

Vilniaus universitetas

Fizikos fakultetas

Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Andrius Laučys

RADARŲ BEPILOČIAMS ORLAIVIAMS TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos studijų programa

Studentas

Andrius Laučys

Leista ginti

2019-05-23

Darbo vadovas

dr. Saulius Rudys

Recenzentas

doc. Vytautas Jonkus

Instituto direktorius

prof. Jonas Matukas

Vilnius 2019

Turinys

Įvadas.....	3
Bepiločių orlaivių aptikimo metodų apžvalga.....	5
Optinė detekcija	5
Akustinė detekcija.....	5
Pasyvioji radijo bangų detekcija	6
Radarinė detekcija.....	6
Radaro veikimo principas.	7
Radaro lygtis	7
Nuolat spinduliuojanti dažninė moduliacija.....	8
FMCW radaro mušimų dažnio matematinė analizė	9
Atliekamų tyrimų metodika.....	12
Bepiločio orlaivio radarinio taikinio skerspjūvio nustatymas	12
Programuojamo radijo pagrindu veikiantis FMCW radaras.....	14
Matavimas su milimetrinių bangų diapazono radaru.....	18
Pagrindiniai AWR1642 mmWave radaro parametrai	21
Milimetrinių bangų radaro didžiausio aptinkamo nuotolio didinimas.....	21
Rezultatai ir jų aptarimas.....	24
DJI Phantom 3 radarinio taikinio skerspjūvio matavimo rezultatai	24
USRP B210 radaro matavimų rezultatai.....	26
Milimetrinių bangų radaro sistemos matavimų rezultatai	30
Jūrinio radaro tinkamumo aptikti bepiločius orlaivius matavimų rezultatai [29].....	31
Galimi atliktų tyrimų rezultatų pritaikymai.....	34
Radaras bepiločiui orlaiviui, skirto kitiems bepiločiams orlaiviams aptikti ir nukenksminti.....	34
Mažo nuotolio milimetrinių bangų radarų sistema	35
Išvados	37
Literatūros sąrašas	38
Santrauka	41
Summary.....	42
Priedai.....	43

Įvadas

Sparčiai tobulėjančios medžiagų ir elektronikos mokslo šakos bei gamybos technologijos lėmė įvairių įrenginių kainų kritimą. Šie pokyčiai neaplenkė ir mažų bepiločių orlaivių srities: nuo fiksuoto sparno iki multirotorinių bepiločių orlaivių. Tokių bepiločių orlaivių taikymo spektras yra labai platus: nuo buitinių paslaugų teikimo, mokslinių tyrimu atlikimo įvairiose žmogui pavojingose aplinkose iki karinių pritaikymų. Tačiau bepiločiai orlaiviai taip pat gali būti naudojami ir nelegaliems tikslams. Jie gali nepastebimi plika akimi gabenti įvairaus dydžio krovinius, narkotines medžiagas ar net sprogmenis, tokiu būdu būti panaudojami teroristiniams išpuoliams, šnipinėjimams neleistinose vietose. Taip dar visai neseniai pastebėtas bepilotis orlaivis sutrikdė Getviko (*angl. Gatwick*) oro uosto darbą [1]. Tokių incidentų skaičius kasmet vis didėja [2]. Siekiant kontroliuoti tokius bepiločius orlaivius, būtina juos nukenksminti. Yra žinoma nemažai tokių bepiločių orlaivių nukenksminimo būdų, tačiau didžiąjai daliai šių priemonių reikia žinoti tokio orlaivio poziciją, greitį, nuotolį, trajektoriją. Todėl radarų sistemos tai gali puikiai atlikti.

Dronams aptikti gali būti naudojamos tiek pasyvios, tiek aktyvios radarų priemonės. Vienas populiariausių radaro veikimo principų yra nuolat spinduliuojantis moduluotojo dažnio (*angl. Frequency modulated continuous wave, FMCW*) principas. Tokio tipo radarai, kuriami kieto kūno elektronikos pagrindu, gali būti sąlyginai mažų matmetų, mažos galios bei atitinkamai pigesni, negu analoginiai jų pirmtakai. Taip pat, tokius radarus yra nesunku realizuoti skaitmeninėmis priemonėmis. Šiuo pagrindu veikiančio radaro sistemos bepiločių orlaivių aptikimui buvo tyrinėtos [3] ir [4]. Bepiločiai orlaiviai yra gana problematiški siekiant juos aptikti dėl savo mažų matmenų, aptakių formų, bei elektromagnetines bangas nestipriai atspindinčių medžiagų. Bendruoju atveju radaro gebėjimą aptikti tokį bepilotį orlaivį lemia objekto radarinio taikinio skerspjūvio (*angl. Radar Cross-section, RCS*) vertė, kuri dėl bepiločio orlaivio formos taip pat priklauso ir nuo bangos ilgio.

Šiame darbe atlikta trumpa mokslinė apžvalga, kurioje aptariama bepiločių orlaivių detekcija radarais ir įvairiais kitais metodais. Taip pat pristatyti radaro bei FMCW radaro veikimo principai, pagrindiniai parametrai, bandymai su įvairiais FMCW radarais ir išmatuotas populiarus multirotorinio bepiločio orlaivio DJI Phantom 3 radarinio taikinio skerspjūvis.

Šio baigiamojo darbo tikslas yra ištirti įvairaus tipo nuolat spinduliuojančio moduluotojo dažnio radarų pritaikymą mažų bepiločių orlaivių aptikimui.

Šio baigiamojo darbo tyrimai buvo atliekami vykdant Lietuvos mokslo tarybos remiamą projektą „Bepiločio orlaivio, skirto aptikti ir nukenksminti bepiločius orlaivius kūrimas“ [5].

Atliekant šį darbą buvo suformuotos tokios užduotys:

1. Realizuoti FMCW radarą programuojamo radijo pagrindu.
2. Ištirti programuojamo radijo pagrindu veikiančio radaro savybes ir galimybes aptikti mažus, lėtai judančius taikinius stiprių atspindžių aplinkoje.
3. Sukurti padidinto veikimo nuotolio FMCW radarą panaudojant milimetrinių bangų radaro plokštę AWR1642Boost su lustu skirtu automobilineis radarams.
4. Ištirti tokio milimetrinių bangų radaro galimybes aptikti bepiločius orlaivius.
5. Ištirti FMCW pagrindu veikiančio jūrinio radaro (*angl. Marine radar*) galimybes aptikti bepiločius orlaivius.

Bepiločių orlaivių aptikimo metodų apžvalga

Bepiločių orlaivių aptikimui gali būti naudojama ne viena technologija. Nors šiame darbe buvo tirti tik pigūs FMCW principu veikiantys radarai, šiame skyriuje bus trumpai apžvelgtos ne tik radarinės, bet ir kitos potencialios bepiločių orlaivių aptikimo technologijos, jų privalumai ir trūkumai.

Optinė detekcija

Optinė bepiločių orlaivių detekcija gali būti atliekama nuo tolimųjų infraraudonųjų iki pat matomos šviesos spektro. Įprastai tokios sistemos yra įrengiamos gimbalu pagrindu su keletu įvairaus spektro ir nuotolio ruožo kamerų. Optiškai bepiločius orlaivius, tokius kaip daugiarotorinius dronus, galima aptikti iki 1000 m. atstumo, tačiau tai labai priklauso nuo bepiločio orlaivio dydžio ir ypač oro sąlygų. Nors bepiločius orlaivius yra gana paprasta aptikti giedro dangaus sąlygomis (žr. *1-a pav.*), optinė detekcija tampa praktiškai neįmanoma net trumpuose atstumuose esant rūkui arba dideliame debesuotumui (žr. *1-b pav.*).



1 pav. Optinė detekcija: a) Bepilotis orlaivis DJI Phantom 3 aptinkamas 200 m atstumu giedro dangaus sąlygomis; b) Bepilotis orlaivis vos pastebimas, kai yra 50m už debesų [29]

Akustinė detekcija

Įprastai bepiločių orlaivių rotorai skleidžia tam tikrą garsą ir dėl to yra įmanoma aptikti tam tikrą parašą, sukeltą greitai besisukančių propelerių [6]. Įvairių bepiločių orlaivių akustinės savybės yra ištirtos ir klasifikuotos. Yra įmanoma nustatyti atsklindančio garso kryptį ir netgi aukštį tik su viena akustine antena naudojant klasikinį pluošto formavimo algoritmą, tačiau išgauti išmatuotą atstumo informaciją tokiu metodu yra gana sudėtinga. Todėl keletas sudėtingesnių sistemų su mikrofonų masyvais [7] arba plačiai išdėstytais antžeminiais akustiniais sensorių kompleksais [8] vis dar yra vystymo etape. Tai galėtų padidinti galimybę išgauti garsą iš tam tikros krypties ir tiksliau nustatyti bepiločio orlaivio vietą trianguliuojant duomenis iš skirtingų akustinių antenų pozicijų. Kilnojamos akustinės sistemos gana mažus bepiločius orlaivius gali aptikti maždaug 250-300 m. atstumu [9], tačiau tokios sistemos yra dažnai apjungiamos su kita bepiločių orlaivių aptikimo sistema (optine, radarine). Deja, akustinės sistemos yra visiškai neveiksmingos prieš sklaidytuvus, arba orlaivius su laikinai išjungtais varikliais.

Pasyvioji radijo bangų detekcija

Bepiločių orlaivių komunikacinės ryšių priemonės įprastai skleidžia santykinai stiprią radijo bangų spinduliuotę. Todėl ši spinduliuotė galėtų būti išnaudojama kaip bepiločio orlaivio buvimo netoliese indikatoriumi ir aptikta net kelių kilometrų atstumu nuo bepiločio orlaivio. Tai populiarus orlaivių aptikimo būdas dėl žemos įrangos kainos ir gana didelio veikimo nuotolio. Keletas bepiločių orlaivių detekcijos scenarijų, perimant valdiklio komunikacijos signalą naudojant pigias programinio radijo plokštes buvo išbandyta [10]. Bepiločių orlaivių komunikacijose naudojami gerai žinomi bevielio ryšio perdavimo protokolai leidžia aptikti bepiločius orlaivius pasinaudojus dar pigesniais įrenginiais [11]. Deja, orlaiviai gali skristi ir su išjungtomis komunikacijų sistemomis, kas tokiu atveju šį aptikimo metodą padarytų neveiksmingą.

Radarinė detekcija

Mažų bepiločių orlaivių aptikimas gali būti pasiektas tiek aktyviomis ir pasyviomis radarų sistemomis. Pasyvaus bistatinio radaro sistema (*angl. Passive Bi-static Radar*) išnaudoja įvairius transliacijų, komunikacijų ar navigacinių sistemų siunčiamus signalus siekiant aptikti objektus. Siųstuvas ir imtuvas yra skirtingose vietovėse ir tokio radaro operatorius gali valdyti tik imtuvo pusę. Galimi atspinduliuojimo signalai, tokie kaip FM, DVB, GSM, GNSS arba WIFI, galėtų būti panaudojami pasyvaus radaro siekiant aptikti bepiločius orlaivius. Keletas eksperimentinių bepiločių orlaivių aptikimo rezultatų naudojant skaitmeninio garso transliacijos (*angl. Digital Audio Broadcast*) signalus paskelbti [12], o naudojant skaitmeninės televizijos transliacijos (*angl. Digital Video Broadcast*) signalus [13].

Tokių sistemų trūkumas yra tai, kad atspinduliuojančių signalų bangų formos nėra specialiai kurtos radarinei detekcijai, todėl turėtų būti apgalvota, kuris signalas yra tinkamiausias tam tikriems objektams aptikti. Šios sistemos taip pat pasižymi prasta nuotolio ir doplerio dažnio skiriamąja geba kai objektas yra arti tokio radaro elementų.

Aktyvūs radarai pagal veikimo principą skirstomi į impulsinius ir nuolat spinduliuojančius (*angl. Continuous Wave, CW*). Impulsinis radaras siunčia labai trumpą, tačiau didelės galios impulsą ir laukia atspindžio visą likusią impulso pasikartojimo periodo trukmę, iki kol kitas impulsas bus išspinduliuotas. Tokių radarų efektyvumui didžiausią įtaką daro siunčiamo impulso trukmės ir atspindžio priėmimo laiko langas. Trumpesnis impulsas lemia platesnę dažnių juostą, o tuo pačiu geresnę nuotolio skiriamąją gebą. Impulsiniai radarai dažniausia yra skirti veikti ilguose atstumuose dėl jų aukštos siuntimo galios.

Nuolat spinduliuojančių radarų sistemos, ištiesai siunčia ir tuo pat metu priima atspindžius nuo objektų. Judančio objekto greitis ir trajektorija gali būti nustatyti stebint imtuve priimto signalo dažnio poslinkius, dėl doplerio efekto. Įprastinės CW sistemos negali atlikti atstumo matavimų be papildomos

moduliacijos, kuri užkoduotų laiko atskaitą siunčiamo signalo bangos formoje. Viena iš labiausiai naudojamų moduliacijų yra tiesinė dažninė moduliacija (*angl. linear frequency modulation, LFM*), kur tam tikra dažnio vertė atitinka laiko delką, atitinkančią tam tikram atstumui [14, 22 p.].

Nemaža dalis bepiločių orlaivių aptikimo tyrimų būtent naudoja nuolat spinduliuojančius moduluotojo dažnio radarus. Pasiūlymai stebėti, ar bepiločiai orlaiviai nekerta tam tikros teritorijos, naudojant siauro pluošto FMCW radarą pateikiami [3]. Paprastu aukštos galios ir didelio jautrumo FMCW radaru, veikiantis 11 - 11.15 GHz dažnių juostoje, bepilotis orlaivis buvo aptinkamas virš 500m atstumu [15].

Radaro veikimo principas.

Šiame poskyryje aptariami veikimo metodai bei pagrindiniai reiškiniai lemiantys šiame darbe tiriamų radarų veikimą. Gana detalai bus aptartas FMCW radaro generuojamo signalo kelias nuo siųstuvo iki imtuvo. Taip pat bus paminėti pagrindiniai reiškiniai lemiantys tam tikru režimu veikiančio radaro efektyvumą, kaip radarinio taikinio skerspjūvio.

Radaro lygtis

Radaro siųstuvo išspinduliuotas signalas, krenta ant tam tikru atstumu esančio objekto, jame indukuoja laike kintančias sroves ir taip pats objektas tapdamas radijo bangų šaltiniu, dalį jam tekusios signalo galios atspindi atgal į radaro imtuvą. Atspindėta galia priklauso nuo krintančios bangos galios tankio bei radarinio taikinio skerspjūvio. RCS nustatomas pagal taikinio dydį, formą, bei medžiagos, būtent paviršiaus, iš kurios taikinys yra pagamintas. Radaro imtuvo antenoje primamo signalo galios dydis priklauso nuo antenos apertūros – efektyvaus antenos ploto. Dėl nuostolių, efektyvus plotas visuomet yra mažesnis už fizinį antenos plotą. Taigi, įvertinus visus minėtus parametrus, priimta galia radaro imtuve gali būti aprašyta išraiška, dar vadinama radaro formule [16 p. 62]:

$$P_i = \frac{P_s G_s G_t \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

kur P_s – yra siųstuvo galia [W], G_s, G_t – atitinkamai siųstuvo ir imtuvo antenų stiprinimai, λ – signalo nešlio bangos ilgis, σ – vidutinė radarinio taikinio skerspjūvio vertė, R – atstumas iki taikinio. Įskaičius šiluminius triukšmus

$$P_n = kTFB, \quad (2)$$

kur k – bolcmano konstanta, T – aplinkos temperatūra, F – triukšmo faktorius ir B – radaro veikimo darbinės juostos plotis, galima išsireikšti priimto nuo taikinio atsispindėjusio signalo ir triukšmo santykį

$$SNR = \frac{P_s G_s G_i \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 P_n} \quad (3)$$

Iš (1) lygties taip pat galima išsireikšti atstumą arba RCS

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_s G_s G_i \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_i}} \quad \text{arba} \quad \sigma = RCS = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_i}{P_s G_s G_i \lambda^2} \quad (4)(5)$$

Atstumo (4), radarinio taikinio skerspjūvio (5), šiluminio triukšmo tam tikroje dažnių juostoje (2), bei signalo ir triukšmo santykio (3) išraiškų pakanka įvertinti teorines radaro galimybes.

Nuolat spinduliuojanti dažninė moduliacija

Jeigu turime judantį objektą, atsispindėjęs signalas nuo tokio objekto dėl doplerio efekto į siųstuvą grįš su pakitusiu dažniu. Šis dažnio pokytis vadinamas doplerio postumi ir jo pagalba galima nustatyti objekto radialinį greitį. Doplerio efektą nulemia santykinis judėjimas. Atspindžiai grįžtantys į radaro imtuvą efektyviai suspaudžiami (arba išplečiami, jei objektas juda tolyn nuo radaro), tai keičia signalo bangos ilgį ir dažnį. Greitis radialinėje kryptyje susijęs tokiu sąryšiu:

$$V = \frac{\lambda f_d}{2} \quad (6)$$

kur V – radialinis greitis, λ – išsiųsto signalo bangos ilgis, f_d – doplerio dažnis. CW radarų sistemos negali nustatyti nejudančių objektų padėties arba atstumo. Šis apribojimas pašalinamas moduluojant išsiunčiamą signalą. Moduliacija tarsi užkoduoja tam tikrą laiko momentą su tą laiką atitinkančiu radialiniu atstumu. Tokiu atveju tam tikra dažnio vertė atitiks tam tikrą vėlavimą, kurį galima susieti su atstumu R :

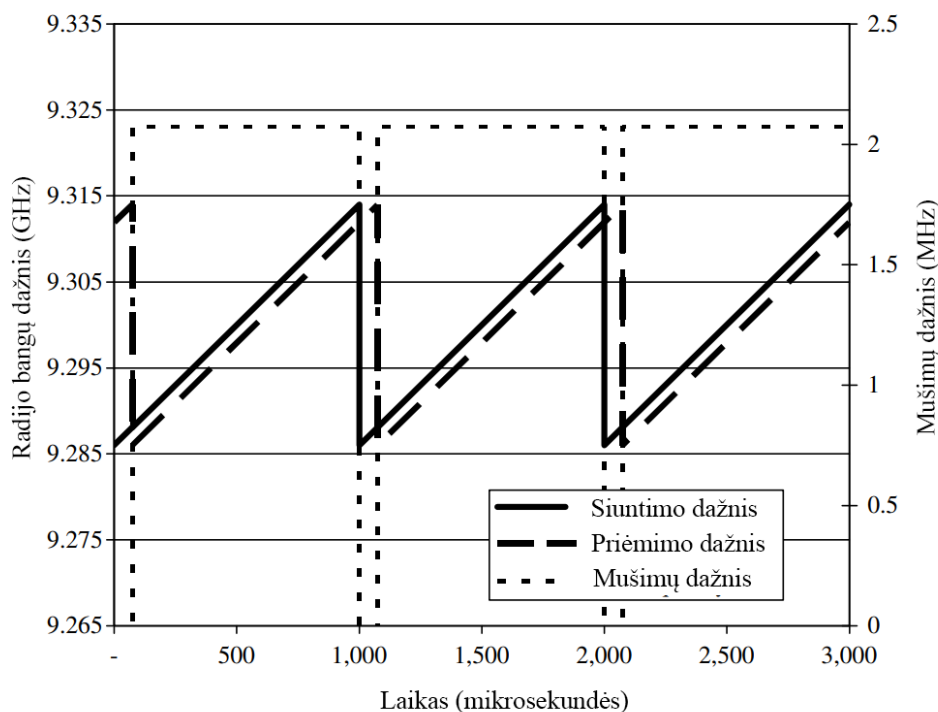
$$\Delta t = \frac{2R}{c} \quad (7)$$

kur c – šviesos greitis. CW tipo radaruose labai svarbi yra fazės reikšmė, kuri nusako tikslią signalo būseną tam tikru laiko momentu [14].

2 pav. pavaizduotas išsiunčiamas ir priimamas FMCW radaro bangos formos dažnis kaip funkcija nuo laiko. Pavaizduota tiesinė pjūklo bangos forma yra plačiai naudojama FMCW radarų sistemose, tuo pačiu ir šiame darbe tirtuose radaruose. Priėmimo signalas ateina nuo atstumu R nuo siųstuvo esančio taikinio. Gaunamas mušimų dažnis f_b yra momentinis dažnių skirtumas tarp išsiųstos ir priimtos bangos formos. Šis mušimų dažnis leidžia gauti taikinio atstumą, nes jis yra susietas su signalo delsa iki taikinio

$$\frac{f_b}{t_d} = \frac{B}{T_m} \quad (8)$$

Kur B – moduliacijos juostos plotis, o T_m – moduliacijos periodas.



2 pav. Siuntimo ir priėmimo signalų dažnio priklausomybė nuo laiko, kartu vaizduojant ir mušimų dažnio vertę [14]

Taigi (7) reikšmę įstačius į (8), gauname FMCW lygtį pjūklo bangos formai:

$$f_b = \frac{B}{T_m} \frac{2R}{c} \quad (9)$$

Mušimų dažnis yra dažnių pokyčio per moduliacijos periodą ir signalo lėkio trukmės produktas. Sekančiame poskyryje bus plačiau aprašytas mušimų dažnio gavimas, kadangi tai yra pagrindinis FMCW radaro veikimo parametras, nusakantis atstumą iki taikinio.

FMCW radaro mušimų dažnio matematinė analizė

Šiame poskyryje pateikiamas matematinis homodininio tiesiškai moduluoto FMCW signalo aprašymas skirtas aptikti vienam taikiniui [17]

Tarkime turime tiesinės FMCW pjūklo bangos formos, svyruojančios dažnių juosta B nuo centrinio dažnio $f_0 - \frac{B}{2}$ iki dažnio $f_0 + \frac{B}{2}$. Dažnis kiekvienu laiko momentu t gali būti išreikštas kaip

$$f_t(t) = f_0 - \frac{B}{2} + \frac{B}{T_m} t \quad 0 < t < T_m \quad (10)$$

, kur T_m yra moduliacijos periodas. Šio signalo fazė $\varphi_t(t)$ gaunama integruojant $f_t(t)$

$$\varphi_t(t) = 2\pi \left[\left(f_0 - \frac{B}{2} \right) t + \frac{B}{2T_m} t^2 \right], \quad 0 < t < T_m \quad (11)$$

Išsiunčiamas sinusinis signalas su amplitude a_0 gali būti išreiškiamas kaip

$$s_t(t) = a_0 \sin 2\pi \left[\left(f_0 - \frac{B}{2} \right) t + \frac{B}{2T_m} t^2 \right], \quad 0 < t < T_m \quad (12)$$

Pirmas narys sinuse atitinka fazės postūmį dėl nešlio dažnio, o antras narys – fazės postūmį dėl moduluoto dažnio. Tarkime yra taikiny s atstumu R ir judantis tam tikru greičiu v laiko momentu t . Čirpo signalas atsispindėjęs nuo tokio taikinio, grįš atgal į imtuvą su tam tikru vėlinimu t_d , bei sumažėjusia amplitude b_0

$$t_d = \frac{2(R + Vt)}{c} \quad (13)$$

Tuomet priimtas atsispindėjęs nuo taikinio signalas bus:

$$s_r(t) = b_0 \sin 2\pi \left[\left(f_0 - \frac{B}{2} \right) (t - t_d) + \frac{B}{2T_m} (t - t_d)^2 \right] \quad (14)$$

Maišiklyje priimtas signalas yra sumaišomas su išsiunčiamu signalu, pasinaudojant trigonometrine savybe

$$\sin a \sin b = \frac{1}{2} (\cos(a - b) - \cos(a + b)), \quad (15)$$

tokiu būdu maišiklio išėjime yra gaunamas mušimų dažnio signalas

$$s_b(t) = s_t(t)s_r(t) = c_0 \cos 2\pi \left[\left(f_0 - \frac{B}{2} \right) t_d - \frac{B}{2T_m} t_d^2 + \frac{B}{T_m} t_d t \right] \quad (16)$$

kur $c_0 = a_0 b_0$, $s_t(t)$ ir $s_r(t)$ signalų amplitudžių sandauga. Stacionariam radarui ir taikiniui, į (16) vietoje t_d užtenka įstatyti $\frac{2R}{c}$, kad gautume

$$s_b(t) = C \cos 2\pi (\phi + f_{b1} t)$$

kur

$$\phi = \left(f_0 - \frac{B}{2} \right) \left(\frac{2R}{c} \right) - \frac{B}{2T_m} \left(\frac{2R}{c} \right)^2 \quad (17)$$

$$f_{b1} = \frac{2BR}{T_m c}$$

f_{b1} yra mušimų dažnis stacionariuoju atveju. Esant pastoviam judėjimui tarp radaro ir taikinio, $s_b(t)$ išraiškoje atstumą reikia pakeisti atstumu priklausančiu nuo greičio ir laiko $R = R_0 + Vt$. Tokiu atveju

$$s_b(t) = C \cos 2\pi (\phi_b + f_d + f_r + f_c(t)) \quad (18)$$

kur

$$f_d = \left(f_0 + \frac{B}{2}\right) \left(\frac{2V}{c}\right)$$
$$f_r = \frac{-2BR_0}{T_m c} \left(1 - \frac{V}{c}\right)$$
$$f_c(t) = 2 \left[\frac{-2BV}{T_m c} \left(1 - \frac{V}{c}\right) \right] t$$

$f_{b2} = f_d + f_r + f_c(t)$ mušimų dažnis esant pastoviam judėjimui tarp radaro ir taikinio, kur f_d yra doplerio dažnio poslinkis, f_r dažnio pokytis dėl pakitusio atstumo moduliacijos periodo metu.

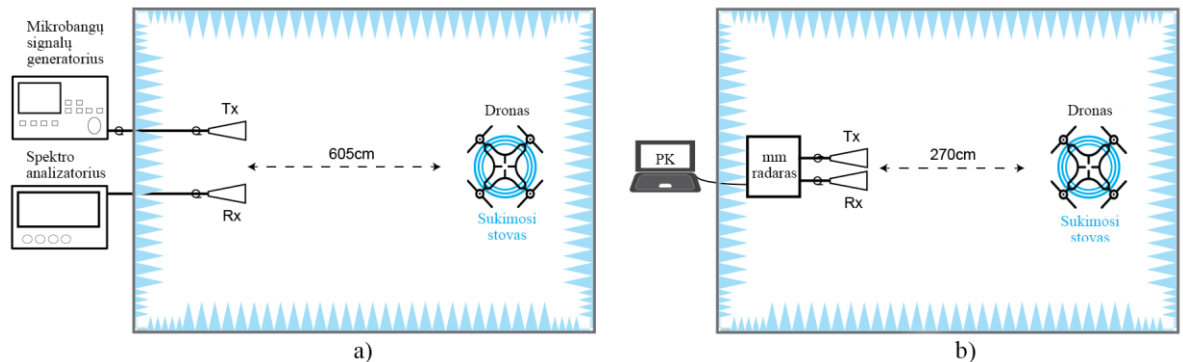
Atliekamų tyrimų metodika

Šiame skyriuje pristatoma, kaip buvo atliekami tyrimai, kokia programinė įranga bei įrenginiai buvo naudoti FMCW radarų tyrimuose siekiant aptikti bepiločius orlaivius (sutrump. BPO).

Bepiločio orlaivio radarinio taikinio skerspjūvio nustatymas

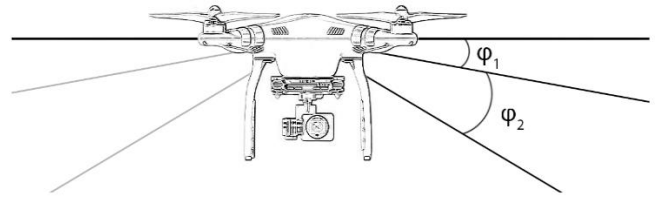
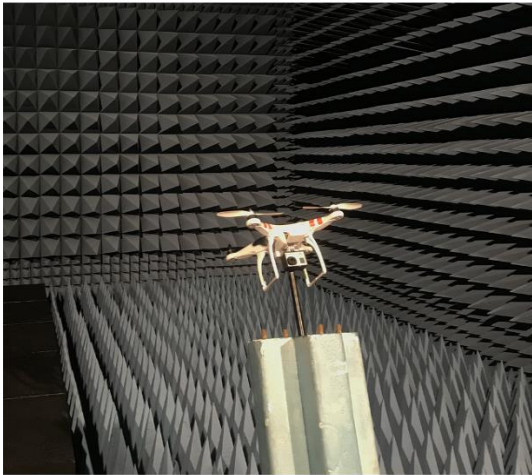
Bepiločio orlaivio radarinio taikinio skerspjūvis, nustatymas tam tikram dažnių ruožui ir bepiločio orlaivio modeliui, gali būti naudojamas įvertinti radaro galimybes, pavyzdžiui, kokio minimalaus signalo ir triukšmo santykio reikėtų (3), norint aptikti mažą objektą, tam tikru atstumu R . Tuo pačiu, RCS suteikia informaciją, kuria padėti bepilotis orlaivis galėtų atspindėti didesnę dalį jį apspinduliuavusios radaro energijos.

Vieni iš populiariausių rinkoje bepiločių orlaivių šiuo metu yra „DJI Phantom“ modelio keturių rotorių bepiločiai. Būtent todėl tokio BPO RCS buvo nustatinėjamas. Matavimas buvo atliekamas centimetrinių bangų (9.5 GHz) ir milimetrinių bangų (77 GHz) diapazonuose. Visi matavimai buvo atliekami Fizinių ir Technologinių mokslų centre (FTMC) esančiame beaidžiame kambaryje, kurio matmenys $8.4 \text{ m} \times 4.6 \text{ m} \times 3.7 \text{ m}$. Signalams generuoti centimetrinių bangų diapazone buvo naudojamas mikrobangų signalų generatorius, o milimetrinių bangų - automobilinio radaro plokštė AWR1642Boost. Centimetrinių bangų diapazone kalibravimui buvo panaudota 50 cm skersmens metalu dengta sfera (žr. 5-a pav.), o matuojant milimetrinių bangų – 28 cm skersmens metalu dengta sfera (žr. 5-b pav). Matavimo aplinkos schemas atitinkamai pavaizduotos 3 pav.



3 pav. Radarinio taikinio skerspjūvio matavimo schemas: a – centimetrinių bangų (9.5 GHz) diapazone, b – milimetrinių bangų diapazone (77GHz)

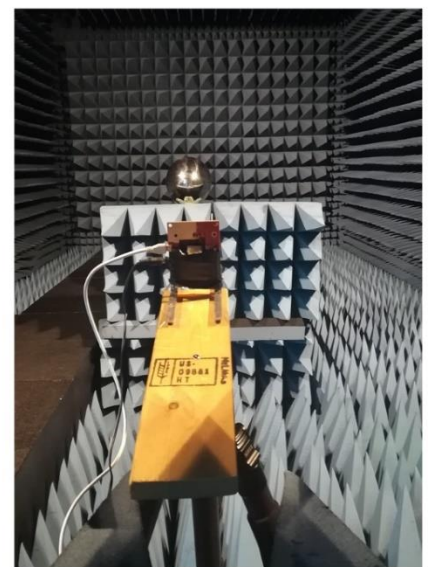
Bepilotis orlaivis milimetrinių bangų diapazone taip pat buvo matuojamas ir kampu į radarą, kadangi įprastai antžeminiai radarai bepilotį orlaivį gali aptikti ir didesniame aukštyje nei yra įrengtas pats radaras, todėl yra didesnė tikimybė apspinduliuoti apatinę bepiločio orlaivio dalį (žr. 4 pav.).



4 pav. DJI Phantom 3 BPO su GoPro kamera RCS matavimas kampu į milimetrinių bangų radaro atžvilgiu



a)



b)

5 pav. Kalibravimas su sfera: a – centimetrinių bangų diapazone su 50 cm skersmens sfera, 6.05 m. atstumu nuo antenų, b – milimetrinių bangų diapazone su 28 cm skersmens sfera 2.70 m. atstumu nuo milimetrinių bangų radaro plokštės

BPO buvo pastatytas ant sukamosios platformos ir centimetrinių bangų diapazone matavimo metu sukamas aplink savo centrinę vertikalią ašį kas 12.5° . Paderinamu mikrobangų generatoriumi buvo generuojamas 9.5 GHz nuolat spinduliuojantis (CW) signalas. Apytiksliai 40 mW galia buvo paduodama į siūstuvą anteną. Atsispindėjusi nuo BPO galia P_r buvo išmatuota naudojant spektro analizatorių, prijungtą prie imtuvo antenos. Pagal (5) lygtį buvo apskaičiuotos bepiločio orlaivio RCS vertės tam tikruose pasukimo kampuose.

Matavimas su milimetrinių bangų radaru buvo kitokio pobūdžio ir galimai mažiau tikslus. BPO buvo sukamas kas 5° aplink savo ašį milimetrinių bangų diapazone. Milimetrinių bangų radaro plokštė AWR1642Boost buvo prijungta prie kompiuterio ir su specialiu programiniu įrankiu [27] buvo stebimas atsispindėjusios galios lygis nuo sferos 2.70 m atstumu. Radaro plokštė generavo FMCW signalą svypuojantį 2 GHz juostoje, nes generuoti vieno dažnio CW signalo nebuvo galimybės. Kadangi sferos RCS nepriklauso nuo bangos ilgio: $RCS_{sf} = \pi r^2 = 0.0615 \text{ m}^2$, gauta atsispindėjusi nuo sferos signalo vertė santykiniais dB vienetais buvo naudota lyginant su atspindėtu galios lygiu nuo tiriamo bepiločio orlaivio. Tokiu būdu, apskaičiavus sferos RCS vertę dBm^2 vienetais, prie šios vertės pridėdant skirtumą tarp, nuo sferos atspindėto signalo lygio ir nuo bepiločio orlaivio atsispindėjusio signalo lygio, verčių, milimetrinių bangų diapazone buvo nustatomos RCS vertės dBm^2 matavimo vienetais.

Programuojamo radijo pagrindu veikiantis FMCW radaras

Moksliniuose straipsniuose buvo atrasta, kad nuolat spinduliuojančio moduliotojo dažnio radaras gali veikti ir programuojamo radijo pagrindu, būtent pasinaudojus Ettus USRP programuojamais radijo įtaisais [18,19,20]. Įvairiuose moksliniuose straipsniuose atlikti bandymai siekiant aptikti bepilotį orlaivį suteikė motyvacijos įvertinti programuojamo radijo potencialą veikti FMCW radaro principu. Taigi šį radarą buvo nuspręsta realizuoti ant Ettus USRP B210 [21] modelio programuojamo radijo (žr. 6 pav.), turinčio 2 siųstuvus ir 2 imtuvus (panaudota buvo tik viena pora Tx ir Rx). Šis programinis radijas paprastai programuojamas naudojant atviro turinio programinę įrangą „GNU RADIO“. Ši programinė įranga turi kitų autorių sukurtą įrankių rinkinį „GR-RADAR“ [22], kuriame taip pat yra nemažai įvairaus veikimo tipo radarų pavyzdžių, tuo pačiu ir FMCW. Tačiau, autorius pažymi, kad su FMCW radaru buvo atliktos tik tam tikros simuliacijos, o bandymų su realia įranga atlikta nebuvo.

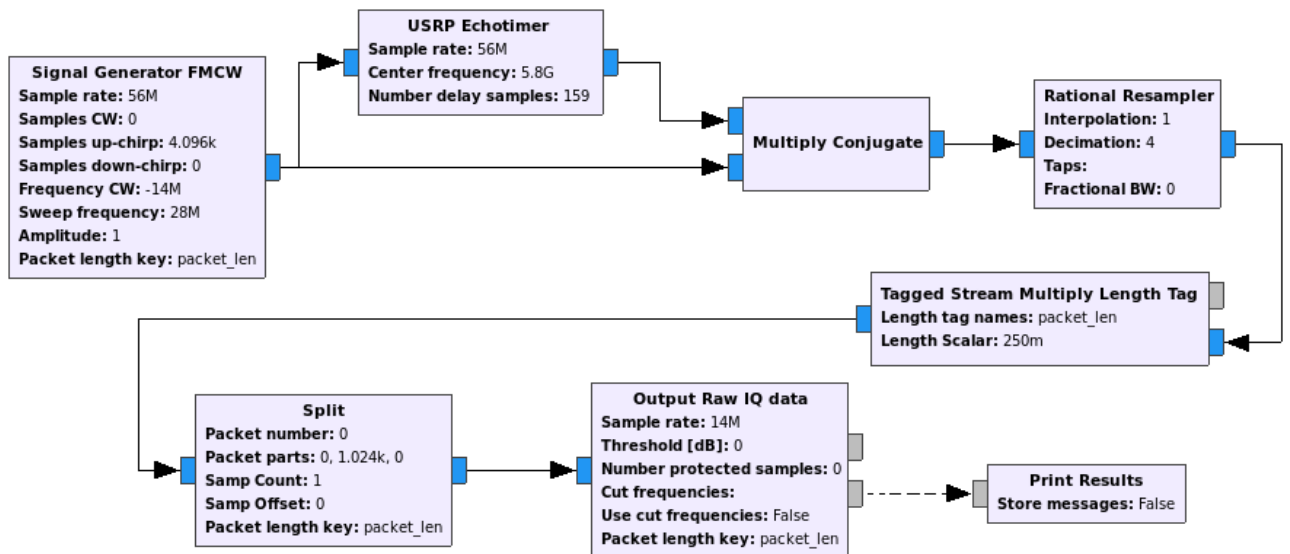


6 pav. Ettus USRP B210 programinio radijo plokštė

„GR-RADAR“ rinkinyje esanti blokinė FMCW radaro „GNU-RADIO“ schema ir buvo pritaikyta tiriant bepiločio orlaivio aptikimą tokio tipo radaru. 7 pav. pateikiama pagrindinių blokelių schema

Blokelis pavadinimu „Signal Generator FMCW“ atliko laike kintančio dažnio bangos formos generavimo funkciją nurodytame svypavimo dažnių intervale. Toks signalas dar vadinamas čirpo signalu. Didžiausias leistinas svypavimo juostos plotis yra 28 MHz (pusė diskretizavimo spartos) ir yra ribojamas USRP B210 įrangos diskretizavimo dažnio. Atstumo skiriamoji geba tokiam juostos pločiui yra 5.35 m. Nors eksperimentų metu buvo naudojama kylančio pjūklo formos signalas, šiuo generatoriumi galima suformuoti ir trikampę bangos forma, su kuria būtų galima nustatyti ir taikinio greitį, tačiau šiame darbe tai nebuvo atliekama. Kylančio dažnio čirpo signalas buvo diskretizuojamas atitinkamu skaičiumi imčių. Šis parametras, kartu su decimacija lemia didžiausią detektuojamą atstumą.

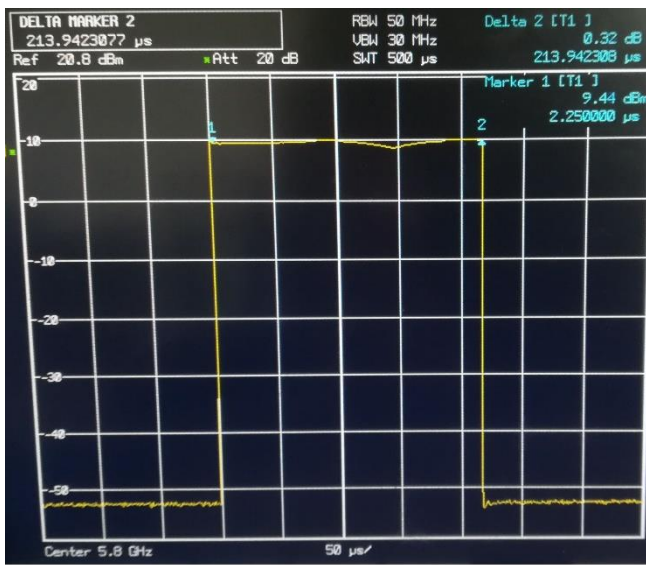
„USRP Echotimer“ blokelis atlieka siųstuvo ir imtuvo funkciją ir leidžia toje pačioje scheme naudoti tiek siųstuvą, tiek imtuvą vienu metu. Šis blokelis taip pat leidžia kompensuoti įrangos sukeliama vėlinimą, praleidžiant atitinkama skaičių imčių (*angl. Samples*). Priimtas imtuve signalas yra sudauginamas su generuojamu FMCW signalu „Multiply Conjugate“ blokelyje, iš kurio yra gaunamas mušimų dažnio signalas. Toliau šis signalas yra decimuojamas, taip sumažinant mušimų dažnio signalo imčių skaičių, bei reikalingą diskretizavimo dažnio vertę šiam signalui diskretizuoti.



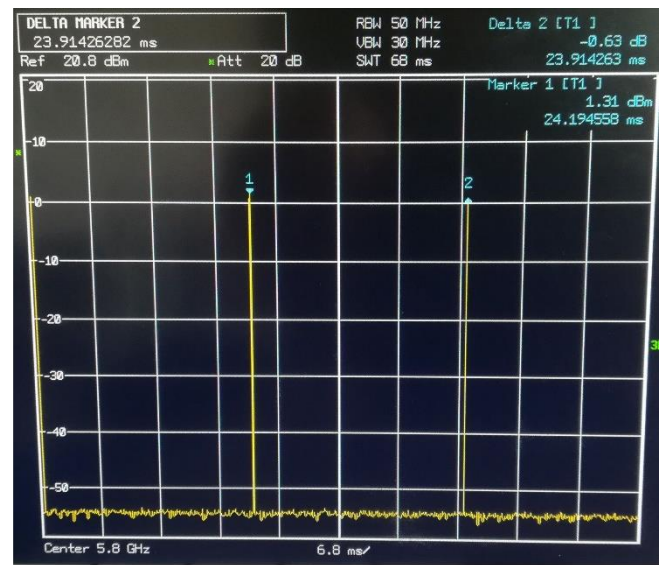
7 pav. Naudota FMCW radaro blokinė schema GNU-RADIO aplinkoje [22]

Radaro didžiausias aptinkamas atstumas gana stipriai priklauso ne tik nuo imtuvo jautrumo, bet ir nuo siųstuvo spinduliavimo galios. USRP plokštėje integruotas stiprintuvas PGA-102+ [23] 6GHz dažnyje gali generuoti iki 16.5 dBm galios, o jo triukšmo faktorius – 3.9 dB. Įskaičius kabelių nuostolius,

su spektro analizatoriumi didžiausia tokio siųstuvo galia, generuojant FMCW signalą buvo išmatuota apie 11 dBm (žr. 8-a pav.). Kadangi siųstuvas ir imtuvas veikia vienoje plokštėje yra poreikis nustatyti tokio radaro jautrumą, kurį mūsų atveju labiausiai lemia šiluminis triukšmas (2). Įprastomis sąlygomis, kai $T = 290 \text{ K}$, $kT = -174 \text{ dBm/Hz}$, $B = 28 \text{ MHz}$, $F = 4 \text{ dB}$, radaro jautrumas turėtų būti $P_n = kBTf = -96 \text{ dBm}$



a)



b)

8 pav. Signalo amplitudės priklausomybė nuo laiko: a) Generuojamo DM signalo svypavimo trukmė ir galia, kai USRP B210 generuoja maksimalią galią (apie 11dBm įskaičius kabelio nuostolius); b) Čirpų pasikartojimo intervalas (~24.2 ms)

Visgi „GR-RADAR“ įrankių rinkiniu realizuotas FMCW radaras turi ir tam tikrų trūkumų. Vienas jų, čirpo signalai turi būti generuojami su tam tikra pauze tarp vienas kito (žr. 8-b pav.), nes kitu atveju, programinė įranga veikia nestabiliai ir dažnai pastringa. Rankiniu būdu yra įvedamas 20 ms vėlinimas, tačiau iš 8-b pav. galima matyti, kad yra papildomas 4 ms vėlinimas, kuris gali būti naudojamas dėl kitų priežasčių. Vis dėlto, šis trūkumas gali turėti įtakos nustatant objekto greitį, bet ne atstumą.



9 pav. USRP FMCW radaras su prijungtomis kryptinėmis antenomis: viena siųstuvui, kita imtuvui
 Bandymų metu naudotų spindulių su paraboliniiais reflektoriais (žr. 9 pav.) stiprinimas nustatomas pagal [30]

$$G = 0.6 \left(\frac{70\pi}{\Psi} \right)^2, \quad (19)$$

$$\Psi = \frac{70\lambda}{D} \quad (20)$$

kur Ψ – antenos spinduliavimo diagramos plotis išreikštas laipsniais, D – antenos diametras, o koeficientai 0.6 ir 70 apibūdina parabolinės antenos apertūros efektyvumą. USRP FMCW radaro naudotas centrinis dažnis yra 5.8 GHz, kas atitinka 5.17 cm bangos ilgį, o parabolinių antenų diametras $D = 60$ cm. Pasinaudoję šiais parametrais, galime apskaičiuoti $\Psi = 6.03^\circ$, o tuomet tokios parabolinės antenos stiprinimas turėtų būti $G_{dB} = 29$ dB, nors realiai, dėl įvairių nuostolių, netgi mažesnis.

Bandymo metu, bepilotis orlaivis DJI Phantom 3, buvo tolinamas tiesia trajektorija radaro antenų spinduliavimo kryptimi. Tolumoje, maždaug už 200 metrų esantys neaukšti medžiai buvo naudojami kaip atskaitos taškas, tiksliau nustatant atstumus iki taikinio.

Matavimas su milimetrinių bangų diapazono radaru

Bepiločių orlaivių aptikimui buvo naudota jau anksčiau paminėta milimetrinių bangų diapazono automobilinio radaro plokštė AWR1642Boost. Trumpai bus pristatoma, kaip tokiu radaru yra gaunamas didžiausias nuotolis, greitis bei jų skiriamosios gebos.

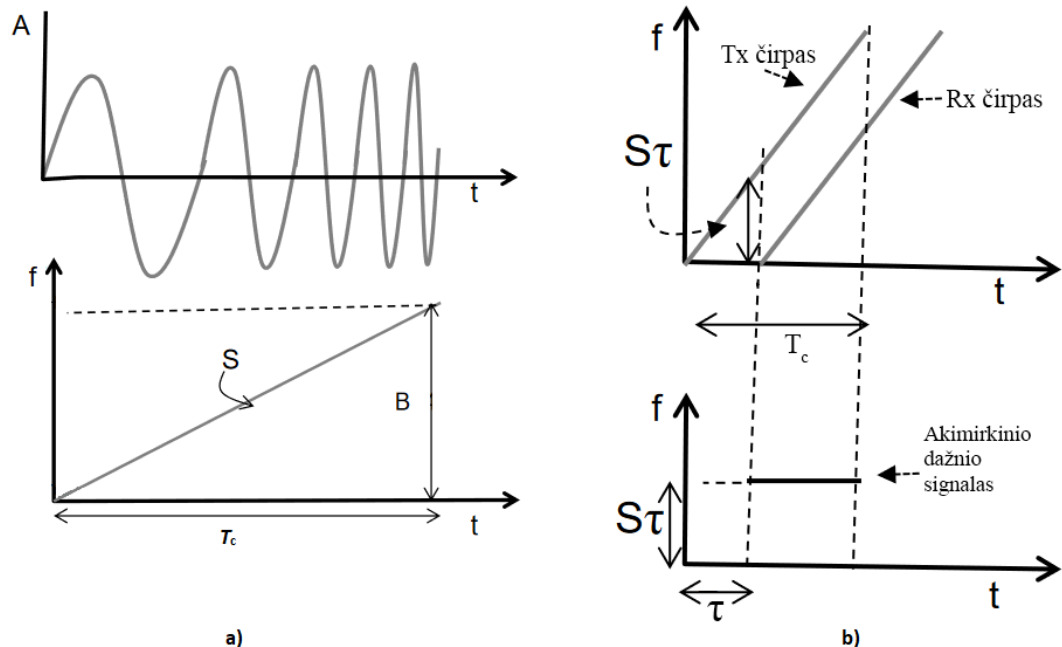
Didžiausias nuotolis

(10 pav. a) ir b)) pavaizduota čirpo signalo priklausomybė nuo laiko bei momentinio dažnio (arba mušimų dažnio) susidarymas. Didžiausias radaro aptinkamas nuotolis d_{max} priklauso nuo šio radaro analoginio skaitmeninio keitiklio diskretizavimo spartos F_s , kuri turi būti didesnė arba lygi

$$F_s \geq \frac{2Sd_{max}}{c} \quad (21)$$

$$d_{max} = \frac{F_s c}{2S}, \quad (22)$$

kur S yra čirpo statumas, c – šviesos greitis. Taigi analoginio-skaitmeninio keitiklio diskretizavimo sparta riboja didžiausią radaru aptinkamą nuotolį. Nors mūsų didžiausią nuotolį riboja aparatūros galimybės, vis dėlto (22) išraiška leidžia mažinti čirpo statumą S ir tokiu būdu galima turėti didesnę nuotolį r_{max} , tačiau paaukojant nuotolio skiriamąją gebą, nes per tą pačią trukmę čirpo signalas bus generuojamas siauresnėje dažnių juostoje.



10 pav. FMCW veikimo principas: a – Čirpo signalas laikiniame bei dažniniame vaizde; b - Išsiųstas (Tx) ir priimtas (Rx) čirpo signalas bei tarpinio dažnio nustatymas [24]

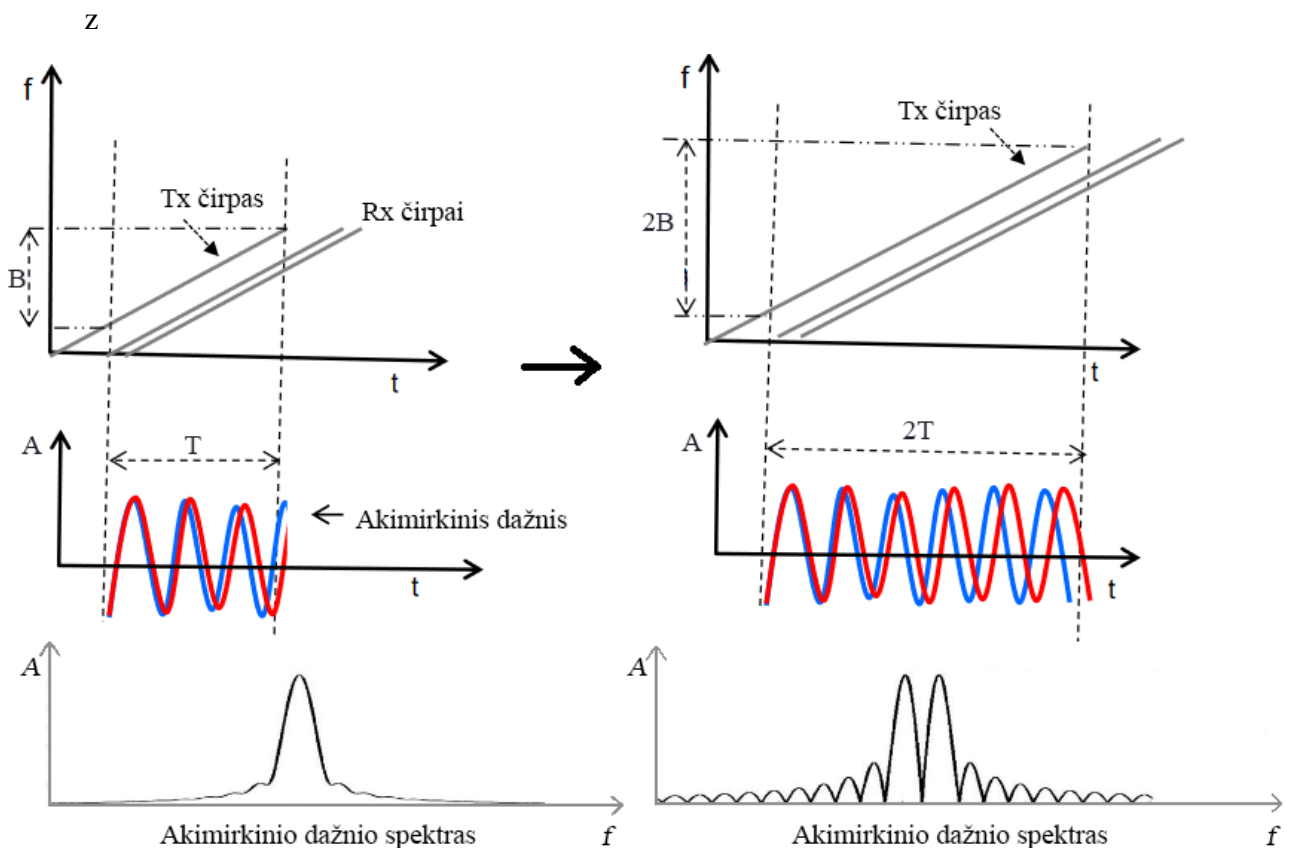
Nuotolio skiriamoji geba

Radaru tuo pačiu laiko momentu galima aptikti ne vieną objektą. Jeigu aptikti objektai yra išsidėstę šalia vienas kito, norint juos išskirti reikia geros nuotolio skiriamosios gebos d_{res} . FMCW radaruose d_{res} lemia čirpo dažnių juostos plotis B . Iš signalų apdorojimo teorijos žinoma, kad dviejų skirtingų dažnių signalai gali būti atskiriami iki kol dažnių skirtumas tarp jų yra ne mažesnis nei $\Delta f > \frac{1}{T}$

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} \rightarrow \frac{2S\Delta d}{c} > \frac{1}{T_c} \rightarrow \Delta d > \frac{c}{2ST_c} \rightarrow \frac{c}{2B},$$

$$d_{res} = \frac{c}{2B},$$
(23)

Taigi iš (23) išraiškos gauname, kad nuotolio skiriamoji geba priklauso nuo čirpo svypavimo dažnio juostos pločio.



11 pav. Pavyzdžiai dviejų šalia vienas kito esančių objektų FMCW radaro nuotolio skiriamoji geba, kai čirpo dažnių juosta yra B ir $2B$ [25]

Didžiausias detektuojamas greitis

Šiame milimetriniame *FMCW* radare greitis yra nustatomas pagal fazės pokytį tarp dviejų paeiliui siunčiamų čirpo signalų, pavyzdžiui N_1 ir N_2 . Kiekvieno iš šių čirpų trukmė nuo N_1 pradžios iki N_2 pradžios yra T_c . Fazių skirtumas, naudojamas nustatyti objekto greitį

$$\omega = \frac{4\pi v T_c}{\tau} \quad (24)$$

Norint gauti didžiausią vienareikšmišką greitį v_{max} , fazių skirtumo modulis turi būti mažesnis už π :

$$|\omega| < \pi$$

Taigi didžiausias santykinis greitis v_{max} , kuris gali būti išmatuotas tarp dviejų čirpų atskirtų per T_c yra:

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c} \quad (25)$$

kur λ – signalo nešlio bangos ilgis. Didesniam v_{max} gauti, reikia mažinti tarpčirpinę trukmę bei pačio čirpo trukmę, tačiau dėl šių pakeitimų nukenčia aptinkamo nuotolio galimybės.

Greičio skiriamoji geba

Kartais nutinka, kad radaras neturi aukštos nuotolio skiriamosios gebos, ir aptikti du taikiniai atvaizduojami tame pačiame atstume. Visgi galimybė nustatyti šių taikinių judėjimo greičius. Tačiau ar tai pavyks, priklauso nuo radaro greičio skiriamosios gebos. Norint nustatyti kelių objektų taikinių greičius, radaras siunčia N skaičių vienoda trukme atskirtų čirpo signalų, kurie sudaro kadrą (*angl. frame*). Kiekvienas taikinytis atitiks tam tikrą periodinį fazės kitimą, matuojamą tarp čirpo signalų. Atlikus sparčiąją Furjė transformaciją (sutrump. SFT) šiems fazės kitimo duomenims, gauname pikus, atitinkančius taikinių greičius. Tai dar vadinama doplerio SFT.

Pavyzdžiui, ω_1 ir ω_2 atitinka fazių poslinkius tarp nuoseklių čirpų nuo skirtingų taikinių:

$$v_1 = \frac{\lambda \omega_1}{4\pi T_c} \quad \text{ir} \quad v_2 = \frac{\lambda \omega_2}{4\pi T_c} \quad (26)$$

Kai taikinių greičiai skiriasi labai mažai, doplerio SFT gali nepakakti skiriamosios gebos pikus išskirti kaip atskirus. Todėl reikia žinoti, koks gali būti mažiausias skirtumas tarp v_1 ir v_2 , kad juos vis dar būtų galima atskirti. Taigi žinant, kad N ilgio sekos SFT gali atskirti du dažnius, kol

$$\omega_1 - \omega_2 > \frac{2\pi}{N} \quad (27)$$

$$\Delta\omega = \frac{4\pi\Delta v T_c}{\lambda} \quad (28)$$

$$\Delta\omega > \frac{\lambda}{2NT_c}, \text{ kur } NT_c = T_f\text{-kadro trukmė} \quad (29)$$

$$v_{res} = \frac{\lambda}{2T_f} \quad (30)$$

Taigi iš gautos išraiškos (30) matome, kad greičio skiriamoji geba priklauso nuo kadro trukmės, kuri susideda iš N skaičiaus kadre čirpų arba čirpo trukmės T_c . [25]

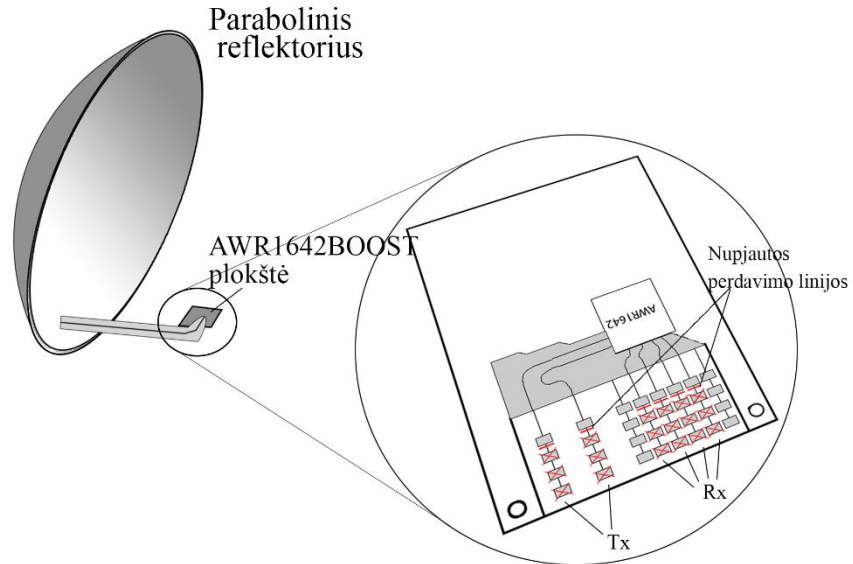
Pagrindiniai AWR1642 mmWave radaro parametrai

Atitinkami milimetrinio radaro AWR1642 parametrai gali būti keičiami norint radarą pritaikyti taikiniams, judantiems tam tikru greičiu arba esančius tam tikrame atstume nuo radaro. Tokiu būdu galime valdyti:

- Didžiausią aptinkamą atstumą
 - Ribojamas maksimalaus skaitmeninio analaginio keitiklio diskretizavimo dažnio.
 - Maksimalų atstumą galima dar padidinti keičiant čirpo statumą S .
- Atstumo skiriamoji geba
 - Priklauso nuo dažnių juostos pločio B , kuriame keičiasi čirpo dažnis.
- Maksimalų greitį.
 - Priklauso nuo trukmės tarp čirpų T_c
- Greičio skiriamoji geba
 - Priklauso nuo kadro trukmės T_f

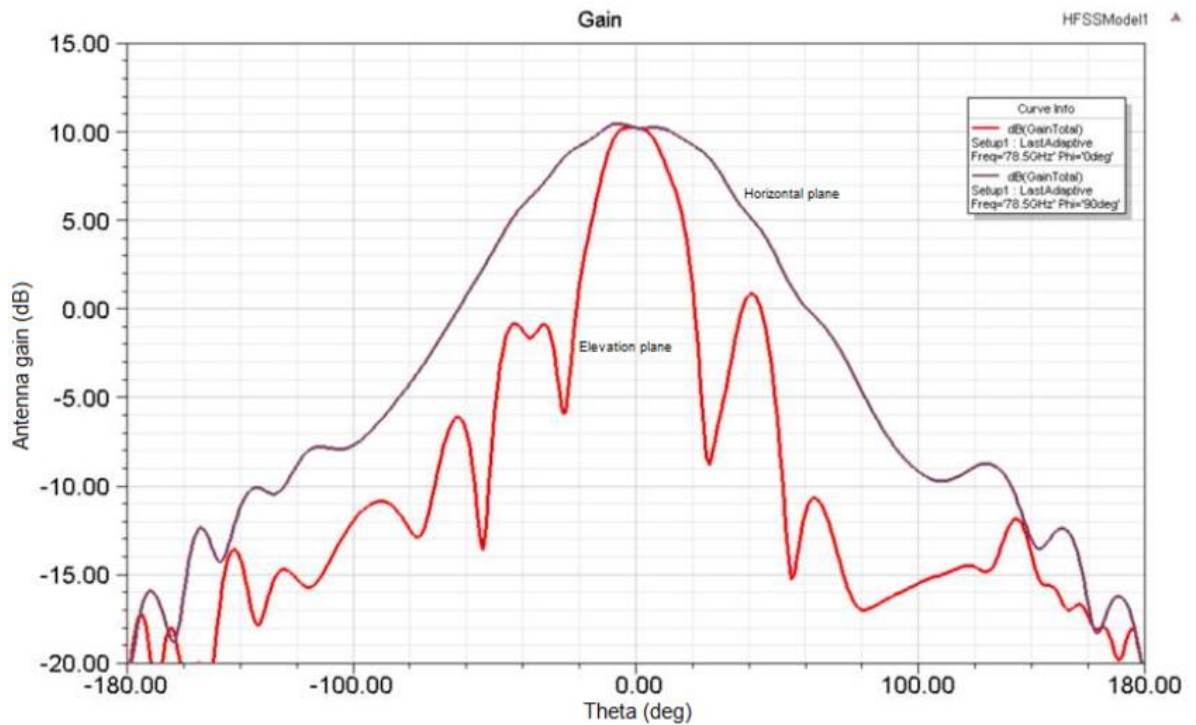
Milimetrinių bangų radaro didžiausio aptinkamo nuotolio didinimas

Siekiant aptikti bepilotį orlaivį – DJI Phantom 3 didesniame nuotolyje, AWR1642Boost plokštė buvo panaudota kaip spinduolis į 60cm skersmens parabolinį reflektorių. Naudojant tokią sistemą yra padidinamas antenos stiprinimas, tačiau susiaurėja spinduliavimo diagramos plotis. AWR1642Boost lopo tipo antenų kryptingumo diagramos buvo per siauros vertikalioje spinduliavimo plokštumoje, todėl tik dalis reflektoriaus paviršiaus buvo apspinduliuojamas. Tai neleido pasiekti didžiausio antenos stiprinimo, kadangi antenos apertūra buvo sumažinama dėl dalinio parabolinio reflektoriaus paviršiaus išnaudojimo. Siekiant padidinti efektyvumą, mikrojuostelinė perdavimo linija jungianti tris iš keturių antenos lopelių buvo nupjauta tiek siūstuve, tiek imtuve. Taigi kiekvienoje imtuvo ir siūstuvo antenoje buvo naudojamas tik vienas lopo tipo antenos elementas.



12 pav. Milimetrinių bangų radaro plokštės AWR1642Boost lopo tipo antenas jungiančių mikrojuostelinių perdavimo linijų pjūvio vietos ir tokio radaro su paraboliniu reflektoriumi koncepcija

Lopo tipo antenos kryptingumo diagrama (žr. 13 pav.) vertikalioje kryptyje (raudona linija) išplatės ir turėtų tapti panaši į horizontalios plokštumos kryptingumo diagramą (tamsiai mėlyna).



13 pav. AWR1642Boost lopo tipo antenos spinduliavimo diagrama horizontalioje (mėlyna kreivė) ir vertikalioje (raudona kreivė) [26]

Atlikus AWR1642BOOST antenų pakeitimus, kiekvienos lopo antenos spinduliavimo diagrama - 10dB lygyje, tiek vertikaloje tiek horizontalioje plokštumoje turėtų būti yra apie 80°. Tai apytiksliai tenkina spindulio reikalavimus standartinei palydovinei antenai. Būtent tokia palydovinė antena kaip reflektorius ir buvo naudojama šioje radaro sistemoje.

Bepiločio orlaivio aptikimo bandymas buvo atliekamas atviroje vietovėje, kurioje, radarui spinduliuojant virš horizonto, nebūtų atspindžių nuo aplinkinių objektų (žr. 14 pav.). AWR1642 radaro čirpo parametrai buvo nustatomi pasinaudojant „Texas Instrument Demo Visualizer“ programiniu įrankiu [27]. Tyrimo metu naudoti konfigūracijos parametrai pateikti 1 priede.

Atliekant DJI Phantom 3 bepiločio orlaivio maksimalaus aptikimo atstumo tyrimą, BPO atstumas buvo palaipsniui didinamas, tuo pat metu siekiant droną išlaikyti radaro spindulio zonoje.



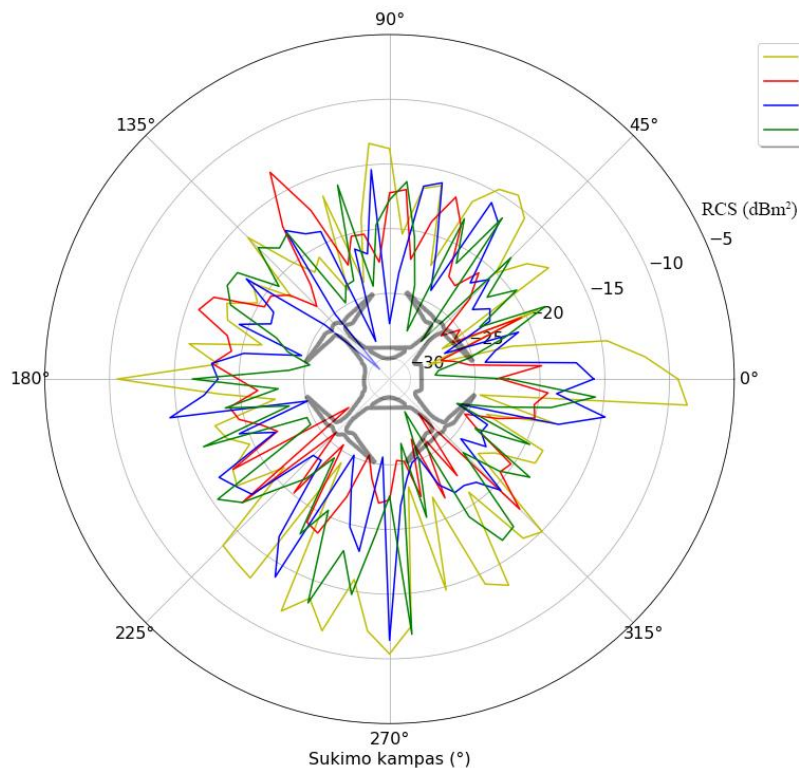
14 pav. AWR1642Boost radaro plokštės ir parabolinio reflektoriaus sistema, matavimo erdvė ir DJI Phantom 3 BPO

Rezultatai ir jų aptarimas

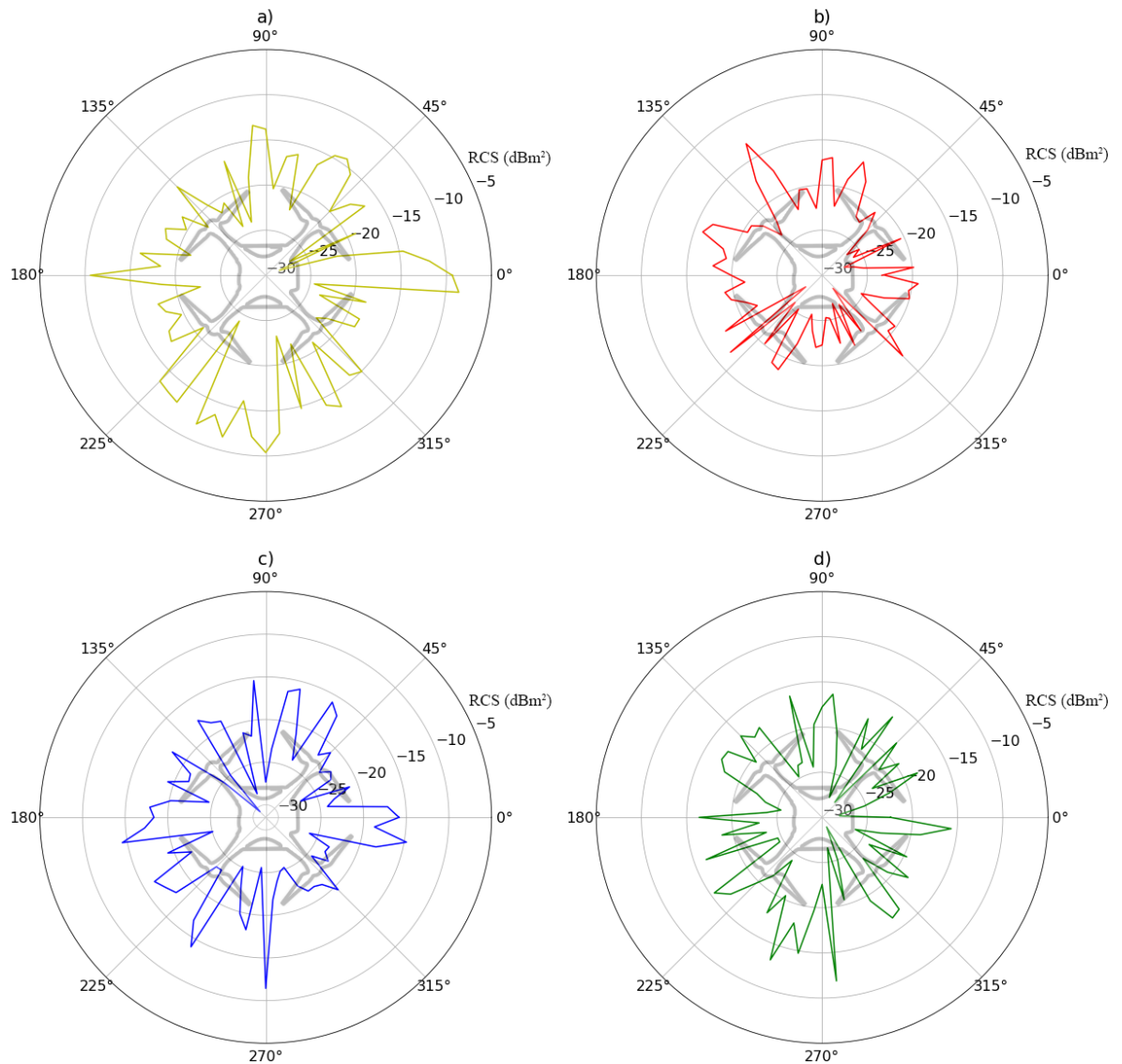
Šiame skyriuje pateikiami eksperimentiniai DJI Phantom 3 bepiločio orlaivio radarinio taikinio skerspjūvio rezultatai. Taip pat pristatomi programinio radijo pagrindu veikiančio radaro, milimetrinių bangų radaro sistemos naudojant radaro plokštę su automobilinio radaro lustu bei FMCW jūrinio radaro bepiločių orlaivių aptikimo tyrimų rezultatai ir jų aptarimas.

DJI Phantom 3 radarinio taikinio skerspjūvio matavimo rezultatai

DJI Phantom 3 bepiločio orlaivio su GoPro Hero kamera matavimų milimetrinių bangų diapazone (77 GHz), horizontalioje ir trims kampų padėtimi rezultatai, atskirose diagramose pavaizduoti *16 pav.* Kiekvienoje iš diagramų galima išvelgti tam tikrą multirotorinio bepiločio orlaivio struktūrą. Apytiksliai 45° , 135° , 225° ir 315° pozicijose galime išvelgti BPO simetriją, kadangi didžioji dalis galios atsispindi nuo rotorių variklių arba nuo kampo susidarančio tarp dviejų rotorių. Apytiksliai 0° , 90° , 180° ir 270° kampuose esantys pikai tikėtina susidaro dėl atspindžio nuo GoPro kameros arba dėl kampo tarp dviejų rotorių. Skirtinguose BPO kampų polinkiuose milimetrinių bangų radaro atžvilgiu, didžiausios RCS vertės neviršijo -16 dBm^2 .



15 pav. Radarinio taikinio skerspjūvio matavimo rezultatai milimetrinių bangų diapazone (77 GHz) keturioms kampo tarp BPO ir radaro vertėms

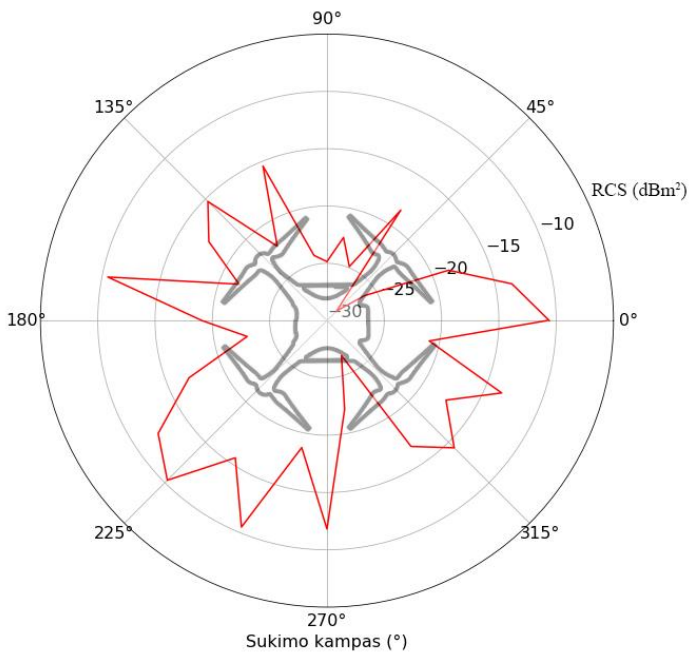


16 pav. Radarinio taikinio skerspjuvio milimetrinių bangų diapazone (77 GHz) rezultatai, BPO paverstam tam tikru kampu milimetrinių bangų radaro atžvilgiu, ir sukamam aplink savo ašį kas 5°: a) 0° kampu (horizontali pozicija); b) 12° kampu; c) 16° kampu; d) 22° kampu

Didžiausia radarinio taikinio skerspūvio vertė, apie -9 dBm^2 . 15 pav. Pavaizduoti įvairių kampų padėtimis išmatuoti rezultatai vienodo mastelio diagramoje. Gautos vidutinės RCS vertės 12° drono polinkio kampu vertei yra -21.5 dBm^2 , 16° ir 22° kampu yra -20.8 dBm^2 , o horizontalioje pozicijoje - 17.5 dBm^2 .

DJI Phantom 3 BPO su pritaisyta GoPro 3 kamera radarinio taikinio skerspjuvio centimetrinių bangų diapazone (9.5 GHz) matavimo rezultatai pavaizduoti (17 pav.) diagramoje. Iš šios diagramos galima pastebėti apie -10 dBm^2 pikus, ties 0°, 170°, 225° ir 250° kampų vertėmis. Vidutinė RCS vertė šiame dažnių diapazone gauta -18 dBm^2 . Viena iš priežasčių, kodėl šio diapazono BPO RCS diagrama

yra gana netolygi galėtų būti per didelis sukimo kampo žingsnis, todėl galėjo būti praleistos tarpinės, didesnės arba žemesnės atspindėtos galios vertės.



17 pav. Horizontaliai pastatyto drono radarinio taikinio skerspjuvio matavimo rezultatai centimetrinių bangų diapazone (9.5 GHz), sukant jį kas 12.5° aplink savo ašį

Taigi pagal gautus rezultatus galima teigti, kad nuo BPO didesnio atspindžio tikėtis galima, kai BPO orientuotas horizontaliai radaro spinduliui.

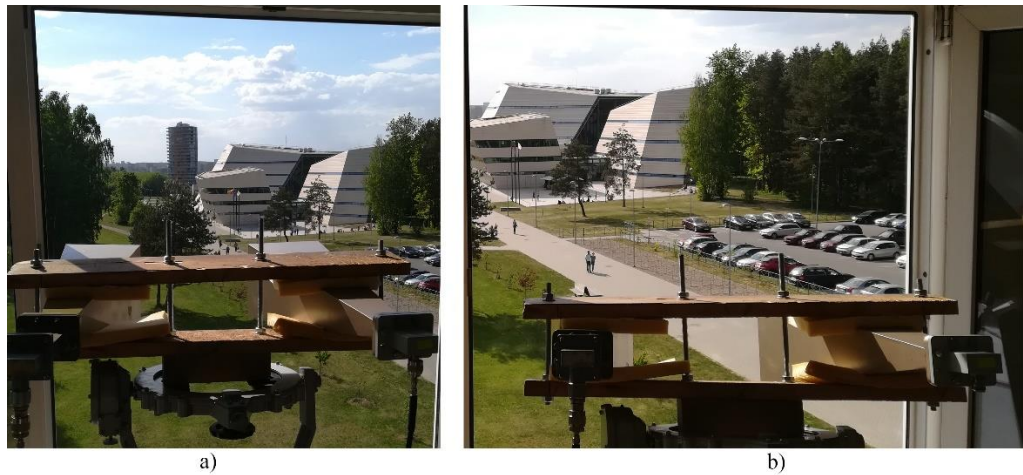
USRP B210 radaro matavimų rezultatai

Su šiuo programinio radijo pagrindu veikiančiu radaru buvo atlikta nemažai įvairių bandymų siekiant aptikti ne tik bepiločius orlaivius, bet ir pastatus tam tikru atstumu, žmones ir kitus objektus. (18 pav.) pavaizduoti du scenarijai, kur viename jų buvo siekiama aptikti tolumoje esančius pastatus, o kitame, buvo siekiama aptikti vaikštančius takeliu žmones arba dviratininkus. (19-a pav.) GNU-RADIO „krioklio“ bei dažnio spektre matosi 18-a pav. esančių pastatų atspindžiai. Dažnio skalėje, 13.6 KHz atitinka apie 5.35 m – didžiausią pasiekiamą atstumo skiriamąją gebą su šiuo radaru. Kadangi pirmasis pikas matosi maždaug apie 660 KHz dažnyje, nesunkiai galime apytiksliai nustatyti atstumą iki objekto:

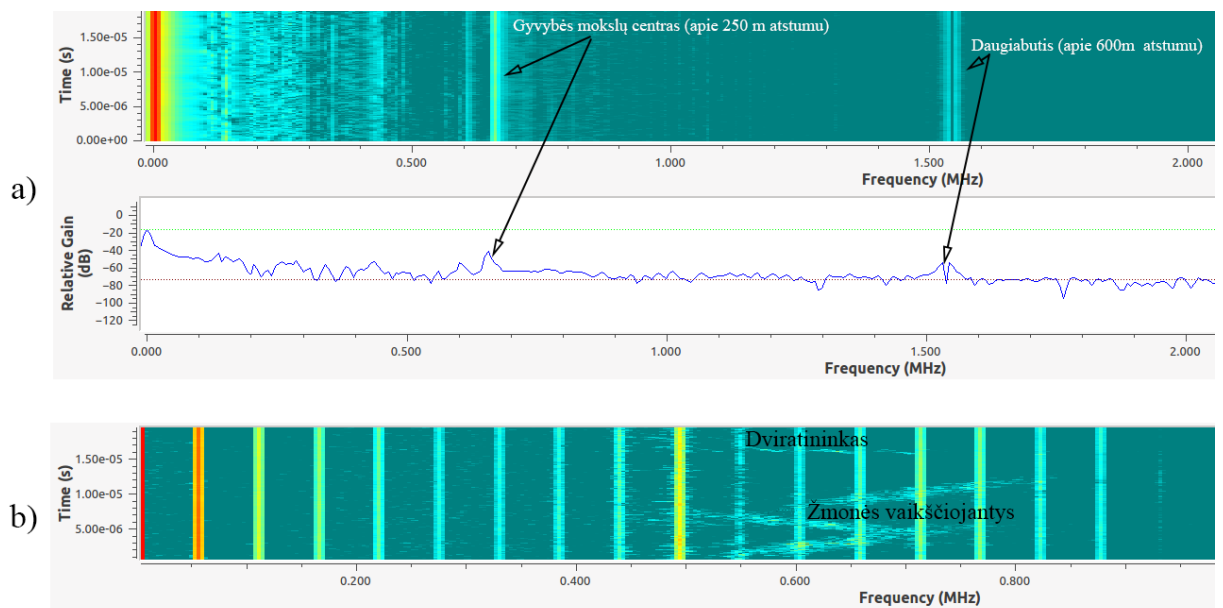
$$R_1 = \frac{666 \text{ KHz}}{13.6 \text{ KHz}} R_{res} = 48.97 * 5.35 \text{ m} = 262 \text{ m}$$

$$R_2 \approx 609 \text{ m}$$

Gautieji atstumai R_1 ir R_2 (aukštesnio dažnio piko), patikrinti pagal duomenis iš google maps, gana gerai sutampa.



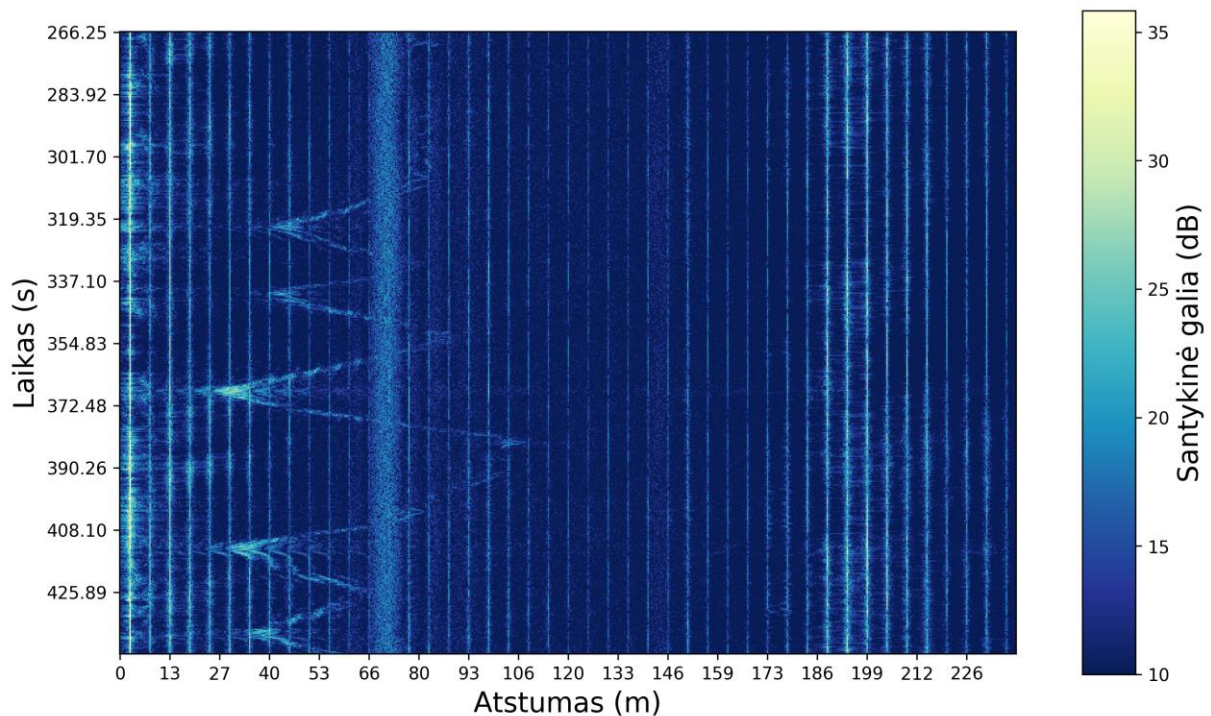
18 pav. USRP B210 FMCW radaro su „Horn“ tipo siųstuvo ir imtuvo antenomis nukreiptomis į :
a) daugiabutį; b) žmones einančius takeliu



19 pav. 18 paveikslėlyje nurodytų krypčių USRP B210 radaro aptikti objektai: a) 18-a pav. daugiabučiai; b) 18-b pav. žmonės einantys takeliu

19-b paveikslėlyje „krioklio“ spektre gautame atsake tarp juostų matomi įvairiomis kryptimis takeliu vaikščiojantys žmonės. Taip pat pavyko aptikti ir judantį dviratininką. Tam, kad „krioklio“ spektre pavyktų plika akimi pamatyti atspindžius nuo žmonių, reikėjo atlikti kelis kartus ilgesnę Sparčiąją Furjė Transformaciją (SFT). Pavyzdžiui 19-b pavyzdyje buvo generuojamas čirpas buvo diskretizuojamas 1024 imtimis. Tačiau, buvo naudojama 8 kartų decimacija, tad prieš SFT vienas čirpas

sugeneruodavo tik 128 imtis. SFT buvo 2048 imčių dydžio, todėl prieš „krioklio“ spektrui atvaizduojant vieną juostelę, jis turėjo sulaukti 16-os čirpų imčių. Todėl, tarp juostų atsirado papildomi „pikseliai“ dėl žmonių judėjimo sukeliama dažnių poslinkio. Gana nesunkiai galima nustatyti atstumą nuo radaro iki žmonių. Šiuo atveju 5.35 m atitinka 54.6 KHz poslinkį, nes naudojame keturis kartus mažiau diskretizavimo taškų čirpo signale negu naudojome (19-a pav.) atveju (t.y. 4096 taškų). Žmones pavyko aptikti nuo 50 m iki 75 m atstumuose. Toliau jie tiesiog išeidavo iš radaro apspinduliuojamo ploto. Taigi šie bandymai parodo, kad šis radaras gali aptikti tiek tolimus stacionarius, tiek artimus, lėtai judančius objektus.



20 pav. Bepiločio orlaivio DJI Phantom 3 pėdsakas skraidant tiesia trajektorija pirmyn-atgal radaro spindulio aprėptyje

Pastatai pasižymi labai didele RCS verte, ir netgi žmonių RCS vertės siekia 1m^2 ir daugiau. Tačiau mūsų tiriamo DJI Phantom 3 su kamera bepiločio orlaivio RCS vertės yra kur kas mažesnės, aptiksliai $0.01\text{-}0.1\text{ m}^2$ verčių ruože, todėl atsispindėjusi galia nuo tokių objektų lyginant su žmonėmis yra nuo 10 iki 100 kartų mažesnė. Drono, skrendančio tiesia linija, aptikimo USRP B210 radaru bandymai buvo atlikti naudojant didesnio stiprinimo antenas (žr. 9 pav.), kaip buvo minėta matavimo metodikoje. Tam tikru atstumu priimtos atsispindėjusios nuo drono galios priklausomybė nuo laiko pavaizduoda 20 pav. Iš šio „krioklio“ spektro, kurio imtys X ašyje pakeistos jas atitinkančiu atstumu, o Y ašyje atidėtas tikslus priėmimo laikas nuo matavimo pradžios, galima nustatyti, kad judantis dronas vis dar matomas ties 106 m atstumu nuo radaro. Juosta esanti ties tarp 66-80 m atsiranda, kai yra naudojama didžiausia USRP

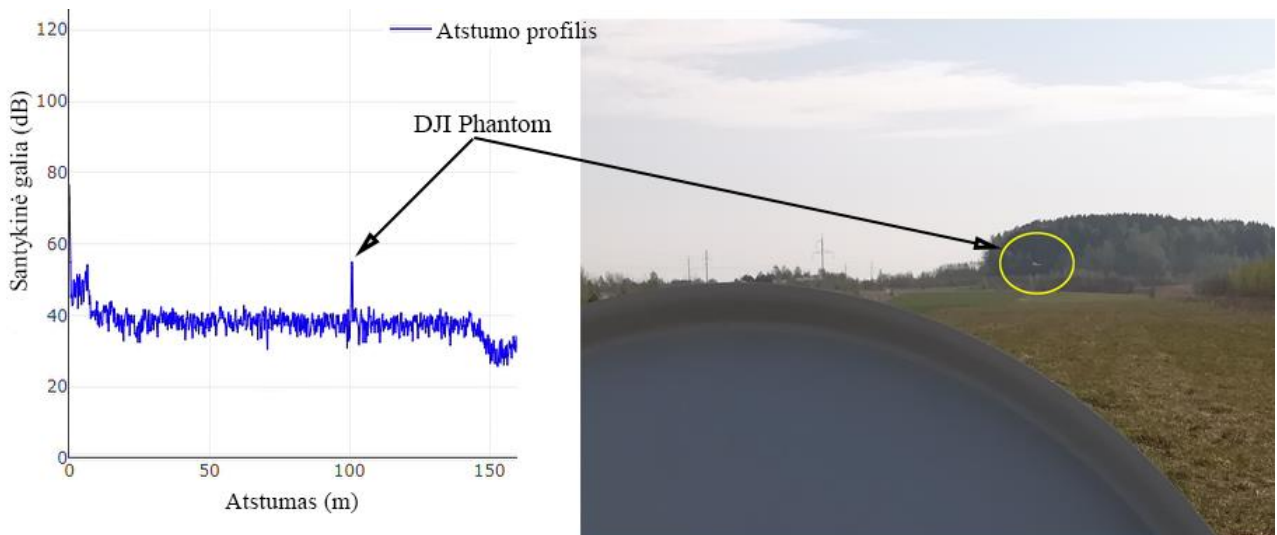
B210 siųstuvo galia, tad šią juostą galima laikyti tiesiog radaro generuojamu triukšmu. 186 m – 199 m atstume galime išskirti tam tikrus stačionarius pikus, kurie atitinka tolumoje esantį krūmyną (žr. 9 pav.). Iš 20 pav., netiksliai būtų galima nustatyti drono judėjimo greiti, kadangi žinome atstumus ir laikus. Didžiausias aptiko drono greitis pagal 20 pav. yra apie 6 m/s.

Taigi, iš gautų rezultatų galima teigti, kad su programuojamo radijo pagrindu veikiančiu *FMCW* radaru galima aptikti net ir mažą radarinio taikinio skerspjuvio vertę turinčius objektus.

Milimetrinių bangų radaro sistemos matavimų rezultatai

Atlikus milimetrinio automobilinio radaro plokštės AWR1642Boost ir parabolinio reflektoriaus tyrimą, multitororinį bepilotį orlaivį vis dar buvo galima aptikti apie 100 m atstumu (žr. 21 pav) (pagal BPO GPS poziciją, BPO nuo operatoriaus buvo nutolęs apie 120 m, kai jis vis dar buvo aptinkamas). Tyrimo metu vyraujantis stiprus vėjas kelė sunkumų BPO operatoriui išlaikyti orlaivį stabilioje padėtyje. Pasinaudojus radaro lygtimi (4), galima paskaičiuoti, koks visgi galėtų būti didžiausias tokios sistemos aptinkamas nuotolis. Tarkime pagal gautą rezultatą, priimtas atsispindėjusio nuo drono signalo lygis yra apie 55 dB, radaro jautrumo riba 40 dB, ir radaras galėtų atskirti signalus 5 dB stipresnius nei radaro triukšmo lygis, tai turėtume apie 10 dB rezervo. Tai maksimalų atstumą 5dB virš jautrumo ribos lygyje gausime

$$R_{5dB} = R_{eksp} \times \sqrt[4]{10} \text{ dB} = 1.77R_{eksp} \approx 177 \text{ m}$$



21 pav. DJI Phantom 3 aptinkamas apie 100 m. atstumu nuo radaro sistemos

Nors eksperimento rezultatas yra gana geras ir daug žadantis, tačiau lieka neatsakytų klausimų. Kadangi AWR1642Boost plokštė veikia MIMO (*angl. Multiple Input Multiple Output*) režimu, nėra aišku kuri dalis išsiunčiamos energijos neatspinduliuoja bepiločio orlaivio. Todėl yra reikalingi papildomi tyrimai siekiant optimizuoti parabolinio reflektoriaus formą, kad bepiločio orlaivio aptikimo atstumas būtų didesnis.

Jūrinio radaro tinkamumo aptikti bepiločius orlaivius matavimų rezultatai [29]

Bandymams buvo naudotas Simrad 4GTM FMCW radaras. Šis jūrinis radaras veikia X dažnių juostoje, nuo 9.3 GHz iki 9.4 GHz. 1 lentelėje pateikta keletas svarbesnių šio radaro parametru.

1 lentelė. Techniniai Simrad 4GTM radaro parametrai [29]

Parametras	Vertė
Darbinis dažnių ruožas	X-band 9.3 iki 9.4 GHz
Antenos plotis	48.26 cm
Technologija	Plačiajuostė (angl. Broadband) FMCW
Horizontalus spinduliavimo plotis	5.2° +/- 10% (-3dB lygyje)
Vertikalus spinduliavimo plotis	25° +/- 20% (-3dB lygyje)
Skenavimo dažnis	0.4/0.6/0.8 Hz
Išėjimo galia (Antenos išėjime)	22.17 dBm (165 mW)
Svypavimo juosta	Iki 75 MHz
Svypavimų pasikartojimo dažnis	Nuo 200 iki 540 Hz

Simrad 4GTM radaras buvo pritvirtintas prie stendo ir užkeltas ant vienatūrio automobilio stogo (žr. 22-a pav). Jūriniai radarai įprastai naudojamas vandeningoje aplinkoje, todėl bandymo vieta buvo pasirinkta prie ežero, kad būtų kuo mažiau aplinkos atspindžių (žr. 22-b pav).



a)



b)

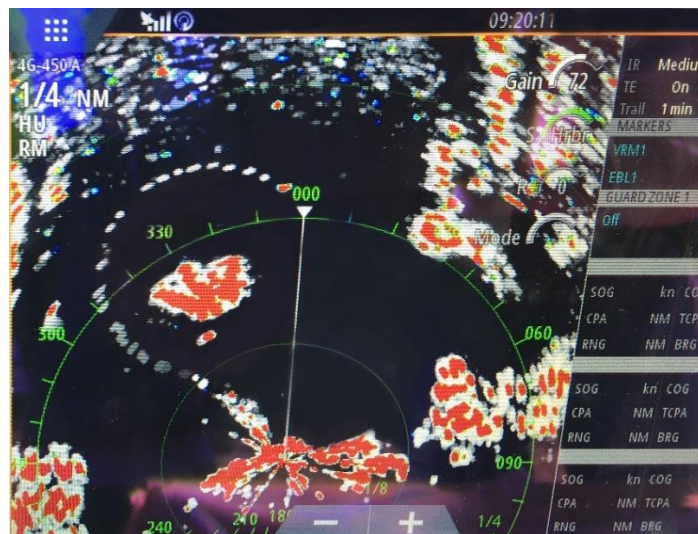
22 pav. Bandymo vietovė: a - Simrad 4GTM radaras ant automobilio stogo, b – bandymo vietovė žemėlapyje [29]

Matavimo metu buvo bandoma aptikti du, skirtingo tipo bepiločius orlaivius: jau anksčiau minėtą DJI Phantom 3 droną ir fiksuotų sparnų orlaivį „Suopis“ (žr. 23 pav.). „Suopio“ plotis ties sparnais yra 1.6 m., o ilgis apie 1.5 m, pagamintas iš kompozitinių medžiagų, daugiausiai iš stiklo pluošto bei mažos dalies anglies pluošto, bei radaro signalą atspindinčių medžiagų.

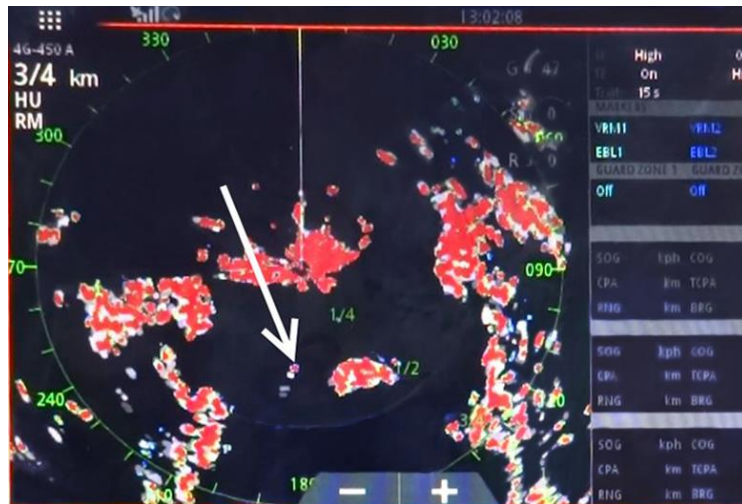


23 pav. Fiksuotų sparnų bepilotis orlaivis „Suopis“ [29]

Bandymo metu „Suopis“ skraidė 150m spindulio ratais, pastoviu 17 m/s greičiu, aplink tam tikrą vietovę, aiškiai matomą 24 pav. Aptiktas „Suopis“ matomas specialiame jūrinio radaro kartografe (*angl. chartplotter*) įvairaus ryškumo taškais aplink salą. Sekimo funkcija buvo įjungta ant aptikto „Suopio“, todėl kartografe yra išsaugomas ir atvaizduojamas didesnis taškų kiekis. Patikimai, pasirinktoje bandymų vietovėje, šį bepilotį orlaivį buvo galima aptikti iki maždaug 600 m. atstumo.



24 pav. Sparnuoto lėktuvo „Suopis“ aptikimas su Simrad 4GTM [29]



25 pav. DJI Phantom 3 aptikimas su Simrad 4GTM jūriniu radaru [29]

DJI Phantom 3 drono aptikimas šiuo jūriniu radaru buvo sudėtingas netik dėl mažesnių pačio bepiločio orlaivio matmenų, bet ir dėl judėjimo dinamikos. Judantį droną aptikti buvo paprasčiau negu jam kybant pastoviam taške. 25 pav. Aptiktas bepilotis orlaivis (pažymėtas balta rodykle) yra maždaug 400 m. atstumu nuo radaro. Didžiausias aptinkamas atstumas taip pat priklausė nuo drono padėties radaro atžvilgiu.

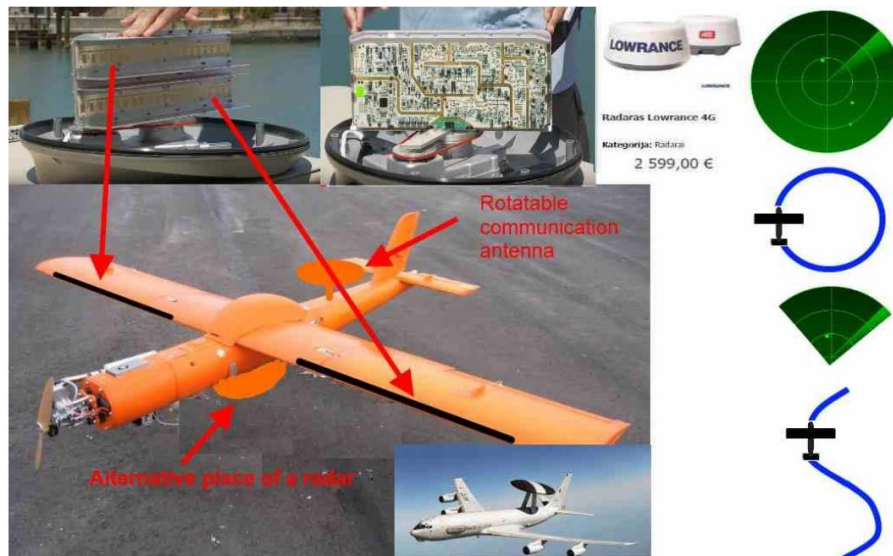
Taigi atlikus dviejų skirtingo tipo bepiločių orlaivių aptikimą jūriniu radaru Simrad 4GTM, galima teigti, kad radaras yra pajėgus aptikti mažus bepiločius orlaivius didesniu nei 500 m. atstumu. Tačiau ribotos aplinkos atspindžių atmetimo galimybės mažina šio radaro efektyvumą, todėl geriausiems rezultatams pasiekti, jūrinis radaras turėtų būti naudojamas žemų žemės fono atspindžių aplinkoje.

Galimi atliktų tyrimų rezultatų pritaikymai

Radaras bepiločiui orlaiviui, skirto kitiems bepiločiams orlaiviams aptikti ir nukenksminti

Vykdomo projekto, kurio pagrindinis tikslas sukurti bepilotį orlaivį skirtą aptikti ir nukenksminti kitus, mažesnius bepiločius orlaivius, vienas iš uždavinių yra pritaikyti jūrinį radarą, siekiant padidinti kovos su BPO atstumą. Dėl BPO aptikimo optinėmis priemonėmis sudėtingumo ir keliamų problemų, radaro panaudojimas galėtų palengvinti bepiločių orlaivių aptikimo uždavinį. Taip pat radaras, sumontuotas į BPO atvertų naujas galimybes bepiločių orlaivių taikymams, tokiems, kaip aplinkos stebėjimas, žvalgyba, ar gelbėjimo ir paieškos misijoms. Šiuo metu BPO srityje naudojami radarai yra sunkūs, brangūs ir nepakankamai efektyvūs. Siekiant atpiginti BPO radarą yra siūloma naudoti masinės gamybos jūrinių radarų įrangą, pritaikant ją bepiločiams orlaiviams. Tokie radarai, priklausomai nuo parametru, kainuoja nuo 3 iki 15 tūkst. Eur., sveria nuo 7 iki 25 kg. Tokia masė gali būti per didelė lengvam BPO, o didelė radaro antena sukels stiprų oro pasipriešinimą. Siekiant išspręsti šias problemas, sukurta radaro koncepcija, kai atsisakoma antenos sukimo mechanizmo, o radaro antenos bus perkeltos į sparnų priekinę dalį (žr. 26 pav). Erdvės skenavimas bus vykdomas keičiant BPO skrydžio kryptį. Metodika, kaip natūraliai skrendant (keičiant BPO posvyrio ir pokrypio kampą, bet nekeičiant polinkio kampo) plokščia vingiuota trajektorija, su paprastu dviejų dimencijų radaru nustatyti taikinių aukštį.

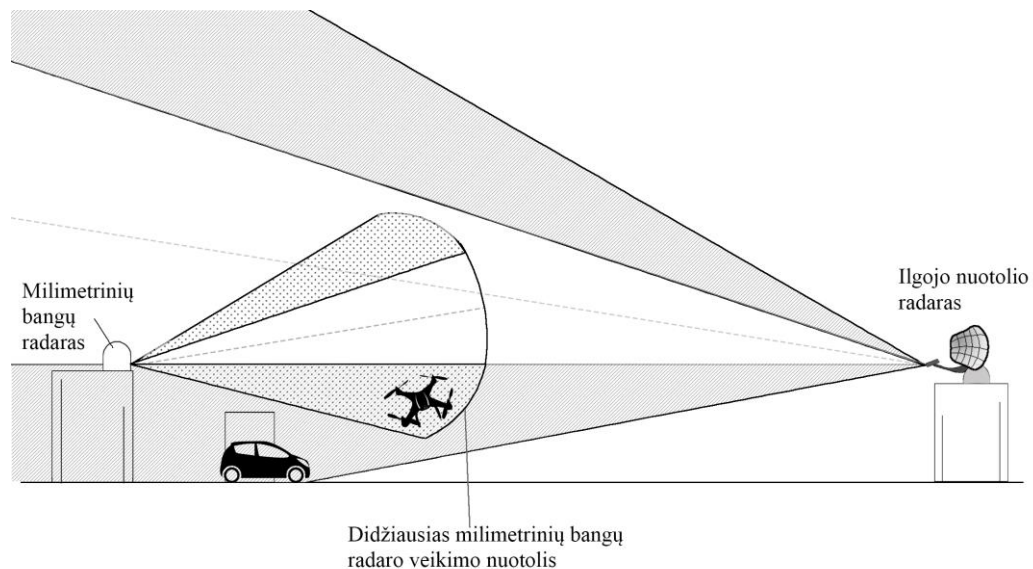
Šio baigiamojo darbo metu atliktas jūrinio radaro tyrimas [29] leidžia įvertinti tokio radaro galimybes aptikti mažus bepiločius orlaivius



26 pav. Pigaus masinės gamybos jūrinio radaro pritaikymas bepiločiui orlaiviui, montuojant tokio radaro antenas į sparnus arba patį radarą montuojant ant bepiločio lėktuvo pilvo, bei skenavimo tokiu radaru metodai

Mažo nuotolio milimetrinių bangų radarų sistema

Vienas iš esminių radarinių technologijų trūkumų yra įrangos brangumas ir tokių sistemų ribotos galimybės aptikti mažo radarinio taikinio skerspjūvio objektus. Nors oro erdvės radarų techninis potencialas leidžia aptikti pakankamai mažus bepiločius orlaivius kilometrų eilės atstumu [31], tačiau yra keletas priežasčių, dėl kurių kartais praktiškai tai padaryti yra labai sunku arba neįmanoma. Vieną iš tokių atvejų iliustruoja pavyzdys, kai ant karinio lėktuvnešio, aprūpinto daugybe radarų sistemų nutūpė multirotorinis bepilotis orlaivis [32]. Viena iš priežasčių – monostatiniai impulsiniai radarai gali turėti iki šimtų metrų eilės akląją zoną, dėl to, kad impulso siuntimo metu, radaras negali priimti atsispindėjusių signalų, nes imtuvas tuo metu yra išjungtas. Taip pat, radarai veikiantys centimetrinių bangų diapazone gali turėti ribotą dažnių juostą (iki kelių šimtų megahercų), kas atitinka nuo kelių metrų iki keliasdešimt centimetrų atstumo skiriamąją gebą, o tai apsunkina mažų objektų identifikavimą. Taip apt maži bepiločiai orlaiviai, skrendantys žemame aukštyje gali susilieti su žemės fonu. Apžvalginių radarų spindulys, ypač vertikalioje plokštumoje neturi griežtų ribų, todėl norint aptikti žemai skraidančius objektus bus gaunamas stiprus atsakas nuo objektų žemėje, kurie gali būti ženkliai stipresni už BPO. Komerciniai civilinės paskirties radarai įprastai veikia dviejų dimencijų režime (trijų dimencijų radarai, nustatantys ir aukštį yra brangesni), todėl tokiose radarų sistemose, aukštis dažniausiai yra nustatomas naudojant papildomą antrinį radarą.



27 pav. Konceptija, išnaudojanti trumpo nuotolio milimetrinio radaro galimybes aptikti mažo dydžio bepiločius orlaivius ir sušvelninti aplinkos fono daromą neigiamą poveikį

Radaro spindulys neturi griežtų ribų (žr. 27 pav.). Jeigu su ilgojo veikimo radaru bus bandoma aptikti objektus arti horizonto, spindulio kraštai (pažymėti tamsesne spalva) apspinduliuos ir žemę, kurioje gali būti daugiau panašiu greičiu, kaip bepilotis orlaivis judančių objektų: žmonių, automobilių, dviračių, svyruojančių medžių. Šių objektų RCS vertė gali būti ženkliai didesnė nei BPO. Trumpo veikimo nuotolio radaro spindulio kraštas gali ir nepasiekti žemės paviršiaus (žr. 27 pav.).

Šiuolaikinių automobilinių radarų lustai leidžia realizuoti elektrinį spindulio skenavimą, kuris galėtų būti panaudotas aukščio nustatymui. Pavyzdžiui Texas Instruments AWR lustai turi 4 imtuvus ir 2 arba 3 siųstuvus. Šiuos lustus galima kombinuoti į masyvą, taip gaunant geresnę kampinę skiriamąją gebą [33]. Skenavimas gali būti atliekamas pagal MIMO arba pluošto formavimo (*angl. Beamforming*) principus. Tokiu atveju trijų dimencijų radaras galėtų būti realizuotas atliekant mechaninį skenavimą horizontalioje plokštumoje, o vertikalioje plokštumoje būtų atliekamas jau minėtas elektrinis skenavimas. Detektavimo atstumui padidinti, reikėtų naudoti veidrodines sistemą.

Siūloma radaro ir jų sistemos koncepcija, švelninanti aukščiau minėtus trūkumus:

1. Turėtų būti naudojama FMCW tipo radarų technologija praktiškai neturinti "aklosios zonos".
2. Turėtų būti naudojamas milimetrinių bangų diapazonas, leidžiantis realizuoti labai mažas antenas duotam apžvalgos kampui.
3. Turėtų būti naudojama gigahercų eilės dažnių juosta, leidžianti pasiekti decimetrų eilės skiriamąją gebą.
4. Turėtų būti naudojama pigių radarų, veikiančių šimtų metrų eilės atstumu, tinklo koncepcija. Tai leis minimizuoti atspindžius nuo žemės objektų ir ženkliai padidinti bepiločių orlaivių aptikimo patikimumą.
5. Pageidautinas 3D radaras, leidžiantis nustatyti ir aukštį, pavyzdžiui, panaudojant MIMO technologiją.
6. Siekiant sumažinti radaro kainą, galėtų būti naudojami pigūs masinės gamybos elementai (Texas Instruments AWR serijos radarų lustai) iš smarkiai besivystančios automobilių radarų srities.

Šio baigiamojo darbo metu atlikti pirmieji tyrimai su milimetrinių bangų AWR1642Boost radaru teikia vilčių, kad patobulinus bei tikslingai išnaudojus tokių radarų savybes, jie galėtų būti pritaikyti aprašytai koncepcijai įgyvendinti.

Išvados

1. Tiriant programinio radijo pagrindu veikiančią FMCW radarą nustatyta, kad lėtai judanti mažo radarinio taikinio skerspjūvio bepilotį orlaivį galima aptikti iki 100 m. atstumu.
2. Tiriant automobilinio milimetrinių bangų radaro plokštę su AWR1642 lustu ir su paraboliniu reflektoriumi, siekiant gauti didesnę stiprinimą, nustatyta, kad tokia sistema gali aptikti bepiločius orlaivius 100 m. ir didesniais atstumais.
3. Atlikus mažų bepiločių orlaivių detektavimo galimybių naudojant pigų jūrinį radarą tyrimą nustatyta, kad tokie orlaiviai gali sėkmingai būti aptinkami virš 500 m. atstumais, mažo žemės fono atsako aplinkoje.
4. Atlikus drono radarinio taikinio skerspjūvio matavimus naudojant milimetrinių bangų automobilinį radarą, iš rezultatų galima pastebėti pikus simetrijose, atitinkančioje matuoto bepiločio orlaivio formą.

Literatūros sąrašas

- [1] Gatwick Airport: Drones ground flights. <<https://www.bbc.com/news/uk-england-sussex-46623754>> [žiūr. 2019-05-21].
- [2] Drones cause record number of air traffic disruptions in Germany. <<https://www.thelocal.de/20190122/drones-cause-record-number-of-air-traffic-disruptions-in-germany>> [žiūr. 2019-05-21].
- [3] Drozdowicz, J., *ir kiti*. 35 GHz FMCW drone detection system. *17th international Radar Symposium (IRS)*, 2016. <<https://doi.org/10.1109/IRS.2016.7497351>>
- [4] Ezuma, M. *ir kiti*. Micro-UAV Detection with a Low-Grazing Angle Millimeter Wave Radar. *2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2019. <<https://doi.org/10.1109/RWS.2019.8714203>>
- [5] Projektas "Bepiločio orlaivio, skirto aptikti ir nukenksminti bepiločius orlaivius kūrimas". <http://www.teti.ff.vu.lt/prj_bepilociai_orlaiviai.html> [žiūr. 2019-05-29]
- [6] Hommes, A. *ir kiti*. Detection of acoustic, electro-optical and RADAR signatures of small unmanned aerial vehicles. *In Proceedings of the SPIE 9997, Target and Background Signatures II*, Edinburgh, United Kingdom, 2016. <<https://doi.org/10.1117/12.2242180>>
- [7] Busset, J. *ir kiti*. Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras. *In Proceedings of the SPIE 9647, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XI; and Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications*, Toulouse, France, 2015. <<https://doi.org/10.1117/12.2194309>>
- [8] Christnacher, F. *ir kiti*. Optical and acoustical UAV detection. *In Proceedings of the SPIE 9988, Electro-Optical Remote Sensing X*, Edinburgh, United Kingdom, 2016. <<https://doi.org/10.1117/12.2240752>>
- [9] Hengy, S. *ir kiti*. Multimodal UAV detection: study of various intrusion scenarios. *In Proceedings of the SPIE 10434, Electro-Optical Remote Sensing XI*, Warsaw, Poland, 2017. <<https://doi.org/10.1117/12.2278212>>
- [10] Nguyen, P. *ir kiti*. Investigating cost-effective RF-based detection of drones. *In Proceedings of the 2nd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use (DroNet'16)*, Singapore, Singapore, 2016. <<https://doi.org/10.1145/2935620.2935632>>
- [11] Fu, H. *ir kiti*. Low-complexity portable passive drone surveillance via SDR-based signal processing. *IEEE Communications Magazine*, 56(4), 112-118. <<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700424>>

- [12] Schüpbach, C. *ir kiti*. Micro-UAV detection using DAB-based passive radar. In *IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Seattle, WA, USA, 2017. <<https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944357>>
- [13] Liu, Y. *ir kiti*. Digital television based passive bistatic radar system for drone detection. *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Seattle, WA, USA, 2017. <<https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944443>>
- [14] William, M. L., Scheer, J. A. Principles of Modern Radar. Vol. III: Radar applications. *New Jersey: SciTech Publishing*, 2014, 794 p. ISBN 978-1-61353-032-0 (PDF)
- [15] Park, S., Park, S. O. Configuration of an X-band FMCW radar targeted for drone detection. *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2017. <<https://doi.org/10.1109/ISANP.2017.8228912>>
- [16] Richards, M. A., Scheer, J. A., Holm, W. A. Principles of Modern Radar. Vol. I: Basic Principles. *New Jersey: SciTech Publishing*, 2010, 923 p. ISBN: 978-1-891121-52-4.
- [17] Piper, S. O. Homodyne FMCW Radar Range Resolution Effects with Sinusoidal Nonlinearities in the Frequency Sweep. In *Proceeding International Radar Conference*. Alexandria, VA, USA, 1995. ISBN: 0-7803-2121-9
- [18] Sundaresan, S. *ir kiti*. Real time implementation of FMCW Radar for Target Detection using GNU Radio and USRP. *IEEE ICCSP 2015 conference*. 2015. <<https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322772>>
- [19] Stasiak, K., Samczynski, P. FMCW Radar Implemented in SDR Architecture Using a USRP Device. *2017 Signal Processing Symposium (SPSympo)*. 2017. <<https://doi.org/10.1109/SPS.2017.8053654>>
- [20] Mathumo, T. W., Swart, T. G., Focke, R.W. Implementation of a GNU radio and python FMCW radar toolkit. *2017 IEEE AFRICON*. 2017. <<https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095547>>
- [21] Ettus USRP B210 series. <<https://kb.ettus.com/B200/B210/B200mini/B205mini#FAQ>> [žiūr. 2019-05-21].
- [22] GR-RADAR. <<https://grradar.wordpress.com/>> [žiūr. 2019-05-20].
- [23] PGA-102+. <<https://ww2.minicircuits.com/pdfs/PGA-102+.pdf>> [žiūr. 2019-05-20].
- [24] MMWAVE training series. <<https://training.ti.com/mmwave-training-series>> [žiūr. 2019-05-21].
- [25] Trainings mmWave sensing. <https://training.ti.com/sites/default/files/docs/mmwaveSensing-FMCW-offlineviewing_0.pdf> [žiūr. 2019-05-21].
- [26] AWR1642 Evaluation Module (AWR1642BOOST) Single-Chip mmWave Sensing Solution. <<http://www.ti.com/lit/ug/swru508b/swru508b.pdf>> [žiūr. 2019-05-21].

- [27] TI MMWAVE SDK. <<http://www.ti.com/tool/MMWAVE-SDK>> [žiūr. 2019-05-21].
- [28] Navico Simrad 4GTM specifications. <<http://www.navico-commercial.com/en-US/Products/Radars/Broadband-Solid-State/Broadband-4G-Radar-Pro-en-us.aspx>> [žiūr. 2019-05-21].
- [29] Laučys, A., Rudys, S., Kinka, M. *ir kiti*. Investigation of detection possibility of UAVS using low cost marine radar. *Aviation*. 23, 2 (2019), 48-53. <<https://doi.org/10.3846/aviation.2019.10320>>
- [30] Straw, R., Dean, E. 2000. The ARRL Antenna Book. 19th Ed. US. American Radio Relay League. p. 18.14. ISBN 978-0-87259-817-1
- [31] Ananenkov, A. E. *ir kiti*. Possibilities to Observe Small-Size UAVs in the prospective Airfield Radar. 20th *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2018. <<https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473885>>
- [32] Tiny drone lands on Queen Elizabeth aircraft carrier. <<https://www.bbc.com/news/uk-scotland-highlands-islands-40910087>> [žiūr. 2019-05-23]
- [33] Imaging radar using multiple single-chip FMCW transceivers. <<https://www.youtube.com/watch?v=C49lhsiIrso>> [žiūr. 2019-05-29]

Andrius Laučys

RADARŲ BEPILOČIAMS ORLAIVIAMS TYRIMAS

Santrauka

Šio baigiamojo darbo tikslas – ištirti įvairaus tipo FMCW radarų galimybes aptikti mažus bepiločius orlaivius. Darbe buvo tiriami trys FMCW radarai: USRP B210 programuojamo radijo pagrindu 5.8 GHz dažnyje veikiantis radaras, jūrinis radaras Simrad 4GTM, veikiantis 9.3 - 9.4 GHz dažnių juostoje ir milimetrinių bangų diapazono radaras, veikiantis 76-81 GHz dažnių juostoje, su automobilinio radaro lustu AWR1642. Šiais radarais buvo bandoma aptikti DJI Phantom 3 ir lengvą fiksuoto sparno (tik jūriniu radaru) bepiločius orlaivius. Taip pat buvo išmatuotas DJI Phantom 3 bepiločio orlaivio radarinio taikinio skerspjūvis centimetrinių ir milimetrinių bangų diapazone.

Programuojamo radijo pagrindu veikiantis radaras ant USRP B210 plokštės buvo realizuotas ir konfiguruojamas pasinaudojus atviro turinio programinės įrangos „GNU-RADAR“ radaro įrankių rinkiniu – „GR-RADAR“ [2]. Milimetrinių bangų diapazono automobilinio radaro plokštė AWR1642Boost buvo panaudota kaip spinduolis į parabolinį reflektorių, tokiu būdu padidinant tokios radaro sistemos veikimo nuotolį.

Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad su realizuotu programinio radijo pagrindu veikiančiu radaru, naudojant pakankamai didelio stiprinimo antenas, nuo 0.01 iki 0.1 m² radarinio taikinio skerspjūvio bepilotį orlaivį pavyko aptikti iki 100 m. atstumu. Šiems rezultatams atvaizduoti pasiūlytas patogus lėtai judančių taikinių atvaizdavimo būdas. Milimetrinių bangų radaru, naudojant papildomą parabolinį reflektorių, bepilotis orlaivis buvo aptinkamas apytiksliai 120 m. atstumu. Jūriniu radaru, dėl didesnės siūstovo galios, antenos stiprinimo ir produkto išbaigtumo, tirti bepiločiai orlaiviai buvo aptinkami kelių šimtų metrų atstumais, tačiau tik mažo žemės fono atsako aplinkoje.

Andrius Laučys

INVESTIGATION OF RADARS FOR UNMANNED AIRCRAFT

Summary

The main goal of this work is to investigate various type FMCW radar capabilities to detect small-size Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Three FMCW radars, implemented on different platforms were investigated: a radar, implemented on software defined radio USRP B210 board, which was operating at 5.8 GHz frequency, a marine radar Simrad 4GTM, operating at 9.3-9.4 GHz frequency and a millimeter wave radar with automotive radar chipset AWR1642, operating at 76-81 GHz frequency bandwidth. Trials to detect DJI Phantom 3 and light fixed-wing (only using marine radar) UAVs were performed using these radars. In addition to that, radar cross section values of DJI Phantom 3 were measured in centimeter and millimeter wave bands.

Software defined radio based radar on USRP B210 board was implemented and configured using open source software „GNU-RADIO“ radar toolbox – „GR-RADAR“ [2]. To increase the detection range of millimeter wave radar, automotive radar board AWR1642Boost was used as an emitter for parabolic reflector.

The results of experimental studies showed, that implemented software defined radio based radar, using high gain antennas, UAV with radar cross section value of 0.01 to 0.1 m² was detected in up to 100 m. distance. A comfortable way to represent this slowly moving UAV trajectory was presented. Using millimeter wave radar system with parabolic reflector UAV was detected in distance of around 120 m. Marine radar, due to higher transmission power, antenna gains and completeness of the product, UAVs under test were detected in range of few hundred meters, but only in low clutter environment.

Priedai

```
sensorStop
flushCfg
dfeDataOutputMode 1
channelCfg 15 3 0
adcCfg 2 1
adcbufCfg -1 0 0 1 0
profileCfg 0 77 1321 7 200 0 0 5 1 1024 5333 0 0 30
chirpCfg 0 0 0 0 0 0 0 1
chirpCfg 1 1 0 0 0 0 0 2
frameCfg 0 1 16 0 100 1 0
lowPower 0 1
guiMonitor -1 1 1 0 0 0 1
cfarCfg -1 0 0 8 4 4 0 5120
cfarCfg -1 1 0 4 2 3 0 5120
peakGrouping -1 1 1 1 1 1023
multiObjBeamForming -1 1 0.5
clutterRemoval -1 0
calibDcRangeSig -1 0 -5 8 256
extendedMaxVelocity -1 0
bpmCfg -1 0 0 1
lvdsStreamCfg -1 0 0 0
nearFieldCfg -1 0 0 0
compRangeBiasAndRxChanPhase 0.0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0
measureRangeBiasAndRxChanPhase 0 1.5 0.2
CQRxSatMonitor 0 3 19 127 0
CQSigImgMonitor 0 127 16
analogMonitor 1 1
sensorStart
```

1 priedas. Milimetrinių bangų radaro AWR1642BOOST bepiločio orlaivio aptikimo metu naudota radaro konfigūracija.