

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TAIKOMOSIOS ELEKTRODINAMIKOS IR TELEKOMUNIKACIJŲ INSTITUTAS

Matas Razgūnas

TRIKDŽIAMS ATSPARIOS PALYDOVINĖS NAVIGACIJOS SISTEMOS, SKIRTOS
BEPILOCIAMS ORLAIVIAMS TYRIMAS IR KŪRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Elektronikos ir telekomunikacijų technologijos
studijų programa

Studentas

Matas Razgūnas

Darbo vadovas
Instituto direktorius

dr. Saulius Rudys
prof. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2022

Turinys

Ivadas	4
1 Literatūros apžvalga	5
1.1 GPS sistema.....	5
1.1.1 Pozicijos ir laiko nustatymas.....	5
1.1.2 GPS signalas	5
1.1.3 GPS paklaidos	6
1.2 Spindulio formavimas.....	7
1.3 Spindulio krypties nustatymas	10
1.4 Programinis radijas	12
1.4.1 IQ moduliacija	12
1.4.2 SDR blokinė diagrama	13
2 Trikdžiams atspari palydovinės navigacijos sistema	15
2.1 HackRF One SDR imtuvas/siųstuvas	15
2.2 KerberosSDR imtuvas	16
2.3 GNSS signalų apdorojimas	17
2.3.1 GNSS signalo sekimo blokas	18
2.3.2 GNSS signalo ir triukšmo santykio nustatymas	19
2.4 Spindulio formavimo įgyvendinimas	20
2.4.1 Spindulio formavimo matavimo stendas	21
2.5 Imtuvų fazės kalibravimas naudojant GNSS signalą	23
2.6 GNSS signalo krypties nustatymas	23
3 Trikdžiams atsparios palydovinės navigacijos sistemos tyrimas	25
3.1 HackRF laikinės synchronizacijos matavimas	25
3.1.1 Koreliacijos skaiciavimo optimizavimas	26
3.2 HackRF fazinės synchronizacijos matavimas	27
3.3 KerberosSDR laikinės synchronizacijos matavimas	28
3.4 KerberosSDR fazinės synchronizacijos matavimas	29
3.5 Spindulio formavimo rezultatai	30
3.6 GNSS imtuvo matavimai	31
3.6.1 Imtuvo fazės kalibravimo rezultatas naudojant GPS signalą	32
3.6.2 GNSS signalų priėmimas kai nėra kliūčių.....	32
3.6.3 GNSS signalų priėmimas kai atspindžiai vyksta nuo vieno pastato	36
3.6.4 GNSS signalų priėmimas urbanistinėje aplinkoje.....	41
3.6.5 GNSS imtuvo matavimų apibendrinimas	44
Išvados ir rezultatai	45
Literatūros sąrašas	46

Summary	48
Priedas Nr. 1.	49
Priedas Nr. 2.	50
Priedas Nr. 3.	51
Priedas Nr. 4.	52

Ivadas

Bepiločių orlaiviai, kaip pagrindinė navigacijos instrumentą naudoja GNSS sistemą. Esant geroms sąlygomis, GNSS sistema veikia pakankamai patikimai, kad būtų užtikrinta tikslia pozicija, tačiau mėginant naudoti orlaivius, aplinkose kur yra daug pašalinių objektų, dėl atsiradusių GNSS paklaidų, pasikliauti gaunamais duomenimis nebegalima.

Didžiausią problemą GNSS tikslumui, miesto teritorijoje, kelia atspindžiai nuo pastatų. Dėl šių atspindžių, prastėja koreliacijos rezultatas, dėl to gaunama mažiau patikima pozicija [1]. Vienas iš galimų metodų, pašalinti atspindžių įtaką yra atsispindėjusio signalo silpninimas, pasinaudojus antenų masyvu (angl. phased antenna array). Šiame darbe bus tyrinėjama antenų masyvo konstrukcija, valdymas, pasinaudojat nebrangiais SDR imtuvais.

Šio darbo tikslas - sukurti trikdžiams atsparią GNSS sistemą, kurią būtų galima pritaikyti bepiločių orlaivių navigacijoje miesto teritorijoje.

1 Literatūros apžvalga

1.1 GPS sistema

GPS (angl. Global Positioning system) yra palydovais paremta navigacinė sistema, priklausanti Jungtinėms Amerikos Valstijoms. Ši sistema yra viena iš kelių globalių navigacinių (GNSS) sistemų. Naudojantis GPS sistema, galima nustatyti vartotojo buvimo vietą (ilgumą, platumą, aukštį), bei galima tiksliai susinchronizuoti laiką. Šiuo metu yra teikiamos dvi GPS paslaugos:

- Tikslaus pozicionavimo paslauga (PPS) [2] skirta kariniam naudojimui
- Standartinė pozicionavimo paslauga (SPS) [3] atvira civiliniams naudojimui.

Šiame darbe bus nagrinėjami tik SPS signalai.

1.1.1 Pozicijos ir laiko nustatymas

Kad imtuvas galėtų nusistatyti savo poziciją, jam reikia priimti signalą bent iš 4 palydovų. GPS signalas sudarytas taip, kad būtų galima išmatuoti atstumą iki kiekvieno palydovo, signale yra užkoduotas išsiuntimo laikas, todėl priėmus signalą iš palydovo, žinant tikslų imtuvo laiką (t_{imtuvo}), sklidimo greitį (c), išsiuntimo laiką ($t_{siustuvo}$), galima išmatuoti signalo keliavimo trukmę ir suskaičiuoti atstumą (l) iki palydovo:

$$l = c(t_{imtuvo} - t_{siustuvo}). \quad (1)$$

1.1.2 GPS signalas

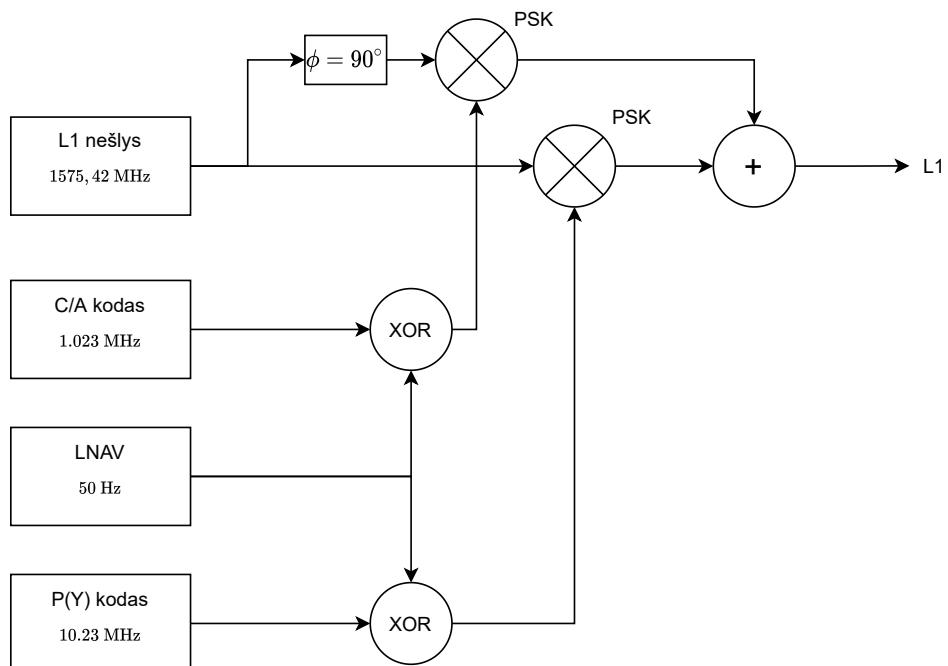
Visi GPS palydovai siunčia apskritimiškai poliarizuotą signalą, trijose skirtingose dažnių juostose: L1 - 1575,42 MHz, L2 - 1227,60 MHz ir L5 - 1176,45 MHz [3]. Šiame darbe naudojimui pasirinktas L1 signalas, kadangi jis yra palaikomas visų GPS palydovų, bei supaprastina imtuvų konstrukciją, kadangi nereikia priimti signalų skirtingose dažnių juostose, todėl toliau bus nagrinėjamas tik L1 signalas.

L1 signalo nešlys susideda iš dviejų komponentų kurių fazė skiriasi 90° . Kiekvienas nešlio komponentas yra faziškai moduliuojamas atskirų skaitmeninių signalų. Pirmasis nešlio komponentas yra koduojamas P(Y) kodo ir LNAV duomenų (50 bitų/s) suma. P(Y) kodas yra skirtas tikslios pozicijos nustatymui, ir šiuo metu jis yra užkoduotas kariniam naudojimui. LNAV duomenys yra skirti perduoti imtuvui tam tikrus GPS sistemos parametrus, tokius kaip orbitos duomenis, laikrodžio korekcijos ir kita. Antroji nešlio dalis yra moduliuojama C/A (netikslaus sekimo) kodu ir tais pačiais LNAV duomenimis. C/A kodas yra 1023 "čirpų" ilgio ir jo dažnis

yra 1.023 MHz. C/A kodas yra naudojamas signalo sklidimo trukmei matuoti. GPS signalas gali būti aprašomas šia lygtimi:

$$x_{IN}[k] = A(t)\tilde{s}_T(t - \tau(t))e^{j(2\pi f_D(t)t + \phi(t))}|_{t=kT_s} + n(t)|_{t=kT_s}, \quad (2)$$

čia x_{IN} priimamas signalas, $A(t)$ - signalo amplitudė, \tilde{s}_T - kompleksinis GPS signalas, $\tau(t)$ - kodo vėlinimas, $f_D(t)$ - Doplerio dažnis, $\phi(t)$ - nešlio fazė, $n(t)$ - triukšmai, T_s - diskretizavimo dažnis imtuve.



1 pav. L1 signalo modulatoriaus schema. Adaptuota iš [4].

Kadangi visi palydovai transliuoja tuo pačiu dažniu, C/A kodas pasirenkamas tokis, kad jis būtų pseudo-atsitiktinis kodas (PRN), kiekvienam palydovui yra suteikta unikali seka. Svarbiausia PRN savybė - autokoreliacijos rezultato maksimumas yra tik ties 0 tašku [5].

Imtuvių ieškodami palydovo signalo, susigeneruoja ieškomo palydovo unikalą C/A signalo kopiją ir atlieka koreliaciją tarp lokalai sugeneruoto signalo ir priimto. Iš gauto koreliacijos rezultato galima nustatyti gauto C/A signalo užlaikymą.

1.1.3 GPS paklaidos

Atliekami GPS signalo matavimai yra veikiами skirtingu tipu atsitiktinių ir sistematinių paklaidų. Paklaidas galima suskirstyti į kelias pagrindines kategorijas [6]:

- Palydovo ir imtuvo laikrodžio paklaidos
- Atspindžių paklaidos

- Atmosferinės paklaidos
- Orbitos paklaidos

Palydovuose naudojami atominiai laikrodžiai yra labai tikslūs, tačiau visi vien atsiranda paklaidos. Tipinė palydovo laikrodžio paklaida yra 8 – 17 ns per dieną. Tokios paklaidos gali būti eliminuotos priimant signalą iš kelių palydovų. Dėl laikrodžio netikslumų atsiranda pozicijos paklaidos iki kelių metrų [6].

GPS signalų sąveika su aplinka, pastatais, reljefu, sukelia atspindžių paklaidas. Kadangi atsispindėjęs signalas nukeliauja didesnį atstumą, naudojantis tokiu signalu nebeįmanoma tiksliai nustatyti atstumo iki palydovo, dėl to mažėja galutinės pozicijos tikslumas.

Atmosferinės paklaidos atsiranda dėl radio bangų sklidimo parametru kitimo atmosferoje ir jonusferoje, kadangi parametrai pastoviai kinta laike, dėl besikeičiančių atmosferos/jonusferos sąlygų. Dėl šių veiksnių atsiradusios paklaidos yra didžiausios lyginant su kitomis. Šių trikdžių šalinimas įmanomas pasinaudojant korekcijomis iš antžemininių stočių, taip pat galima priiminėti L1 ir L5 signalus. Kadangi šie signalai veikia skirtinguose dažnių ruožuose, atmosferos reiškiniai juos veikia skirtingai, o kadangi dažninės priklausomybės yra detaliai ištýrinėtos, todėl galima pašalinti paklaidas išmatavus sklidimo trukmės skirtumus tarp L1 ir L5 signalo.

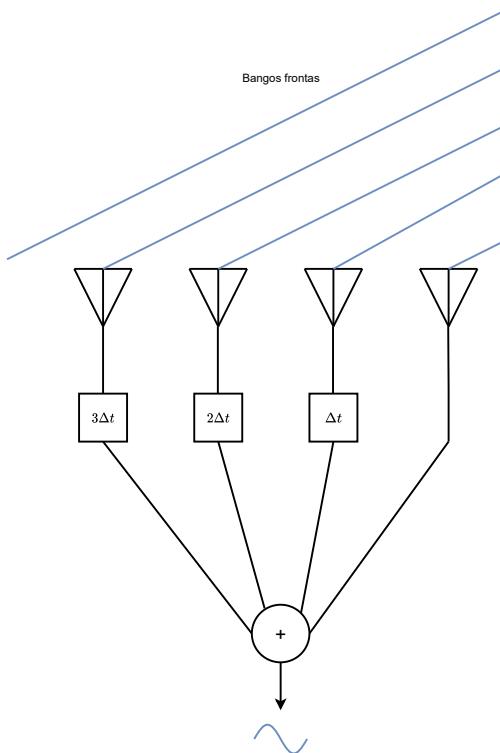
Kadangi orbitoje esantys palydovai yra veikiami nenuuspėjamų jėgų, bégant laikui jų orbitos po truputį keičiasi. Norint pašalinti šias paklaidas, visi palydovai transliuoja savo orbitos duomenis ir juos atnaujina kas 4 valandas [3]. Palydovų orbitas matuoja antžeminės GPS sistemos valdymo stotys, kurios perduoda šiuos duomenis į palydovus, kad šie galėtų juos išsiųsti imtuvams per LNAV žinutes.

1.2 Spindulio formavimas

Spindulio formavimas (angl. Beamforming), arba erdvinis formavimas, yra radio signalų apdorojimo metodas, naudojamas pasitelkiant antenų masyvus. Spindulio vairavimas pasiekiamas kombinuojant signalus iš atskirų antenų sukuriant konstruktyvią interferenciją, taip sudarant maksimumus.

Norint susidaryti supratimą, kaip veikia spindulio vairavimas, galima pasinaudoti nesudėtinga iliustracija 2 pav. Paveiksluke pavaizduota 4 elementų spindulio vairavimo sistema. Kiekvienam RF signalui yra pritaikomas tam tikras užvėlinimas (Δt), parinkus tinkamas vertes gaunama konstruktyvi interferencija tik signalui atėjusiam iš pasirinktos krypties. Signalams atėjusiems iš kitos krypties, sumatoriuje atėjusio signalo fazės nebeatitinka, todėl gaunama destruktyvi interferencija. Keičiant signalo užlaikymą (fazę), galima gauti signalo maksimumą norima kryptimi.

Pasinaudojus 3 pav. schema, galima suskaičiuoti vėlinimo laiką (Δt), arba reikalingą fazės pokytį ($\Delta\Phi$).



2 pav. 4 elementų masyvo spindulio formavimo schema.

Laiko vėlinimas:

$$L = d \sin(\Theta), \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{L}{c} = \frac{d \sin(\Theta)}{c}, \quad c = 3 * 10^8 \text{ m/s}. \quad (4)$$

Žinant laiko vėlinimą, galime nesunkiai suskaičiuoti fazės pokytį:

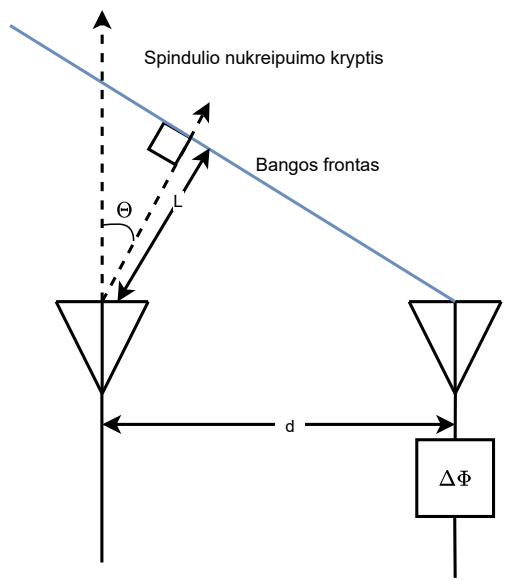
$$\Delta\Phi = \frac{2\pi c \Delta t}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin \Theta}{\lambda} \quad (5)$$

Laikant, kad $d = \lambda/2$, (5) lygtis supaprastėja ir gauname:

$$\Delta\Phi = \pi \sin \Theta \quad (6)$$

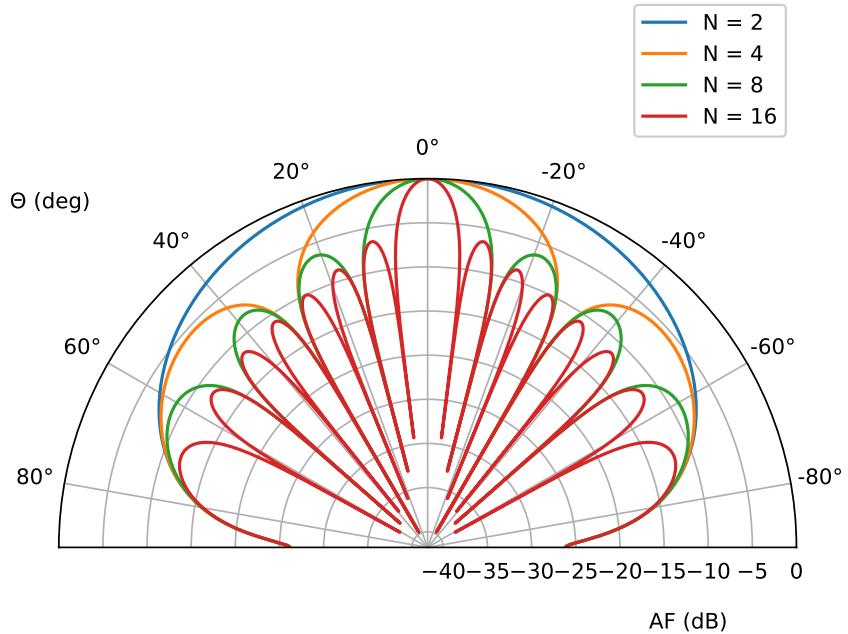
Norint ivertinti spindulio formą, iš kelių antenų, galime išvesti masyvo faktorių AF (angl. array factor). Šis parametras nurodo spindulio formą, neatsižvelgus į antenų, sudarančių masyvą, spindulio formą. Turint antenos spindulio formą ir AF , antenų masyvo spindulio forma galime gauti sudėjus abu parametrus (jeigu jie yra išreikšti dB vienetais). AF išraiška N-antenų masyvui, kai jos yra vienoje plokštumoje [7]:

$$AF(\Theta, \Delta\Phi) = \frac{\sin(N \left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin \Theta - \frac{\Delta\Phi}{2} \right])}{N \sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \Theta - \frac{\Delta\Phi}{2} \right)} \quad (7)$$



3 pav. Bangos vėlinimui suskaičiuoti skirtas brėžinys.

Pasinaudojus (7) lygtimi galime nubraižyti spindulio formą (4 pav.), kai $d = \lambda/2$.



4 pav. AF esant skirtingam skaičiui antenų masyve, kai $d = \lambda/2$ ir $\Delta\Phi = 0$.

1.3 Spindulio krypties nustatymas

Apdorojant signalus iš antenų masyvų, galima ne tik atlikti spindulio formavimą, tačiau ir aptikti siūstuvų padėtis antenų masyvo atžvilgiu. Vienas iš signalų apdorojimo metodų yra MUSIC (angl. Multiple Signal Classification) algoritmas kuris gali nustatyti kelių signalų kryptis. Šis algoritmas buvo išrastas Schmidt [8] ir nepriklausomai Bienvenu ir Kopp [9], [10].

Signalų modelis aprašo imtuvo gautus duomenis per siūstuvu siunčiamą signalą. Tarkime, kad turime D nekoreliuotų ar dalinai koreliuotų signalų šaltinių $s_d(t)$. Imtuvo duomenys $x_m(t)$ yra sudaryti iš signalų, priimtų antenų masyve, kartu su triukšmu $n_m(t)$.

$$x(t) = As(t) + n(t), \quad (8)$$

$$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)], \quad (9)$$

$$A = [a(\theta_1)|a(\theta_2)|\dots|a(\theta_D)], \quad (10)$$

čia:

- $x(t)$ yra vektorius priimtų signalų iš antenų masyvų. Vektoriaus dydis yra M ;
- A - $M \times D$ matrica, kurioje yra signalo priémimo krypčių vektoriai. Vektorius yra sudarytas iš reliatyvių fazės skirtumų tarp antenų iš vieno signalo šaltinio. Kiekvienas A stulpelis parodo atskirą signalo šaltinį su savo priémimo kryptimi;

- $s(t)$ yra $D \times 1$ vektorius priimtų signalų antenų masyve;
- $n(t)$ imtuvo triukšmų vertės.

Svarbus kiekvieno poerdvinio metodo dydis yra sensorių kovariantiškumo matrica R_x . Kai signalų triukšmai nėra koreliuoti, imtuvių kovariantiškumo matricos turi du komponentus, signalų kovariantiškumo matricą ir triukšmų kovariantiškumo matricą:

$$R_x = Exx^H = AR_sA^H + \sigma_n^2 I, \quad (11)$$

čia R_s signalo kovariantiškumo matrica:

$$R_s = Ess^H. \quad (12)$$

Nekoreliuotiemis ar dalinai koreliuotiemis šaltiniams, R_s yra Ermito matrica ir turi pilną rangą D .

Taikant MUSIC algoritmą, darome prielaidą, kad triukšmų galia visuose imtuvuose yra vienoda ir jie yra nekoreliuoti. Padarius tokią prielaidą, triukšmų kovariantiškumo matrica patampa su lygiomis vertėmis įstrižainėje. Kadangi tikroji sensorių kovariantiškumo matrica yra nežinoma, MUSIC algoritmas įvertina sensorių kovariantiškumo matricą R_x iš priimto signalo kovariantiškumo matricos. Priimto signalo kovariantiškumo matrica yra vidurkis kelių atskirų matavimų:

$$R_x = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T x(t)x(t)^H. \quad (13)$$

Kadangi matrica AR_sA^H turi rangą D , ji turi D teigiamų tikrinių verčių ir $M - D$ nulinį tikrinių verčių. Tikriniai vektoriai turintys teigiamas vertes padengia signalų poerdvį $U_s = [v_1, v_2, \dots, v_D]$. Tikriniai vektoriai turintys nulines vertes yra statmeni signalo poerdvui ir apima nulinį poerdvį $U_n = [u_{D+1}, \dots, u_N]$. Nuliniai poervio vektoriai turi tenkinti šią sąlygą:

$$AR_sA^H u_i = 0 \Rightarrow u^H AR_sA^H u_i = 0 \Rightarrow (A^H u_i)^H R_s (A^H u_i) = 0 \Rightarrow A^H u_i = 0. \quad (14)$$

Pridėjus triukšmus prie tikrinių signalo vektorių sensorių kovariantiškumo matricos, ji išlieka nepakitusi. Prie tikrinės vertės prisideda triukšmų galia. Tarkime v_i vienas iš betriukšmių signalo poervio tikrinių vektorių:

$$R_x v_i = AR_sA^H v_i + \sigma_0^2 I v_i = (\lambda_i + \sigma_0^2) v_i. \quad (15)$$

Nulinio poervio tikrinis vektorius taip pat yra R_x matricos tikrinis vektorius. Tarkime u_i yra vienas iš nulinį tikrinių vektorių:

$$R_x u_i = A R_s A^H u_i + \sigma_0^2 I u_i + \sigma_0^2 I u_i = \sigma_0^2 u_i, \quad (16)$$

tikrinėms vertėms esant σ_0^2 vietoje nulinės vertės, nulinis poerdvis patampa triukšmų poerdviu.

MUSIC algoritmas veikia paieškos principu, ieškant visų priėmimo vektorių, kurie yra statmeni triukšmų poerdviui. Tam kad atlikti paiešką algoritmas sukuria nuo priėmimo kampo priklausantį galios išraišką, vadinamą MUSIC pseudospektru:

$$P_{MUSIC}(\vec{\phi}) = \frac{1}{a^H(\vec{\phi}) U_n U_n^H a(\vec{\phi})}. \quad (17)$$

Kai signalo vektorius yra statmenas triukšmų poerdviui, pseudospektro maksimumai yra begaliniai. Taikant algoritmą praktiškai, vektoriai niekada nėra visiškai statmeni, todėl sklidimo kampai yra nustatomi iš P_{MUSIC} maksimumų.

1.4 Programinis radijas

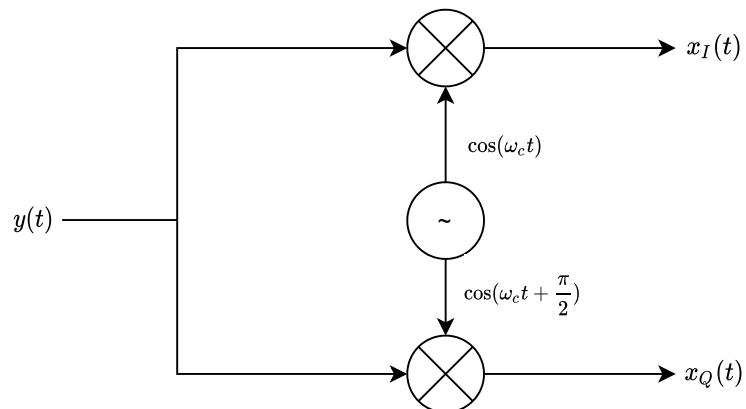
Programinis radijas (SDR, angl. Software-defined radio) yra komunikacijos sistema, kurios dauguma komponentų yra įgyvendinta programiškai. Analoginė radijo dalis atlieka tik IQ demoduliaciją, demoduliuoto signalo skaitmenizavimą. Visi kiti radijo komponentai (filtrai, demodulatoriai, detektoriai) yra įgyvendinti pasitelkiant programinę įrangą.

Pagrindiniai programinio radijo privalumai [11]:

- lankstumas;
- lengvas pritaikymas;

1.4.1 IQ moduliacija

IQ modulatorius yra centrinė SDR dalis. Norint apdoroti priimtą RF signalą, reikia ji perkelti į žemesnių dažnių juostą. Tai pasiekiamas sudauginant gaunamą signalą su dviem sinusoidėmis, kurių fazė skiriasi $\pi/2$, taip gaunamas $x_I(t)$ ir $x_Q(t)$ signalai, kaip pavaizduota 5 pav.

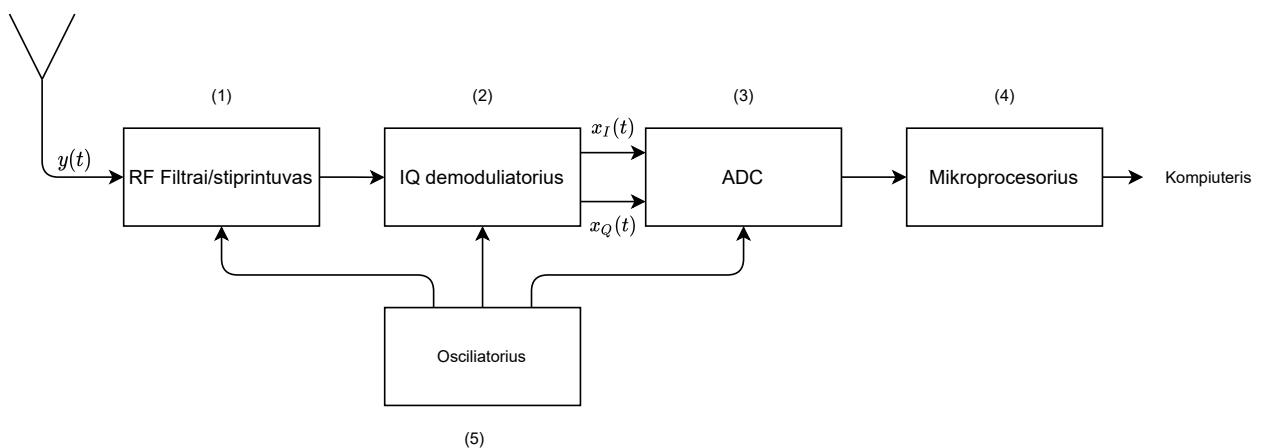


5 pav. IQ demodulatoriaus schema

1.4.2 SDR blokinė diagrama

Pagrindinė SDR radio užduotis, yra demoduliuoti signalą, jį suskaitmenizuoti, ir perduoti IQ signalą programinei įrangai. SDR siųstuvas susideda iš kelių pagrindinių dalių:

1. RF signalų paruošimo grandinė (stiprintuvas, filtrai);
2. IQ demodulatorius;
3. ADC (angl. Analog-Digital converter);
4. Mikroprocesorius;
5. Osciliatorius;



6 pav. SDR radijo blokinė diagrama

RF signalų paruošimo grandinė (1) yra atsakinga už signalo sutvarkymą, kad jis būtų tinkamas demoduliacijai. Dažniausiai atliekamas signalo stiprinimas, filtravimas, taip pat būna

integruotas maitinimas aktyviai antenai. ADC (3) atlieka IQ signalo skaitmenizavimą, su-skaitmenizuotas signalas yra perduodamas mikroprocesoriui (4), kuris arba atliekā skaitmeninj signalų apdorojimą, arba juos perduoda kitam įrenginiui. Taip pat mikroprocesorius yra at-sakingas už visų grandinių darbo valdymą: parenka stiprinimo koeficientus, valdo osciliatorių, parenka RF kelią pagal nustatytais sistemos reikalavimus. Osciliatorius (5) atsakingas už įvairų taktinių dažnių generavimą.

2 Trikdžiams atspari palydovinės navigacijos sistema

2.1 HackRF One SDR imtuvas/siųstuvas

HackRF One yra SDR imtuvas, kuris sugeba siųsti/priimti signalus dažnių ruože nuo 1 MHz iki 6 GHz [12]. HackRF imtuvas turi 8 bitų ADC, veikiantį iki 20 MHz. Imtuvo brėžiniai ir apartinė įranga yra atviro kodo, todėl visi reikalingi pakeitimai gali būti nesunkiai įgyvendinti [13].

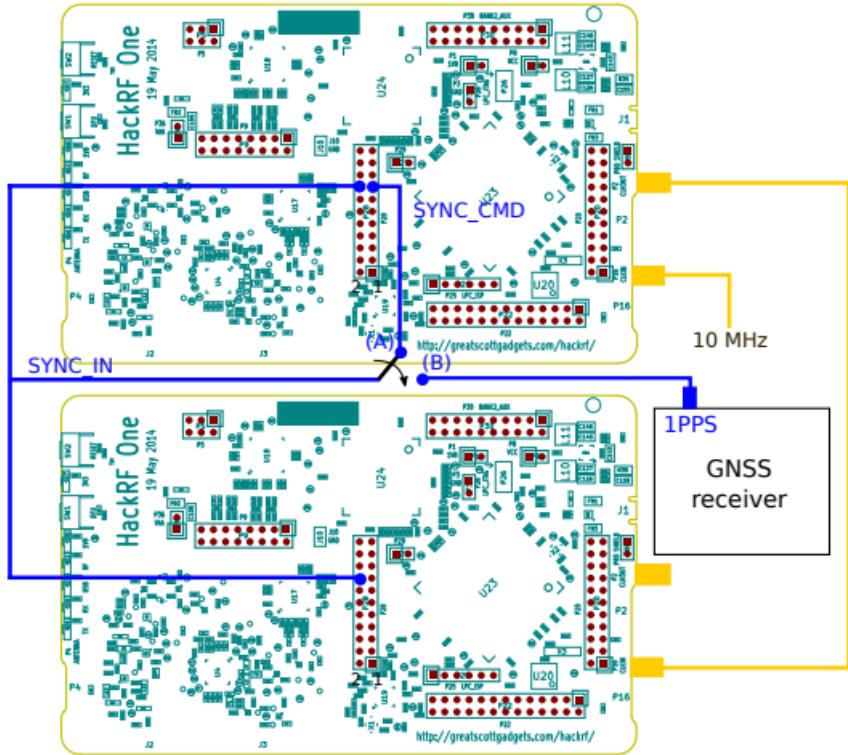


7 pav. HackRF One nuotrauka su pažymėtais jėjimais ir išėjimais.

Norint atlikti spindulio formavimą, reikia tiek SDR imtuvų, kiek masyve turėsime antenų. Kad būtų įmanoma atlikti spindulio formavimą, reikia laiko, dažnio ir fazės synchronizacijos tarp visų SDR imtuvų. Dažnio synchronizaciją pasiekti yra lengviausia, vieno imtuvo CLK OUT sujungiamas su kitų imtuvų CLK IN, taip gaunama dažnio synchronizacija, kadangi visi imtuvai generuoja taktinius dažnus iš to pačio šaltinio.

Laiko synchronizaciją pasiekti yra sudėtingiau. Prieš pradedant duomenų nuskaitymą, kompiuterio operacinė sistema (OS) išsiunčia nuskaitymo pradžios komandą. Kadangi OS sistema yra nenuspėjama, atsiranda tam tikri uždelsimai tarp visų nuskaitymo komandų. Kadangi imtuvai pradeda skaityti skirtingu metu, nebeįmanoma sulyginti IQ taškų gautų kompiuteryje. Vienas iš galimų sprendimų yra susinchronizuoti visų imtuvų nuskaitymo pradžią pasitelkus signalu, kuris perduodamas ne per USB, tačiau tiesiogiai tarp imtuvų. Toks metodas buvo ištirinėtas ir nustatyta, kad pasiekiamą synchronizaciją geresnė negu 1 nuskaitymo taškas [14].

Vienas iš imtuvų yra pasirenkamas kaip valdantysis, kuris generuoja SYNC CMD signalą, kiti kaip valdomieji, kurie laukia SYNC IN signalo. Kompiuteris išsiunčia komandą į visus



8 pav. HackRF imtuvų sinchronizacijos schema [14].

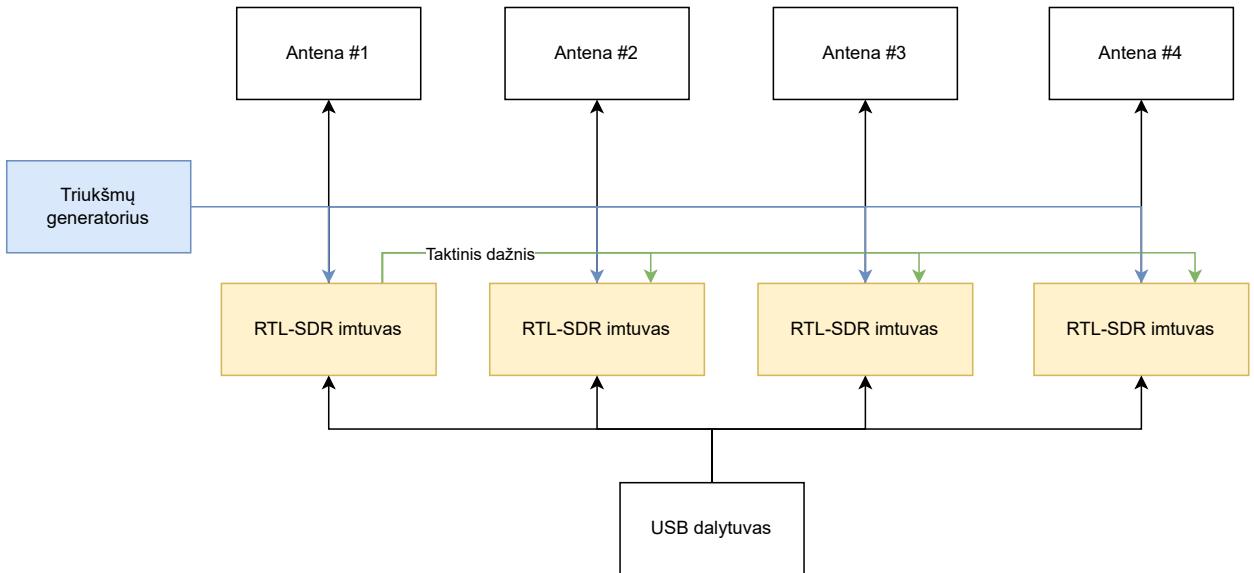
imtuvus, kad lauktų signalo iš vieno iš imtuvų, valdančiajam imtuvui sugeneravus pradžios signalą, visi imtuvalai vienu metu pradeda nuskaitymą ir duomenų siuntimą į kompiuterį.

Fazinės sinchronizacijos įsijungimo metu pasiekti neįmanoma. Kadangi įsijungimo metu yra paleidinėjama fazės paderinimo sistema su grižtamuoju ryšiu - PLL (angl. Phase Locked Loop), jų pradinė fazė yra atsitiktinė. Norint turėti vienodas fazes, reikia naudoti tą patį PLL šaltinį visiems dažnių maišytuvams. HackRF tokios galimybės neturi be didelių įrangos pakeitimų, todėl pasirinktas kalibravimo metodas. Kai SDR yra inicializuotas, jo fazė yra pakankamai stabili, kad būtų galima vykdyti spindulio formavimą. Tam, kad išsiaiškinti imtuvų fazę, po kiekvieno įjungimo reikia atlikti kalibravimą. Į visų imtuvų jėjimą, paduodamas pastovus signalas, kompiuteryje yra išsaugomas fazinis poslinkis tarp imtuvų. Baigus kalibravimą galima pradėti spindulio formavimo operacijas.

2.2 KerberosSDR imtuvas

KerberosSDR yra SDR imtuvas gebantis priimti signalus dažnių ruože nuo 24 MHz iki 1,7 GHz, ADC yra 8 bitų ir veikia iki 2,4MHz diskretizavimo dažnio [15]. KerberosSDR yra sudarytas iš 4 RTL-SDR imtuvų. RTL-SDR yra atviro kodo imtuvalai, padaryti iš DVB-T standartinių imtuvų, kurie yra lengvai prieinami. KerberosSDR imtuvas gali būti naudojamas krypties nustatymui, pasyviniam radarui ar spindulio formavimui.

KerberosSDR imtuvas turi integruotą plačiajuostį triukšmų generatorių, kuris leidžia synchronizuoti imtuvų darbą, atlikus kalibravimą radijai gali veikti kaip koherentinis imtuvas. Vienas iš KerberosSDR trūkumų yra reikalavimas atjungti antenas prieš kalibravimą, kadangi imtuvas neturi integruotų RF jungiklių. Ši problema yra sprendžiama naujos kartos KrakenSDR imtuve [16].



9 pav. KerberosSDR imtuvo blokinė diagrama.

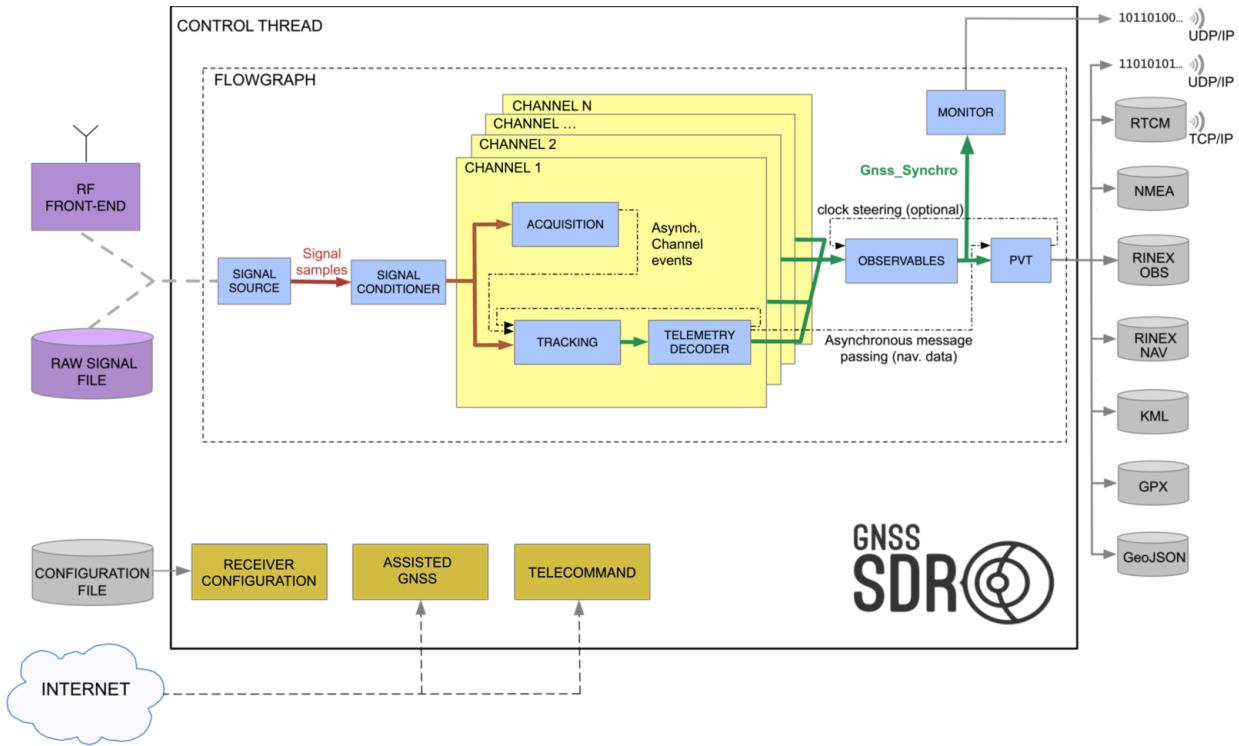
2.3 GNSS signalų apdorojimas

Signalų apdorojimui pasirinkta naudoti atviro kodo programinė įranga GNSS-SDR [17]. GNSS-SDR yra projektas, vystomas Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya organizacijos, nuo 2011 metų.

GNSS signalų apdorojimas yra intensyvus procesas, todėl norint apdoroti juos realiu laiku, reikalingos optimizacijos, kurios pilnai išnaudotų kompiuterio resursus. Norint išnaudoti resursus, visus skaičiavimus reikia lygiagretinti, tačiau tai nėra tokia paprasta užduotis. Ši problema jau yra išspėsta GNU Radio projekto, todėl GNSS-SDR pasitelkia ši įrankį signalų apdorojimui.

Signalo apdorojimas prasideda nuo duomenų šaltinio (angl. Signal Source). Duomenų šaltiniu gali būti arba SDR imtuvas, arba duomenų failas. Dažniausiai SDR imtuvas naudojamas, kai duomenys yra apdorojami realiu laiku, o duomenų failas, kai duomenys yra apdorojami vėliau, taip pat duomenų failas yra patogesnis naudojimui, kai yra tobulinamas GNSS SDR programinis kodas, kadangi galima nesunkiai lyginti imtuvo kokybę su tuo pačiu signalu.

Duomenys iš šaltinio turi būti pritaikyti prie vidinio formato. Signalo šaltiniai dažnai turi skirtinges formatus, skiriasi duomenų rezoliucija, išdėliojimas ir t.t. Signalo paruošimo (angl.



10 pav. GNSS SDR imtuvo, duomenų apdorojimo schema [18].

Signal Conditioner) paskirtis yra pritaikyti duomenų šaltinio formatą prie vidinio formato, naudojamo visuose kituose apdorojimo blokuose.

Kanalai (angl. Channel) yra skirti individualių palydovų paieškai ir sekimui. Kiekvienas kanalas yra atsakingas už palydovo signalo suradimą (angl. Acquisition), jį suradus, už jo signalo sekimą (angl. Tracking) ir duomenų dekovavimą (angl. Telemetry Decoder). Visi kanalai veikia lygiagrečiai, iš pradžių kiekvienam kanalui yra priskiriamas palydovas kurio jis ieškos ir tada pradedama palydovų paieška. Aptikus palydovo signalą, pradiniai sekimo parametrai yra perduodami sekimo blokui, kuris užsirakina ant signalo.

Stebėjimo blokas (angl. Observables) surenka duomenis iš visų kanalų ir atlieka pseudo atstumo, fazės ir Doplerio dažnio matavimus. Iš šių duomenų, galime rasti imtuvo poziciją, greitį ir laiką, už tai yra atsakingas PVT (angl. Position-Velocity-Time) blokas. Šis blokas atsakingas už sprendinio radimą ir rezultato pateikimą skirtingais standartizuotais formatais.

2.3.1 GNSS signalo sekimo blokas

Sekimo bloko pagrindinė užduotis yra sekti signalo sinchronizacijos parametrus: kodo užlaikymą ($\tau(t)$), Doplerio dažnį ($f_D(t)$) ir nešlio fazę ($\phi(t)$).

Pasinaudojus didžiausio tikėtinumo metodas (ML), bandoma maksimizuoti priimamo signalo koreliaciją su lokaliai atkurtu signalu. ML sekami parametrai f_D ir τ gali būti surasti maksimizujant šią funkciją:

$$\hat{f}_{DML}, \hat{\tau}_{ML} = \arg \max \left\{ \left| \hat{R}_{xd}(f_D, \tau) \right|^2 \right\}, \quad (18)$$

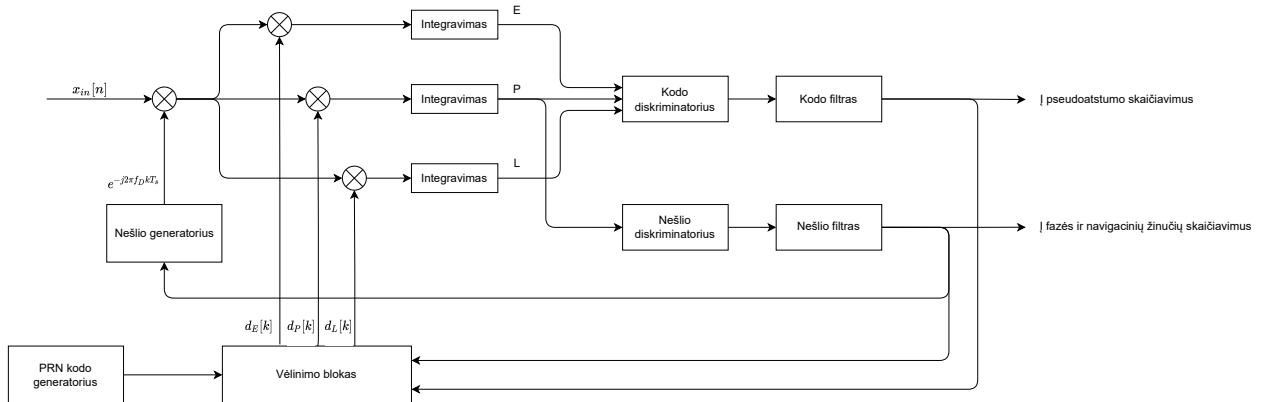
kur

$$\hat{R}_{xd}(f_D, \tau) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x_{IN}[k] d[k] T_s e^{-j2\pi f_D k T_s}, \quad (19)$$

čia $x_{IN}[k]$ signalas aprašytas (2), $d[k]$ - lokali palydovo signalo kopija, K - taškų skaičius naudojamas koreliacijai.

Signalų sekimas yra pasiekiamas pasinaudojus uždaro kontūro sistemomis, kurios yra suprojektuotos taip, kad minimizuotų skirtumus tarp kodo užlaikymo, Doplerio dažnio ir nešlio fazės lyginant su lokalia signalo kopija $d[k]$.

GNSS signalų atveju imtuvas skaičiuoja 3-jų signalų R_{xd} koreliacijas: paankstinto signalo $E = R_{xd}(\hat{\tau} + \epsilon)$, tikrasis signalas $P = R_{xd}(\hat{\tau})$, pavėlintas signala $L = R_{xd}(\hat{\tau} - \epsilon)$. Atlirkus koreliacijas, palyginami rezultatai ir taip nustatoma ar lokali signalo kopija atsilieka, skuba, ar tiksliai atkartoja priimamą signalą. Atlirkus skaičiavimus atnaujinama lokali signalo kopija ir vėl viskas vykdoma iš naujo. Signalų sekimo blokinė diagrama pavaizduota 11 pav.



11 pav. GNSS signalo sekimo blokinė diagrama [18].

2.3.2 GNSS signalo ir triukšmo santykio nustatymas

Signalo ir triukšmo tankio santykis gali būti išreikštinas kaip $C/N_0 = \frac{C}{N_0} = \frac{C}{BW}$, kur C yra nešlio galia, N - triukšmų galia, BW - imtuvo juostos plotis. Ši išraiška parodo nešlio galios ir triukšmo galios santykį per juostos pločio vieną. Santykis $\frac{C}{N}$ vadinamas signalo triukšmo santykiumi (SNR).

Laikant, kad dažnių juostos plotis yra atvirkščiai proporcingas integravimo laikui T_{int} , gaime užrašyti:

$$C/N_0 = \frac{SNR}{T_{int}}. \quad (20)$$

Kompleksiniams skaičiams SNR gali būti suskaičiuotas pasinaudojus antro ir ketvirto laipsnio momentų vertintoju [19]:

$$\widehat{SNR} = \frac{\hat{C}}{\hat{N}} = \frac{\sqrt{2\hat{M}_2^2 - \hat{M}_4}}{\hat{M}_2 - \sqrt{2\hat{M}_2^2 - \hat{M}_4}}, \quad (21)$$

čia:

- $\hat{M}_2 = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |P[m]|^2$,
- $\hat{M}_4 = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |P[m]|^4$,
- M - taškų skaičius naudojamas SNR įvertinimui,
- $P[m]$ - nevėlinto koreliatoriaus kompleksinė vertė (aprašyta 2.3.1 skyriuje).

Pasinaudojus (20) ir (21) galime išreikšti C/N_0 vertę dB – Hz vienetais:

$$\widehat{C/N_0}_{dB-Hz} = 10 \log_{10}(\widehat{SNR}) - 10 \log_{10}(T_{int}). \quad (22)$$

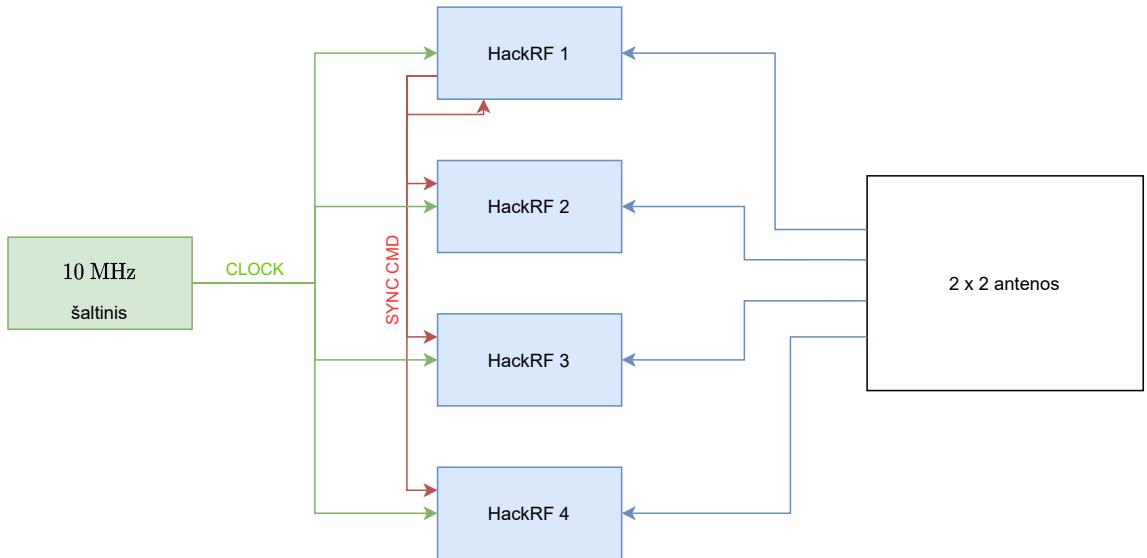
2.4 Spindulio formavimo įgyvendinimas

Spindulio formavimui pasirinktas antenų masyvas sudarytas iš 4 antenų, išdėliotų stačia-kampio formoje, tarp kurių atstumas yra $l = \lambda/2$. Toks išdėstymas pasirinktas dėl galimybės formuoti spindulius dvejose plokštumose, kad būtų galima nutaikyti antenų maksimumą į kiek-vieną GPS palydovą. Atliekant spindulio formavimą, bus užtikrinama, kad atėjęs signalas yra tiesioginis iš palydovo, o ne, pavyzdžiui, atsispindėjęs nuo šalia esančio pastato.

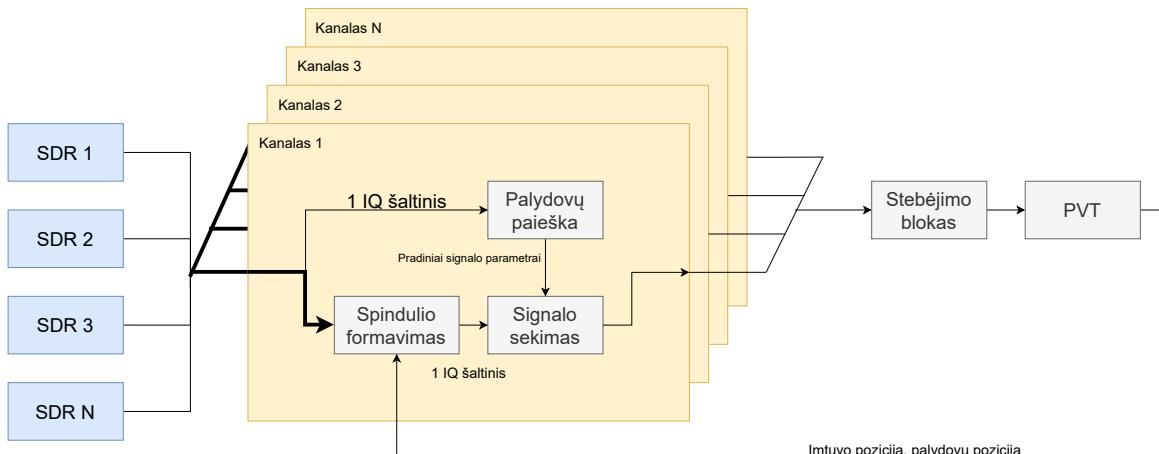
Norint žinoti nutaikymo kampą, reikia žinoti imtuvo poziciją, antenų pokrypi, ir į kurią pasaulio šalį jos yra nusuktos, taip pat palydovų padėti. Dėl paprastumo šiame darbe, bus laikoma, kad antenos visada nusuktos ta pačia kryptimi (šiaurės) ir jos bus lygiagrečios su žemės paviršiumi. Pridėjus IMU (angl. Inertial Measurement System), galima pamatuoti antenų paviršimo kampus ir kompensuoti signalų apdorojime.

Imtuvo struktūra (12 pav.) pasirinkta pilnai skaitmeninė, kad būtų sudaryta galimybė turėti daugumą spinduliu lygiagrečiai. Visi imtuvalai naudoja tą patį taktinį dažnį, bei turi sujungtą sinchronizacijos signalą. Toks sujungimas, kaip aptartas 2.1 skyriuje, užtikrina laikinę ir dažninę sinchronizaciją. Fazinė sinchronizacija turės būti kalibruojama prieš kiekvieną matavimą, kadangi visi SDR maišytuvai naudoja lokalius taktinio dažnio šaltinius, kurie yra generuojami naudojant PLL, kurių fazės įjungimo metu yra atsitiktinės.

13 pav. pavaizduota siūloma GNSS SDR signalo apdorojimo struktūra, su integruotu spindulio formavimu. Didžiausias pakeitimas bus atliekamas imtuvo kanaluose. Kiekviename kanale yra integruotas spindulio formavimo blokas, kuris iš N (antenų skaičius) duomenų srautų



12 pav. Trikdžiams atsparaus GNSS imtuvu schema.



13 pav. GNSS SDR blokinė diagrama, su pridėtu spindulio formavimu.

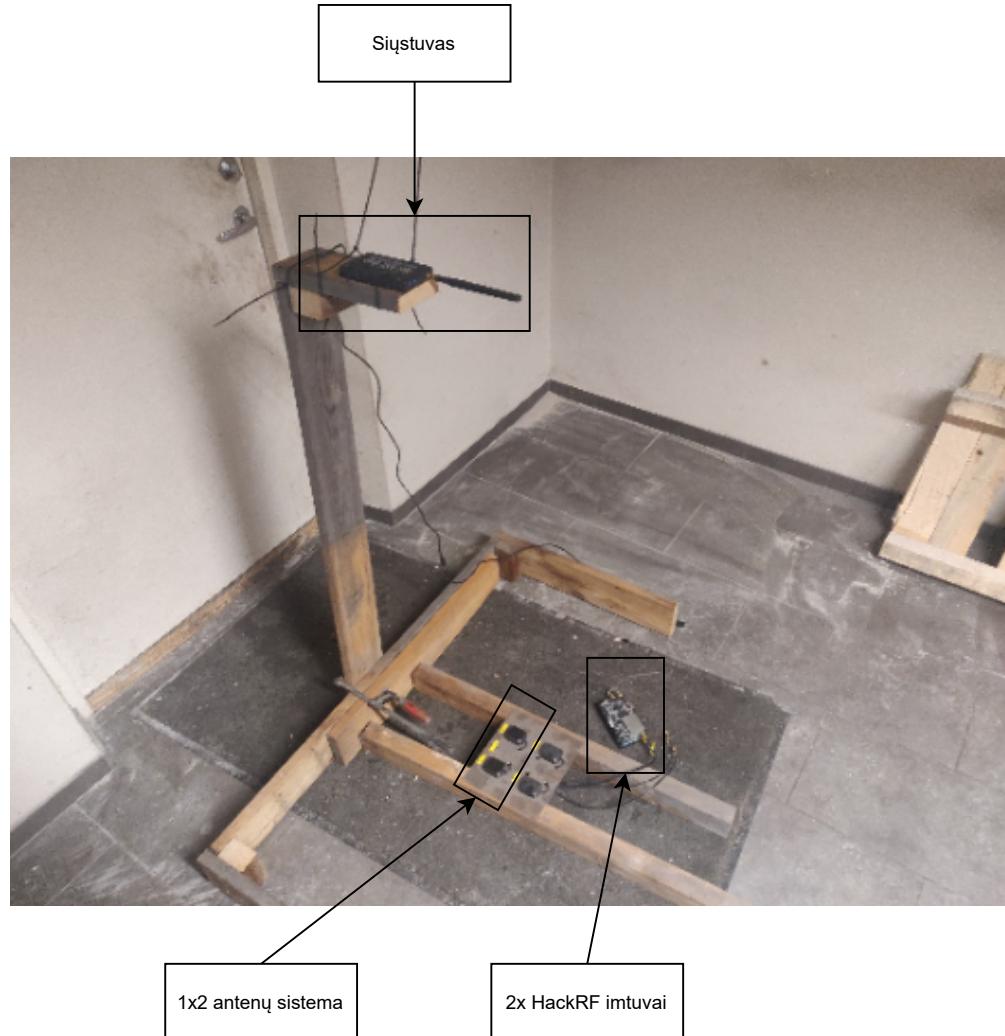
padaro 1 duomenų srautą. Tai bus atliekama, keičiant jėjimo signalų fazes ir juos sudedant. Spindulio kryptis bus nustatoma iš PVT sugeneruotų duomenų: imtuvu pozicijos, laiko ir palydovų orbitų. Spindulio formavimas negalės būti pradedamas, kol nebus gauta pirminė imtuvu pozicija, todėl tuo metu bus naudojamas signalas iš vienos antenos.

2.4.1 Spindulio formavimo matavimo stendas

Spindulio formos matavimui naudojamas stendas pavaizduotas 14 pav. Pagrindiniai stendo elementai:

1. HackRF siųstuvas, kuris generuoja CW signalą;
2. 1x2 spinduolių sistema sudaryta iš GNSS signalams priimti skirtų antenų;

3. Du HackRF koherentiniai imtuvai, susinchronizuoti anksčiau aptartais metodais;
4. Siųstuvo stovas, kuris leidžia keisti siųstuvo kampą, spinduolių sistemos atžvilgiu;



14 pav. Spindulio formos matavimo stendas.

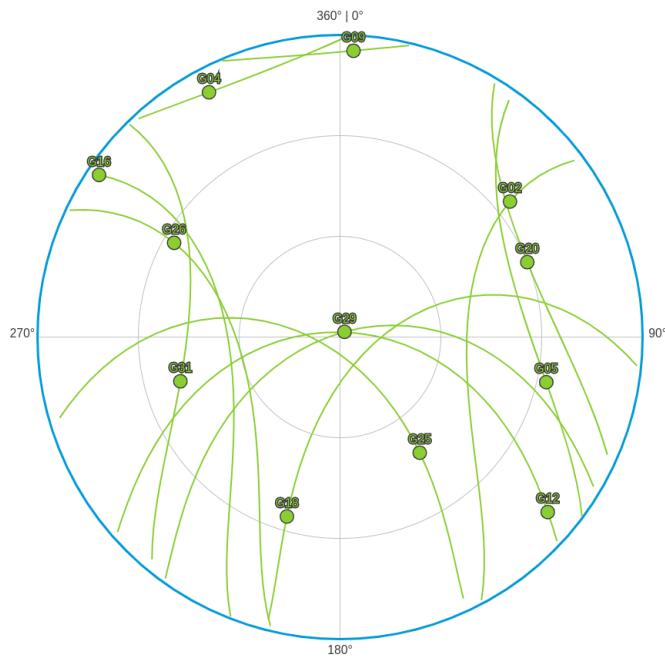
Matavimai stendu pradedami vertikalioje padėtyje, įjungiamas siųstuvas ir abu imtuvai. Atliekant signalų koreliaciją priimtų iš atskirų antenų, patikrinama laikinė sinchronizacija ir randamas fazijų skirtumas, kuris yra išsaugomas ir pritaikomas vienam iš imtuvų.

Spinduolių diagrama matuojama skaičiuojant priimamo signalo stiprumą: atliekama FFT transformacija ir matuojamas maksimumo dydis. Nuskaičius vieną tašką, siųstuvu stovas yra pasukamas iki kito kampo. Kampas yra matuojamas pasinaudoju išmaniojo telefono akselerometro pagalba. Išmatavus vieno spindulio diagramą įjungiamas spindulio formavimas (signalų sudėtis) ir vėl kartojamas matavimas keičiant vieno iš imtuvų fazę.

2.5 Imtuvų fazės kalibravimas naudojant GNSS signalą

Kaip aprašyta ankstesniuose skyriuose, naudojant HackRF SDR imtuvus, kiekvieno matavimo pradžioje reikalingas fazinis imtuvų kalibravimas. Tam, kad supaprastinti matavimo metodiką, faziniam kalibravimui naudojamas priimamas GPS signalas.

Tam, kad būtų galima atlikti fazijų nuokrypį įvertinimą, palydovas, naudojamas kalibravimui, turi būti gerai matomas, bei jis turi būti dangaus skliauto viršuje. Kai palydovas yra statmenai antenų masyvui, visos priimamos fazės visuose imtuvuose turi būti lygios 0. Dėl šios priežasties, matavimus reikia planuotis iš anksto, tuo laiku kai bent vienas palydovas yra kuo aukščiau virš horizonto. Tinkamas palydovų išsidėstymas pateiktas 15 pav., kalibravimui tinkamas palydovas yra PRN29.



15 pav. GPS palydovų pozicijos dangaus skliaute, adresu Saulėtekio al. 9, Vilnius, 2022-05-11 13:20.

Kalibravimas atliekamas lyginant vienos iš antenų fazę, su kitų trijų antenų fazėmis. Atliekamas vidurkio skaičiavimas, gauta vertė atitinka fazės nuokrypi nuo tikrosios fazės, ši vertė naudojama fazės poslinkiui visuose skaičiavimuose.

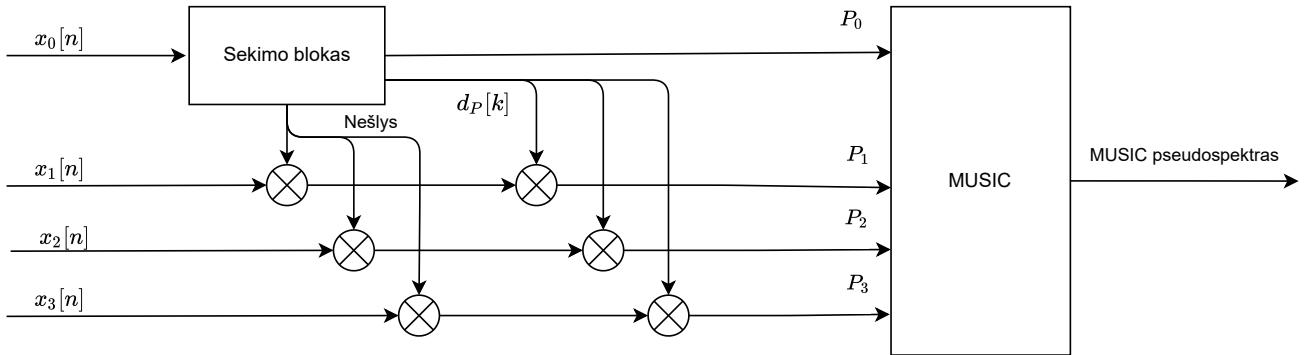
Jeigu palydovas nėra statmenas antenų masyvui, pritaikius spindulio formavimo algoritmą, galime suskaičiuoti fazes kiekvienoje antenoje ir šis pokrypis yra pridedamas prie nulinės fazės.

2.6 GNSS signalo krypties nustatymas

Norint aptikti trikdžių šaltinius (pvz. signalo atspindžius), reikia žinoti signalo priėmimo kryptį. Tai galima pasiekti pasinaudojus MUSIC krypties nustatymo algoritmu (1.3 skyrius),

tačiau kadangi GPS signalo lygis yra žemesnis už imtuvo triukšmus ir visi GPS palydovai transliuoja tame pačiame dažnyje, tiesiogiai imtuvo duomenims MUSIC taikyti negalime.

Krypties nustatymą galima įgyvendinti panaudojus GNSS signalo sekimo bloką, aprašytą 2.3.1 skyriuje. GPS signalo sekimas yra vykdomas vienoje iš antenų, pvz. $x_0[n]$. Tarpiniai sekimo rezultatai, nešlys ir tikrojo signalo kopija $d_P[k]$, koreliuojami su kitų antenų signalais, kaip pavaizduota 16 pav.



16 pav. GNSS signalo krypties nustatymo diagrama.

Gautas koreliacijos rezultatas (P_n) yra kompleksinis skaičius, kurio fazė parodo priimtų signalų fazes, todėl naudojantis šiais duomenimis, galime nustatyti signalo priėmimo kryptį. Koreliacijos rezultatai yra perduodami MUSIC algoritmui, kurio įgyvendinimas atliktas panaudojus Python biblioteka "doatools.py" [20].

16 pav. blokas yra vykdomas visuose GNSS imtuvo kanaluose, todėl galime visų matomų palydovų signala kryptis nustatyti nepriklausomai. Gavus signala kryptis ir žinant tikrąsias palydovų padėtis galime pritaikyti spindulio formavimo algoritmą arba pozicijos skaičiavimams nenaudoti palydovų, kurių signalas yra priimamas netiesiogiai.

3 Trikdžiams atsparios palydovinės navigacijos sistemos tyrimas

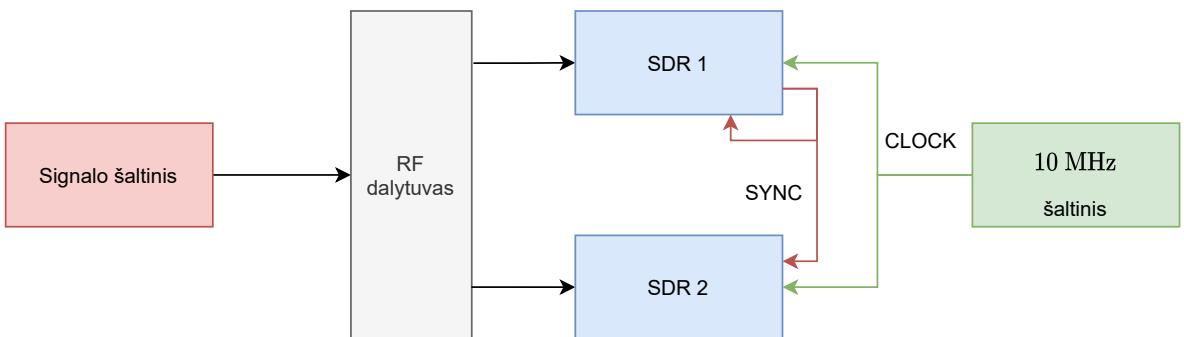
Visų matavimu metu naudojamas nešlio dažnis $f_D = 1575,42 \text{ MHz}$, nuskaitymo dažnis $f = 2 \text{ MHz}$. Kaip 10 MHz šaltinis naudojamas OLP01-12s-MF5.8-36A, temperatūriškai stabiliuotas osciliatorius, kurio specifikacijos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. OLP01-12s-MF5.8-36A specifikacijos.

Parametru pavadinimas	Vertė
Dažnis	10 MHz
Temperatūrinis stabilumas	$\pm 5 \times 10^{-8} \text{ Hz}/^\circ\text{C}$
Maitinimo įtampos stabilumas	$\pm 2 \times 10^{-9} \text{ Hz}/\text{V}$
Laikinis stabilumas	$\pm 5 \times 10^{-8} \text{ Hz}/\text{Metus}$

3.1 HackRF laikinės synchronizacijos matavimas

Tikrinant laikinę synchronizaciją, naudojamas stendas, kurio blokinė diagrama pavaizduota 17 pav. Kaip signalo šaltinis naudojamas HackRF One siųstuvu konfigūracijoje, jo siunčiamas signalas yra gauso triukšmas.



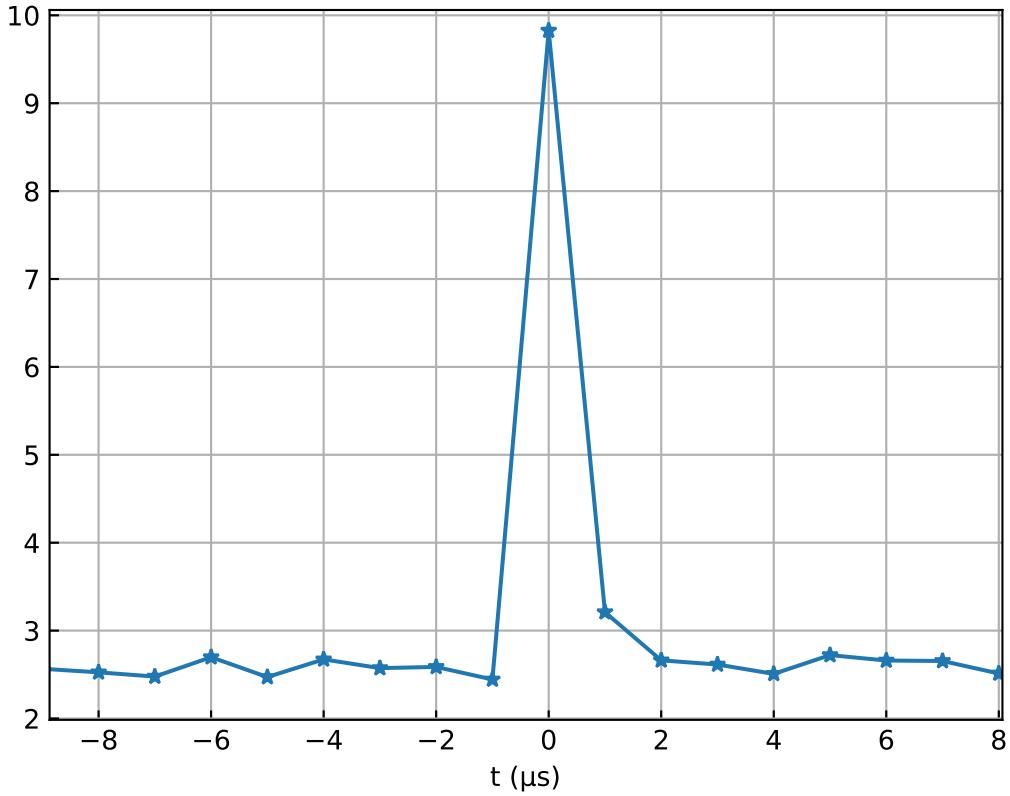
17 pav. Matavimo stendo schema.

Matavimui naudojami 2 HackRF One radijai, sukonfigūruoti imtuvo konfigūracijoje. Tarp jų yra sujungtas synchronizacijos signalas kaip aprašyta 2.4 skyriuje, bei naudojamas bendras 10 MHz šaltinis.

Turint IQ taškus iš abiejų imtuvų, norint rasti signalo užlaikymą tarp imtuvų, galime pasinaudoti koreliacijos operacija, kurios rezultatas bus užlaikymas tarp signalų. Tarkime, kad pirmojo imtuvo taškai yra seka $x[n]$, o antrojo $y[n]$. Kryžminė koreliacija r_{xy} apibrėžiama:

$$r_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-l], \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots . \quad (23)$$

Pritaikę (23) lygtį, gauname koreliacijos rezultata, kurio maksimumas nurodo uždelsimą tarp dviejų signalų.



18 pav. HackRF signalų koreliacijos rezultatas.

18 pav. galime matyti, kad koreliacijos maksimumas yra centruotas ties $0 \mu\text{s}$, todėl galime daryti išvadą, kad imtuvių yra sinchronizuoti laike, ± 1 taško tikslumu (kai skaitymo dažnis yra $f_s = 2 \text{ MHz}$). Rezultatas sutampa su rezultatais pateiktais [14] straipsnyje.

3.1.1 Koreliacijos skaičiavimo optimizavimas

3.1 skyriuje aprašytas algoritmas reikalauja didelių skaičiavimo pajėgumų, todėl taikyti šio algoritmo realiu laiku neišeina. Algoritmas gali būti optimizuotas pasinaudojus koreliacijos savybe, kuri lemia tai, kad sudauginus kompleksiškai jungtines signalų Furje transformacijas, gauname koreliacijos Furje transformaciją. Rezultatui pritaikius atvirkštinę Furje transformaciją gauname koreliacijos rezultatą. Sparčiam Furje skaičiavimui naudosime FFT (angl. Fast Fourier transform) algoritmą, kuris tinkamas naudoti su diskretizuotu signalu.

Algoritmo eilišumas:

1. Atliekame abiejų signalų Furje transformacijas pasinaudojus FFT algoritmu;
2. Sudauginame vieną signalą su kito kompleksinio jungtinu rezultatu;
3. Atliekame atvirkštinę Furje transformaciją pasinaudojus FFT algoritmu;

3.2 HackRF fazinės sinchronizacijos matavimas

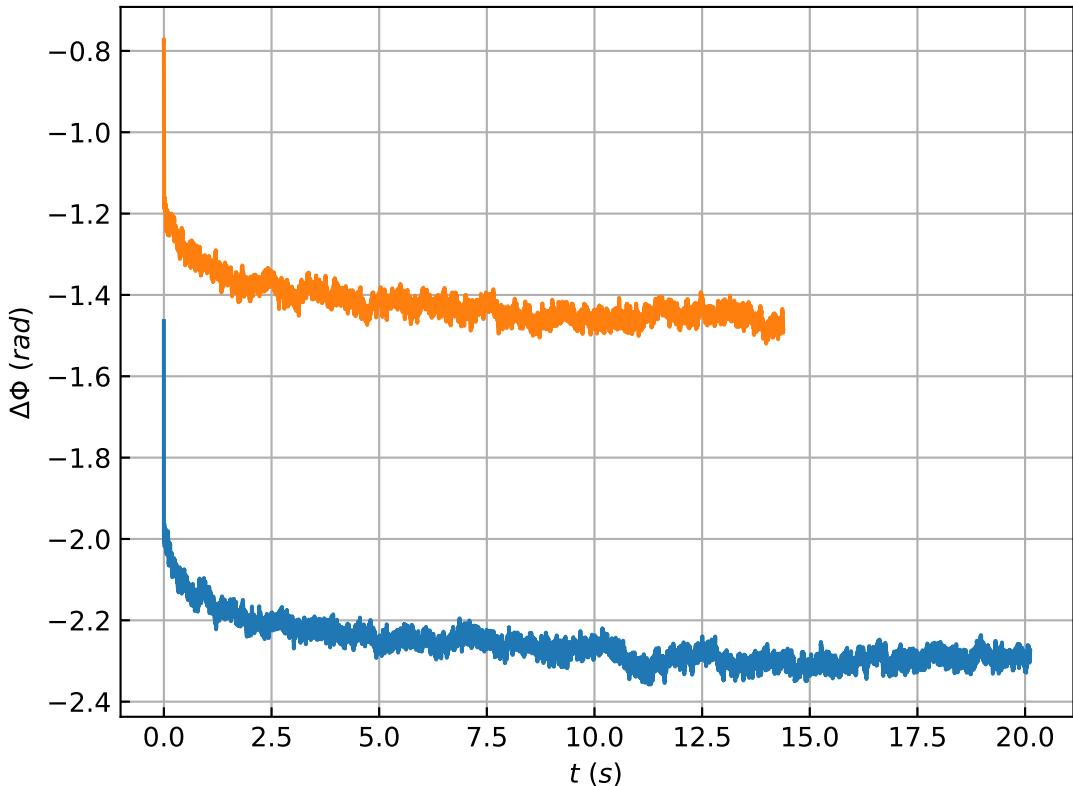
Fazinei sinchronizacijai tarp imtuvų matuoti naudojamas tas pats matavimų standas, kaip ir 3.1 skyriuje, tačiau pakeistas generuojamasis signalas iš Gauso triukšmo, į pastovų signala (CW, angl. Continous Wave). Kaip aptarta 2.1 skyriuje, fazinės sinchronizacijos imtuvai negarantuoja, tačiau sukonfigūravus visas grandines, fazė turėtų nekisti tarp imtuvų.

Signaloo fazę galime gauti iš IQ ($x[n]$) taškų, kurie yra kompleksinėje plokštumoje. Kampas sudaromas su realiaja ašimi ir yra signaloo fazė, kuri gali būti apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$\Phi[n] = \arctan 2(\operatorname{Im}(x[n]), \operatorname{Re}(x[n])), \quad (24)$$

kadangi signalo generatorius nėra sinchronizuotas su imtuviniais, gali atsirasti dažnio skirtumas, kuris faziniuose matavimuose atsispindės kaip pastovus fazės kitimas. Kad pašalinti tokį kitimą, galime lyginti matuojamias fazes tarp imtuvų, pritaikę nesudėtingą formulę:

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (25)$$



19 pav. Fazių skirtumas tarp dviejų SDR imtuvų.

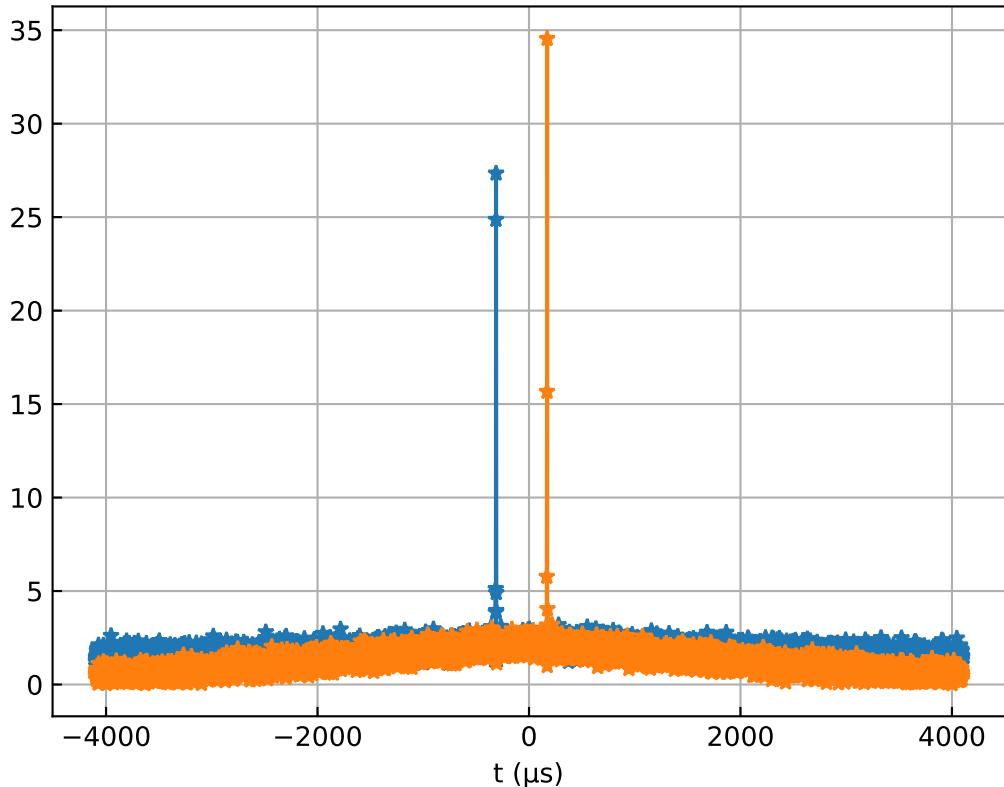
19 pav. galima matyti, kad fazių skirtumas tarp imtuvų po kurio laiko nusistovi. Iš grafike

pavaizduotų matavimų, galime nustatyti, kad kiekvieno matavimo metu, atsiranda vis kitoks fazių skirtumas, kaip aptarta 2.1 skyriuje. Pradėjus matavimą, fazių skirtumas nusistovi maždaug po 5 s, tai įtakoja kiekvieno imtuvo PLL nusistovėjimo laikas. Toks nusistovėjimas GNSS signalų priėmimui įtakos neturės, dėl to, kad spindulio formavimas bus pradedamas tik po kalibravimo, bei pirmų koordinacijų gavimo, kuris trunka daugiau negu 30 s. Iš grafiko taip pat galima nustatyti, kad nusistovėjus fazei, nestebimas didelis fazių skirtumo kitimas, iš to galime daryti išvadą, kad abu imtuvai yra sinchronizuoti tiek fazėje, tiek dažnyje.

Norint atlikti kalibravimą, reikia gauti fazės skirtumo vidurki, jį išsisaugoti. Turint fazių skirtumą, jį galime taikyti kaip konstantą SDR imtuviui. Kai imtuvai yra sinchronizuoti laike, dažnyje ir fazėje, galime taikyti spindulio formavimo algoritmus.

3.3 KerberosSDR laikinės synchronizacijos matavimas

Laikinės synchronizacijos tikrinimui pasitelktas triukšmų generatorius integruiotas į KerberosSDR imtuvą (aprašyta 2.2 skyriuje). Signalo užlaikymas skaičiuojamas tokiu pačiu metodu kaip aprašyta 3.1 skyriuje.



20 pav. KerberosSDR signalų koreliacijos rezultatas.

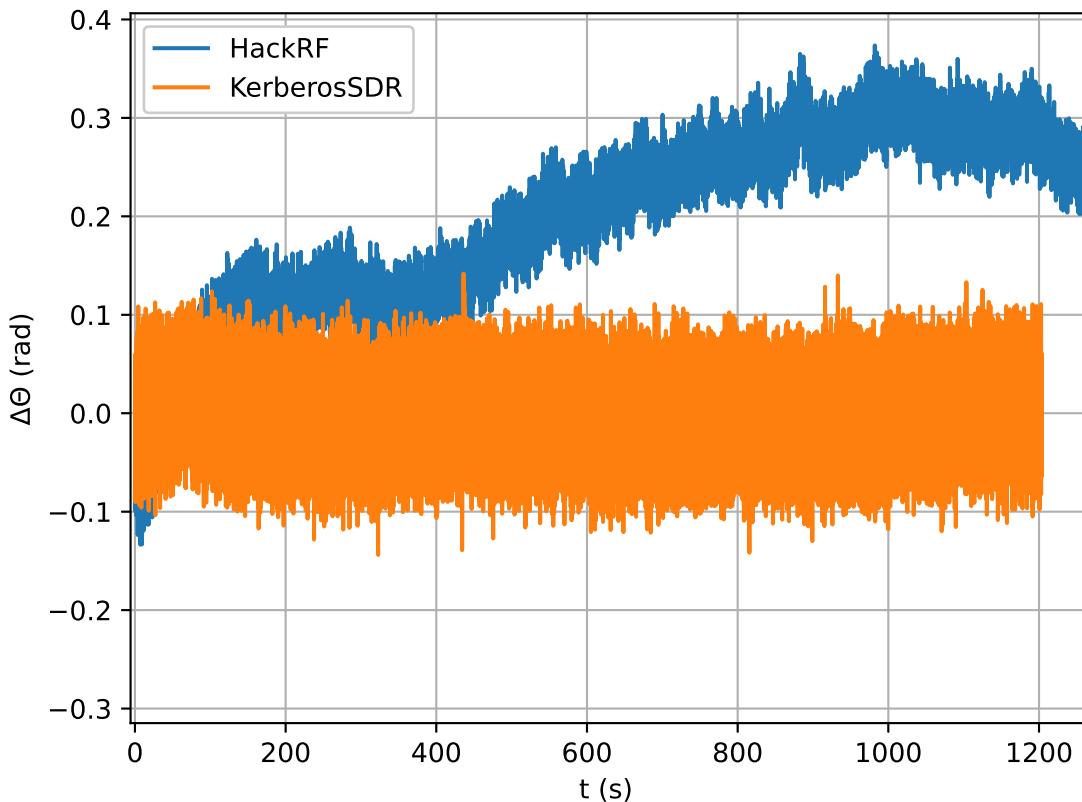
20 pav. pavaizduota dviejų matavimų rezultatai, tarp kurių imtuvas buvo inicializuotas iš

naujo. Iš grafikų galime matyti, kad vienu atveju signalo vėlinimas yra $171 \mu\text{s}$, o kitu $-312 \mu\text{s}$. Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, kad naudojant KerberosSDR imtuvą reikia atlikti taškų vėlinimo kalibravimą. Priežastys kodėl atsiranda taškų vėlinimas yra tos pačios kaip ir HackRF imtuve, kuris aprašytas 2.1 skyriuje.

3.4 KerberosSDR fazinės synchronizacijos matavimas

Fazinei synchronizacijai tarp imtuvų matuoti naudojamos integruotas triukšmo generatorius, tačiau šį kartą naudosime kitą metodą fazės skirtumo gavimui.

Fazės skaičiavimui pasinaudosime jau turimu koreliacijos rezultatu. Kadangi koreliacija atliekama su kompleksiniais skaičiais, tai koreliacijos rezultatas irgi gaunamas kompleksinis. Absoliuti koreliacijos vertė parodo koreliacijos koeficientą, o kompleksinio skaičiaus kampas parodo signalų fazės skirtumą.



21 pav. Fazės stabilumas HackRF ir KerberosSDR imtuvų.

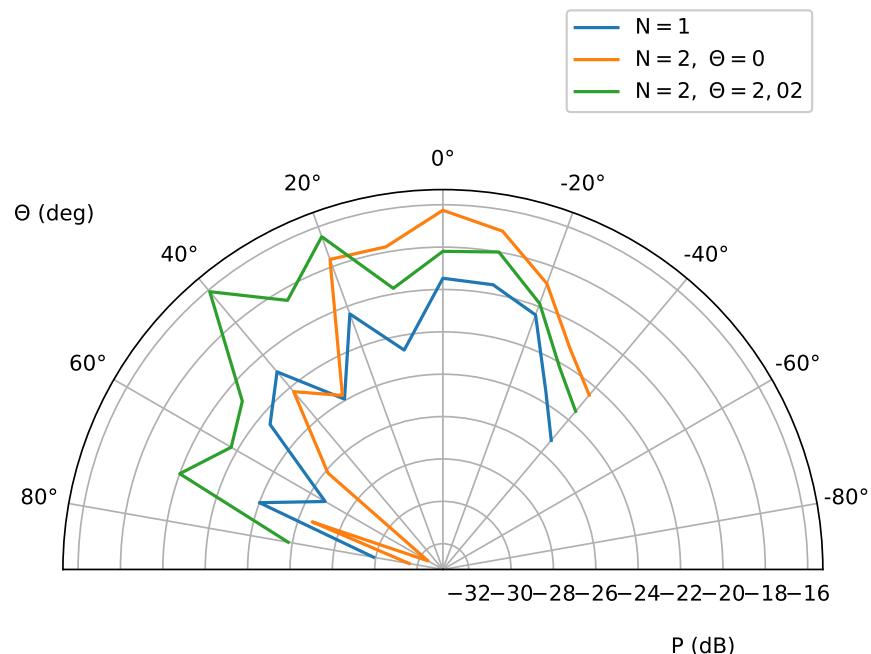
21 pav. aiškiai matoma, kad KerberosSDR imtuvu fazė yra stabilesne už HackRF. KerberosSDR vidutinis fazės nuokrypis per 20 minučių nekito, o HackRF imtuvu fazė pasikeitė per $0,35 \text{ rad}$. Toks fazės nuokrypis, pagal (6) lygtį, reikštų apie 6° spindulio maksimumo nuokry-

pi. Kadangi spindulio formavimas bus vykdomas tik su keturiomis antenomis ir tokiu atveju spindulio plotis yra daug didesnis, tai nėra reikšmingas fazinis nuokrypis.

Taip pat kaip ir HackRF atveju, kiekvieną karta įjungus imtuvus, pradinis fazinių skirtumas tarp imtuvų yra atsitiktinis, todėl prieš kiekvieną matavimą reikia atlikti imtuvo kalibravimą. KerberosSDR atveju atlikti kalibravimą yra lengviau dėl integravoto triukšmų generatoriaus.

3.5 Spindulio formavimo rezultatai

Matavimai atliekami 2.4.1 skyriuje aprašytame stende, su 2 spinduolių sistema, pirmas matavimas atliekamas su viena antena, antrasis - su dviem antenomis esant 0 fazės skirtumui ir trečias matavimas - su dviem spinduoliais ir esant 2 rad fazės skirtumui. Antenos yra išdėstytos $\lambda/2$ atstumu, todėl esant 2 rad fazės skirtumui, tikimasi, kad diagramos maksimumas bus nukreiptas 40 laipsnių kampu.



22 pav. Antenų sistemos spinduliavimo diagramos esant skirtingam spinduolių skaičiui ir skirtingai fazei tarp spinduolių.

Iš 22 pav. galima nustatyti, kad naudojant viena spinduoli, diagramos maksimumas yra

$-19,4$ dB ir yra nukreiptas 0 laipsnių kampu. Įjungus antrą anteną iškarto stebimas 3 dB maksimumo padidėjimas iki $-16,4$ dB. Toks signalo padidėjimas reiškia, kad priimama galia padidėjo 2 kartus, kadangi signalas priimamas iš dviejų antenų.

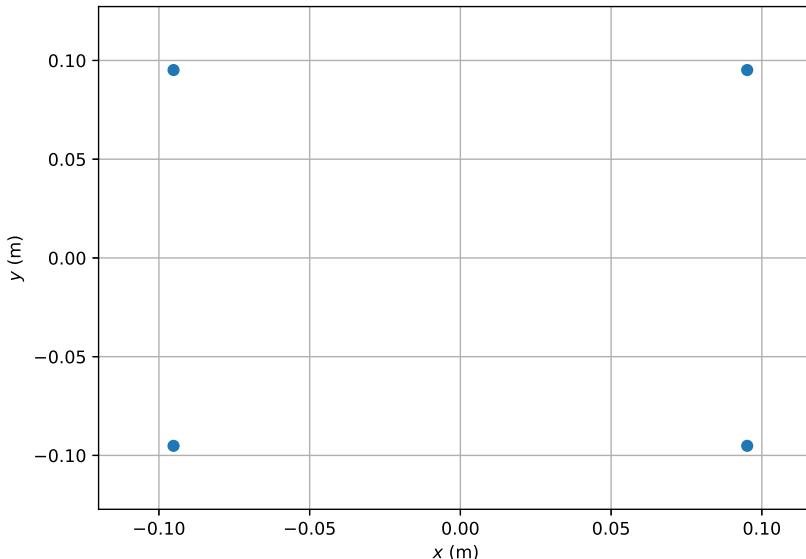
Vienam iš imtuvų pritaikius $\Delta\Theta = 2$ rad fazės pokytį, gauta, kad maksimumas pasislinko į 40 laipsnių kryptį, o signalo stiprumas išliko tokis pat kaip atveju kai fazės pokyčio nebuvo. Šis rezultatas sutampa su (6) lygties rezultatu.

Visi matavimų grafikai turi tam tikrus minimumus, ten kur jų neturėtū būti. Jie atsiranda dėl stovinčių bangų, kadangi matavimai buvo atlikti patalpoje nuo kurios sienų vyksta atspindžiai. Norint gauti tikslesnes spinduliaivimo diagramas, matavimus reiktų atlikti patalpoje, kurioje nėra atspindžių.

Iš gautų rezultatų galime daryti išvada, kad naudojant HackRF imtuvus spindulio formavimas yra galimas, gaunamas 3 dB signalo sustiprėjimas ir pritaikius fazės pokytį, galima keisti spinduolių sistemos kryptingumo diagramą.

3.6 GNSS imtuvo matavimai

GNSS matavimai atlikti naudojant 4 HackRF imtuvus su prijungtomis 4 aktyviomis antenomis išdėstytomis kvadrato formoje $\lambda/2$ atstumu, kaip pavaizduota 23 pav.



23 pav. Antenų masyvo, naudoto GNSS imtuvo tyrimams, išdėstymo schema.

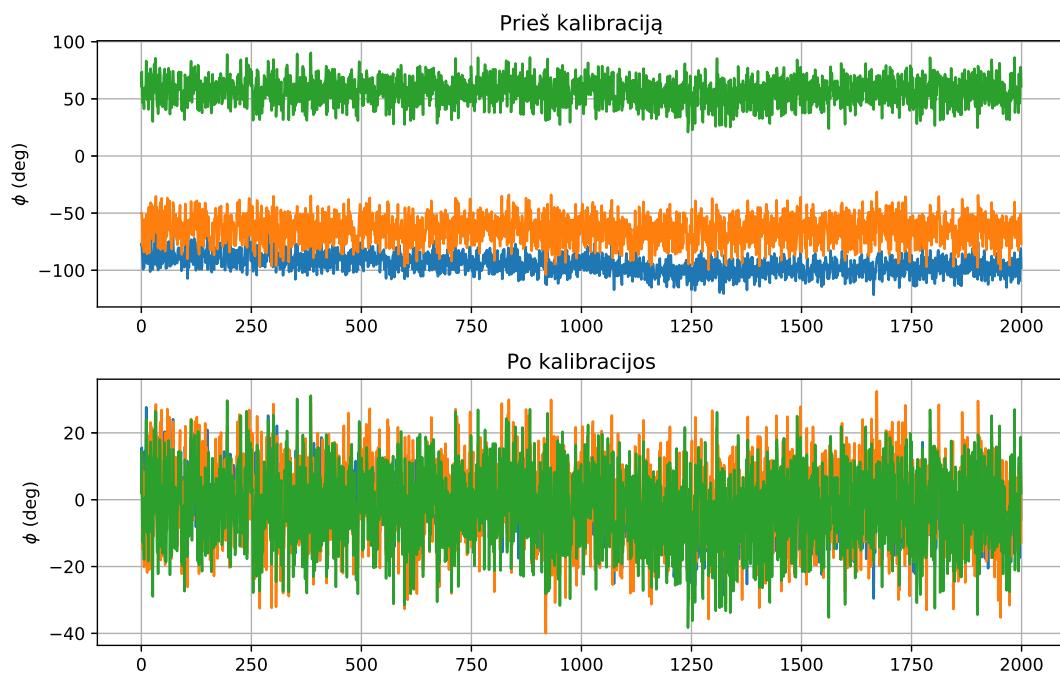
Visi matavimai atliekami išsisaugant neapdorotus duomenų failus iš kiekvieno imtuvo atskirai ir duomenų apdorojimas vykdomas šia tvarka:

1. Atliekamas duomenų apdorojimas 2.6 skyriuje aprašytu bloku;

2. Atliekamas fazės kalibravimas pasinaudojant vienu iš matomų palydovų;
3. Pritaikomas MUSIC algoritmas signalų krypčių nustatymui;
4. Duomenys apdorojami nenaudojant spindulio formavimo;
5. Duomenys apdorojami taikant spindulio formavimo algoritmą;

3.6.1 Imtuvo fazės kalibravimo rezultatas naudojant GPS signala

Imtuvų fazės kalibravimas yra atliekamas 2.5 skyriuje aprašytu metodu. 24 pav. pateiktos antenų fazės prieš kalibravimą ir po kalibravimo. Iš grafiko matoma, kad be kalibravimo fazės nuokrypis yra atsitiktinis, todėl šis signalas negali būti naudojamas algoritmų įgyvendinimui. Pritaikius kalibravimą, visų antenų fazės poslinkiai yra surandami ir iš grafiko galime nustatyti, kad fazės reikšmingai nekinta.

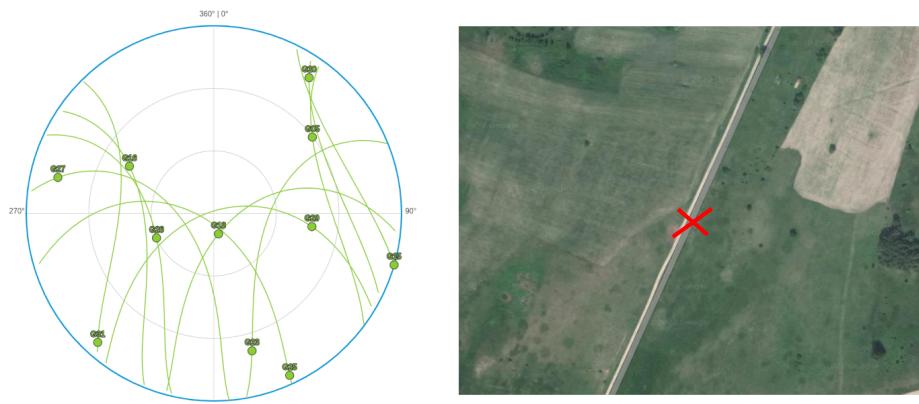


24 pav. PRN29 palydovo priimto signalo fazės kiekviename antenų masyvo elemente, prieš kalibravimą ir po kalibravimo.

3.6.2 GNSS signalų priėmimas kai nėra kliūčių

Pirmam matavimui buvo parinkta atvira vietovė, kurioje dangaus skliautas néra blokuojamas jokių kliūčių. Matavimas buvo atliekamas 10 minučių, fazės kalibravimas atliktas pagal PRN18 palydovą. 25 pav. kairėje pavaizduota matavimų metu buvęs palydovų išsidėstymas

dangaus skliaute. Kadangi PRN18 yra aukščiausiai esantis palydovas, jis buvo pasirinktas faziņiam kalibravimui. Aptykslė matavimų vieta pažymėta raudonu kryžiuku žemėlapyje. Iš palydovinės nuotraukos galime matyti, kad pasirinktoje vietovėje nėra pastatų, bei aukštos augalijos.



25 pav. Kairėje palydovų išsidėstymas dangaus skliaute matavimų metu, dešinėje matavimo vietovės palydovinė nuotrauka [21].

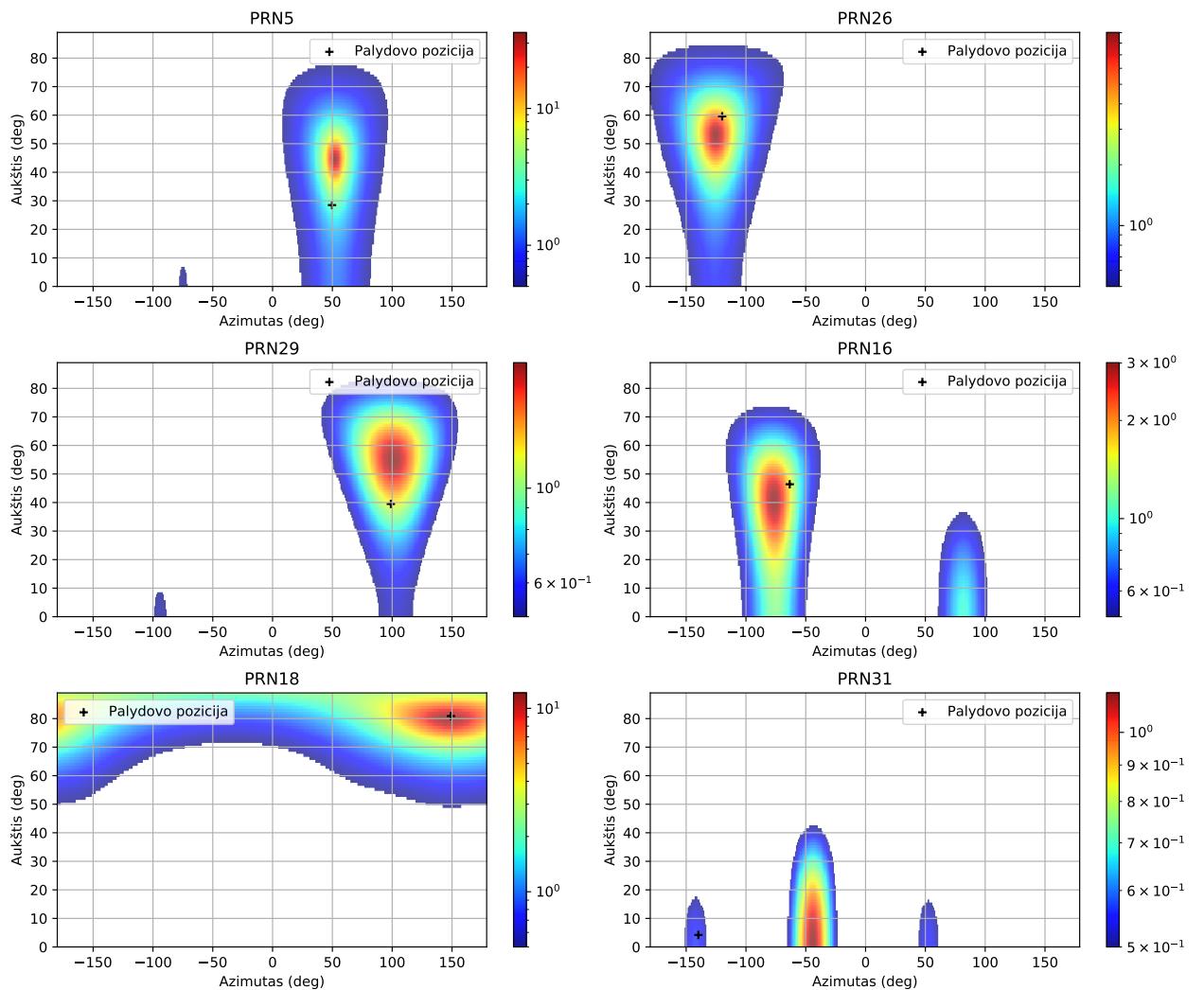
Pritaikius GNSS signalų apdorojimą aprašytą 2.6 skyriuje, gauti rezultatai pavaizduoti 26 pav. Kiekvienas grafikas parodo individualaus palydovo MUSIC pseudospekro vertę, azimutas rodo nustatyta pasaulio šalies kryptį, kur 0 atitinka šiaurę, 180/-180 - pietūs. Aukštis rodo palydovo aukštį virš horizonto laipsniais. Juodas kryžius parodo tikraja palydovo poziciją, kuri nustatyta pasinaudojus žinomomis palydovų orbitomis, matavimo data, laiku ir pozicija.

26 pav. visi grafikai turi vieną stiprų maksimumą, kuris atitinka signalo priėmimo kryptį. Taip pat kadangi yra tik vienas maksimumas, galime daryti išvadą, kad šioje matavimo vietovėje imtuvas nemato signalo atspindžių ir priima tik tiesioginį palydovo signalą. PRN18 grafike maksimumas tiksliausiai sutampa su tikraja palydovo pozicija, kadangi fazinis kalibravimas buvo atliekama pagal šį palydovą. Kitų palydovų tikroji pozicija turi tam tikras paklaidas ir nesutampa su MUSIC pseudospekro maksimumu. Tam yra kelios pagrindinės priežastys:

- Matavimų metu, antenų masyvas nebuvo lygiagretus su horizontu, o turėjo tam tikrus pokrypius;
- Matavimų metu, antenų masyvas nebuvo tiksliai nukreiptas šiaurės kryptimi;
- HackRF fazių nestabilumas aprašytas 3.4 skyriuje;

Tolimesniuose matavimuose paklaidų mažinimui antenų masyvas buvo lyginamas pasinaudojant išmaniojo telefono akselerometru, šiaurės kryptis nustatoma pagal žemėlapį. Geresniam

fazių stabilumui užtikrinti, pasiruošus matavimui, buvo palaukiama kol stabilizuosis imtuvų temperatūra (apie 10 min).

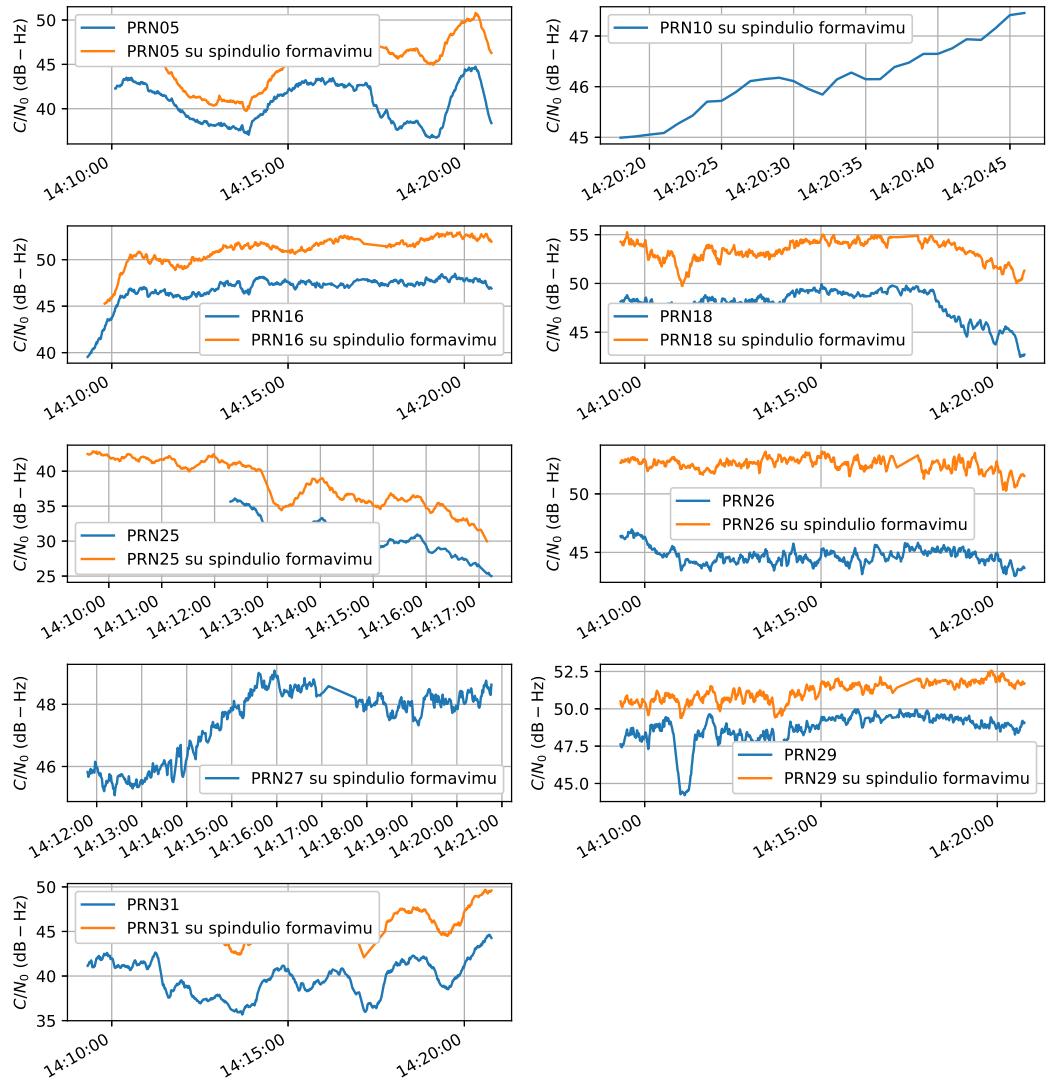


26 pav. Nustatyti GPS palydovų signalų kryptys, naudojant MUSIC algoritmą.

27 pav. pavaizduotas signalo triukšmo santykis, kiekvieno palydovo, pritaikius spindulio formavimą aprašytą 2.4 skyriuje, o signalo triukšmo santykis suskaičiuotas pagal 2.3.2 skyriuje aprašytą metodiką.

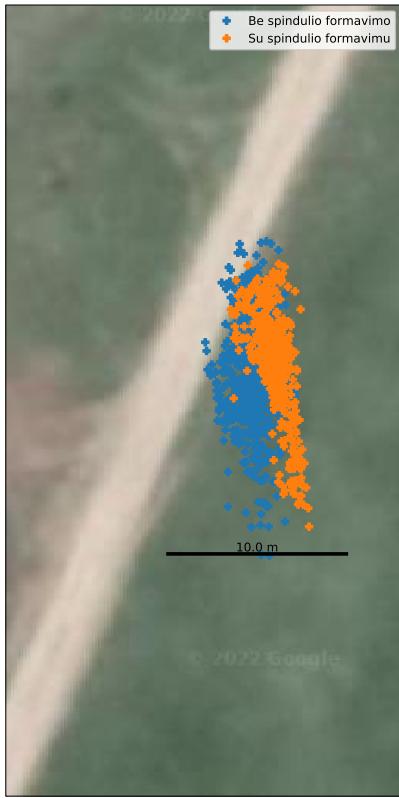
Spindulio formavimas atliekamas maksimumą nukreipiant į tikrąjį palydovo padėtį. 27 pav. galima stebėti, kad naudojant spindulio formavimą, signalo triukšmo santykis pagerėja nuo 2 dB. iki 8 dB lyginant su signalo triukšmo santykiu be spindulio formavimo. Kadangi naujojamos 4 antenos, tai numatomas signalo pagerėjimas yra 6 dB, kas ir yra stebima signalo triukšmo santykio matavimuose. Taip pat PRN10 ir PRN27 atveju, nenaudojant spindulio formavimo palydovo signalas buvo per silpnas, kad būtų įmanoma vykdyti jo sekimą, todėl naudojant spindulio formavimą buvo aptikta daugiau palydovų, kas leidžia tiksliau nustatyti

imtuvo pozicija.



27 pav. Nustatytais signalo triukšmo santykis nenaudojant ir naudojant spindulio formavimą.

Atlikus spindulio formavimą, suskaičiuotos koordinatės pavaizduotos 28 pav. Iš grafiko galime nustatyti, kad koordinatės taškų išsibarstymas nežymiai sumažėjo, tačiau reikšmingų pokyčių nėra. Ši rezultatą pagrinde įtakoja geresnis signalo triukšmo santykis, bei atsiradę du papildomi palydovai, kaip aptarta šio skyrelio pradžioje. Kadangi 26 pav. atspindžiai nėra stebimi, tai šiam matavimui atspindžiai nesudarė papildomo trukdžio koordinačių skaičiavime.

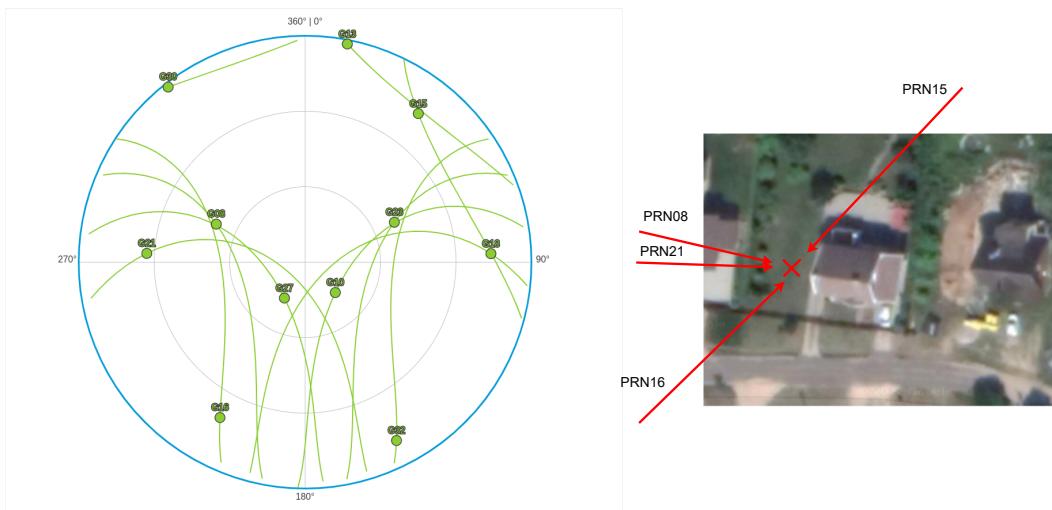


28 pav. Imtuvo pozicijos koordinatės su spindulio formavimu ir be spindulio formavimo. Palydovinės nuotraukos [21].

3.6.3 GNSS signalų priėmimas kai atspindžiai vyksta nuo vieno pastato

Antras matavimas buvo daromas vietovėje kur yra vienas, nedidelis pastatas, nuo kurio gali atsirasti signalo atspindžiai. Matavimo vieta ir laikas (palydovų išsidėstymas) pavaizduoti 33 pav. Vieta parinkta taip, kad dalis dangaus skliauto būtų atviras, o kita dalis būtų blokuojama pastato. Palydovų išsidėstymas parinktas taip, kad jų signalas, kristų kuo statmeniau į pastato paviršių. Palydovinėje nuotraukoje raudonu kryžiuku pažymėta apytikslė matavimų vieta. Raudonos rodykles vaizduoja apytiksles palydovų signalų kryptis. Iš signalų krypčių, galime mėginti spėti, kad atspindys bus matomas PRN21 ir PRN08 palydovų.

30 pav. pavaizduotas MUSIC algoritmo pseudospektro vertės. Grafikų fonas yra panoraminė nuotrauka, kuri buvo padaryta matavimo vietoje. Nuotrauka yra sukalibruota pagal pastato aukštį ir apytiksles pasaulio šalis. Grafike dauguma palydovų turi vieną, aiškų maksimumą, tačiau PRN08 turi du maksimumus: vieną labai stiprų ir kitą silpnesnį. PRN21 turi 2 beveik identiškus maksimumus. Abiem atvejais stipresnės pseudospektro vertės yra stebimos tiesiogiai atėjusio signalo, tačiau matomas ir atspindys nuo šalia esančio pastato. Iš šių matavimų galima nustatyti, kad vyksta atspindžiai nuo pastato ir tai galimai sukelia trukdį koordinačių

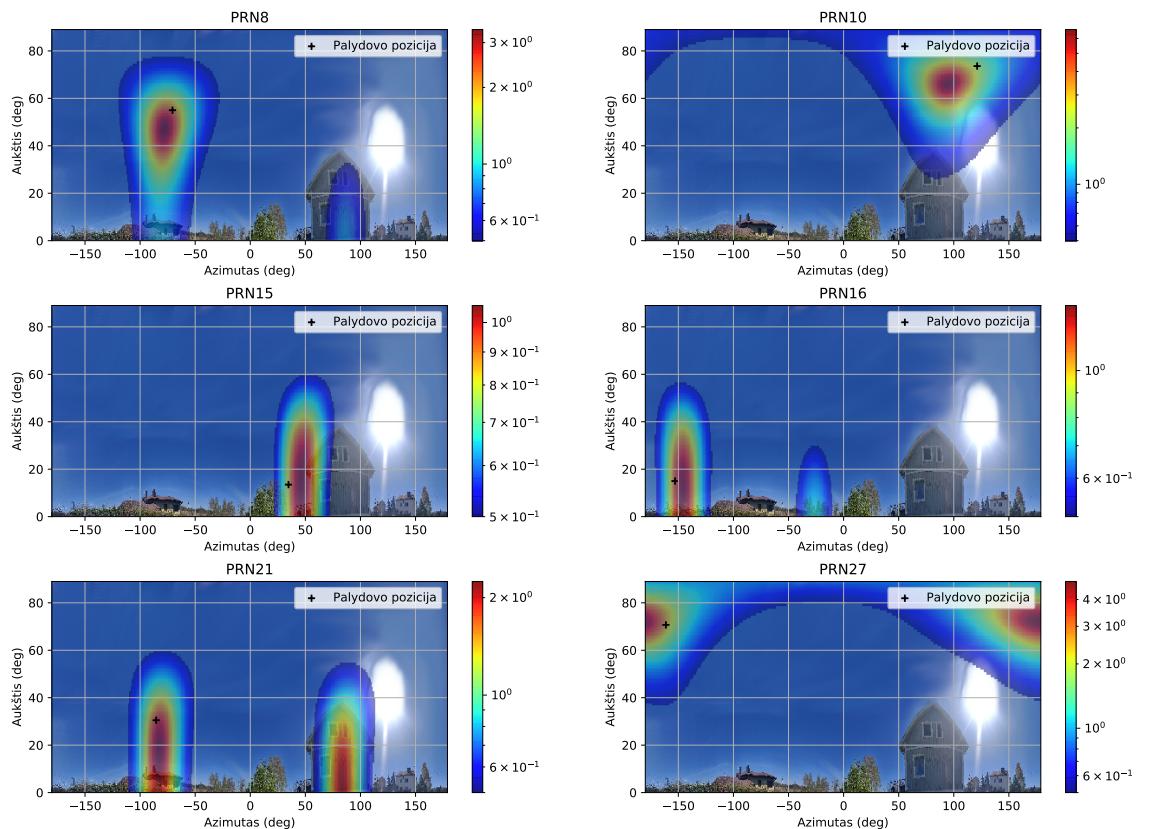


29 pav. Kairėje palydovų išsidėstymas dangaus skliaute matavimų metu, dešinėje matavimo vietovės palydovinė nuotrauka [21].

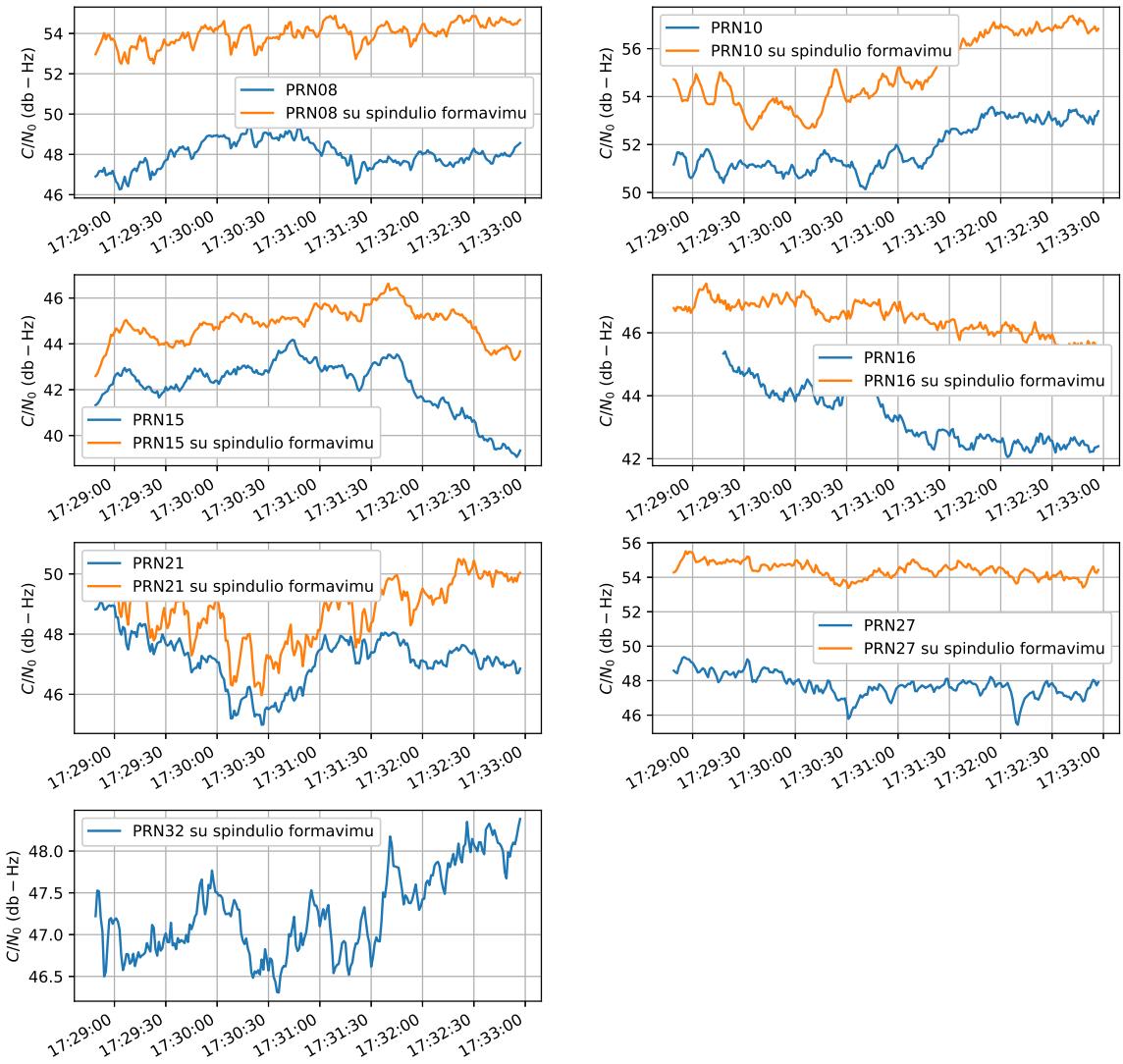
skaičiavime. Kitų palydovų signalai beveik sutampa su tikrosiomis palydovų padėtimis, tačiau dėl priežasčių aptartų 3.6.2 skyriuje, maksimumai tiksliai nesutampa su tikrosiomis palydovų padėtimis.

31 pav. pavaizduotas signalo triukšmo santykis atliekant spindulio formavimą, maksimumą nutaikant į tikrąjį palydovo padėtį. Kaip ir pirmojo matavimo atveju, stebimas signalo triukšmo santykio padidėjimas nuo 2 dB iki 8 dB, taip pat imtuvas priima signalą iš vieno papildomo palydovo, kai vykdomas spindulio formavimas.

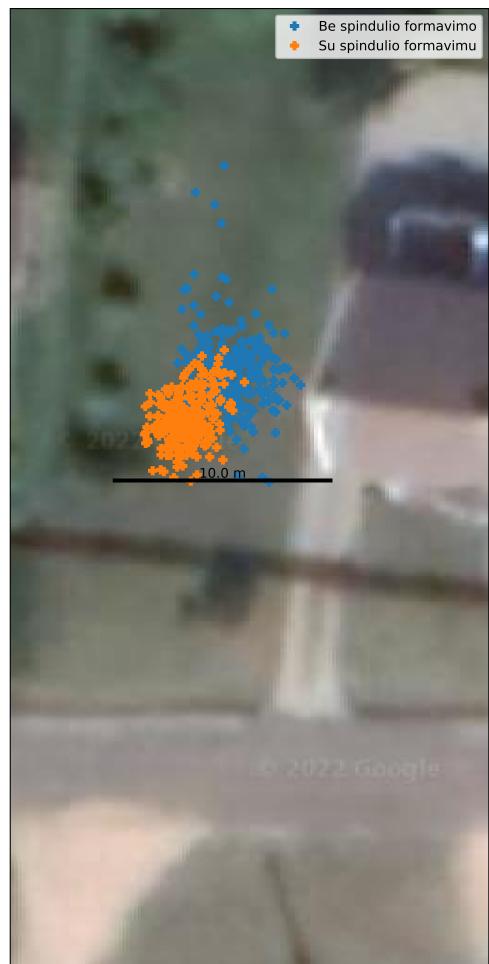
Iš 32 pav. galime nustatyti, kad koordinačių nuokrypis sumažėjo taikant spindulio formavimą, bei vidutinė koordinatė pasistūmė toliau nuo pastato. Iš vidutinės koordinatės pokyčio galime daryti išvadą, kad taikant spindulio formavimą, buvo nuslopintas atspindys. Esant atspindžiui, koordinatė priartėja prie pastato, kadangi signalo kelias atispindint nuo pastato pailgėja, dingus atspindžiui signalo kelias sutrumpėja ir imtuvo koordinatė gaunama esanti arčiau palydovo (toliau nuo pastato). Koordinačių nuokrypis sumažėja ir dėl vieno papildomo palydovo.



30 pav. Nustatytių GPS palydovų signalų kryptys, naudojant MUSIC algoritma.



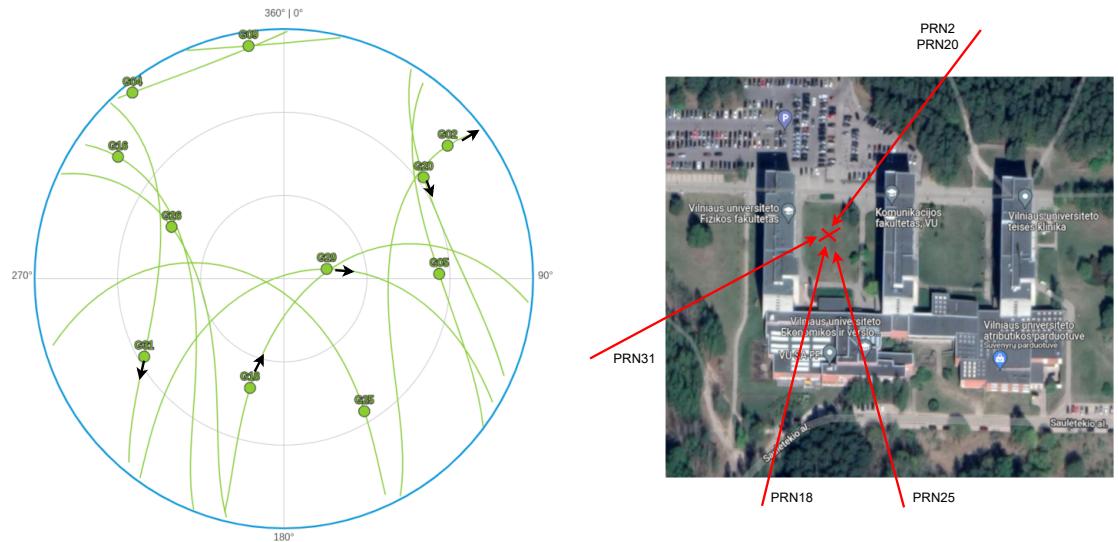
31 pav. Nustatyta signalo triukšmo santykis nenaudojant ir naudojant spindulio formavimą.



32 pav. Imtuvo pozicijos koordinatės su spindulio formavimu ir be spindulio formavimo. Palydovinės nuotraukos [21].

3.6.4 GNSS signalų priėmimas urbanistinėje aplinkoje

Trečiam matavimui parinkta vieta su dviem aukštais pastatais. 33 pav. raudonu kryžiuku pažymėta apytikslė matavimų vieta. Rytuose ir vakaruose yra du aukšti pastatai, kurie blokuoja tiesioginius palydovų signalus. 33 pav. kairėje pavaizduotas palydovų išsidėstymas matavimo metu, juodomis rodyklėmis pažymėta palydovų judėjimo kryptis.

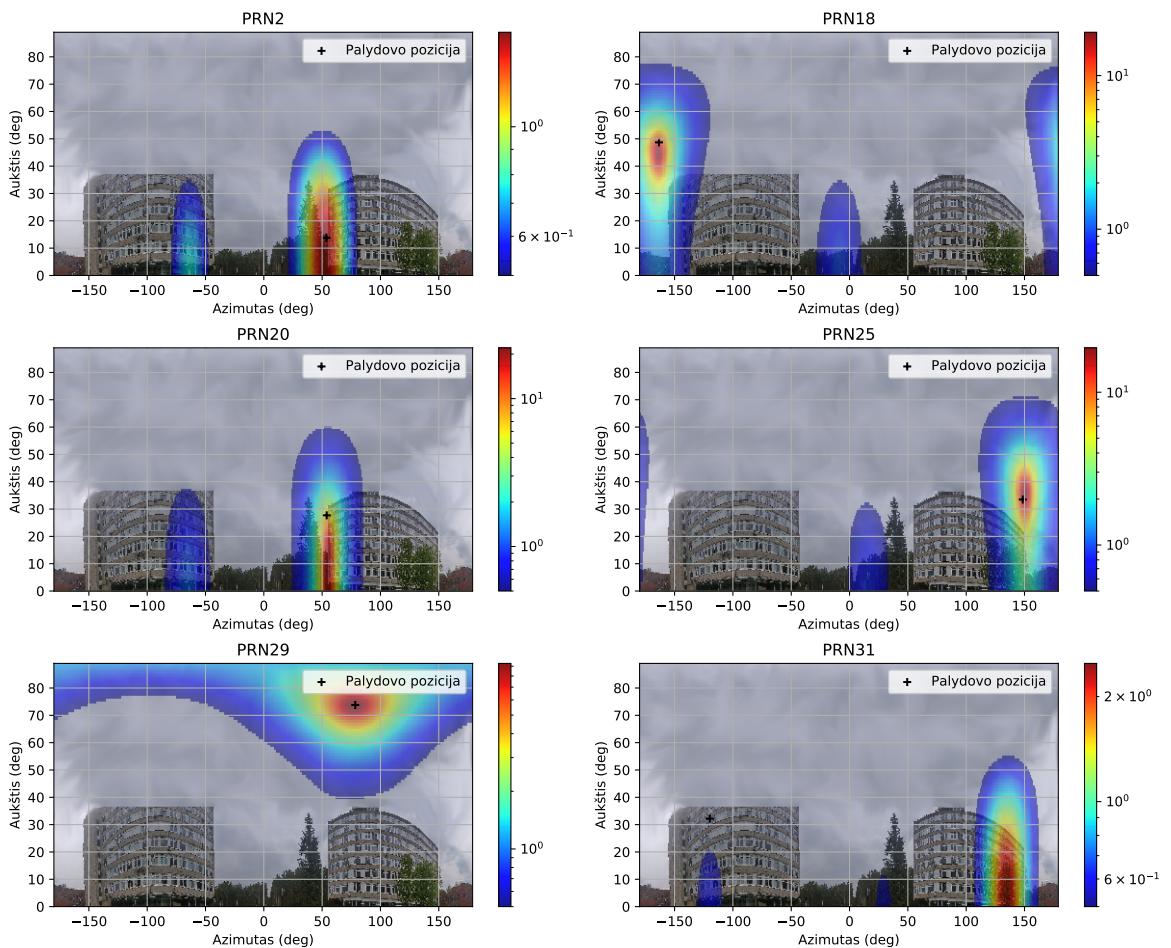


33 pav. Kairėje palydovų išsidėstymas dangaus skliaute matavimų metu, dešinėje matavimo vietovės palydovinė nuotrauka [21].

34 pav. pavaizduota nustatytos palydovų signalų kryptys. Panoraminėje nuotraukoje matoma, kad rytuose ir vakaruose yra du aukšti pastatai. PRN2 galime matyti, kad signalas gaunamas tiesioginis, bet iš 33 pav. galime nuspėti, kad palydovas netrukus pasislėps už pastato. Taip pat stebime nestiprų atspindį nuo pastato vakaruose (apie -60 laipsnių). PRN31 palydovo atveju, tikroji padėtis yra apie -120 laipsnių kryptimi, bet čia joks signalas nestebimas, tačiau imtuvas stebi stiprų atspindį nuo pastato rytuose.

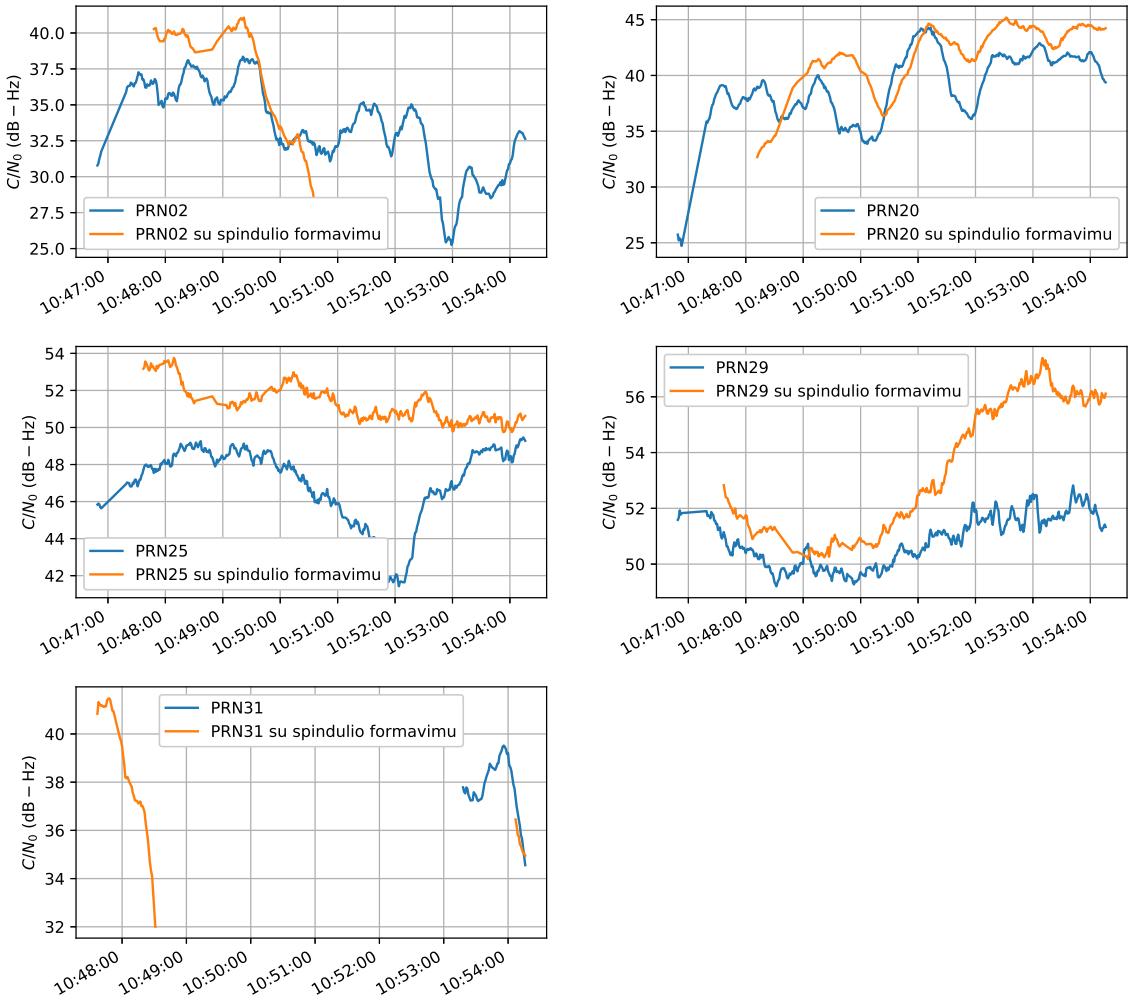
35 pav. pavaizduotas signalo triukšmo santykis su spindulio ir be spindulio formavimo. PRN02 atveju, po 5 minučių matavimo, galime matyti, kad su spindulio formavimu, signalo triukšmo santykis staigiai pradeda mažėti. Kaip aprašyta anksčiau, palydovas pasislepia už pastato. Be spindulio formavimo PRN2 signale galime stebeti signalo sumažėjimą, bet jis visiškai neišnyksta, kadangi vietoje tiesioginio signalo, imtuvas pradeda matyti atspindį nuo pastato vakaruose. PRN31 atveju su spindulio formavimu, iš pradžių signalas yra matomas, tačiau palydovui leidžiantis, signalas pradingsta, pasislepia už pastato esančio vakaruose.

36 pav. galime matyti, kad be spindulio formavimo koordinacių nuokrypis yra didelis, taip yra dėl to, kad esant tarp didelių pastatų, dauguma palydovų yra užstojami, ir koordinatės skaičiavimui buvo naudojami 4 palydovai, minimalus skaičius reikalingas skaičiavimams. Pritaikius spindulio formavimą koordinacių nuokrypis sumažėjo, svarbiausia to priežastis yra naudojami



34 pav. Nustatytių GPS palydovų signalų kryptys, naudojant MUSIC algoritma.

tik 4-5 palydovai koordinacių skaičiavimui, bei sumažėjės atspindžių trikdis.



35 pav. Nustatytas signalo triukšmo santykis nenaudojant ir naudojant spindulio formavimą.



36 pav. Imtuvo pozicijos koordinatės su spindulio formavimu ir be spindulio formavimo. Palydovinės nuotraukos [21].

3.6.5 GNSS imtuvo matavimų apibendrinimas

Atlikus tris matavimus, trijose skirtingose vietovėse, pademonstruota signalų sklidimo krypties, bei atspindžių nustatymas pasinaudojant MUSIC algoritmu. Pritaikius spindulio formavimą, pademonstruotas signalo triukšmo santykio padidėjimas nuo 2 dB iki 8 dB. Taikant spindulio formavimą vietovėje, kurioje nėra atspindžių, nestebėtas koordinacijų pasiskirstymo sumažėjimas. Esant vienam atspindžių paviršiui, pastebėtas koordinatės nuokrypio sumažėjimas, bei vidutinės koordinatės atitolėjimas nuo atspindžių šaltinio. Urbanistinėje aplinkoje spindulio formavimas padeda priimti signalą iš didesnio skaičiaus palydovų kas leidžia patikslinti koordinatės skaičiavimą.

Išvados ir rezultatai

1. Tiriant HackRF laiko sinchronizaciją tarp kelių imtuvų, nustatyta, kad gauta sinchronizacija geresnė negu ± 1 nuskaitymo taškas. Atliekant tuos pačius matavimus su KerberosSDR imtuvu, gauta, kad vėlinimas tarp imtuvų yra kintamas, todėl šiam imtuvui reikalingas vėlinimo kalibravimas.
2. Tiriant HackRF ir KerberosSDR fazinę sinchronizaciją tarp kelių imtuvų, nustatyta, kad fazės skirtumas tarp imtuvų nusistovi greičiau negu per 5 s, HackRF imtuvo fazė kinta bėgant laikui, per 20 minučių pakinta apie 0,35 rad, o KerberosSDR imtuvo fazė yra stabili ir nekinta. Norint panaudoti HackRF imtuvus, reikalingas periodiškas fazės kalibravimas.
3. Išmatavus spinduolių sistemos, sudarytos iš dviejų antenų, kryptingumo diagramą, nustatyta, kad gaunamas 3 dB signalo padidėjimas, naudojant spindulio formavimą ir pademonstruotas spindulio krypties keitimas panaudojant sinchronizuotus HackRF imtuvus.
4. Tiriant GPS signalų priėmimą naudojant spinduolių sistemą, nustatyta, kad taikant MUSIC algoritmą galima nustatyti palydovų signalų sklidimo ir atspindžių kryptis.
5. Tiriant GPS signalų priėmimą naudojant keturių spinduolių sistemą, nustatyta, kad taikant spindulio formavimą galima sumažinti atspindžių trukdžio įtaką, pagerinti imtuvo suskaičiuotų koordinačių nuokrypi, pagerinti signalo triukšmo santykį iki 8 dB.

Literatūros sąrašas

- [1] N. Vagle, A. Broumandan, A. Jafarnia-Jahromi, G. Lachapelle, Performance analysis of gnss multipath mitigation using antenna arrays, *The Journal of Global Positioning Systems* 14(1), 4 (2016).
- [2] Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard, 1st edition, Technical report, U.S. Government, Department of Defense, Positioning, Navigation, and Timing Executive Committee (2007).
- [3] Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 5th edition, Technical report, U.S. Government, Department of Defense (2020).
- [4] M. Sadeghi, M. Gholami, Time synchronizing signal by gps satellites, *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS* archive 7, 521–530 (2008).
- [5] E. Ochin, Chapter 2 - fundamentals of structural and functional organization of gnss, in G. p. Petropoulos, P. K. Srivastava (eds.), *GPS and GNSS Technology in Geosciences* (Elsevier, 2021), 21–49.
- [6] A. Kumar, S. Kumar, P. Lal, P. Saikia, P. K. Srivastava, G. P. Petropoulos, Chapter 1 - introduction to gps/gnss technology, in G. p. Petropoulos, P. K. Srivastava (eds.), *GPS and GNSS Technology in Geosciences* (Elsevier, 2021), 3–20.
- [7] R. Mailloux, *Phased array antenna handbook*, second edition (Artech House, 2005), 16–17.
- [8] R. Schmidt, Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 34(3), 276–280 (1986).
- [9] G. Bienvenu, L. Kopp, Adaptivity to background noise spatial coherence for high resolution passive methods, in *ICASSP '80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* (1980), volume 5, 307–310.
- [10] G. Bienvenu, L. Kopp, Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 31(5), 1235–1248 (1983).
- [11] C. Sadiku, M.N.O.; Akujobi, Software-defined radio: a brief overview, *IEEE Potentials* 23 (2004).
- [12] M. Ossman, HackRF One. Tikrinta 2021-12-15, <https://greatscottgadgets.com/hackrf-one/>.
- [13] HackRF GitHub puslapis. Tikrinta 2021-12-18, <https://github.com/mossmann/hackrf>.

- [14] M. Bartolucci, J. A. Del Peral-Rosado, R. Estatuet-Castillo, J. A. Garcia-Molina, M. Crisci, G. E. Corazza, Synchronisation of low-cost open source sdrs for navigation applications, in 2016 8th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC) (2016), 1–7.
- [15] KerberosSDR projekto puslapis. Tikrinta 2022-01-10, <https://www rtl-sdr.com/ksdr/>.
- [16] KrakenSDR projekto puslapis. Tikrinta 2022-01-10, <https://www.crowdsupply.com/krakenrf/krakensdr>.
- [17] C. Fernández-Prades, J. Arribas, P. Closas, C. Avilés, L. Esteve, GNSS-SDR: An open source tool for researchers and developers, in Proc. 24th Intl. Tech. Meeting Sat. Div. Inst. Navig. (Portland, Oregon, 2011), 780–794.
- [18] GNSS SDR projekto puslapis. Tikrinta 2021-12-18, <https://gnss-sdr.org/>.
- [19] D. Pauluzzi, N. Beaulieu, A comparison of snr estimation techniques for the awgn channel, IEEE Transactions on Communications 48(10), 1681–1691 (2000).
- [20] M. Wang, A. Nehorai, Coarrays, music, and the cramér-rao bound, IEEE Transactions on Signal Processing 65(4), 933–946 (2017).
- [21] Google žemėlapiai. Tikrinta 2022-05-15, <https://maps.google.com/>.

Matas Razgūnas

R&D OF ROBUST TO INTERFERENCES GNSS NAVIGATION SUBSYSTEM FOR UAVS

Summary

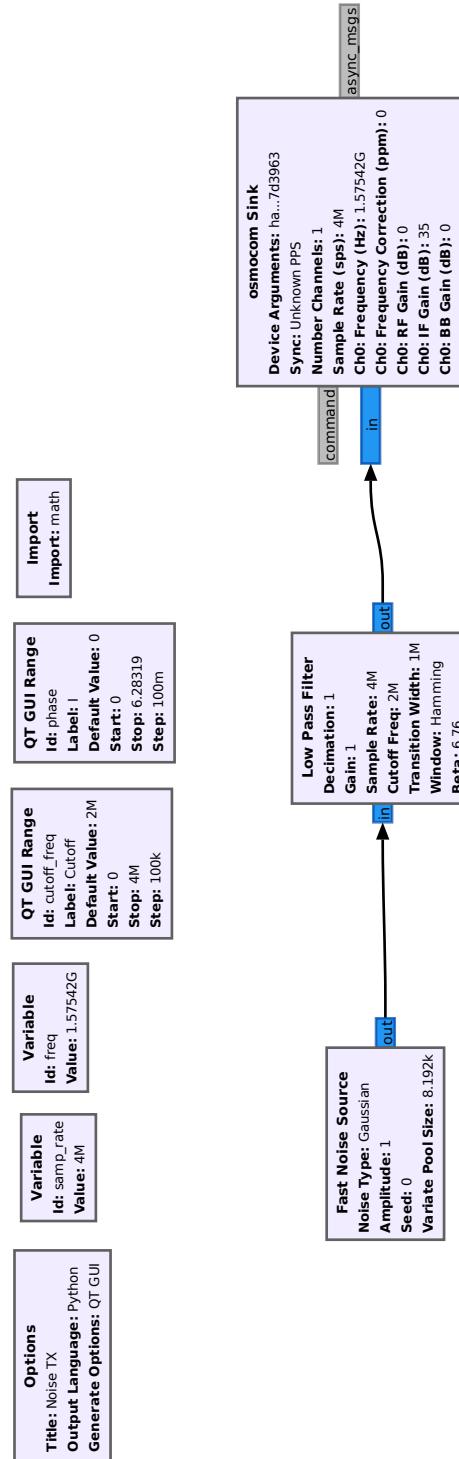
Unmanned Aerial Vehicles (UAV) utilize GNSS receivers as the main navigation instrument, in ideal conditions receiver works sufficiently well to ensure safe operation of UAV. In recent years application fields of UAVs are expanding, and more often, they are used in environments with various interference to GNSS signals. One of the most common interference sources is a reflection from buildings in urbanized territories, which decreases performance of GNSS receiver correlator, which degrades the performance of receiver.

In recent decades array processing has been adopted to suppress interference. This work created a GNSS receiver, which can attenuate reflection interference by utilizing antenna array processing. The receiver can distinguish the direction of signal arrival using the MUSIC algorithm, and applying beamforming techniques can improve navigation precision. The receiver is constructed with HackRF SDRs, synchronized in time and frequency.

In this work constructed GNSS receiver was studied. It was shown that it is possible to synchronize HackRF SDRs, which allows applying MUSIC and beamforming algorithms. The receiver was studied in different environments: open field, low reflection, and urbanistic with tall buildings. It was shown that signal to noise ratio is improved up to 8 dB by applying beamforming. Also, it was revealed that by using MUSIC, it is possible to detect the angle of arrival of GNSS signals and also, it is possible to see reflected signals; when array processing was applied, deviation of receiver coordinates was improved.

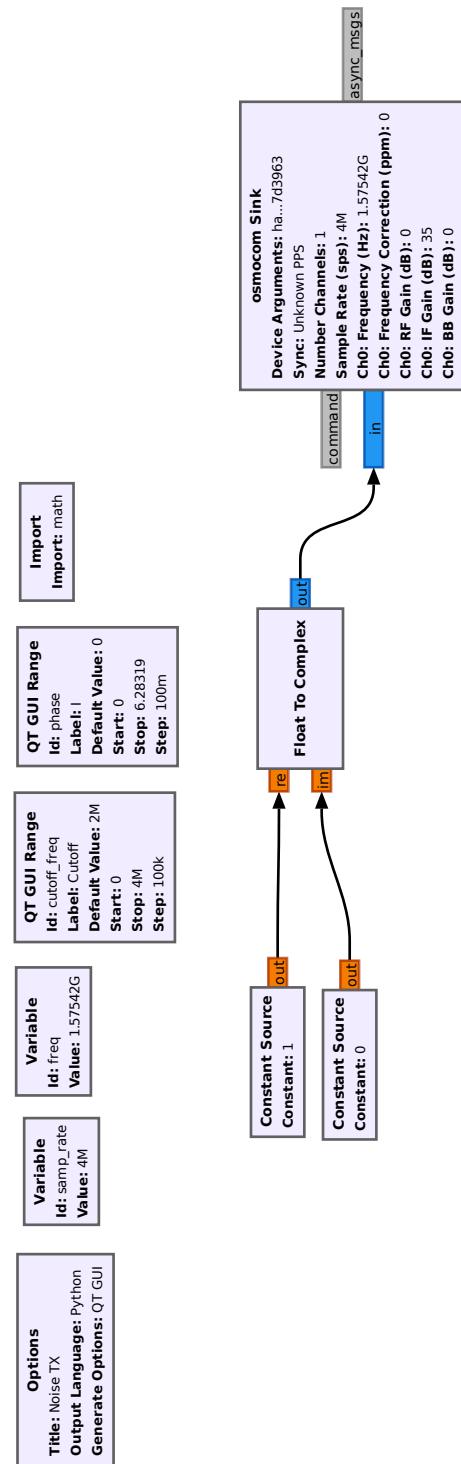
Priedas Nr. 1.

GNU Radio siųstuvo programa, Gauso triukšmui generuoti



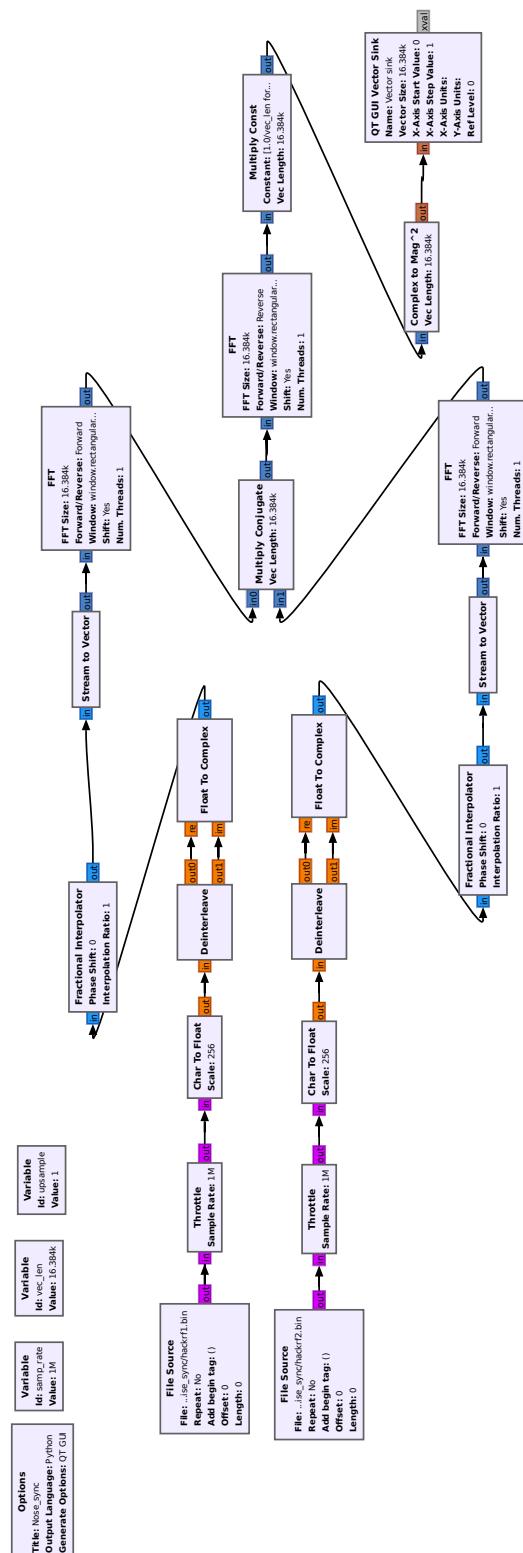
Priedas Nr. 2.

GNU Radio siūstuvu programa, pastoviam signalui generuoti



Priedas Nr. 3.

GNU Radio programa, koreliacijos skaičiavimui



Priedas Nr. 4.

Spindulio formavimo C++ kodas

```
1 std::map<uint32_t, std::array<gr_complex, 4>> prn_phase_shifts = {
2     { 2, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(-0.7165653382097126, -0.6975199753959741), gr_complex(1.0, 0.0),
3       gr_complex(-0.40497812574510855, 0.9143263737134454), gr_complex(-0.34756762205441344, -0.9376549195196708) } },
4     { 5, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(-0.8613362847130315, -0.5080352395619339), gr_complex(1.0, 0.0),
5       gr_complex(-0.9078425843514135, -0.41931115181705664), gr_complex(0.9949826001738922, -0.10004811518065) } },
6     { 9, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(0.8775574285570917, 0.47947154199625314), gr_complex(1.0, 0.0),
6       gr_complex(-0.850306890744293, -0.5262871759341785), gr_complex(-0.9985328523039517, -0.05414926472016588) } },
7     { 16, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(-0.762648410601778, 0.6468132665666203), gr_complex(1.0, 0.0),
7       gr_complex(0.7858404188971819, 0.6184293298571), gr_complex(-0.19931165147309432, -0.9799361538320075) } },
8     { 18, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(0.8315945027152374, 0.5553832758139167), gr_complex(1.0, 0.0),
8       gr_complex(-0.8377761846665095, 0.5460137950689768), gr_complex(-0.3934431395294178, 0.9193489522250162) } },
9     { 20, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(0.6233198528674544, -0.7819669820531395), gr_complex(1.0, 0.0),
9       gr_complex(-0.7314140387446979, 0.6819336506781063), gr_complex(-0.077344707765703, -0.9970044113145328) } },
10    { 25, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(0.19752959628155795, -0.9802969236883511), gr_complex(1.0, 0.0),
10      gr_complex(0.6472121701396945, 0.7623099152071074), gr_complex(-0.6194465060984503, 0.7850388691538925) } },
11    { 26, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(-0.41037445758585406, 0.9119171039963644), gr_complex(1.0, 0.0),
11      gr_complex(0.44821757272676555, 0.8939244976500681), gr_complex(0.6312479958002604, -0.7755810517271258) } },
12    { 29, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(0.6452068417239275, -0.764007939518334), gr_complex(1.0, 0.0),
12      gr_complex(0.5020534810787359, -0.8648365753925555), gr_complex(0.9846703507450776, -0.17442562989298863) } },
13    { 31, std::array<gr_complex, 4>{ gr_complex(-0.6716897529989271, 0.7408325557885805), gr_complex(1.0, 0.0),
13      gr_complex(-0.878634300963697, -0.47749530381987576), gr_complex(0.23642559028476792, 0.9716495974673685) } },
14 };
15 std::shared_ptr<gr_complex []> beam(new gr_complex[min_items]);
16 auto beam_prn = d_acquisition_gnss_synchro>PRN;
17 if (prn_phase_shifts.count(beam_prn) > 0) {
18     auto s = prn_phase_shifts[beam_prn];
19     for(int i = 0; i < min_items; i++) {
20         beam.get()[i] = in[i]*s[0] + in1[i]*s[1] + in2[i]*s[2] + in3[i]*s[3];
21     }
22     in = beam.get();
23 }
24 }
```