papildomai buvo ištirtas antenų poliarizacijos poveikis. Nustatyta, kad horizontaliai poliarizuotos antenos suteikia maždaug 10 dB didesnį taikinio atspindžio signalą nei vertikaliai poliarizuotos, nors dalis skirtumo gali būti susijusi su skirtingu antenų stiprinimu. Tyrime naudotos tiek logoperiodinės, tiek mikrojuostinės (angl. patch) antenos.

Apibendrinant, LTE450 tinklas laikomas perspektyviu ir patikimesniu apšvietimo šaltiniu pasyvaus radaro sistemose, ypač kritinės infrastruktūros apsaugos kontekste, nes užtikrina didesnį veikimo patikimumą ekstremaliomis sąlygomis ir leidžia efektyviai aptikti dronus be aktyvaus signalo siuntimo.

5G ryšio tinklai taip pat nagrinėjami kaip galimas pasyvaus radaro apšvietimo šaltinis, pasižymintis dideliu signalo juostos pločiu ir tankiu bazinių stočių išdėstymu miesto aplinkoje. 5G signalai, pagrįsti OFDM (angl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ortogonalus dažnio dalijimo multipleksavimas) moduliacija, leidžia pasiekti aukštą nuotolio skiriamąją gebą (apie 7,8 m), tačiau jų panaudojimą apsunkina dinaminis tinklo resursų paskirstymas, priklausantis nuo duomenų srauto. Dėl šios priežasties ne visi signalo intervalai yra tinkami radariniam apdorojimui. Siekiant išspręsti šią problemą, siūlomas metodas, pagrįstas Rényi entropijos skaičiavimu, leidžiantis automatiškai nustatyti laiko momentus, kai signalas turi pakankamą informacinį turinį ir gali būti naudojamas aptikimui. Signalo apdorojimo grandinė apima sinchronizaciją laiko ir dažnio srityse, aukštynkrypčio ryšio signalo pašalinimą, tinkamų signalų segmentų atrinkimą, CAF skaičiavimą ir objektų aptikimą

naudojant CFAR metodą. Eksperimentiniai rezultatai, gauti realiame 5G tinkle, parodė, kad dronas gali būti aptiktas ir jo parametrai nustatyti, o rezultatai sutampa su GPS duomenimis [16]

Skirtingi pasyvaus radaro apšvietimo šaltiniai pasižymi nevienodomis charakteristikomis, turinčiomis tiesioginę įtaką dronų aptikimo galimybėms. DVB-T signalai pasižymi didele galia ir plačiu padengimu, todėl leidžia pasiekti didelius aptikimo nuotolius (iki kelių kilometrų), tačiau yra priklausomi nuo infrastruktūros veikimo stabilumo. LTE450 tinklas, veikiantis žemesniame dažnių ruože, užtikrina didesnį patikimumą ir atsparumą energijos tiekimo sutrikimams, todėl yra tinkamesnis kritinės infrastruktūros apsaugai, išlaikant panašų aptikimo nuotolį (apie 2–3 km). Tuo tarpu 5G signalai pasižymi dideliu dažnių juostos pločiu ir leidžia pasiekti aukštą nuotolio skiriamąją gebą, tačiau jų efektyvumas priklauso nuo tinklo apkrovos, nes signalo struktūra yra kintanti. Dėl šios priežasties 5G pagrindu veikiančios sistemos reikalauja papildomų adaptacinių metodų, tokių kaip entropija pagrįstas signalų parinkimas, ir dažniausiai pasižymi mažesniu aptikimo nuotoliu. Taigi, DVB-T ir LTE450 signalai yra tinkamesni ilgesnio nuotolio aptikimui, o 5G signalai – aukštos nuotolio skiriamosios gebos, tačiau riboto nuotolio sistemoms.

1.2.2. Aktyvūs dronų aptikimo metodai

Pasyvus dronų aptikimas, kai naudojama civilinė infrastruktūra kaip elektromagnetinių bangų šaltinis, yra tinkamas taikos metu, tačiau karinio konflikto metu tokia infrastruktūra gali būti neveiksni arba sąmoningai išjungta. Dėl šios priežasties tokiais atvejais dronų aptikimui būtina taikyti aktyvius aptikimo metodus, kurie nepriklauso nuo išorinių signalų šaltinių ir gali veikti autonomiškai.

Aktyvūs dronų aptikimo metodai grindžiami elektromagnetinių bangų spinduliavimu ir jų atspindžių nuo objektų analize. Skirtingai nei pasyvaus radaro sistemos, aktyvūs metodai naudoja nuosavą siųstuvą, todėl leidžia tiesiogiai valdyti signalo parametrus, tokius kaip dažnis, galia, moduliacija ir bangos forma. Tai užtikrina stabilesnį ir patikimesnį aptikimo procesą įvairiomis aplinkos sąlygomis.

Pagrindinis aktyvių radarų veikimo principas yra siunčiamo signalo sklidimas link taikinio ir nuo jo atsispindėjusio signalo priėmimas. Išmatuojant signalo sklidimo laiką nustatomas atstumas iki objekto, o Doplerio dažnio poslinkis leidžia įvertinti objekto greitį. Naudojant antenų masyvus ir kampo nustatymo metodus galima papildomai nustatyti objekto kryptį.

Radijo dažnių spektras, naudojamas radarų sistemose, skirstomas į standartines dažnių juostas: L (1–2 GHz), S (2–4 GHz), C (4–8 GHz), X (8–12 GHz), Ku (12–18 GHz), K (18–27 GHz), Ka (27–40 GHz), Q (40–50 GHz), V (50–80 GHz) ir W (80–90 GHz). Skirtingos dažnių juostos pasižymi skirtingomis sklidimo ir skiriamosios gebos savybėmis: žemesni dažniai (pvz., L ir S juostos) užtikrina didesnį aptikimo nuotolį ir geresnį signalo sklidimą, tuo tarpu aukštesni dažniai (pvz., X, Ku, Ka juostos) leidžia pasiekti didesnę skiriamąją gebą, tačiau yra jautresni slopinimui ir atmosferos poveikiui.

Aktyvūs dronų aptikimo metodai pasižymi dideliu aptikimo nuotoliu ir nepriklausomumu nuo išorinių signalų, tačiau turi ir trūkumų. Tokios sistemos reikalauja didesnių energijos sąnaudų, gali būti aptinkamos priešo elektroninės žvalgybos priemonėmis, taip pat gali sukelti elektromagnetinius trikdžius kitoms sistemoms. Be to, mažų dronų aptikimas išlieka sudėtingas dėl jų mažo radarinio sklaidos ploto (angl. radar cross section, RCS), žemo skrydžio aukščio ir galimų daugiakelių atspindžių.

1.2.2.1. Egzistuojančių technologijų pritaikymas aktyviam dronų aptikimui

Aktyvių dronų aptikimo sistemų kūrimas gali būti pagreitintas pritaikant jau egzistuojančias technologijas, sukurtas kitoms pramonės sritims. Viena iš tokių sričių yra automobilių pramonė, kur radarai plačiai naudojami atstumo nustatymui parkavimo sistemose bei pažangiose vairuotojo pagalbos sistemose. Tokie radarai pasižymi nedideliais matmenimis, maža kaina ir dideliu integracijos lygiu, todėl jų pritaikymas dronų aptikimui būtų ekonomiškai patrauklus sprendimas.

Automobiliniuose radaruose dažniausiai naudojami FMCW (angl. Frequency-Modulated Continuous Wave) principu veikiantys jutikliai, dirbantys milimetrinių bangų diapazone (76–81 GHz). Tokie radarai leidžia vienu metu nustatyti objekto atstumą ir greitį, taikant nuotolio–Doplerio analizę ir CFAR detektorius. Eksperimentiniuose tyrimuose naudojant „Texas Instruments“ AWR1843 Boost radarą buvo sėkmingai aptiktas „DJI Matrice 100“ dronas, kurio radarinis sklaidos plotas yra labai mažas (apie −20 dBsm , priklausomai nuo orientacijos). Didžiausias aptikimo nuotolis siekė apie 40 m, o tuo pačiu buvo nustatomi ir drono judėjimo parametrai. Be aptikimo, tokie radarai leidžia analizuoti mikro-Doplerio efektą, atsirandantį dėl besisukančių propelerių, kuris gali būti naudojamas dronų klasifikavimui ir atskyrimui nuo kitų objektų, pavyzdžiui, paukščių ar foninio triukšmo. Tačiau, nepaisant šių privalumų, automobilinių radarų taikymas dronų aptikimui turi reikšmingų apribojimų.

Vienas pagrindinių trūkumų yra maža siųstuvo galia (apie 16 mW), dėl kurios ribojamas aptikimo nuotolis. Be to, tokie radarai dažniausiai neturi mechaninio ar elektroninio skenavimo galimybių krypties ir aukščio plokštumose, todėl aprėpiama teritorija yra ribota. Kaip nurodyta eksperimentiniuose rezultatuose, aptikimas apsiriboja artimais atstumais, o didesniam nuotoliui reikalingi galingesni ir sudėtingesni radarai [17].

Papildomai svarbu paminėti, kad aukštų dažnių naudojimas riboja tokių sistemų realizavimą naudojant standartines SDR platformas dėl aukštų darbo dažnių ir reikalaujamos RF įrangos sudėtingumo. Automobiliniuose radaruose naudojamos dažnių juostos taip pat skiriasi priklausomai nuo regiono: JAV leidžiama naudoti apie 24 GHz (22–29 GHz) juostą, o Europoje standartizuota 79 GHz dažnių juosta, kuri užtikrina didesnę skiriamąją gebą, tačiau didesnį signalo slopinimą aplinkoje [18].

Apibendrinant galima teigti, kad didelis veikimo dažnis (76–81 GHz) leidžia pasiekti aukštą nuotolio skiriamąją gebą, tačiau tuo pačiu didina signalo slopinimą ir riboja aptikimo nuotolį. Taip pat automobilinių radarų technologija yra tinkama trumpų nuotolių dronų aptikimui ir gali būti naudojama kaip nebrangus sprendimas lokalioms apsaugos sistemoms, tačiau dėl riboto veikimo nuotolio ir aprėpties nėra pakankama didelio masto stebėjimo ar ankstyvo aptikimo sistemoms.

1.2.2.2. Specializuoti radarai dronų aptikimui

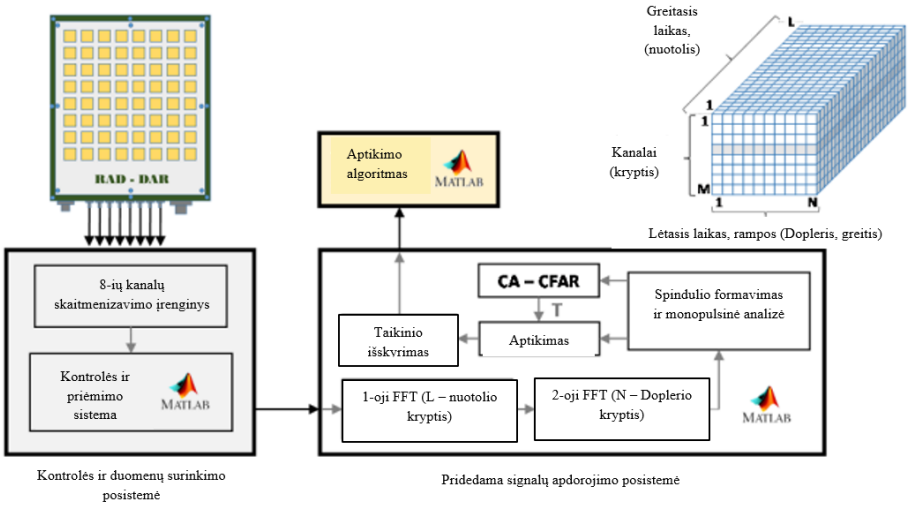
Specializuoti radarai, skirti dronų aptikimui, yra kuriami siekiant optimizuoti parametrus mažų bepiločių orlaivių aptikimui. Viena iš tokių sistemų yra demonstracinė radarų platforma „RAD-DAR“ (**10 pav.**), veikianti FMCW režimu X dažnių juostoje (8,75 GHz) .

Sistema naudoja iki 500 MHz dažnių juostą, o siųstuvo signalas stiprinamas iki 5 W galios ir išspinduliuojamas plataus spindulio mikrojuosteline antena. Priėmimo dalyje naudojamas 8 elementų

mikrojuostelinis antenų masyvas, leidžiantis taikyti skaitmeninį spindulio formavimą (angl. beamforming) ir suformuoti kelis kryptinius spindulius kampų intervale nuo −40° iki +40° .

Sistema veikia nuolatinio stebėjimo principu (angl. persistent radar arba ubiquitous radar), kai visas stebimas plotas nuolat apšviečiamas plačiu siųstuvo spinduliu, o kryptinė analizė atliekama priėmimo pusėje naudojant skaitmeninį spindulio formavimą. Toks metodas leidžia pasiekti gerą kompromisą tarp stebėjimo trukmės (angl. dwell time) ir atnaujinimo dažnio, tai yra svarbu aptinkant mažo RCS ir lėtai judančius taikinius, tokius kaip dronai.

Signalų apdorojimas atliekamas formuojant trimatį duomenų kubą (nuotolis–Dopleris–kampas), taikant dvimatę greitąją Furjė transformaciją (2D FFT), spindulio formavimą bei monopulsinę krypties nustatymo techniką. Monopulsinė analizė leidžia pagerinti krypties nustatymo tikslumą, lyginant sumos ir skirtumo signalus [19].



10 pav. RAD-DAR sistemos blokinė schema [19, p. 1]

Naudojant 200 MHz dažnių juostą pasiekiama nuotolio skiriamoji geba yra apie 0,878 m .
Signalo aptikimui naudojamas CA-CFAR detektorius, leidžiantis adaptuoti slenkstinę vertę pagal triukšmo lygį ir palaikyti pastovią klaidingo aptikimo tikimybę. Eksperimentuose parodyta, kad esant $P_{fa} = 10^{-3}$, aptikimo tikimybė gali viršyti 0,7, dronui esant iki 2 km atstumu [19].

Kituose eksperimentiniuose rezultatuose pateikiami duomenys rodo, kad sistema gali aptikti ir sekti „DJI Phantom 4“ droną iki maždaug 2 km atstumu, o palankiomis sąlygomis – iki 3,2 km. Taip pat nustatyta, kad drono radarinis sklaidos plotas yra apie 0,01–0,02 m² (≈ −20 dBsm), o jo statistinės savybės atitinka Sverlingo 1 modelį. Tai rodo, kad drono atspindžiai pasižymi dideliu kintamumu, kas apsunkina stabilų aptikimą ir reikalauja adaptacinių aptikimo metodų.
Matavimų tikslumas buvo patvirtintas lyginant radaro duomenis su GPS duomenimis: greičio vidutinė kvadratinė paklaida siekė apie 0,2 km/h, o krypties standartinis nuokrypis – apie 0,7° . Tokie rezultatai rodo aukštą sistemos gebėjimą tiksliai nustatyti taikinio judėjimo parametrus. Papildomai pažymėtina, kad sistema generuoja labai didelį duomenų srautą (apie 3 Gbps), todėl realaus laiko signalų apdorojimas išlieka sudėtingas techninis uždavinys [20].

Apibendrinant galima teigti, kad specializuotos radarų sistemos, tokios kaip „RAD-DAR“, pasižymi dideliu potencialu dronų aptikimo srityje, nes leidžia efektyviai aptikti mažo radarinio sklaidos ploto

taikinius, užtikrina aukštą nuotolio ir greičio nustatymo tikslumą bei suteikia galimybę taikyti pažangius signalų apdorojimo metodus. Naudojant 200 MHz dažnių juostą pasiekiama nuotolio skiriamoji geba atitinka $\Delta R \approx c/(2B)$, kas šiuo atveju sudaro apie 0,75–0,9 m.

1.2.2.3. L bangų diapazono aktyvus radaras

L bangos ilgio aktyvaus radaro realizacijai pasirinktas žemos kainos sprendimas, naudojant „Analog Devices“ ADALM-PLUTO SDR įrenginį, asmeninį kompiuterį signalų apdorojimui ir dvi kryptines antenas, pagamintas iš cilindrinių metalinių skardinių (angl. *cantennas*). Tokia sistema leidžia įgyvendinti FMCW radaro principą naudojant minimalius aparatinės įrangos resursus.

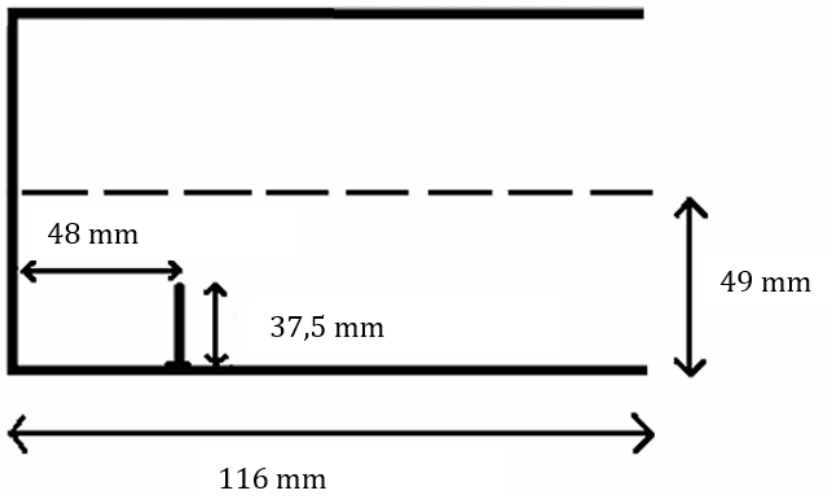
Siekiant išvengti trikdžių 2,4 GHz dažnių juostoje, eksperimento metu pasirinktas 2 GHz dažnių juosta. Nors ADALM-PLUTO SDR teoriškai palaiko iki 56 MHz dažnių juostą, praktikoje FMCW radaro realizacijai buvo naudojama tik 2 MHz juosta dėl realaus laiko dečirpavimo (angl. *dechirping*) ir USB sąsajos duomenų perdavimo apribojimų. Dėl šių apribojimų maksimalus mėginių ėmimo dažnis buvo nustatytas 2 MSPS, kas tiesiogiai riboja pasiekiamą nuotolio skiriamąją gebą.

Teoriškai nuotolio skiriamoji geba apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \tag{7}$$

esant 2 MHz juostai ji siekia apie 75 m. Taikant signalų apdorojimo metodus, tokius kaip nulinių reikšmių pridėjimas (angl. *zero-padding*) ir langavimas, FFT dažninė skiriamoji geba gali būti padidinta, leidžiant tiksliau nustatyti signalo maksimumo padėtį. Tokiu būdu buvo pagerintas signalo maksimumo nustatymo tikslumas (interpolacija), tačiau reali nuotolio skiriamoji geba išlieka apribota signalo juostos pločiu.

Antenos modelis pateikiamas **11 pav.** Antenos pusės galios spindulio plotis buvo 95˚



11 pav. Antenos pjūvis [21, p. 3]

FMCW signalui panaudotas pjūklo tipo čirpo signalas. Atstumas iki objekto apskaičiuojamas

$$R = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot S} \tag{8}$$

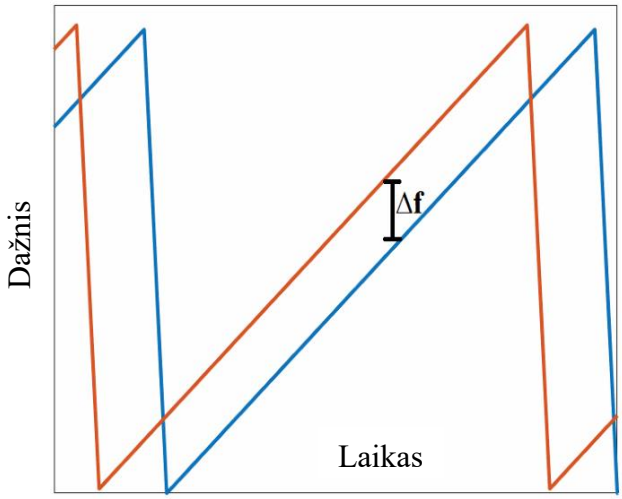
$$S = \frac{B_c}{T_c} \quad (9)$$

S – dažnio statumas.

B_c – čirpo juostos plotis

T_c – čirpo trukmė

Δf – mušimo (angl. beat frequency) dažnis



12 pav. FMCW išspinduliuotas ir priimtas signalai [21, p. 1]

Apibendrinant galima teigti, kad naudojant žemos kainos SDR įrangą galima realizuoti veikiančią FMCW radaro sistemą, tačiau jos veikimas yra ribojamas siaura dažnių juosta ir duomenų perdavimo apribojimais, todėl tokios sistemos labiau tinkamos trumpų nuotolių ir vieno taikinio aptikimo scenarijams ribotuose nuotoliuose[21].

1.2.2.4. S bangų diapazono aktyvus radaras

S bangos ilgio radarams taip pat plačiai naudojamos SDR technologijos, tokios kaip „Analog Devices“ ADALM-PLUTO bei aukštesnės klasės USRP B210 įrenginiai, leidžiantys pasiekti iki 28 MHz dažnių juostą. Signalų generavimui ir apdorojimui dažnai naudojama „GNU Radio“ programinė įranga, leidžianti lanksčiai realizuoti FMCW ar kitų tipų radarų sistemas.

Didžiausias aptinkamas greitis priklauso nuo Doplerio dažnio ribos ir gali būti apskaičiuojamas:

$$v_{max} = \frac{\lambda \cdot PRF}{4} \quad (10)$$

čia:

- PRF– pulso pasikartojimo dažnis (angl. Pulse Repetition Frequency),
- λ– bangos ilgis.

Esant $PRF = 2200$Hz ir centriniam dažniui 5,5 GHz ($\lambda \approx 0{,}0545$ m), maksimalus aptinkamas greitis siekia apie 30 m/s.

Greičio skiriamoji geba apskaičiuojama:

$$\Delta v = \frac{\lambda \cdot PPD}{2 \cdot N_C} \quad (11)$$

čia N_C– čirpų skaičius. Naudojant $N_C = 50$, pasiekiama apie 1,2 m/s greičio skiriamoji geba [22].

Vienas pagrindinių SDR sistemų trūkumų yra ribota dažnių juosta. Esant 28 MHz juostai, pasiekiama apie 5,35 m nuotolio skiriamoji geba. Taip pat svarbus veiksnys yra dažnių generatoriaus (angl. local oscillator, LO) stabilumas – jo nestabilumas sukelia fazės klaidas, kurios tiesiogiai veikia Doplerio dažnio ir greičio skaičiavimų tikslumą.

Siekiant pagerinti signalo ir triukšmo santykį, dažnai taikomas koherentinis kelių čirpų sumavimas. Pavyzdžiui, sumuojant 50 čirpų, pagerinamas signalo ir triukšmo santykis.

Objekto greitis nustatomas pagal Doplerio dažnį:

$$v = \frac{\lambda}{2} f_D \quad (12)$$

čia: f_D– Doplerio dažnis. Signalų apdorojimui naudojamas Hanning langas, mažinantis spektrinį persidengimą [22].

MIMO (Multiple Input Multiple Output) radarai yra pažangi aktyvių radarų technologija, leidžianti padidinti kampinės skiriamosios gebos tikslumą nedidinant antenos fizinių matmenų. Tokiose sistemose naudojamos kelios siuntimo ir priėmimo antenos, sudarančios virtualų antenų masyvą. Pavyzdžiui, naudojant 2 siuntimo ir 2 priėmimo antenas, sukuriamas virtualus 4 elementų antenų masyvas, leidžiantis tiksliau nustatyti taikinio kryptį.

Kampo skiriamoji geba aprašoma:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (13)$$

čia:

- D– efektyvus antenų masyvo ilgis.

MIMO radaruose dažnai naudojami ortogonalūs signalai, pavyzdžiui, Gauso triukšmo sekos. Tokie signalai pasižymi:

- maža tarpusavio koreliacija,
- sudėtingu aptikimu (mažas aptinkamumas priešininko sistemoms),
- atsparumu trikdžiams.

Priimtas signalas apdorojamas naudojant suderintus filtrus (angl. matched filtering), kurie koreliuoja priimtą signalą su siunčiamu. Tai leidžia išskirti silpnus atspindžius iš triukšmo. Doplerio dažnis nustatomas atliekant FFT lėtojo laiko ašyje kiekvienam nuotolio langeliui, taip sudarant atstumo–greičio (range–Doppler) žemėlapį.

Svarbūs praktiniai aspektai:

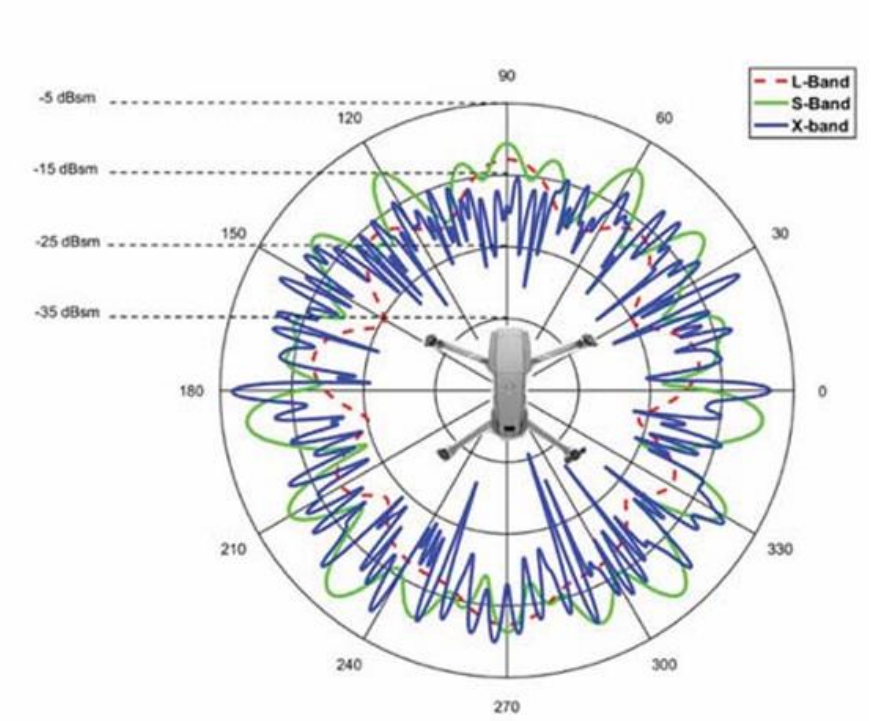
- Reikalinga labai gera siųstuvo ir imtuvo sinchronizacija;

- Vietinio osciliatoriaus stabilumas yra kritiškai svarbus;
- Didelis duomenų srautas (iki šimtų MB/s SDR sistemose) riboja realaus laiko apdorojimą.

MIMO leidžia pasiekti:

- Geresnę krypties skiriamąją gebą;
- Ilgesnį taikinio stebėjimo laiką;
- Geresnį Doplerio tikslumą.

Atlikta drono radaro atspindžio ploto analizė skirtingose dažnių juostose (L, S ir X), kurios rezultatai pateikiami **13 pav.** Analizė rodo, kad S bangų diapazone drono efektyvus atspindžio plotas yra didžiausias (apie −14 dBsm), lyginant su L (apie −19 dBsm) ir X (apie −17 dBsm) bangų diapazonais. Tai reiškia, kad S bangų radarai yra efektyvesni mažų bepiločių orlaivių aptikimui, nes didesnis radaro atspindžio plotas lemia stipresnį atspindėtą signalą ir geresnį signalo ir triukšmo santykį. Taip pat matyti, kad atspindys stipriai priklauso nuo stebėjimo kampo, todėl dronų aptikimas priklauso nuo atspindžio kampo, ypač mažo radaro atspindžio ploto taikiniams [23]



13 pav. FMCW išspinduliuotas ir priimtas signalai [21, p. 1]

Mažos kainos SDR pagrindu sukurtos dronų aptikimo sistemos pasižymi ribotu momentiniu dažnių juostos pločiu, kuris dažnai neviršija 40–60 MHz dėl USB sąsajos duomenų perdavimo apribojimų. Dėl to realiu laiku apdorojant plačiajuosčius signalus susiduriama su dideliais duomenų srautais, siekiančiais šimtus MB/s. Siekiant sumažinti skaičiavimo apkrovą ir duomenų perdavimo poreikius, dalis signalų apdorojimo, pavyzdžiui, greitoji Furjė transformacija (FFT) ir pirminis filtravimas, gali būti įgyvendinami FPGA lygiu, taip sumažinant perduodamų duomenų kiekį ir leidžiant efektyviau realizuoti realaus laiko signalų analizę [24].

1.2.2.5. C bangų diapazono aktyvus radaras

Straipsnyje nagrinėjami trys C bangų diapazone veikiantys nuolatinės bangos (CW) radarų tipai: skaitmeninis FMCW, analoginis FMCW ir triukšmo (angl. noise) radaras. Visi trys metodai buvo eksperimentiškai patikrinti realiomis sąlygomis ir parodė gebėjimą aptikti nedidelius bepiločius orlaivius. Skaitmeninis FMCW radaras realizuojamas naudojant SDR platformą, kur signalų maišymas ir tarpinio dažnio (IF) generavimas atliekamas skaitmeniniu būdu. Tokia architektūra leidžia greitai realizuoti prototipus, tačiau reikalauja didelių diskretizavimo dažnių ir pasižymi ribota dinamika dėl ADC skiriamosios gebos. Eksperimentuose naudojant 160 MHz dažnių juostą dronas buvo aptiktas apie 42 m atstumu, esant ~20 dB signalo ir triukšmo santykiui. Analoginis FMCW radaras naudoja analoginį maišytuvą IF signalo generavimui prieš skaitmenizavimą. Tai leidžia sumažinti reikalavimus ADC ir padidinti sistemos dinaminį diapazoną. Eksperimentai parodė, kad naudojant iki 960 MHz dažnių juostą galima pasiekti aukštesnį (~35 dB) signalo ir triukšmo santykį bei geresnį aptikimo efektyvumą, net esant trumpam integravimo laikui. Triukšmo radaras naudoja pseudoatsitiktinius signalus, o aptikimas atliekamas taikant koreliacijos funkciją, leidžiančią nustatyti taikinio nuotolį ir greitį. Šio tipo radaras pasižymi geru triukšmo ir foninių atspindžių slopinimu bei atsparumu trikdžiams, tačiau reikalauja didelės skaičiavimo galios ir aukštos duomenų perdavimo spartos. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad analoginis FMCW radaras yra tinkamiausias realaus laiko dronų aptikimui dėl geresnio signalo ir triukšmo santykio bei trumpesnio integravimo laiko. Triukšmo radarai pasižymi žemu signalų tarpusavio koreliacijos lygiu, todėl yra sunkiau aptinkami priešininko elektroninės žvalgybos priemonėmis [25].

Papildomai dronų lokalizavimui gali būti taikomi krypties nustatymo metodai, naudojant kryptinių antenų masyvus. Šiuose metoduose analizė atliekama remiantis skirtingų antenų priimto signalo galios skirtumais, kurie priklauso nuo antenų stiprinimo charakteristikų ir signalo atėjimo kampo. Nustatant kryptį ieškoma kampo, kuriam esant skirtumas tarp teorinio antenų stiprinimo modelio ir išmatuotų reikšmių yra mažiausias. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad toks metodas leidžia pakankamai tiksliai nustatyti drono kryptį, tačiau nustatymo tikslumas priklauso nuo antenų kryptingumo, jų išdėstymo ir signalo bei triukšmo santykio [26].

1.2.2.6. X bangų diapazono aktyvus radaras

X bangos diapazone (8–12 GHz) veikiantys radarai pasižymi aukšta nuotolio skiriamąja geba dėl galimybės naudoti plačią dažnių juostą. Pavyzdžiui, FMCW radaras, realizuotas naudojant SDR platformą ir analoginį RF priekinį modulį, gali pasiekti didesnę nei 1 GHz dažnių juostą, todėl galima tiksliai nustatyti taikinio nuotolį. Tokiose sistemose nuotolis apskaičiuojamas iš mušimo dažnio, o greitis – iš fazės pokyčių tarp nuoseklių čirpų.

X bangos FMCW radarai dažnai realizuojami naudojant analoginius radijo komponentus (stiprintuvus, filtrus, dažnio daugiklius ir maišytuvus), o SDR naudojamas signalo generavimui ir skaitmenizavimui. Toks sprendimas leidžia išlaikyti sistemos lankstumą ir sumažinti kaštus, tačiau reikalauja sudėtingesnio analoginio projektavimo. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad tokia sistema gali aptikti objektus iki maždaug 0,5 km atstumu, naudojant apie 15 dBm siųstuvo galią ir kryptines antenas.

Papildomai, X bangos radarai plačiai naudojami mikro-Doplerio analizėje, kuri leidžia ne tik aptikti, bet ir klasifikuoti bei identifikuoti mažus dronus. Analizuojant laiko–greičio diagramas galima išskirti

charakteringus požymius, leidžiančius atskirti dronus nuo paukščių bei klasifikuoti skirtingus dronų tipus [27].

Eksperimentai su X bangos CW radaru (apie 9,7 GHz) parodė, kad naudojant mikro-Doplerio požymius ir klasifikavimo algoritmus galima pasiekti labai aukštą aptikimo tikimybę. Pavyzdžiui, naudojant stiprinimo klasifikatorių buvo pasiektas apie 99,8 % aptikimo tikslumas ir klaidingo aptikimo tikimybė apie $5 \cdot 10^{-3}$. Tai rodo, kad X bangos radarai yra ypač tinkami ne tik aptikimui, bet ir aukšto tikslumo taikinių identifikavimui [28].

1.2.2.7. K bangų diapazono aktyvus radaras

K bangos diapazone (~24 GHz) veikiantys radarai yra tinkami labai mažų dronų aptikimui dėl trumpo bangos ilgio, kuris leidžia efektyviau aptikti mažus objektus ir išryškinti jų atspindžio savybes. Tai ypač svarbu nano-dronams, kurių fiziniai matmenys yra labai maži ir kurių aptikimas žemesniuose dažniuose yra sudėtingas. Straipsnyje pateikiamas K bangos FMCW radaro prototipas, veikiantis apie 24 GHz dažnyje. Eksperimentai parodė, kad net labai mažas dronas (apie 3 cm dydžio) gali būti aptiktas maždaug 2,4–2,5 m atstumu, o iš signalo galima išskirti charakteringus mikro-Doplerio požymius, susijusius su besisukančiais propeleriais. Doplerio dažnio komponentai siekia apie 400–600 Hz, o mikro-Doplerio analizė leidžia įvertinti propelerių sukimosi dažnį (~25 000 aps./min.). Svarbu pažymėti, kad didėjant dažniui, nors pagerėja mikro-Doplerio efektų matomumas ir išryškėja mažų objektų atspindžio savybės, tuo pačiu didėja ir signalo slopinimas atmosferoje bei mažėja maksimalus aptikimo nuotolis [29].

Kituose tyrimuose taip pat parodyta, kad K bangos ir dar aukštesnių dažnių radarai leidžia aptikti periodinius drono atspindžio pokyčius, kuriuos sukelia besisukantys propeleriai [30]. Šie pokyčiai matomi tiek atstumo–laiko, tiek atstumo–Doplerio diagramose ir gali būti naudojami ne tik aptikimui, bet ir objekto identifikavimui bei klasifikavimui. Spektrinė analizė leidžia nustatyti propelerių sukimosi greitį, jei naudojamas pakankamai didelis PRF [30].

Apibendrinant pateiktą informaciją galima teigti, kad K bangos radarai yra tinkamiausi trumpų nuotolių, didelio tikslumo aptikimo ir klasifikavimo sistemoms.

1.2.2.8. Dronų aptikimo metodų analizė ir palyginimas

Dronų aptikimui naudojami įvairūs metodai, kuriuos galima suskirstyti į pasyvius ir aktyvius. Pasyvūs metodai remiasi jau egzistuojančių elektromagnetinių signalų (pvz., DVB-T, LTE) atspindžių analize arba drono valdymo signalų stebėjimu. Tokie metodai pasižymi mažomis energijos sąnaudomis ir nepastebimumu, tačiau jų veikimas priklauso nuo išorinės infrastruktūros prieinamumo, todėl jie yra mažiau patikimi karinėse ar trikdžių paveiktose aplinkose.

Aktyvūs radarai yra vienas pagrindinių dronų aptikimo metodų, leidžiantis nepriklausomai aptikti taikinius įvairiomis sąlygomis. Plačiausiai naudojami FMCW radarai, kuriuose taikinio nuotolis nustatomas pagal mušimo dažnį, o greitis – pagal Doplerio dažnį. Taip pat naudojami triukšmo radarai, kuriuose taikinio aptikimas atliekamas taikant suderintą filtrą ir koreliacinę analizę. Tokie radarai pasižymi atsparumu trikdžiams ir mažesniu aptinkamumu priešininko sistemoms, tačiau reikalauja didelės skaičiavimo galios ir duomenų perdavimo spartos.

Papildomai naudojami MIMO radarai, kuriuose kelios siuntimo ir priėmimo antenos sudaro virtualų antenų masyvą. Tai leidžia tiksliau nustatyti taikinio kryptį, pagerinti kampinę skiriamąją gebą ir padidinti aptikimo patikimumą nedidinant fizinių antenos matmenų. Tačiau tokios sistemos yra sudėtingesnės ir reikalauja tikslios kanalų sinchronizacijos.

Apibendrinant galima teigti, kad efektyviausios dronų aptikimo sistemos dažniausiai derina kelis metodus: FMCW radarus nuotolio ir greičio nustatymui, MIMO architektūrą krypties įvertinimui bei mikro-Doplerio analizę taikinių klasifikavimui. Triukšmo radarai gali būti naudojami specializuotose sistemose, kur svarbus atsparumas trikdžiams ir mažas aptinkamumas.

Skirtingų dažnių juostų radarai pasižymi skirtingomis savybėmis, todėl jų tinkamumas dronų aptikimui priklauso nuo taikymo scenarijaus. Žemesnių dažnių (L juosta) radarai užtikrina didelį aptikimo nuotolį ir mažus sklidimo nuostolius, tačiau dėl mažo dronų radaro atspindžio ploto jų aptikimo efektyvumas yra ribotas. S juostos radarai pasižymi geresniu kompromisu tarp nuotolio ir radaro atspindžio ploto, todėl leidžia patikimiau aptikti mažus dronus vidutiniais atstumais. C juostos radarai užtikrina dar didesnę skiriamąją gebą ir pakankamą signalo–triukšmo santykį, o eksperimentai rodo, kad įvairių tipų radarai šiame diapazone gali sėkmingai aptikti dronus realiomis sąlygomis. Aukštesnių dažnių (X ir K juostos) radarai pasižymi didžiausia skiriamąja geba ir ryškiais mikro-Doplerio efektais, leidžiančiais ne tik aptikti, bet ir klasifikuoti taikinius, tačiau jų veikimo nuotolis yra mažesnis dėl didesnių sklidimo nuostolių.

2 lentelė. Skirtingų radarų dažnių juostų palyginimas

Dažnių juosta	Privalumai	Trūkumai	Tinkamumas
L (1–2 GHz)	Didelis aptikimo nuotolis, mažas slopinimas	Mažas dronų radaro atspindys, prasta skiriamoji geba	Ilgo nuotolio aptikimas
S (2–4 GHz)	Geras kompromisas tarp radaro atspindžio ir nuotolio	Vidutinė skiriamoji geba	Universalus aptikimas
C (4–8 GHz)	Gera skiriamoji geba, pakankamas SNR, sėkmingi eksperimentai	Didesni reikalavimai apdorojimui	Optimalus kompromisas (SDR)
X (8–12 GHz)	Aukšta skiriamoji geba, mikro-Doplerio analizė	Didesnis slopinimas, sudėtingesnė įranga	Tikslus sekimas ir klasifikacija
K (24 GHz)	Geresnis mažų objektų aptikimas dėl trumpo bangos ilgio.	Labai mažas nuotolis, didelis slopinimas	Trumpų nuotolių aptikimas

Apibendrinant galima teigti, kad žemesnių dažnių radarai yra tinkamesni ilgų nuotolių aptikimui, aukštesnių – tiksliam identifikavimui, o S ir C juostos sudaro optimalų kompromisą tarp šių savybių. Atsižvelgiant į eksperimentinius rezultatus ir sistemų realizacijos galimybes, C juostos radarai gali būti laikomi praktiškai efektyviausiu pasirinkimu SDR pagrindu veikiančioms sistemoms dėl gero kompromiso tarp skiriamosios gebos, nuotolio ir realizacijos sudėtingumo.

1.2.3. Radijo įrangos parinkimas

Vien SDR technologijos nepakanka, dronų aptikimui reikalinga parinkti radijo įrangą signalo siuntimui ir priėmimui. Toliau aprašoma reikalinga radijo įranga.

1.2.3.1. Drono radaro atspindžio plotas

Radaro atspindžio plotas yra pagrindinis parametras, apibūdinantis objekto gebėjimą atspindėti elektromagnetines bangas. Jis priklauso nuo objekto dydžio, formos, medžiagų, bangos ilgio bei stebėjimo kampo. Mažų bepiločių orlaivių atveju radaro atspindžio ploto reikšmės yra labai mažos, todėl jų aptikimas radarais yra sudėtingas.

Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad tipinių komercinių dronų radaro atspindžio ploto reikšmės yra mažesnės nei 0,2 m², o dažnai siekia apie 0,15–0,21 m² (apie –8 dBsm). Tačiau šios reikšmės nėra pastovios – jos stipriai kinta priklausomai nuo drono orientacijos ir vidinės struktūros. Net esant simetriškai išorinei formai, skirtingas elektronikos komponentų išdėstymas gali sukelti skirtingą atspindžio intensyvumą skirtingais kampais. Skirtingų tipų dronai pasižymi skirtingais radaro atspindžio ploto svyravimo modeliais, todėl universalus vienas modelis (pvz., Swerling modelis) ne visada tiksliai aprašo jų elgseną [31].

Išplėstiniai matavimai 24 GHz dažniu parodė, kad dronų radaro atspindžio plotas pasižymi dideliais svyravimais, kurių diapazonas gali siekti apie 30 dB. Šie svyravimai nėra susiję vien tik su aplinkos poveikiu (pvz., daugkartiniais atspindžiais), bet yra būdingi pačiam objektui ir atsiranda dėl sudėtingos drono konstrukcijos bei besisukančių elementų [32].

Tyrimai taip pat rodo, kad radaro atspindžio plotas stipriai priklauso nuo dažnio ir poliarizacijos. Skirtinguose dažnių diapazonuose tas pats dronas gali turėti skirtingas radaro atspindžio ploto statistines charakteristikas, o skirtingos poliarizacijos (VV, HH, VH, HV) leidžia gauti papildomos informacijos apie objekto struktūrą [33].

Apibendrinant galima teigti, kad mažas ir stipriai kintantis dronų radaro atspindžio plotas yra viena pagrindinių priežasčių, dėl kurių jų aptikimas yra sudėtingas. Dėl šios priežasties būtina taikyti pažangius signalų apdorojimo metodus, tokius kaip CFAR, mikro-Doplerio analizė ir daugiamatė (atstumas–Doplerio pokytis–kryptis) analizė.

Dronų aptikimo efektyvumas stipriai priklauso nuo pasirinktos radaro dažnių juostos, nes ji lemia taikinio radaro atspindžio plotą, signalo slopinimą, skiriamąją gebą ir sistemos realizacijos sudėtingumą. Skirtingų dažnių juostų analizė rodo, kad kiekviena jų pasižymi skirtingais privalumais ir trūkumais.

L bangos diapazone užtikrinamas didelis aptikimo nuotolis dėl mažo signalo slopinimo, tačiau mažų dronų radaro atspindžio plotas šiame diapazone yra labai mažas, todėl aptikimas tampa sudėtingesnis. Tuo tarpu aukštesniuose dažniuose (X ir K juostose) pasiekiama didesnė skiriamoji geba ir ryškesni mikro-Doplerio efektai, tačiau ženkliai sumažėja maksimalus aptikimo nuotolis dėl didesnių sklidimo nuostolių.

S ir C bangos diapazonai pasižymi kompromisinėmis savybėmis. Modeliavimai ir eksperimentiniai rezultatai rodo, kad S bangos diapazone dažnai pasiekiamas geresnis aptikimo efektyvumas nei L ir X juostose, todėl pagerėja aptikimo tikimybė. C bangos diapazone atlikti eksperimentai parodė, kad

skirtingų tipų radarai (skaitmeninis FMCW, analoginis FMCW ir triukšmo radaras) gali sėkmingai aptikti dronus realiomis sąlygomis, užtikrindami pakankamą signalo ir triukšmo santykį bei tinkamą skiriamąją gebą.

1.2.3.2. Atmosferos sąlygų įtaka radaro dažnio parinkimui

Atmosferos sąlygos yra vienas pagrindinių veiksnių, lemiančių radaro dažnio pasirinkimą, nes jos tiesiogiai veikia elektromagnetinių bangų sklidimą, slopinimą ir sistemos veikimo nuotolį. Ypač didelę įtaką daro krituliai, kurių poveikis stiprėja didėjant dažniui.

Žemesniuose dažniuose, tokiuose kaip L ir S bangų diapazonai (iki ~6 GHz), atmosferos slopinimas yra nedidelis. Net esant stipriam lietui slopinimas siekia apie 1 dB/km, todėl šie dažniai yra tinkami ilgo nuotolio aptikimui ir stabiliai veiklai lauko sąlygomis. Dėl šios priežasties S bangos radarai, kurie ankstesniuose skyriuose buvo identifikuoti kaip efektyvūs dronų aptikimui, pasižymi geru kompromisu tarp aptikimo nuotolio ir atsparumo aplinkos sąlygoms.

Didėjant dažniui iki C ir X bangų diapazonų (4–12 GHz), atmosferos poveikis tampa reikšmingesnis. Stipraus lietaus metu slopinimas gali siekti apie 2 dB/km, tačiau šie dažniai vis dar laikomi tinkamais radarų sistemoms, nes suteikia geresnę atstumo ir kampo skiriamąją gebą. Tai paaiškina, kodėl X bangos radarai, tokie kaip „RAD-DAR“ sistema, gali aptikti dronus kelių kilometrų atstumu, išlaikydami pakankamą tikslumą.

Aukštesniuose dažniuose, tokiuose kaip Ku, K ir Ka bangų diapazonai (>12 GHz), atmosferos slopinimas tampa reikšmingu ribojančiu veiksniu. Tyrimai rodo, kad ties 10 GHz stipraus lietaus sąlygomis slopinimas gali siekti apie 3–5 dB/km, o dar aukštesniuose dažniuose jis sparčiai didėja ir gali pasiekti keliasdešimt dB/km esant stipriam lietui [34]. Tokios sąlygos reikšmingai sumažina radaro veikimo nuotolį ir patikimumą.

Milimetrinių bangų diapazone (30–100 GHz), kuris naudojamas automobilių radarams ir kai kurioms aukštos raiškos sistemoms, lietaus poveikis tampa kritinis. Šiuose dažniuose elektromagnetinės bangos intensyviai absorbuojamos ir išsklaidomos lietaus lašų, todėl signalas greitai silpnėja, o maksimalus veikimo nuotolis yra ribotas [35]. Tai paaiškina, kodėl 76–81 GHz automobilių radarai, nors ir pasižymi aukšta skiriamąja geba, yra tinkami tik trumpo nuotolio aptikimui.

Papildomai, atmosferos poveikis priklauso nuo regioninių klimato sąlygų. Pavyzdžiui, atlikti tyrimai rodo, kad 28–94 GHz dažniuose slopinimas gali siekti iki 7–8 dB/km net esant mažai tikimybei (p = 0,01 %), o ekstremaliomis sąlygomis viršyti 15 dB/km ribą, kuri laikoma ryšio nutrūkimo riba [36]. Tai reiškia, kad aukštų dažnių radarai tampa mažiau patikimi kritinėse meteorologinėse situacijose.

Poliarizacija taip pat turi įtakos signalo slopinimui. Tyrimai rodo, kad horizontaliai poliarizuotos bangos patiria didesnį slopinimą nei vertikaliai poliarizuotos, ypač mikrobangų ir milimetrinių bangų diapazonuose [34].

Be lietaus, svarbų vaidmenį taip pat atlieka atmosferos dujų absorbcija, ypač ties 22 GHz (vandens garai) ir 60 GHz (deguonis) dažniais.

Apibendrinant galima teigti, kad dažniai iki 10 GHz yra mažiau jautrūs atmosferos poveikiui ir tinkamesni ilgo nuotolio aptikimui. Tuo tarpu aukštesni dažniai (>10 GHz) leidžia pasiekti geresnę skiriamąją gebą, tačiau jų panaudojimą riboja didėjantis slopinimas dėl lietaus, todėl būtina įvertinti kompromisą tarp skiriamosios gebos ir veikimo nuotolio. Tai svarbu projektuojant radarų sistemas ir parenkant antenų konfigūraciją.

Atsižvelgiant į ankstesniuose skyriuose atliktą skirtingų radarų technologijų analizę, galima teigti, kad optimalus dažnių diapazonas dronų aptikimui dažniausiai yra S, C ir X bangų ruožai. Šie dažniai užtikrina pakankamą aptikimo efektyvumą, pakankamą aptikimo nuotolį ir santykinai mažą atmosferos slopinimą. Tuo tarpu aukštesni dažniai (Ku, K ir Ka) yra tinkamesni trumpesnio nuotolio, didelės raiškos sistemoms, tačiau jų veikimą riboja aplinkos sąlygos.

1.3. Eksperimentinė dalis

Šioje dalyje pateikiami eksperimentinės dalies priemonės metodai ir rezultatai.

1.3.1. Pasyvus aptikimas pagal signalo stiprumą

Krypties nustatymas pagal signalo stiprumą yra vienas iš paprasčiausių radijo krypties nustatymo metodų, naudojamas tiek mėgėjiškose SDR sistemose (pvz., RTL-SDR pagrindu veikiančiose sistemose), tiek profesionaliose krypties nustatymo sistemose, kuriose šis metodas dažnai derinamas su fazės ir interferenciniais metodais.

Eksperimentuose kaip RF signalo šaltinis naudotas „Turnigy 9X“ siųstuvas (**14 pav.**), veikiantis 2,4 GHz ISM dažnių juostoje (2,408–2,475 GHz). Įrenginys naudoja AFHDS 2A protokolą. AFHDS (angl. Automatic Frequency Hopping Digital System) yra skaitmeninis ryšio protokolas, naudojantis dažnių šuoliavimo technologiją (angl. frequency hopping), leidžiančią signalui dinamiškai keisti dažnį ir taip sumažinti trikdžių įtaką bei padidinti ryšio patikimumą. Perdavimo signalas moduliuojamas naudojant Gausinė dažnio poslinkio moduliacija (angl. Gaussian Frequency Shift Keying), o vieno kanalo juostos plotis yra apie 500 kHz. Maksimali siųstuvo galia siekia iki 20 dBm, o imtuvo jautrumas – apie -105 dBm, kas leidžia užtikrinti stabilų ryšį tipinėmis eksploatavimo sąlygomis.

14 pav. „Turnigy“ TGY 9X siųstuvas imtuvas

Eksperimentuose RF signalų registravimui ir analizei naudotas „USRP B210“ SDR įrenginys (**15 pav.**). Šis įrenginys leidžia dirbti plačiame dažnių diapazone (apie 70 MHz – 6 GHz) ir palaiko iki ~56 MHz momentinį dažnių juostos plotį, todėl yra tinkamas 2,4 GHz ISM juostos signalų stebėjimui. „USRP B210“ naudoja 12 bitų analoginį–skaitmeninį keitiklį, leidžiantį užtikrinti pakankamą dinaminį diapazoną signalų analizei. Įrenginys prijungiamas per USB 3.0 sąsają, leidžiančią perduoti didelės apimties IQ duomenis realiu laiku į kompiuterį tolimesniam apdorojimui. Dėl šių savybių „USRP B210“ yra tinkamas pasirinkimas dažnių šuoliavimo signalų ir sudėtingų moduliacijų analizei.

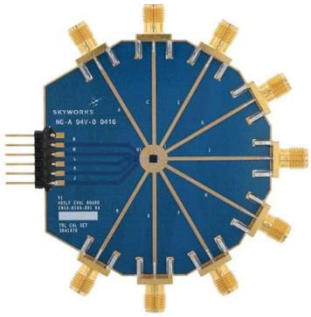
15 pav. „Ettus research“ USRP B210 (https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200-enclosure/)

Eksperimentuose taip pat naudotas „ADALM-PLUTO“ SDR įrenginys (**16 pav.**), skirtas RF signalų generavimui ir priėmimui. Įrenginys veikia maždaug 325 MHz – 3,8 GHz dažnių diapazone (programiškai gali būti išplėstas iki ~6 GHz) ir palaiko iki ~20 MHz stabiliai (teoriškai iki ~56 MHz) momentinį dažnių juostos plotį. „ADALM-PLUTO“ naudoja 12 bitų ADC/DAC keitiklius ir yra prijungiamas per USB2 sąsają, leidžiančią perduoti IQ duomenis į kompiuterį tolimesniam apdorojimui. Dėl paprastos konstrukcijos ir mažos kainos šis SDR įrenginys yra tinkamas bandomiesiems matavimams ir signalų analizei 2,4 GHz ISM juostoje, tačiau jo dažnių juostos plotis ir dinaminis diapazonas yra mažesni nei „USRP B210“.

16 pav. „Analog Devices“ „Adalm Pluto“

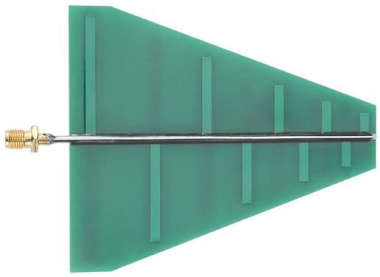
Eksperimentuose taip pat naudota „Skyworks SKY13418-485LF-EVB“ plokštė (**17 pav.**), kuri yra aukšto dažnio RF jungiklis, skirtas signalų maršrutizavimui 2,4 GHz ISM juostoje. Šis komponentas leidžia pasirinkti tarp skirtingų signalų kelių arba antenų, todėl gali būti naudojamas kelių kanalų sistemose, pavyzdžiui, MIMO ar krypties nustatymo užduotyse. RF jungiklio panaudojimas suteikia

galimybę lanksčiai valdyti signalų srautą tarp siųstuvo ir imtuvo grandinių bei optimizuoti eksperimentinę konfigūraciją.



17 pav. „Skyworks“ „SKY13418-485LF-EVB“ radijo jungiklio plokštė

Eksperimentuose taip pat naudota plataus dažnių diapazono logoperiodinė kryptinė antena (**18 pav.**), veikianti maždaug 1,35–9,5 GHz ruože. Tokia antena pasižymi plačia darbine juosta ir kryptine spinduliavimo charakteristika, todėl yra tinkama skirtingų dažnių signalų stebėjimui, į kuria patenka 2,4 GHz ISM juosta. Kryptingumas leidžia sumažinti triukšmo ir nepageidaujamų signalų įtaką bei pagerinti signalo ir triukšmo santykį matavimų metu. Antena prijungta per SMA jungtį prie SDR įrenginių.



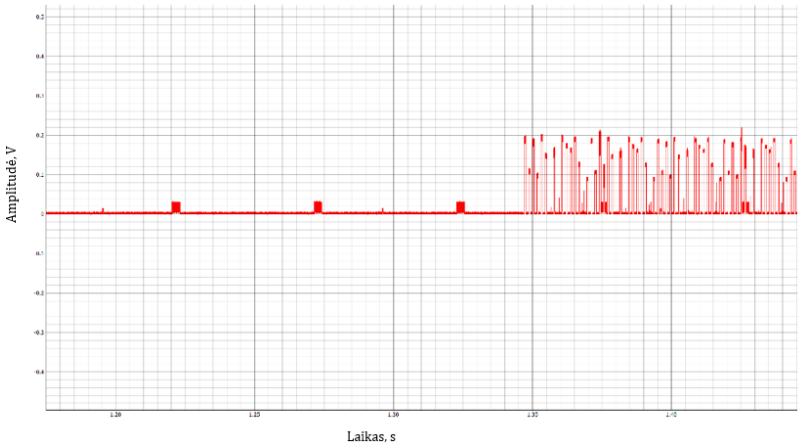
18 pav. „Walfront“ logoperiodinė antena

Eksperimentuose taip pat naudota 2,4 GHz dažnių juostai skirta kryptinė Yagi tipo antena (**19 pav.**). Antena sudaryta iš 16 elementų ir pasižymi dideliu kryptiniu stiprinimu iki ~15–18 dBi (pagal gamintojo duomenis), todėl yra tinkama silpnų signalų aptikimui ir kryptinei analizei. Tokia antena leidžia padidinti signalo ir triukšmo santykį bei sumažinti nepageidaujamų signalų įtaką iš kitų krypčių. Dėl siauro spinduliavimo kampo ji yra ypač naudinga atliekant krypties nustatymo (DoA) eksperimentus 2,4 GHz ISM juostoje.

19 pav. „Tbest“ kryptinė Yagi tipo antena

Šioje dalyje buvo siekiama nustatyti drono valdymo pulto transliuojamo signalo pobūdį bei įvertinti jo tinkamumą pasyviam aptikimui ir krypties nustatymui. Signalui įrašyti buvo naudojamas „USRP B210“ SDR įrenginys, leidžiantis registruoti plataus dažnių diapazono IQ duomenis 2,4 GHz ISM juostoje.

Eksperimento metu buvo įrašytas 2 s trukmės signalas. Gauti rezultatai pateikti **20 pav.** Iki maždaug 1,34 s momento signalų aktyvumas yra minimalus ir atitinka aplinkos triukšmo lygį bei pavienius kitų įrenginių perdavimus. Po 1,34 s aiškiai matoma signalo aktyvumo pradžia, atitinkanti drono valdymo pulto įjungimą.

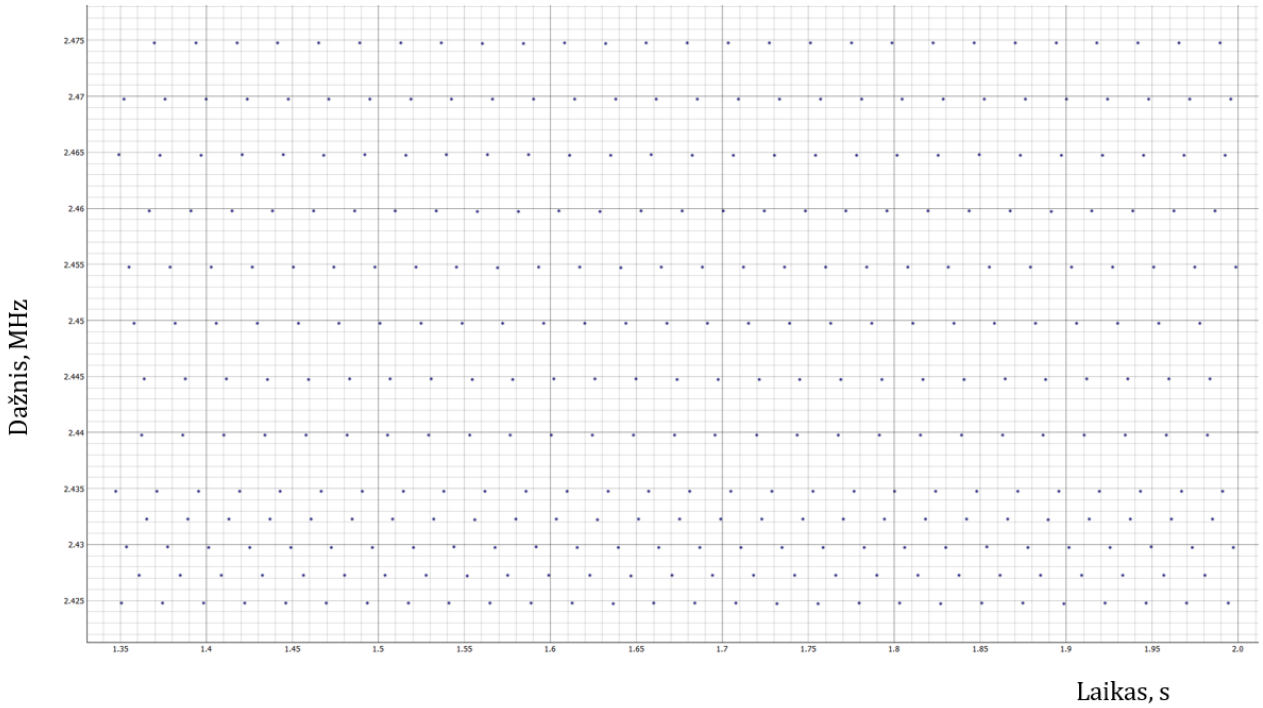


20 pav. Pulto įjungimo momento įrašas laiko srityje

Užfiksuotas signalas pasižymi paketine struktūra – signalas nėra tęstinis, o sudarytas iš trumpų impulsinių perdavimų (**21 pav.**). Stebimas didelis paketų tankis po valdymo pulto aktyvavimo, kas rodo intensyvų duomenų perdavimą tarp valdymo pulto ir imtuvo. Tokia struktūra būdinga skaitmeniniams ryšio protokolams, naudojantiems dažnių šuoliavimo (frequency hopping) technologiją.

Iki signalo aktyvavimo taip pat matomi pavieniai, rečiau pasikartojantys impulsai, kurie gali būti susiję su kitais 2,4 GHz ISM juostoje veikiančiais įrenginiais, pavyzdžiui, Wi-Fi ar Bluetooth sistemomis. Tačiau pagrindinis signalas po 1,34 s pasižymi ženkliai didesniu aktyvumu ir struktūriškumu, todėl gali būti siejamas su valdymo pulto AFHDS 2A protokolu.

Analizuojant signalo pasiskirstymą dažnių srityje pastebėta, kad signalas ne tik keičia dažnį, bet ir pasižymi pasikartojančia struktūra. Stebint dažnių seką laike nustatyta, kad tam tikri dažniai kartojasi periodiškai, sudarydami pasikartojantį modelį (6; 1; 5; 7; 1; 5; 7 ... 1; 5; 7). Tai rodo, kad naudojamas dažnių šuoliavimo algoritmas nėra visiškai atsitiktinis, o turi apibrėžtą struktūrą.



21 pav. Pulto dažnių srities vaizdas, gauta naudojant USRP B210

Papildomai buvo atlikta laiko intervalų tarp signalų perdavimų analizė. Nustatyta, kad intervalai tarp signalų nėra atsitiktiniai, o pasiskirsto į kelias aiškias reikšmių grupes: apie 900–950 µs ir apie 2400–2500 µs. Dažniausiai pasikartojantys intervalai yra ~900 µs (202 kartai) ir ~950 µs (100 kartų), tuo tarpu ilgesni intervalai (~2400–2450 µs) pasitaiko rečiau.

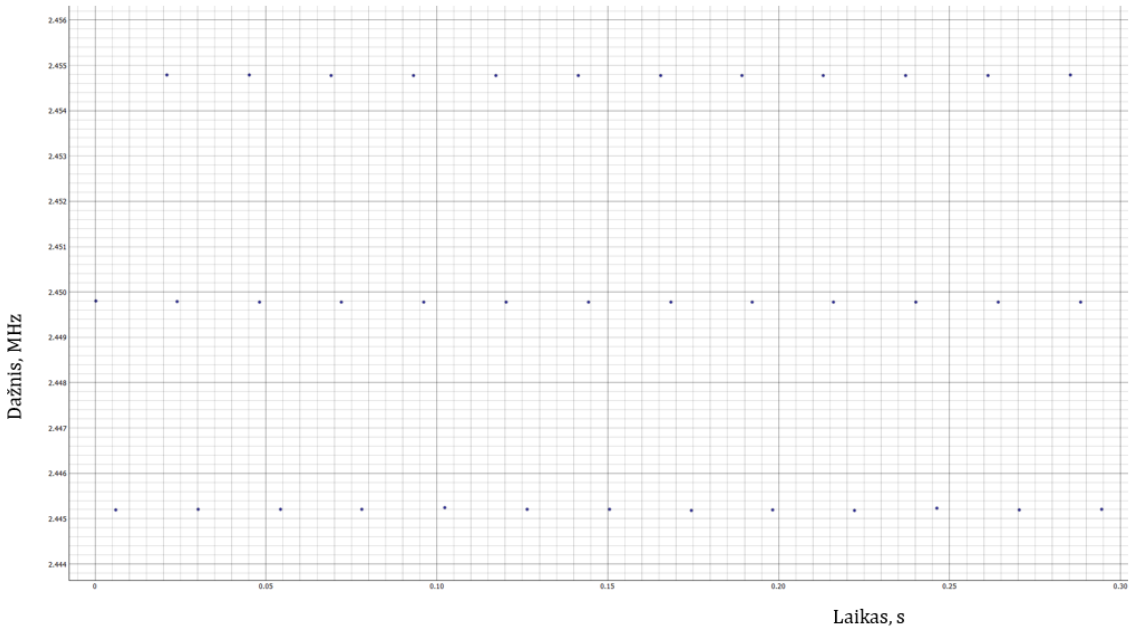
Toks diskretus intervalų pasiskirstymas rodo, kad signalas turi apibrėžtą laikinę struktūrą ir yra valdomas protokolo lygmens algoritmų, o ne generuojamas atsitiktinai. Tai patvirtina, kad naudojamas dažnių šuoliavimo ryšio metodas, kuriame signalas perduodamas nustatytais laiko intervalais ir keičia dažnį pagal iš anksto apibrėžtą seką.

Toliau eksperimentai buvo atliekami naudojant „ADALM-PLUTO“ SDR įrenginį. Naudojant šią sistemą įrašo trukmė buvo sumažinta iki 300 ms, o stebima dažnių juosta apribota iki 10 MHz (**22 pav.**). Tokie apribojimai atsirado dėl mažesnio momentinio dažnių juostos pločio ir duomenų perdavimo apribojimų.

Įrašyto signalo pasiskirstymas dažnių srityje pateiktas 25 pav. Matyti, kad signalas pasireiškia tik keliuose atskiruose dažnių kanaluose, o bendras stebimų dažnių skaičius yra ženkliai mažesnis nei naudojant „USRP B210“. Tai rodo, kad fiksuojama tik dalis viso dažnių šuoliavimo sekos.

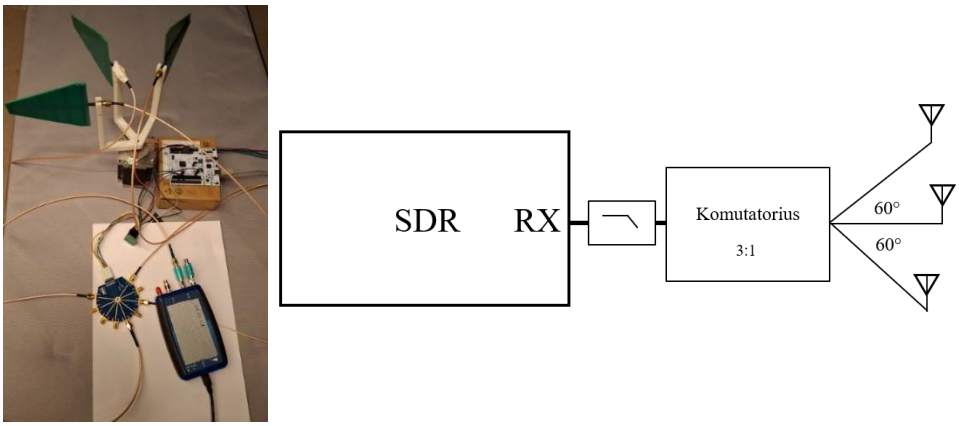
Lyginant su ankstesniais rezultatais, gautais naudojant „USRP B210“, galima teigti, kad „ADALM-PLUTO“ leidžia užfiksuoti tik dalinę signalų struktūrą – maždaug ketvirtadalį visų naudojamų dažnių kanalų. Tai paaiškinama siauresne stebima dažnių juosta, kuri neapima viso 2,4 GHz ISM diapazono, todėl dažnių šuoliavimo signalas tik epizodiškai patenka į stebimą dažnių langą.

Gauti rezultatai patvirtina, kad SDR įrenginio momentinis dažnių juostos plotis yra kritinis parametras analizuojant dažnių šuoliavimo signalus. Naudojant siauresnę juostą, dalis signalų lieka neužfiksuota, todėl tampa sudėtinga pilnai atkurti signalo struktūrą ir atlikti patikimą analizę.



22 pav. Pulto dažnių srities vaizdas, gautas „Adalm Pluto“

Siekiant įvertinti pasyvaus drono aptikimo galimybes, buvo parengtas bandymų stendas, pateiktas **23 pav.**



23 pav. Pasyvaus dronų aptikimo bandymo fizinės įrangos nuotrauka ir schema

Bandymuose naudotos trys logoperiodinės kryptinės antenos, prijungtos prie radijo kanalų komutavimo įrenginio. Komutatorius buvo valdomas „Nucleo F103“ bandymų plokšte. Antenos buvo išdėstytos 60° kampu viena kitos atžvilgiu, siekiant sudaryti galimybę įvertinti signalo atėjimo kryptį pagal skirtinguose kanaluose užfiksuotą signalo lygį.

Signalų registravimui ir analizei naudotas SDR įrenginys (USRP B210). Įrašyti IQ duomenys buvo apdorojami apskaičiuojant signalo galią ir jos slankųjį vidurkį, kuris buvo naudojamas kaip signalo gaubtinė. Tokiu būdu buvo sumažintas triukšmo poveikis ir išryškinti impulsiniai signalai.

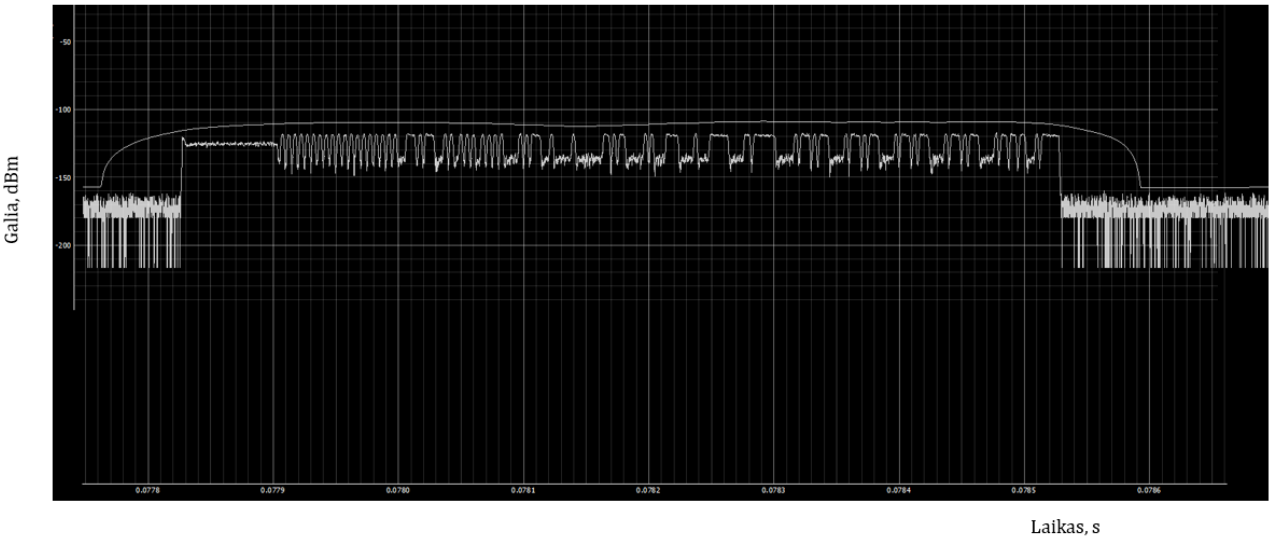
Toliau šiai gaubtinei buvo taikomas CA-CFAR (Cell Averaging CFAR) tipo slenkstinis detektorius, skirtas išskirti trumpalaikius impulsinius perdavimus iš triukšmo fono. Kiekvienam signalo taškui

slenkstinė reikšmė buvo apskaičiuojama naudojant abiejose pusėse esančius mokymo langus (angl. *training cells*), išskiriant apsauginius langus. Triukšmo lygis buvo įvertintas kaip mokymo langų vidurkis, o slenkstinė reikšmė apskaičiuota:

$$T(i) = \alpha \cdot \frac{1}{2T} \sum x_i \quad (14)$$

čia: T– mokymo lango dydis, o α– koeficientas, priklausantis nuo pasirinktos klaidingo aptikimo tikimybės P_{fa}.

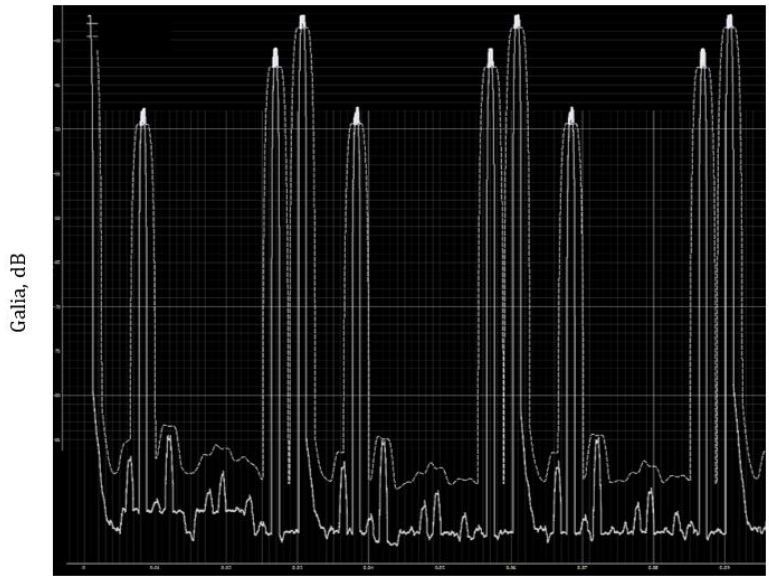
Įrašyto signalo padidintas fragmentas pateiktas **24 pav.**



24 pav. Įrašyto signalo fragmentas ir CFAR slenkstinė kreivė

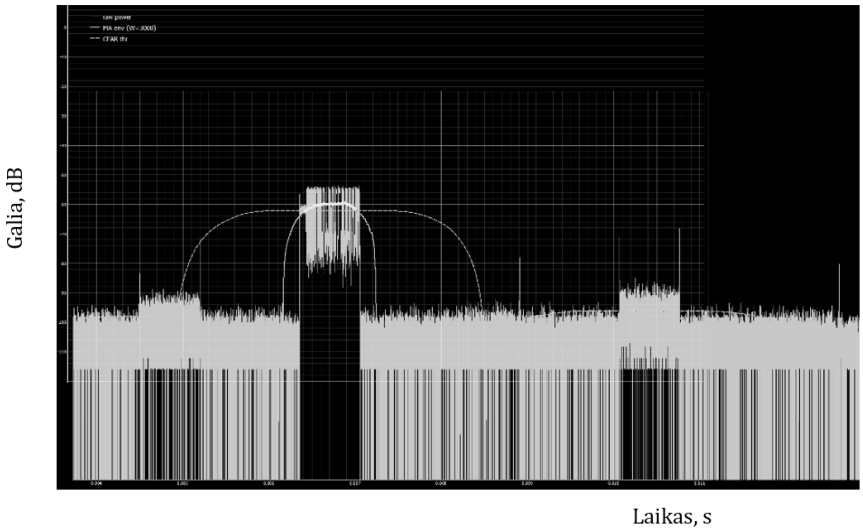
Paveiksle matomas trumpalaikis impulsinis perdavimas ir jam pritaikyta CFAR slenkstinė kreivė. Iš pateikto rezultato matyti, kad naudotas CFAR koeficientas ir parametrai nebuvo optimaliai parinkti, todėl slenkstis nepakankamai tiksliai seka signalo gaubtinę. Dėl to dalis impulsų nėra aptinkami patikimai arba aptinkami netiksliai.

Gautuose rezultatuose (**25 pav.**) matyti, kad CFAR slenkstinė kreivė seka bendrą signalo lygio tendenciją, tačiau dėl didelio mokymo lango ir slankiojo vidurkio lango dydžio slenkstis kinta lėtai. Tai lemia sumažėjusį jautrumą trumpiems impulsams, todėl dalis jų gali būti praleidžiami.



25 pav. Pasyvaus dronų aptikimo rezultatas

Šie rezultatai rodo, kad pasyvaus aptikimo sistemoje CFAR parametrų parinkimas turi didelę įtaką aptikimo kokybei ir turi būti derinamas pagal realų triukšmo lygį, impulsų trukmę ir signalo galią. Papildomai **26 pav.** pateiktas signalo galios, slankiojo vidurkio gaubtinės ir CFAR slenkstinės reikšmės palyginimas.



26 pav. Signalo galios, slankiojo vidurkio gaubtinės ir CFAR slenkstinės kreivės palyginimas

Paveiksle matyti trys pagrindinės kreivės: momentinė signalo galia, slankiojo vidurkio pagrindu apskaičiuota gaubtinė ir CFAR slenkstinė kreivė. Slankusis vidurkis naudojamas siekiant sumažinti triukšmo įtaką ir išryškinti bendrą signalo struktūrą, tuo tarpu CFAR algoritmas nustato adaptuojamą slenkstinę reikšmę pagal lokalų triukšmo lygį.

Matyti, kad CFAR slenkstinė kreivė seka slankiojo vidurkio gaubtinę, tačiau dėl didelio glodinimo lango ir mokymo lango dydžio slenkstis kinta lėtai. Dėl to trumpalaikiai impulsai, nors ir aiškiai matomi momentinės galios grafike, ne visada viršija slenkstinę reikšmę arba viršija ją tik iš dalies.

Šis rezultatas rodo, kad slankiojo vidurkio ir CFAR parametrų parinkimas turi esminę įtaką aptikimo kokybei. Per didelis glodinimas sumažina signalo dinaminius pokyčius, o per didelis CFAR mokymo langas lemia lėtą slenksčio adaptaciją, dėl ko mažėja jautrumas trumpiems impulsiniams signalams.

Siekiant įvertinti pasyvaus krypties nustatymo galimybes, buvo apskaičiuota suminė signalo galia, viršijanti CFAR slenkstinę reikšmę. Tokiu būdu buvo išskirti tik reikšmingi signalai, sumažinant triukšmo įtaką. Gautos reikšmės buvo sumuojamos kiekvienam antenos kanalui atskirai.

Eksperimentai atlikti naudojant tris logoperiodines antenas, išdėstytas 60° kampu viena kitos atžvilgiu. Buvo vertinamos trys kryptys (0°, 60°, 120°) bei skirtingi atstumai iki signalo šaltinio (10 m, 60 m ir 100 m). Taip pat atlikti papildomi matavimai naudojant kryptinę 17 dBi Wi-Fi anteną.

Gauti eksperimentiniai rezultatai rodo, kad suminė signalo galia gali būti naudojama krypties nustatymui, lyginant skirtingų antenų kanalų reikšmes. Mažais atstumais (10 m) aiškiai matomas dominuojantis antenos kanalas, atitinkantis signalo šaltinio kryptį, o kitų antenų užfiksuota galia yra ženkliai mažesnė. Didėjant atstumui iki 50 m, bendras signalo lygis mažėja, tačiau kryptinis kontrastas tarp antenų išlieka, nors ir tampa mažiau ryškus. Esant 100 m atstumui, signalo lygis dar labiau sumažėja, todėl skirtumai tarp antenų tampa mažesni ir krypties nustatymas tampa mažiau patikimas. Taip pat pastebėta, kad naudojant kryptinę 17 dBi Wi-Fi anteną gaunami stabilesni rezultatai ir aiškesnis kryptinis išskyrimas, kas rodo, kad antenos stiprinimas ir kryptingumas turi tiesioginę įtaką pasyvaus aptikimo efektyvumui.

3 lentelė. Aptiktų siųstuvo signalų suminė galia, atstumas10 m

Dažnis, GHz	2,45			2,43		
Pasukimas nuo centrinės ašies	0°	60°	120°	0°	60°	120°
Ant1 suminė galia, dB	20,49	3,36	1,01	10.32	25,18	8,1369
Ant2 suminė galia, dB	29,1919	1,14554	0,715652	33,9929	19,916	6,86651
Ant3 suminė galia, dB	29,4155	0,572596	0,206616	7,64366	34,9896	23,005

4 lentelė. Aptiktų siųstuvo signalų suminė galia, atstumas 50 m

Dažnis, GHz	2,45			2,43		
Antenos pasukimas nuo centrinės ašies	0°	60°	120°	0°	60°	120°
Ant1 suminė galia, dB	2,75587	2,22974	0,0340087	4,06521	0,740379	0,692341

Ant2 suminė galia, dB	3,66233	0,509939	0,614133	6,89879	1,27669	0,643384
Ant3 suminė galia, dB	2,81935	0,774499	0,302718	4,47465	1,14709	0,177899

5 lentelė. Aptikto signalo galia, kai antenos išdėstytos stacionariai, šaltinis priešais vieną iš antenų už 100 m

Dažnis, GHz	2,43		
Signalo šaltinio kryptis	Ant1 suminė galia, dB	Ant2 suminė galia, dB	Ant3 suminė galia, dB
Tiesiai	0,357844	**3,01769**	0,593845
Kairėje	**0,822195**	0,244273	0,129471
Dešinėje	0,0405035	0,348639	**0,620208**

6 lentelė. Aptikto signalo galia naudojant Wi-Fi anteną, atstumas 100 m

Dažnis, GHz	2,43		
Antenos pasukimas nuo signalo šaltinio	0°	60°	120°
Vietovė 1	1,6963	0,793233	0,558437
Vietovė 2	1,80463	0,620721	0,456017
Vietovė 3	0,400467	0,260315	0,105248
Vietovė 4	0,246978	0,117379	0,0198064

Atlikti eksperimentai parodė, kad pasyvus dronų signalų aptikimas ir krypties įvertinimas galimas naudojant SDR įrenginius ir kelių antenų sistemą. Nustatyta, kad drono valdymo pulto signalas pasižymi diskretine struktūra tiek laiko, tiek dažnio srityse, būdinga dažnių šuoliavimo ryšio sistemoms. CFAR detektoriaus taikymas leidžia išskirti reikšmingus signalus iš triukšmo, tačiau aptikimo kokybė stipriai priklauso nuo pasirinktų parametrų. Taip pat nustatyta, kad krypties nustatymas gali būti atliekamas lyginant skirtinguose antenų kanaluose užfiksuotą signalo galią, tačiau šio metodo tikslumas mažėja didėjant atstumui dėl blogėjančio signalo ir triukšmo santykio. Eksperimentai leidžia daryti išvadą, kad plataus dažnių diapazono priėmimas ir kryptinės antenos yra esminiai veiksniai siekiant patikimo pasyvaus dronų aptikimo pagal signalo galią. Taip pat eksperimentiniai rezultatai rodo, kad dažnių šuoliavimo signalų analizei būtinas pakankamai platus momentinis dažnių juostos plotis SDR įrenginiuose.

1.3.2. Pasyvaus krypties nustatymas pagal dviejų kanalų fazių palyginimą

Krypties nustatymui buvo taikytas dviejų kanalų fazinio palyginimo ir monopulsinio sekimo metodas. Sistema naudoja dviejų antenų signalus $x_1(t)$ir $x_2(t)$, tarp kurių atsiranda fazės skirtumas $\Delta\varphi$, priklausantis nuo signalo atėjimo kampo.

Programoje vienam kanalui buvo taikomas fazinis poslinkis φ, ir buvo sudaromi sumos ir skirtumo signalai:

$$S(t) = x_1(t) + x_2(t)e^{j\varphi} \quad (15)$$

$$D(t) = x_1(t) - x_2(t)e^{j\varphi} \quad (16)$$

Pradiniame etape buvo atliekamas fazės skenavimas, ieškant tokio φ, kuriam suminio signalo galia yra maksimali:

$$\varphi_{\text{opt}} = \arg\max_{\varphi} | S(t) |^2 \quad (17)$$

Iš šio optimalaus fazės poslinkio buvo apskaičiuojamas signalo atėjimo kampas:

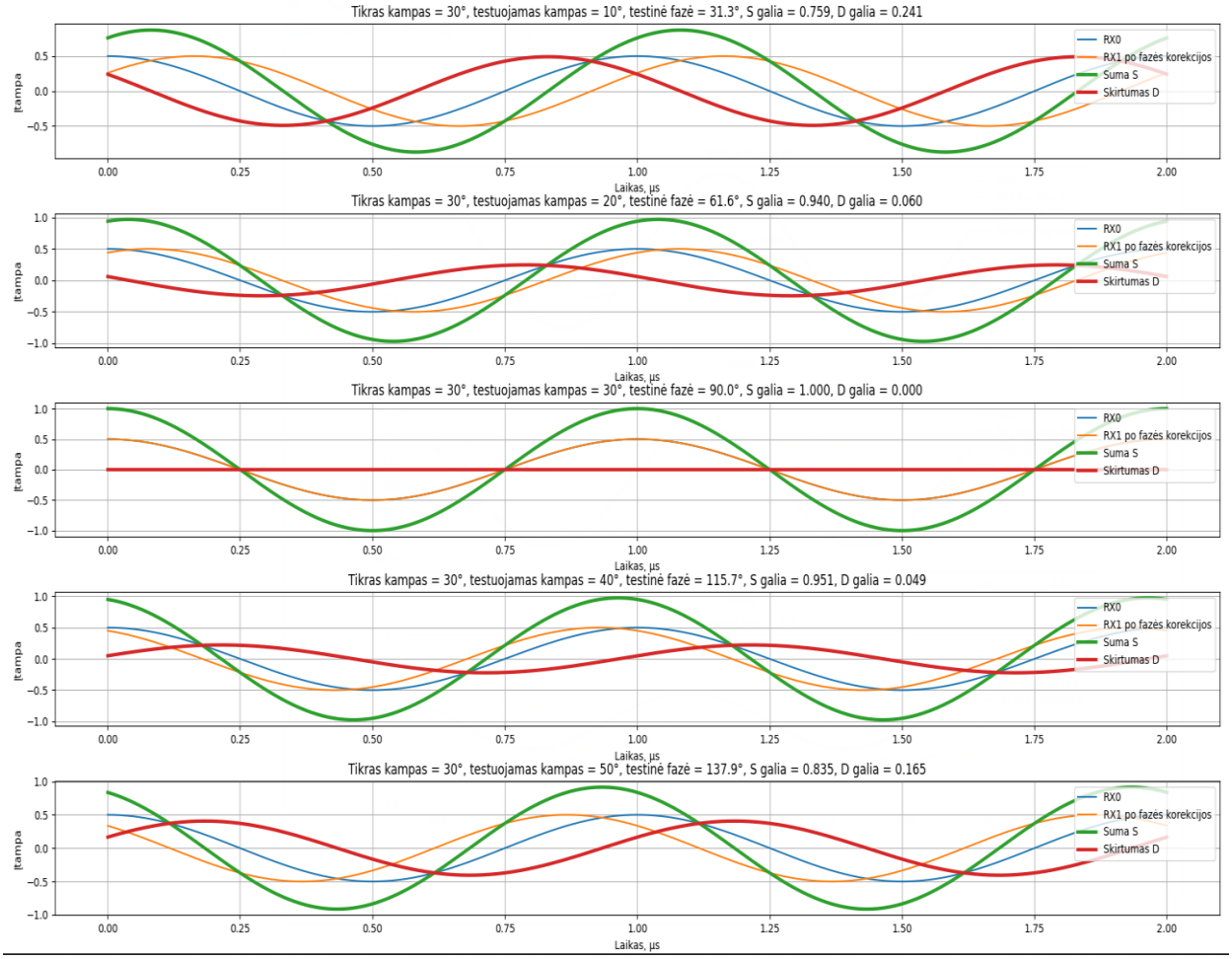
$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda\Delta\varphi}{2\pi d}\right) \quad (18)$$

Toliau kryptis buvo sekama monopulsiniu principu, naudojant sumos ir skirtumo signalų santykį. Kampo pokyčio kryptis nustatoma pagal:

$$\text{sign}\left(\angle(S \cdot D^*)\right) \quad (19)$$

čia D* – skirtumo signalo kompleksinis jungtinis.

Monopulsinio signalo maksimumo paieškos pavyzdys pateikiamas **27 pav.**



27 pav. Monopulsinio signalo maksimumo paieškos pavyzdys

Eksperimentų metu sistema sėkmingai nustatė ir sekė prieš antenų sistemą maždaug 8 m atstumu esantį siųstuvą.
Taip pat buvo atliekamas eksperimentas su 5,74 GHz video signalo siųstuvu (**28 pav.**), kuris montuojamas ant drono ir skirtas perduoti vaizdą drono operatoriui.

28 pav. Eksperimentui panaudotas „ImmersionRC“ 600mW galios vaizdo siųstuvas

Signalo atėjimo krypties (angl. Direction of Arrival, DoA) nustatymas šiame darbe grindžiamas fazių skirtumo metodu, naudojant dviejų elementų vienodą linijinį antenų masyvą (ULA). Kai plokščioji elektromagnetinė banga krenta į antenų masyvą kampu θ, tuomet papildomas kelias, kurį signalas nukeliauja iki antrosios antenos, išreiškiamas [37]:

$$\Delta l = d\sin(\theta) \tag{20}$$

čia: d– atstumas tarp antenų. Šis kelio skirtumas sukelia fazės poslinkį tarp priimtų signalų:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d\sin(\theta) \tag{21}$$

čia λ– signalo bangos ilgis.

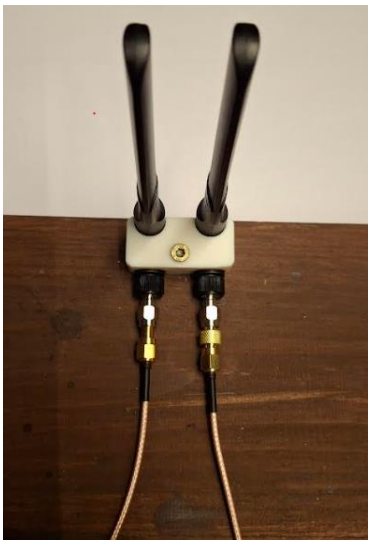
Kadangi SDR sistemoje signalas apdorojamas kompleksinėje formoje (I/Q), fazė apskaičiuojama naudojant kompleksinio spektro argumentą:

$$\varphi = \arg\big(X(f)\big) \tag{22}$$

čia $X(f)$– signalo Furjė transformacija. Praktikoje fazių skirtumas nustatomas tarp dviejų kanalų:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 \tag{23}$$

Signalų priėmimui panaudotos dvi dviejų dažnių (2,4 ir 5,8 GHz) „Bingfu“ antenos. Antenų fiziniai centrai išdėstyti per pusę bangos ilgio 25,15 mm (apie 0,48λ ties 5,74 GHz, **29 pav.**)



29 pav. Eksperimentui naudotas antenų stendas

Signalams priimti panaudotas „ADALM-Pluto“ SDR. Gauti rezultatai (**31 pav.**) parodė, kad mažiems kampams (iki ±20°) sistema pasižymi artimu tiesiniam atsakui, tačiau didesniems kampams stebima nelinijinė paklaida. Šis efektas galimai atsiranda dėl arcsin funkcijos netiesiškumo ir fazės matavimo paklaidų didėjant kampui, todėl kampo įvertinimas natūraliai „suspaudžiamas“ didėjant θ. Be to, plačiajuosčio signalo naudojimas lemia fazės vidurkinimą skirtinguose dažniuose, kas dar labiau sumažina įvertinto kampo reikšmę.

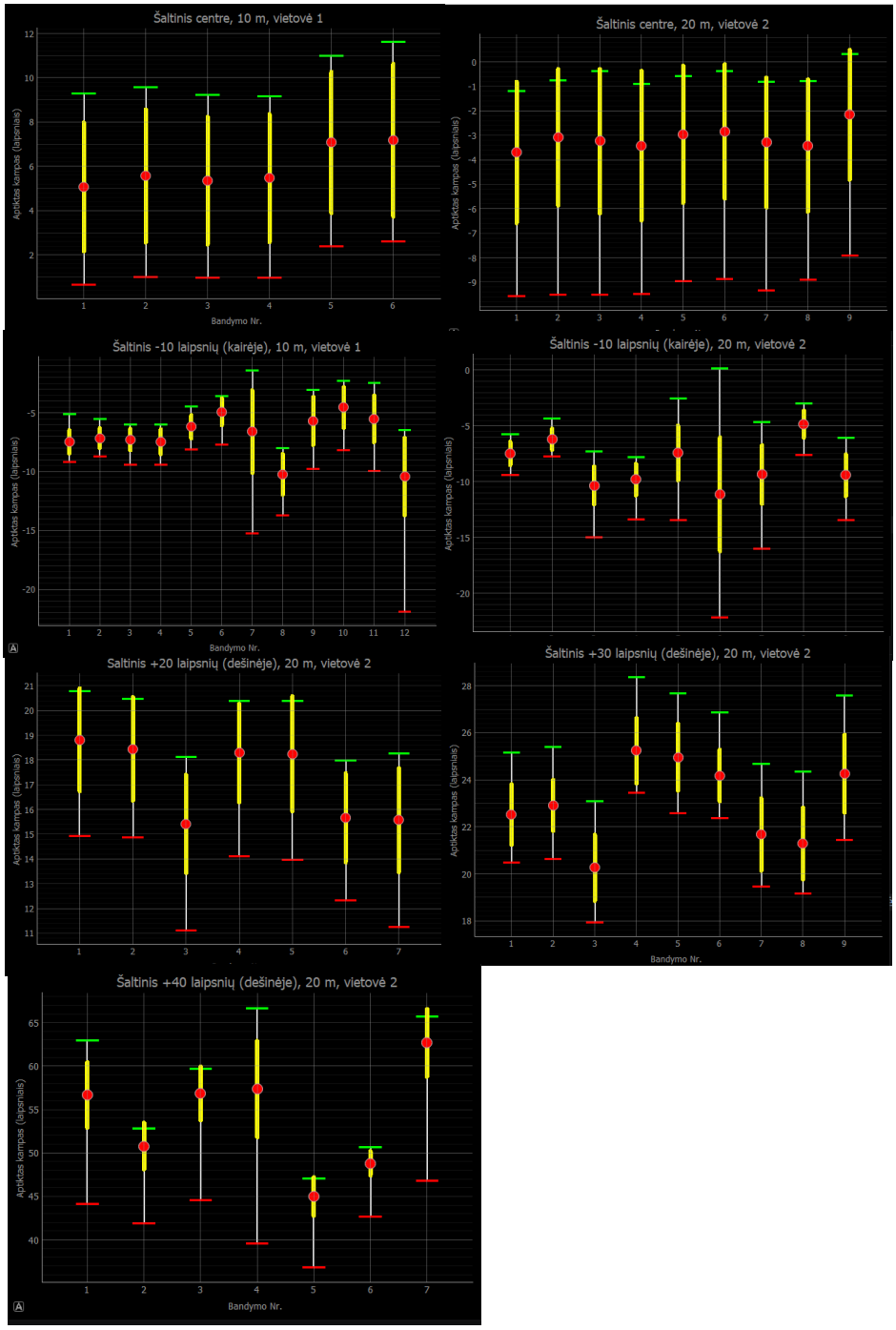
Eksperimentų metu nustatyta, kad sistema sistemingai nuvertina tikrąjį kampą. Pavyzdžiui, esant ±10° kampui, gaunama apie ±8,7°, o esant ±30° – apie ±22–23°. Tai rodo, kad realus sistemos atsakas gali būti aproksimuojamas kaip:

$$\theta_{matuotas} \approx k \cdot \theta_{tikras} \quad (24)$$

čia: $k \approx 0{,}75–0{,}88$, priklausomai nuo kampo dydžio. Toks nuokrypis gali būti siejamas su efektyvaus antenų tarpo skirtumu (antenų fazinių centrų nesutapimu), fazės kalibracijos paklaida bei aplinkos veiksniais, tokiais kaip daugiakeliai atspindžiai. Apibendrinant galima teigti, kad fazių skirtumo metodas leidžia nustatyti signalo kryptį, tačiau jo tikslumas priklauso nuo kampo dydžio, signalo pločio ir aplinkos sąlygų, todėl praktiniam taikymui būtina atlikti sistemos kalibraciją.

Iš surinktų duomenų buvo apskaičiuoti pagrindiniai statistiniai rodikliai: vidurkis, standartinis nuokrypis, minimalios ir maksimalios reikšmės, kurie buvo panaudoti sistemos tikslumui, stabilumui ir paklaidų pobūdžiui įvertinti (**30 pav.**).

:



30 pav. Monopulsiniu metodu grįsto kampo matavimo rezultatai

Tyrimo rezultatai parodė, kad sistema geba nustatyti signalo kryptį, tačiau jos atsakas yra nelinijinis. Pastebėta, kad mažų kampų srityje sistema linkusi nepakankamai įvertinti tikrąjį kampą, tuo tarpu didesnių kampų atveju – pervertinti. Tai rodo, kad paklaida priklauso nuo kampo ir negali būti kompensuojama vien tik pastovia korekcija.

Analizė taip pat atskleidė sisteminę paklaidą ir asimetrišką duomenų pasiskirstymą (neigiamą pasvirimą), kai matavimų nuokrypiai dažniau pasireiškia į mažesnių kampų pusę. Be to, nustatyta, kad matavimų sklaida (triukšmas) didėja didėjant kampui, o tai rodo galimą antenos charakteristikų, signalo ir triukšmo santykio bei aplinkos (pvz., daugkartinių atspindžių) įtaką.

Kai kuriuose matavimuose užfiksuoti ryškūs išskirtiniai nuokrypiai, kurie tikėtina atsiranda dėl signalo kokybės pablogėjimo arba neteisingo piko identifikavimo algoritme. Taip pat pastebėtas ribotas sistemos pakartojamumas, nes net esant toms pačioms sąlygoms matavimų rezultatai tarp bandymų skiriasi.

Apibendrinant, sistema veikia ir leidžia nustatyti signalo krypties tendenciją, tačiau pasižymi:

- nelinijiniu atsaku,
- kampui priklausoma paklaida,
- didėjančia sklaida esant didesniems kampams,
- asimetrišku paklaidų pasiskirstymu,
- bei pavieniais išskirtiniais nuokrypiais.

Siekiant pagerinti sistemos tikslumą ir patikimumą, būtina taikyti kalibravimo metodus (pvz., korekcines kreives), išskirtinių reikšmių filtravimą bei tolesnę signalo apdorojimo algoritmo optimizaciją.

Tačiau bandant nustatyti nuo automobilio atsispindėjusio signalo kryptį buvo gaunama ne automobilio, o tiesioginio siųstuvo kryptis, nes tiesioginis signalas dominavo. Taip pat nustatyta, kad atjungus siųstuvą sistema rodė kryptį į stipriausią aplinkoje esantį signalų šaltinį. Tai rodo, kad norint taikyti šį metodą dronų aptikimui reikalingi papildomi sistemos bandymai ir metodo tobulinimas.

1.3.3. Aktyvus aptikimas panaudojant FMCW signalą atstumui iki objekto nustatyti

Eksperimentas su monopulsiniu signalo sekimu parodė, kad esant mažam atstumui tarp siųstuvo ir priėmimo kanalų, priimamame signale pradeda dominuoti tiesioginis siųstuvo signalas. Šis reiškinys vadinamas signalo nutekėjimu (angl. *signal leakage*) ir yra viena iš pagrindinių FMCW radarų problemų, nes sumažina efektyvų dinaminį diapazoną ir apsunkina silpnų atspindžių aptikimą. Nutekėjimas atsiranda dėl nepakankamos izoliacijos tarp TX ir RX grandinių bei elektromagnetinio susiejimo tarp antenų.

1.3.3.1. Pasirengimas FMCW matavimams

Atliekant atstumo matavimo eksperimentus nustatyta, kad naudojamas ADALM-PLUTO SDR neturi vidinės fizinės TX ir RX signalų sąsajos RF lygyje. Dėl šios priežasties neįmanoma tiesiogiai sinchronizuoti siųstuvo ir imtuvo signalų analoginėje grandyje, o tai riboja tikslaus FMCW metodo realizavimą. Nors įrenginys palaiko vidinį skaitmeninį sąsajos režimą, jis apeina RF grandinę ir, pradiniu vertinimu, nėra tinkamas realiems radariniams matavimams.

Siekiant realizuoti eksperimentinę FMCW schemą, buvo panaudotas signalų daliklis Mini-Circuits ZFRSC-42-S+ (**31 pav.**), kuris leidžia padalinti siųstuvo generuojamą čirpo signalą į kelis kelius. Viena signalo šaka, per 30 dB slopintuvą, nukreipiama į RX0 kanalą kaip etaloninis signalas, o kita – į siuntimo anteną. Priėmimo antena prijungta prie RX1 kanalo, kuriame fiksuojamas nuo objekto atsispindėjęs signalas. Tokiu būdu realizuojamas etaloninio ir atspindėto signalo maišymas.

Siunčiamas FMCW čirpo signalas gali būti aprašomas kaip tiesiškai kintančio dažnio signalas:

$$f(t) = f_0 + St \tag{25}$$

čia: S yra dažnio kitimo greitis (čirpo šlaitas).

Atsispindėjęs signalas yra vėluojantis laiko atžvilgiu per vėlinimo laiką τ, kuris priklauso nuo atstumo:

$$\tau = \frac{2R}{c} \tag{26}$$

Maišant siųstą ir priimtą signalus, gaunamas mušimo dažnis , kuris lygus momentinių dažnių skirtumui:

$$f_b = f(t) - f(t - \tau) \tag{27}$$

Įstatant čirpo lygtį gauname:

$$f_b = (f_0 + St) - \big(f_0 + S(t - \tau)\big) = S\tau \tag{28}$$

Todėl mušimo dažnis tiesiogiai proporcingas signalo vėlinimui:

$$f_b = S\tau \tag{29}$$

Galiausiai, įstatant tau, gaunama standartinė FMCW radaro lygtis:

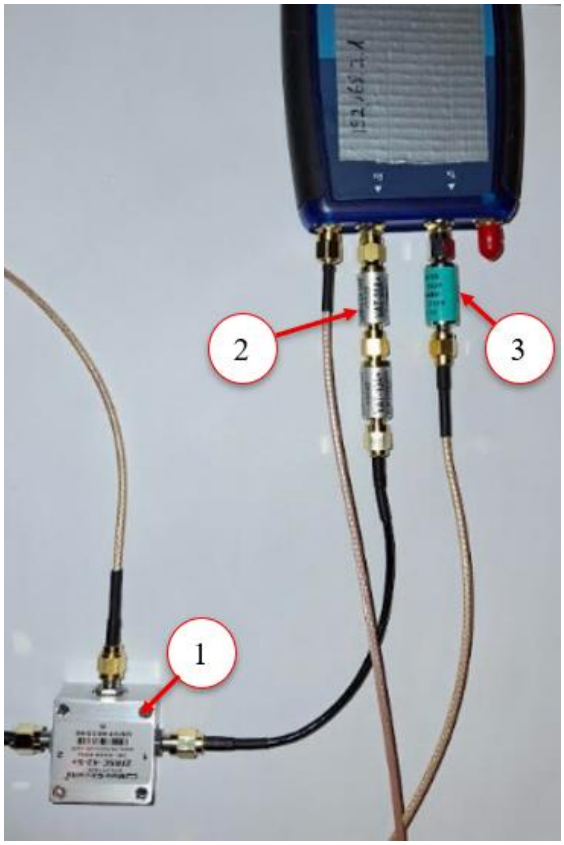
$$f_b = \frac{2RS}{c} \tag{30}$$

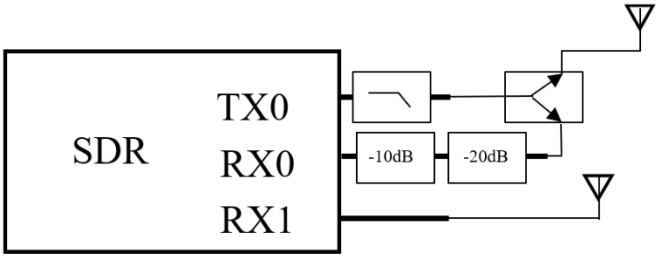
Iš čia atstumas apskaičiuojamas:

$$R = \frac{f_b\, c}{2S} \tag{31}$$

Kai matuojamas tiesioginis kelias:

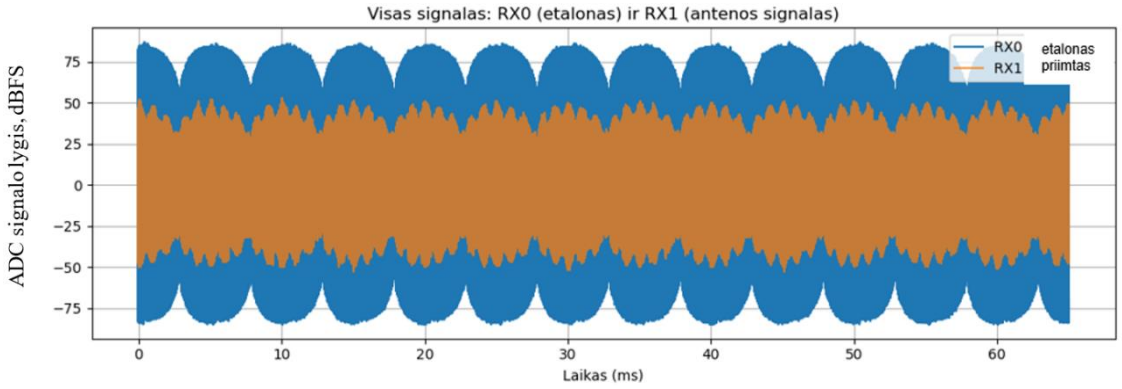
$$R = \frac{f_b\, c}{S} \tag{32}$$



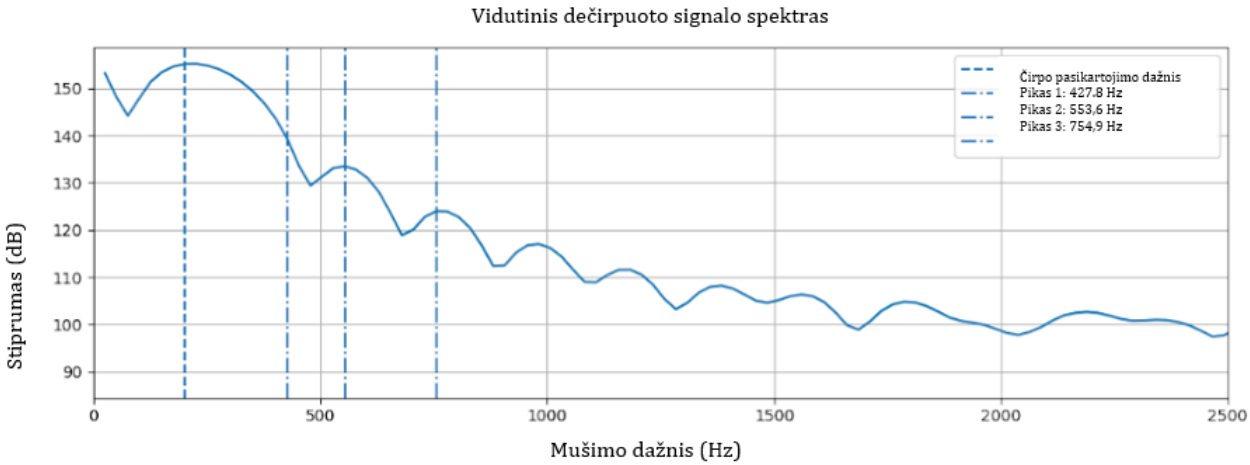


31 pav. Signalo daliklio ir slopintuvų panaudojimas radaro bandymuose (1 – signalo daliklis; 2 – 10 ir 20 dB slopintuvai (vėliau bandymuose naudotas tik 10 dB); 3 – aukštų dažnių filtras) nuotrauka ir schema

Eksperimentai buvo atliekami urbanizuotoje vietovėje. Signalo siųstuvo antena buvo išdėstyta skirtingais atstumais nuo priimančios antenos. Šio eksperimento tikslas buvo patikrinti FMCW signalo generavimo, priėmimo ir apdorojimo grandinės teisingumą prieš pereinant prie realių atspindžio matavimų. Eksperimentai buvo vykdomi naudojant 2,5 GHz nešlio dažnį, 30 MHz pločio čirpo signalą ir 5 ms čirpo trukmę. Išspinduliuotas ir priimtas signalai pateikiami **32 pav.** Buvo naudojamas 13-os čirpų signalas. Tipinis rezultatų grafikas pateikiamas **33 pav.**



32 pav. Etaloninis ir priimtas signalai tiesioginio kelio antenos bandymuose



33 pav. Aptiktos signalo viršūnės po dečirpavimo

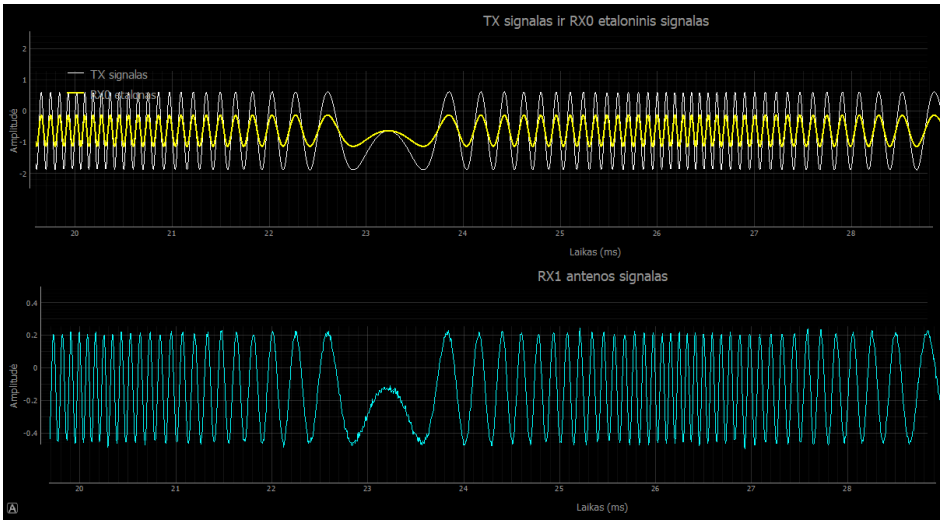
Apibendrinti matavimų rezultatai pateikiami **7 lentelėje**. Šie rezultatai parodė, kad FMCW signalo apdorojimo grandinė veikia teisingai, o nuotolio nustatymas yra tikslus po kalibracijos. Taip pat buvo pastebėta, kad dėl daugialypių signalų kelių (multipath) gali atsirasti keli spektriniai pikai, todėl būtina parinkti fiziškai pagrįstą maksimumą. Apibendrinant galima teigti, kad tiesioginio sklidimo eksperimentai patvirtino sistemos tinkamumą ir leido pereiti prie sudėtingesnių matavimų, kai signalas atsispindi nuo realių objektų.

7 lentelė. Atliktų matavimų su tiesiogine antenų padėtimi rezultatų lentelė

Eil. Nr.	Tikrasis atstumas, m	Mušimo dažnis, Hz	Apskaičiuotas atstumas, m	Kalibravimo paklaida, m	Atstumas su pataisa
1.	10	276,802	13,83	- 4,47	9,36
2.	10	284,02	14,1	- 4,47	9,72
3.	10	271,825	13,58	- 4,47	9,11
4.	18	299,774	22,46	- 4,47	17,99
5.	18	293,83	22,022	- 4,47	17,55
6.	20	528,44	26,4	- 4,47	21,93
7.	20	553,621	27,66	- 4,47	23,19

1.3.3.2. FMCW atstumo nustatymas

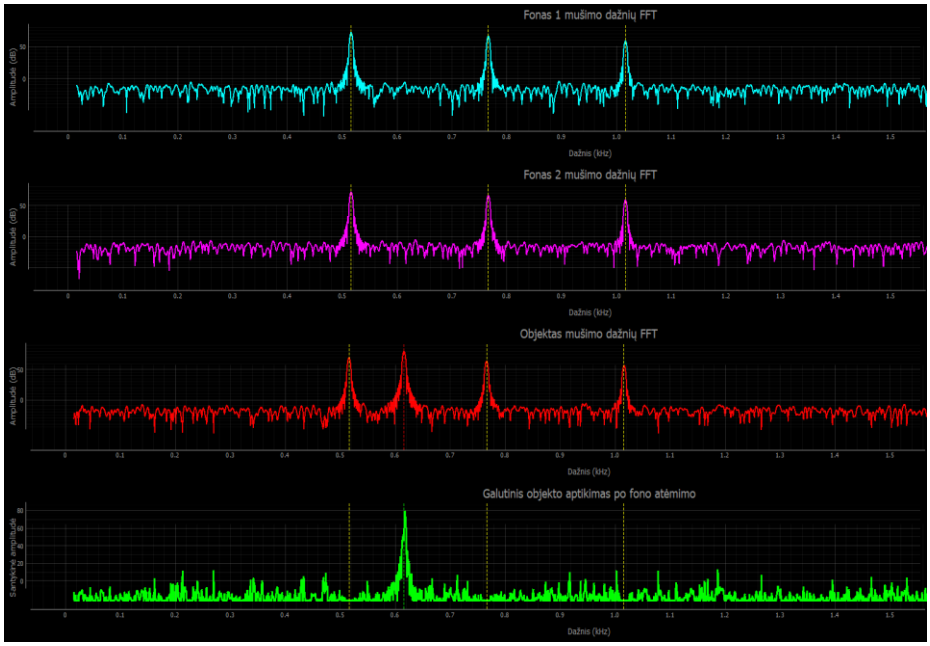
Prieš atliekant realius FMCW matavimus su ADALM-PLUTO SDR buvo sukurtas FMCW radaro signalų modeliavimo algoritmas Python aplinkoje. Modelio tikslas buvo patikrinti FMCW signalo generavimo (**34 pav.**), mušimo dažnių formavimosi bei fono atėmimo algoritmo veikimą



34 pav. Siunčiamo, etaloninio ir priimto FMCW signalų simuliacija

prieš pereinant prie realių eksperimentų. Modelyje buvo generuojamas tiesinis kompleksinis čirpo signalas, atitinkantis realioje sistemoje naudotus parametrus – 30 MHz dažnių juostos plotį ir 5 ms čirpo trukmę. Taip pat buvo modeliuojamas etaloninis RX0 kanalas, signalo slopinimas daliklyje bei keli foniniai atspindžiai skirtingais atstumais.

Modelyje papildomai realizuotas objektas pasirinktame atstume bei triukšmo komponentai, leidžiantys imituoti realias aplinkos sąlygas (**35 pav.**). Gauti mušimo dažnių signalai buvo apdorojami taikant FFT analizę ir dvigubo fono atėmimo metodą (35 formulė):



35 pav. Aplinkos signalų išvalymo ir atstumo iki objekto aptikimo simuliacija

kur β– empiriškai parinktas svorio koeficientas. Tokiu būdu modelis leido įvertinti, kaip aplinkos nestabilumas ir foniniai atspindžiai veikia taikinio aptikimą.

Modeliavimo rezultatai parodė, kad taikinio signalas po fono atėmimo tampa aiškiai išskiriamas net esant keliems foniniams atspindžiams bei triukšmui. Taip pat buvo pastebėta, kad net ir idealiomis sąlygomis spektre gali atsirasti keli maksimumai, todėl taikinio identifikavimui būtina naudoti papildomus kriterijus, tokius kaip piko padėtis bei jo pokytis lyginant su foniniu matavimu. Šis modelis tapo pagrindu kuriant realių FMCW matavimų algoritmą ir vėliau buvo pritaikytas eksperimentinėje sistemoje su ADALM-PLUTO SDR.

Matavimai buvo atliekami dviejose skirtingose vietovėse: mieste – vietovė 1; neurbanizuotoje vietovėje – vietovė 2 (**36 pav.**)

36 pav. Matavimai: vietovė 1 (kairėje), vietovė 2 (dešinėje)

Atliekant matavimus pastebėta, kad vietovėje 1 skirtingomis dienomis atlikti matavimai skiriasi, galimai dėl foninio triukšmo nestabilumo. Taip pat vietovėje 2 atlikti matavimai parodė, kad sėkmingiems aptikimams svarbu TX antenos padėtis ir kryptis. Geriausi rezultatai pasiekti, kai TX antena buvo už 2 m į kairę ir 6 m priekyje, pasukta 45° kampu į aptinkamą objektą.

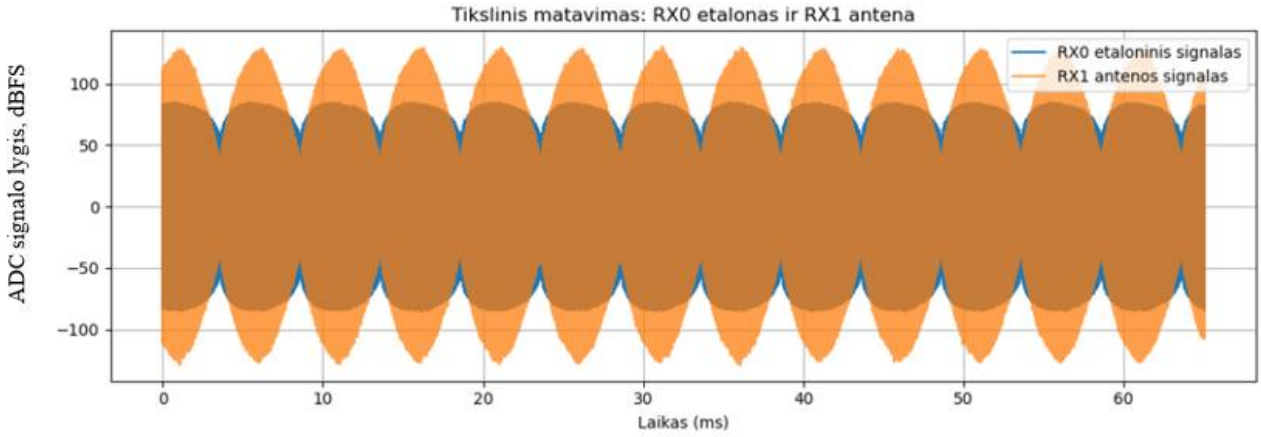
Po pradinių bandymų, logoperiodinė TX antena buvo pakeista į 17 dBi Wi-Fi anteną (**37 pav.**), taip pat abi antenos pridengtos RF absorbuojančia medžiaga.

37 pav. Antenos su RF absorbcine medžiaga: TX (kairėje), RX (dešinėje)

Siunčiamas signalas išplėstas iki 100 čirpų. Didinant fiksuojamų čirpų skaičių virš 100, sistema tapo nestabili dėl reikšmingai išaugusio priėmimo buferio dydžio, duomenų perdavimo per USB apkrovos

ir Python atminties poreikio. Todėl tolimesniems matavimams pasirinktas 100 čirpų kompromisas, užtikrinantis pakankamą vidurkinimą ir stabilų sistemos veikimą.

Signalai buvo registruojami abiejuose kanaluose vienu metu (**38 pav.**). Surinkti duomenys buvo suskirstomi į atskirus čirpus, sudarant dvimatę matricą, kur kiekviena eilutė atitiko vieną čirpą. Siekiant sumažinti triukšmo įtaką, analizėje naudotas kelių čirpų vidurkinimas.



38 pav. Priimtas signalas etaloniniame (mėlynas) ir antenos (oranžinis) kanaluose

Kadangi tiesioginis siųstuvo-priėmėjo ryšys sukuria stiprų foninį signalą, buvo taikomas kompleksinis nuotėkio slopinimas. Etaloninis signalas (RX0) buvo naudojamas kaip bazė, o antenos signalas (RX1) koreguojamas atimant jo projekciją į etaloninį signalą. Tai leido sumažinti statinius komponentus ir pagerinti silpnų atspindžių aptikimą.

Siekiant sumažinti aplinkos nestabilumo įtaką, buvo taikoma trijų matavimų metodika:

1. **Fonas 1 (F1)** – pirmasis aplinkos matavimas be objekto.
2. **Fonas 2 (F2)** – pakartotinis matavimas tomis pačiomis sąlygomis.
3. **Objektas (Obj)** – matavimas su pastatytu automobiliu.

Ši procedūra leido įvertinti sistemos stabilumą ir atskirti tikrą signalą nuo atsitiktinių svyravimų. Skirtumas tarp dviejų foninių matavimų:

$| F_2 - F_1 |$
apibūdina natūralius aplinkos pokyčius, triukšmą bei sistemos nestabilumą. Tuo tarpu skirtumas tarp taikinio ir foninio matavimo:

$| Obj - F_1 |$
apima tiek tikro taikinio signalą, tiek aplinkos svyravimus.

Galutinis aptikimo kriterijus apskaičiuojamas taip:

$$\Delta = | Obj - F_1 | - \beta \cdot | F_2 - F_1 | \quad (35)$$

čia β yra empiriškai parinktas svorio koeficientas. Neigiamos reikšmės yra atmetamos (nustatomos į nulį). Tokiu būdu efektyviai pašalinami klaidingi pikai, atsirandantys dėl aplinkos pokyčių, ir išryškinami tik realūs taikiniai.

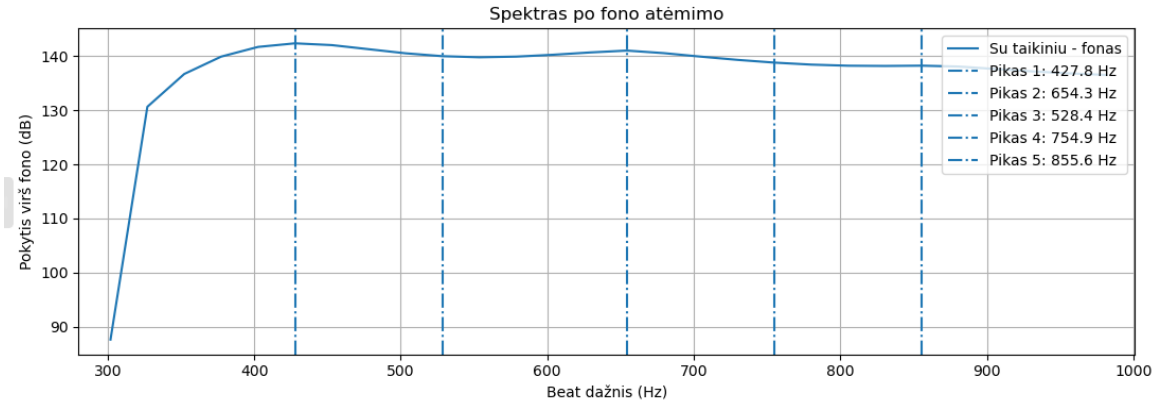
Šis metodas yra ypač svarbus realiomis sąlygomis, kuriose aplinka nėra visiškai stabili (pvz., dėl judančių objektų, temperatūros pokyčių ar elektromagnetinių trikdžių).

Po apdorojimo spektre buvo ieškoma lokalinių maksimumų, atitinkančių galimus taikinius. Siekiant išvengti klaidingų aptikimų, naudoti tik tie dažnių komponentai, kurie patenka į iš anksto apibrėžtą paieškos intervalą. Aptikti pikai buvo konvertuojami į atstumus pagal FMCW formulę.

Atliekant FMCW radaro eksperimentus su priekyje orientuotomis siuntimo (TX) ir priėmimo (RX) antenomis buvo realizuotas realios aplinkos atspindžio matavimas, kai signalas sklinda į taikinį ir grįžta atgal į imtuvą. Sistema veikė 2,5 GHz dažniu, naudojant 30 MHz pločio linijinį čirpo signalą ir 5 ms trukmę, kas atitiko apie 5 m nuotolio skiriamąją gebą.

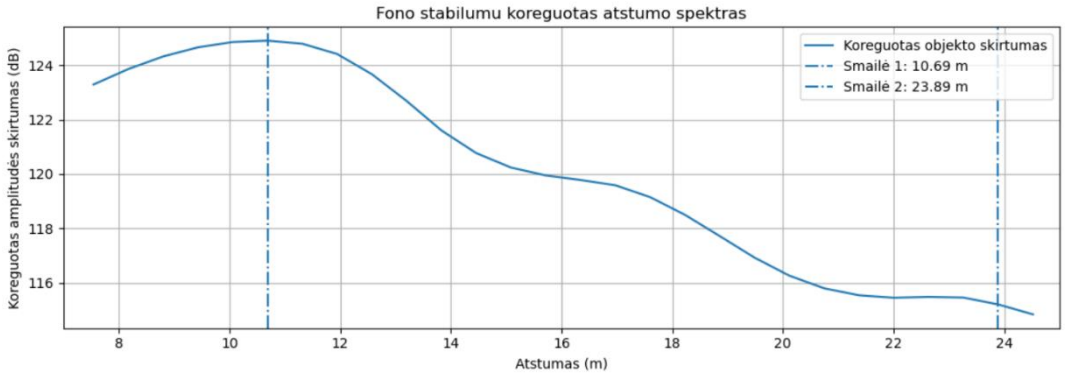
Sistemos kūrimo metu iš pradžių buvo susidurta su reikšmingomis problemomis, susijusiomis su neteisingu signalo interpretavimu. Ankstyvuose bandymuose, kai nebuvo taikomas nei nuotėkio kompensavimas, nei foninio signalo atėmimas, spektre dominavo stiprus žemų dažnių komponentas, atsirandantis dėl tiesioginio TX ir RX kanalų susiejimo ar artimų atspindžių. Dėl to buvo stebimi keli klaidinantys spektriniai maksimumai, kurie nesikeisdavo keičiant taikinio atstumą arba neatitiko realios situacijos. Taip pat buvo nustatyta, kad paprastas RX kanalų skirtumas ar tiesioginis atimties metodas nėra pakankami.

Papildomai įdiegus foninio signalo atėmimą iš spektro su taikiniu pašalinami kintantys, su taikiniu nesusiję signalai. Aptinkamas signalas su vienu fono atėmimu pateikiamas **39 pav.**



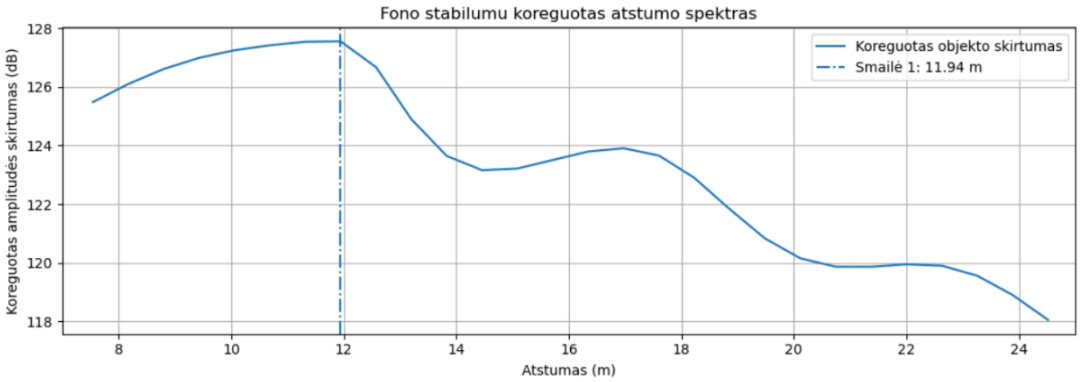
39 pav. Priimtas signalas po vieno fono atėmimo, vietovė 1

Eksperimentų metu buvo atlikti matavimai skirtingais atstumais (apie 10 m, 12 m ir 16 m), ir visais atvejais sistemoje buvo stebimi keli spektriniai maksimumai, atsirandantys dėl riboto dažnių juostos pločio ir daugialypių atspindžių. Tačiau tinkamai parinkus analizės diapazoną ir vertinant pikus, artimiausius tikėtinam nuotoliui, buvo gauti rezultatai, atitinkantys realų atstumą su maždaug ±1 m paklaida. Tai laikytina geru rezultatu, atsižvelgiant į teorinę sistemos skiriamąją gebą. Taip pat nustatyta, kad stipriausias spektrinis pikas ne visada atitinka tikrąjį taikinį, todėl būtina taikyti papildomus kriterijus, pavyzdžiui, piko padėtį arba jo pokytį lyginant su foniniu matavimu.



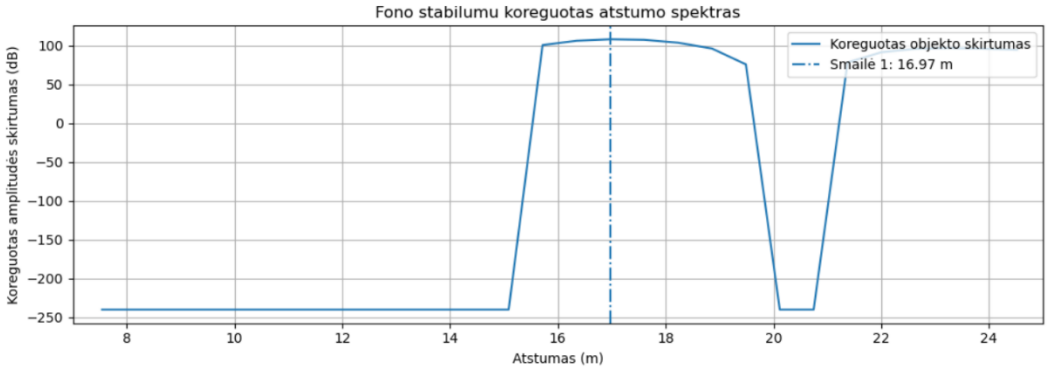
40 pav. Priimtas objekto už 10 m nuo RX antenos, dvigubas fono atėmimas, vietovė 2

Vietovėje 2 atliktas objekto už 10 m nuo RX antenos matavimo rezultatas pateikiamas **40 pav.** Matavime taikomas dvigubas fono atėmimas. Matoma pagrindinė smailė ties ~10 m bei papildoma smailė ties ~24 m, kuri gali būti siejama su daugkartiniais atspindžiais ar klaida



41 pav. Priimtas objekto už 12 m nuo RX antenos, dvigubas fono atėmimas, vietovė 2

Vietovėje 2 atliktas objekto už 12 m nuo RX antenos matavimo rezultatas pateikiamas **41 pav.** Matavime taikomas dvigubas fono atėmimas. Gauta aiški vienintelė smailė, atitinkanti realų objekto atstumą (~12 m), kas rodo stabilias matavimo sąlygas.



42 pav. Priimtas objekto už 16 m nuo RX antenos, dvigubas fono atėmimas, vietovė 2

Vietovėje 2 atliktas objekto už 16 m nuo RX antenos matavimo rezultatas pateikiamas **42 pav.** Matavime taikomas dvigubas fono atėmimas. Didėjant atstumui (~16 m), signalas tampa mažiau išreikštas, o spektras rodo išplokštėjimą, kas gali būti susiję su mažėjančiu signalo ir triukšmo santykiu bei apdorojimo artefaktais. Taip pat visuose matavimuose matyti atspindys ties 17 m riba. Apibendrinti kelių dienų matavimai pateikiami lentelėse 8 – 10.

8 lentelė. Matavimai vietovėje Nr. 1, pirma diena

Nr.	Tikrasis atstumas, m	Matavimo rezultatas, m
1.	10	Neaptikta
2.	10	Neaptikta
3.	10	Neaptikta
4.	10	10,2
5.	10	10,1
6.	10	10,3
7.	12	12.2
8.	12	12
9.	10	10,2

9 lentelė. Matavimai vietovėje Nr. 1, antra diena

Nr.	Tikrasis atstumas, m	Matavimo rezultatas, m
1.	10	Neaptikta
2.	10	10,2
3.	10	Neaptikta
4.	10	Neaptikta
5.	12	Neaptikta
6.	12	Neaptikta
7.	12	Neaptikta

10 lentelė. Matavimai vietovėje Nr. 2, trečia diena

Nr.	Tikrasis atstumas, m	Matavimo rezultatas, m
1.	10	Neaptikta
2.	10	Neaptikta
3.	10	7,1
4.	10	Neaptikta
5.	10	10,1
6.	10	10,4
7.	12	11,9
8.	12	12,1
9.	16	16,9
10.	16	16,5

Gauti rezultatai parodė, kad objekto aptikimas priklauso nuo antenų padėties objekto ir priimančios antenos atžvilgiu. Į objektą turi būti nukreipiamas kuo didesnis signalo energijos kiekis tokiu kampu, kad atspindys būtų maksimalus. Savo ruožtu į priimančią anteną turi patekti kuo mažesnis tiesiogiai išspinduliuotos energijos kiekis.

Urbanizuotoje vietovėje taikomas fono atėmimas nėra toks efektyvus, galimai dėl stipriai kintančio aplinkos fono ir judančių objektų.

Apibendrinant galima teigti, kad sukurta FMCW radaro sistema su priekyje orientuotomis antenomis geba patikimai aptikti objektus 10–16 m atstumu realiomis sąlygomis, tačiau jos veikimą riboja siųstuvo-imtuvo nuotėkis, ribota dažninė juosta ir daugialypiai atspindžiai, kurie galimai lemia kelių pikų atsiradimą bei reikalauja pažangesnių signalų apdorojimo metodų. Taip pat reikia paminėti, kad ADALM-PLUTO SDR siųstuvo TX stiprinimas buvo nustatytas į 0 dB (maksimali išėjimo galia), tačiau dėl galios daliklio ir perdavimo grandinės nuostolių efektyvi į anteną tiekiama galia buvo žymiai mažesnė, todėl sistema veikė arti praktinės ne aptikimo ribos.

Išvados

1. Atlikta pasyvių ir aktyvių dronų aptikimo metodų analizė parodė, kad SDR technologija gali būti taikoma įvairiems bepiločių orlaivių aptikimo principams, tačiau metodų efektyvumas priklauso nuo specialiai aptikimui pritaikytos RF įrangos parametrų, naudojamų antenų charakteristikų bei taikomų signalų aptikimo algoritmų.
2. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad vieno priėmimo kanalo SDR gali būti naudojamas ne tik drono valdymo signalui aptikti, bet ir krypčiai nustatyti pagal skirtingų antenų priimamo signalo galios palyginimą. Taikant sektorinių antenų sistemą ir RF komutatorių, galima įgyvendinti kryptinį stebėjimą naudojant supaprastintą vieno kanalo SDR sistemą.
3. Monopulsinio krypties nustatymo tyrimai parodė, kad dviejų priėmimo kanalų SDR sistema leidžia tiksliau nustatyti signalo kryptį nei vieno kanalo galios palyginimo metodas, todėl krypties nustatymui tikslinga naudoti dviejų kanalų SDR sistemas.
4. FMCW principu veikiančio atstumo nustatymo SDR radaro tyrimas parodė, kad esant mažai atspindėto signalo galiai tikslinga taikyti aplinkos fono atėmimą, lyginant matavimus be objekto ir su objektu. Šis metodas buvo suformuotas eksperimentinių tyrimų metu.

Literatūros sąrašas

1. AKEELA R., DEZFOULI B. Software-definedRadios: Architecture, state-of-the-art, and challenges. *Computer Communications*, Volume 128, (2018), p. 106-125.
2. COLLINS T. F., GETZ R., PU D., WYGLINSKI A. M. Software-Defined Radio for Engineers. Analog Devices perpetual eBook license – Artech House copyrighted material. Prieiga per internetą: https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf [žiūrėta 2024-04-11]
3. ASHRY M. M., MASHALY A. S., FMCW SAR Imaging Based on Software Defined Radio Architecture, (2023) International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)
4. KHAN M. A., MENOUAR H., ELDEEB A., ABU-DAYYA A., SALIM F. D. On the Detection of Unauthorized Drones—Techniques and Future Perspectives: A Review. *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 22, NO. 12, JUNE 15, 2022
5. BASAK S., RAJENDRAN S., POLLIN S., SCHREERS B. Combined RF-Based Drone Detection and Classification. *IEEE Transactions On Cognitive Communications And Networking*, VOL. 8, NO. 1, MARCH 2022.
6. PARK S., KIM H. T., LEE S., JOO H., KIM H. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges. IEEE ACCESS Volume 9: 2021.
7. GARVANOV I., KANEV D., GARVANOVA M., IVANOV V. Drone Detection Approach Based on Radio Frequency Detector. *International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS* (2023), Varna, Bulgaria (ICAI'23)
8. COLUCCIA A., PARISI G., FASCISTA A. Detection and Classification of Multirotor Drones in Radar Sensor Networks: A Review. University of Salento, Italy. *Sensors* (2020), *20*(15), 4172; https://doi.org/10.3390/s20154172
9. CHIPER F. L., MARTIAN A., MUSCALU D. I., VLADEANU C., MARGHESCU I., Aerial Drone Defense System based on Software Defined Radio Platforms. IEEE *14th International Conference on Communications (COMM)* (*2022)*
10. EZUMA M., ERDEN F., ANJINAPPA Ch. K., OZDEMIR O., GUVENC I. Detection and Classification of UAVs Using RF Fingerprints in the Presence of Wi-Fi and Bluetooth Interference, IEEE *Open Journal of the Communications Society (Volume 1)* (2019).
11. FANAN A. M., MEHDAWI M. A., MURRAY J. C., Detecting and filtering multiple drone controller signals from background noise using bearing & amplitude data. IEEE 29th Telecommunications Forum (TELFOR) (2021).
12. KAPLAN B., KAHRAMAN I., EKTI A. R., YARKAN S., GORCIN A., OZDEMIR M. K., CIRPAN H. A. Detection, Identification, and Direction of Arrival Estimation of Drone FHSS Signals With Uniform Linear Antenna Array. IEEE (2021).
13. KARPOVICH P., KARENEUSKI S., ZIELIŃSKI T. P. Practical Results of Drone Detection by Passive Coherent DVB-T2 Radar, (2020) *21st International Radar Symposium (IRS)*, IEEE.
14. KULPA K., BACZYK M., MALANOVSKI M. Microdoppler Drone identification in DVB-T Passive Radar, (2024) *International Radar Conference* (RADAR), IEEE.
15. DEMISSIE B., BOSWETTER M., MANDT M., STEFFES C. Protection of Critical Infrastructure using LTE450-based Passive Radar: Range Measurements for Drone Detection. (2024) *International Radar Conference (Radar)*, IEEE.

16. MAKSYMIUK R., PLOTKA M., ABRATKIEWICZ K., SAMCZYNSKI P. 5GNetwork-Based Passive Radar for Drone Detection. (2023) *24th International Radar Symposium (IRS),* IEEE.
17. MORRIS P. J. B., HARI K. V. S. Detection and Localization of Unmanned Aircraft Systems Using Millimeter-Wave Automotive Radar Sensors, (2021) *IEEE SensorsLetters VOL. 5, NO. 6.*
18. CHARVAT G. L. Small and Short-Range Radar Systems, (2017)Taylor and Francis Group, LLC.
19. DE QUEVEDO A. D., URZAIZ F. I., MENOYO J. G., LÓPEZ A. A. Remotely Piloted Aircraft Detection with Persistent Radar. (2018) *15th European Radar Conference (EuRAD).*
20. DE QUEVEDO A. D., URZAIZ F. I., MENOYO J. G., LÓPEZ A. A. Drone Detection and RCS Measurements with Ubiquitous Radar. (2018) *International Conference On Radar (Radar)*.
21. KAYA S., YAPICI A. C., TIBIKOĞLU B., YAZICI S. O. Implementation of FMCW Radar by Using SDR, (2021) *13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) IEEE.*
22. DESHMUKH S., VINOY K. J., Design and Development of RADAR for detection of Drones and UAVs. (2022) *IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*
23. AL-NUAIM T., ALAM M., ALDOWESH A. Low-Cost Implementation of a Multiple-Input Multiple-Output Radar Prototype for Drone Detection. (2019) *International Symposium on Electronics in Marine (ELMAR), IEEE.*
24. FLAK P. Drone Detection Sensor With Continuous 2.4 GHz ISM Band Coverage Based on Cost-Effective SDR Platform. (2021) *IEEE Access Volume 9.*
25. STASIAK K., CIESIELSKI M., KUROWSKA A., PRZYBYSZ W. A Study on Using Different Kinds of Continuous-Wave Radars Operating in C-Band for Drone Detection, (2018) *22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), IEEE.*
26. MIRANDA R. K., ANDO D. A., da COSTA J. P. C. L., de OLIVEIRA M. T. Enhanced Direction of Arrival Estimationvia Received Signal Strength of Directional Antennas. (2018) *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT).*
27. DABROWSKI G., STASIAK K., DROZDOWICZ J., GROMEK D., SAMCZYNSKI P. An X–band FMCW Radar Demonstrator Based on an SDR Platform. (2020) *21st International Radar Symposium, IEEE.*
28. BJÖRKLUND S. Target Detection and Classification of Small Drones by Boosting on Radar Micro-Doppler. (2018) *15th European Radar Conference (EuRAD)*
29. ZULKIFLI S., BALLERI A. Design and Development of K-Band FMCW Radar for Nano-Drone Detection. (2020) *IEEE Radar Conference (RadConf20).*
30. STASIAK K., CIESIELSKI, SAMCZY´NSKI P., GROMEK D., KULPA K. Preliminary Results of Drone's Propellers Detection Using K-band and mm-Wave FMCWRadar. (2019) IEEE *20th International Radar Symposium (IRS).*
31. RZEWUSKI S., KULPA K., SALSKI B., KOPYT P., BOROWIEC K., MALANOWSKI M., SAMCZYŃSKI P. Drone RCS estimation using simple experimental measurement in the WIFI bands. (2018) *22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), IEEE.*
32. ARDOINO R., RUSSO S., Bagnato R., FLAGIELLO N., DI GREGORIO L., ROSSI V. Commercial Drones Radar Cross Section characterisation at 24 GHz with a Frequency Modulated Continuous Wave Radar. (2024) *International Radar Symposium (IRS), IEEE.*
33. FRANZESE M., CAROTENUTO V., MATTEI F., CONTE C., RUFINO G., ACCARDO G., BERARDINO P., DI VINCENZO A., ESPOSITO C., NATALE A., PALMESE G., PERNA S.,

LANARI S., DE MAIO A. In-Flight UAVs Polarimetric Radar Cross Section Measurement and Statistical Analysis at X- and L-Bands. (2025) *IEEE Sensors Journal, Volume: 25, Issue: 20.*

34. MONGA S., SALUJA N., SIANG T., TANEJA A., GARG R. Estimation of Rain Attenuation over 10 GHz to 80 GHz Radio Band, (2022) *3rd International Conference on Computing, Analytics and Networks (ICAN), IEEE.*
35. MATA-ALONSO I., RIERA J. M., PIMIENTA-DEL-VALLE D., BENARROCH A. Rain Attenuation of Millimeter Waves Investigated from Drop Size Distributions, (2023) *17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE.*
36. PAVLIKOV V., NIKOLAY R., ZHYLA S., OLEKSANDR T., SOBKOLOV A., OLEXIY O. Cumulative Rain Attenuation Probability In Ukraine. (2019) *IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM).*
37. Kraft J. Building a Monopulse Signal Tracker with ADALM-PLUTO, https://ez.analog.com/ez-blogs/b/engineerzone-spotlight/posts/building-a-monopulse-signal-tracker-with-adalm-pluto, Žiūrėta 2025-11-23.