

# 1 Matavimai

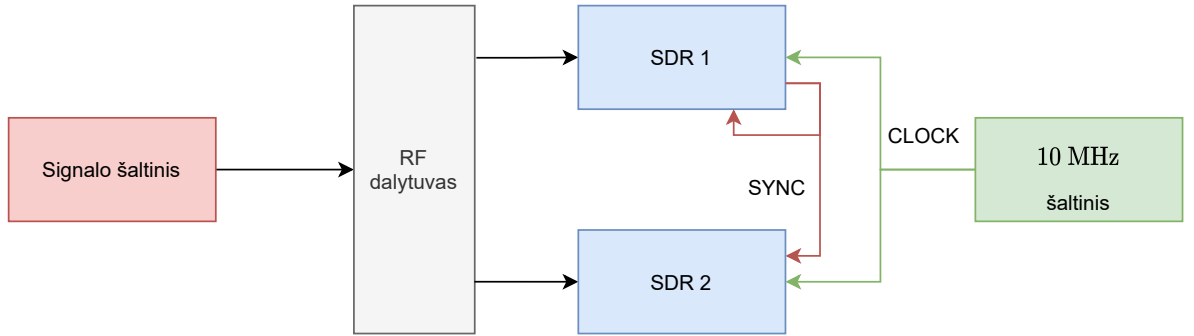
Visų matavimų metu naudojamas nešlio dažnis  $f_D = 1575,42 \text{ MHz}$ , nuskaitymo dažnis  $f = 2 \text{ MHz}$ . Kaip  $10 \text{ MHz}$  šaltinis naudojamas OLP01-12s-MF5.8-36A, temperatūriškai stabilizuotas osciliatorius, kurio specifikacijos pateiktos 1 lentelėje.

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

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

## 1.1 HackRF laikinės sinchronizacijos matavimas

Tikrinant laikinę sinchronizaciją, naudojamas stendas, kurio blokinė diagrama pavaizduota 1 pav. Kaip signalo šaltinis naudojamas HackRF One siųstuvo konfigūracijoje, jo siunčiamas signalas yra gauso triukšmas.



1 pav. Matavimo stendo schema.

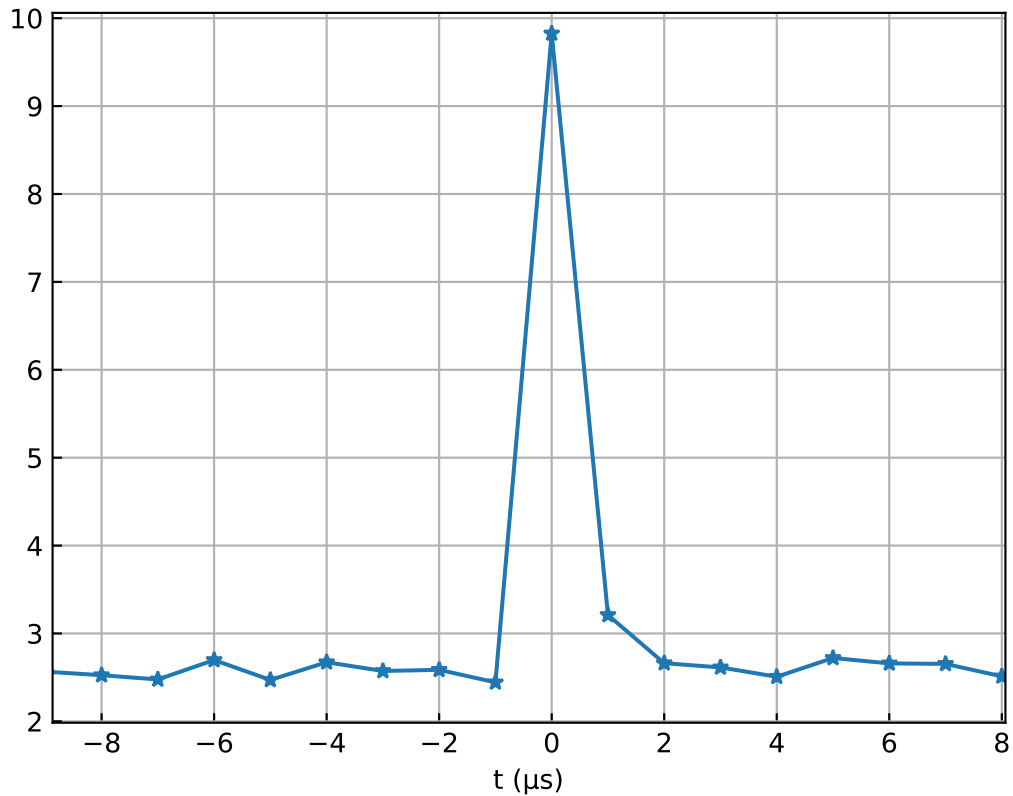
Matavimui naudojami 2 HackRF One radijai, sukonfigūruoti imtuvo konfigūracijoje. Tarp jų yra sujungtas sinchronizacijos signalas kaip aprašyta ?? skyriuje, bei naudojamas bendras  $10 \text{ MHz}$  šaltinis.

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:

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

Pritaikę (1) lygtį, gauname koreliacijos rezultatą, kurio maksimumas nurodo uždelsimą tarp dviejų signalų.

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



2 pav. HackRF signalų koreliacijos rezultatas.

### 1.1.1 Koreliacijos skaičiavimo optimizavimas

1.1 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 kompleksiskai 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 eiliškumas:

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;

## 1.2 HackRF fazinės sinchronizacijos matavimas

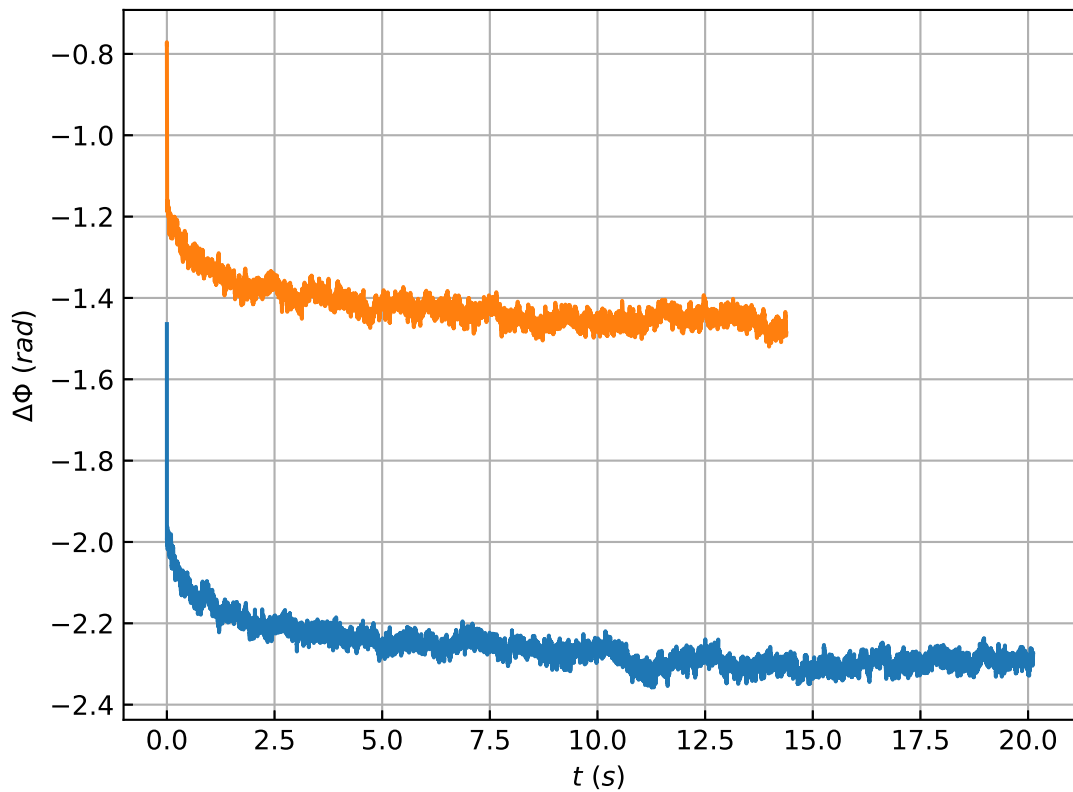
Fazinei sinchronizacijai tarp imtuvų matuoti naudojamas tas pats matavimų stendas, kaip ir 1.1 skyriuje, tačiau pakeistas generuojamas signalas iš Gauso triukšmo, į pastovų signalą (CW, angl. Continuous Wave). Kaip aptarta ?? skyriuje, fazinės sinchronizacijos imtuvai negarantuoja, tačiau sukonfigūravus visas grandines, fazė turėtų nekisti tarp imtuvų.

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

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

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

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (3)$$



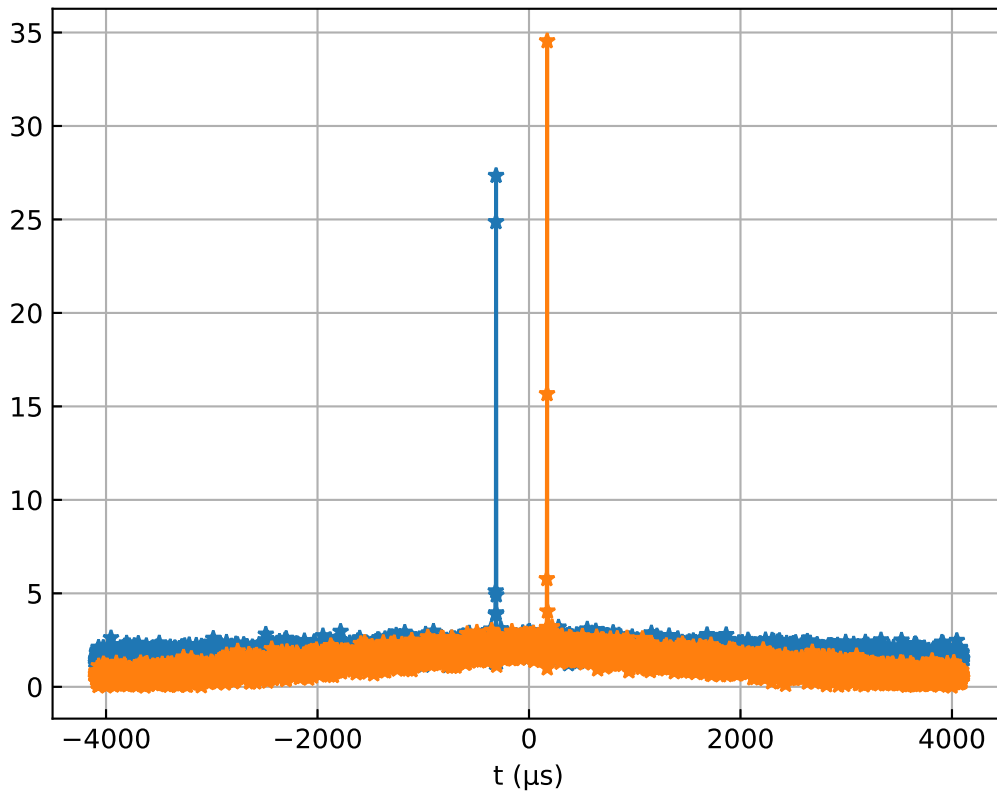
3 pav. Fazių skirtumas tarp dviejų SDR imtuvų.

3 pav. galima matyti, kad fazių skirtumas tarp imtuvų po kurio laiko nusistovi. Grafike pavaizduoti du atskiri matavimai, matome, kad kiekvieno matavimo metu, atsiranda vis kitoks fazių skirtumas, kaip aptarta ?? 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 koordinatų gavimo, kuris trunka daugiau negu 30 s. Iš grafiko taip pat matome, 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 vidurkį, jį išsisaugoti. Turint fazių skirtumą, jį galime taikyti kaip konstantą SDR imtuvui. Kai imtuvai yra sinchronizuoti laike, dažnyje ir fazėje, galime taikyti spindulio formavimo algoritmus.

### 1.3 KerberosSDR laikinės sinchronizacijos matavimas

Laikinės sinchronizacijos tikrinimui pasitelktas triukšmų generatorius integruotas į KerberosSDR imtuvą (aprašyta ?? skyriuje). Signalų užlaikymas skaičiuojamas tokiu pačiu metodu kaip aprašyta 1.1 skyriuje.



4 pav. KerberosSDR signalų koreliacijos rezultatas.

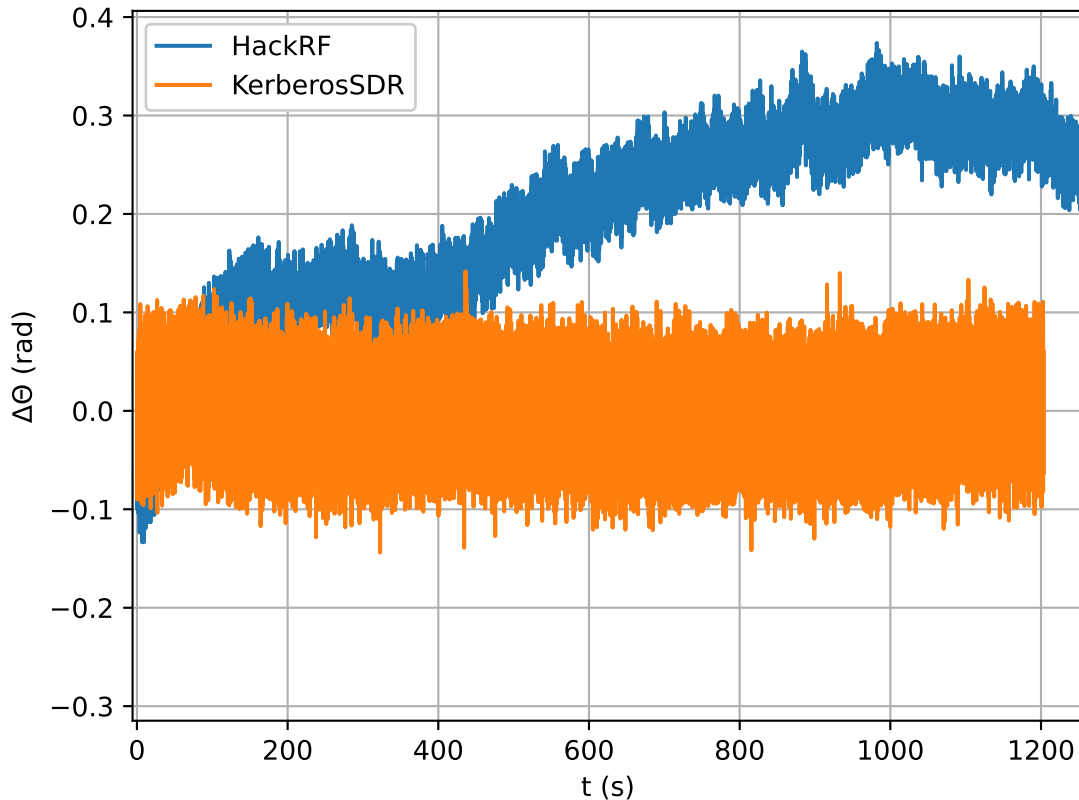
4 pav. pavaizduota dviejų matavimų rezultatai, tarp kurių imtuvas buvo inicializuotas iš naujo. Iš grafikų galime matyti, kad vienu atveju signalo vėlinimas yra  $171 \mu s$ , o kitu  $-312 \mu s$ . Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, kad naudojant KerberosSDR imtuvą reikia atlikti taškų vėlinimo kalibravimą. Priežastys kodėl atsiranda taškų vėlinimas yra tos pačios kaip ir HackRF imtuve, kuris aprašytas ?? skyriuje.

### 1.4 KerberosSDR fazinės sinchronizacijos matavimas

Fazinei sinchronizacijai tarp imtuvų matuoti naudojamas 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.

5 pav. aiškiai matome, kad KerberosSDR imtuvo fazė yra stabilesnė už HackRF. KerberosSDR vidutinis fazės nuokrypis per 20 minučių nekito, o HackRF imtuvo fazė pasikeitė per  $0,35 \text{ rad}$ .



5 pav. Fazės stabilumas HackRF ir KerberosSDR imtuvų.

Toks fazės nuokrypis, pagal (??) lygtį, reikštų apie  $6^\circ$  spindulio maksimumo nuokrypį. Kadangi spindulio formavimas bus vykdomas tik su keturiomis antenomis ir tokiu atveju spindulio plotis yra daug didesnis, tai nėra reikšmingas fazinis nuokrypis.

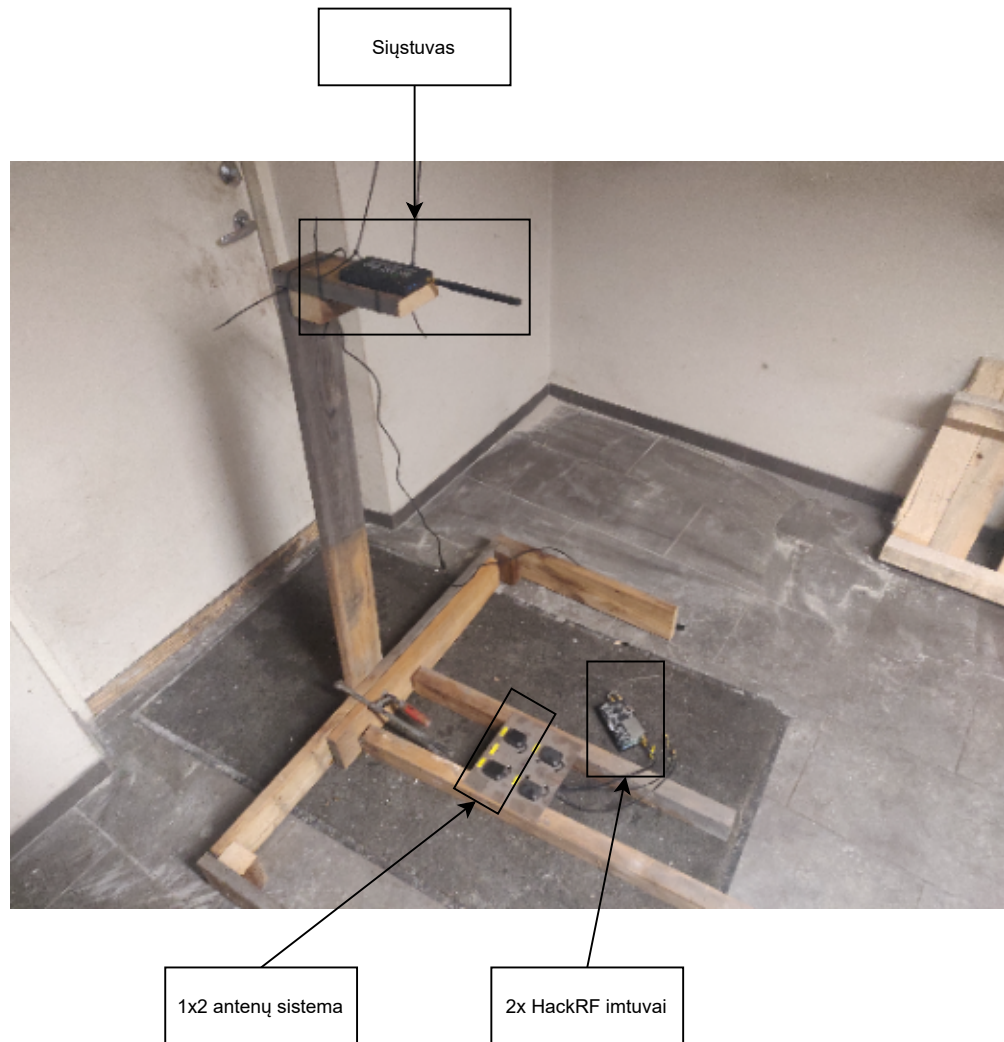
Taip pat kaip ir HackRF atveju, kiekvieną kartą įjungus imtuvus, pradinis fazių skirtumas tarp imtuvų yra atsitiktinis, todėl prieš kiekvieną matavimą reikia atlikti imtuvo kalibravimą. KerberosSDR atveju atlikti kalibravimą yra lengviau, dėl integruoto triukšmų generatoriaus.

## 1.5 Spindulio formavimo matavimai

### 1.5.1 Spindulio formavimo matavimo stendas

Spindulio formos matavimui naudojamas stendas pavaizduotas 6 pav. Pagrindiniai stendo elementai:

1. HackRF siųstuvas, kuris generuoja CW signalą;
2. 1x2 spindulių 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, spindulių sistemos atžvilgiu;



6 pav. Spindulio formos matavimo stendas.

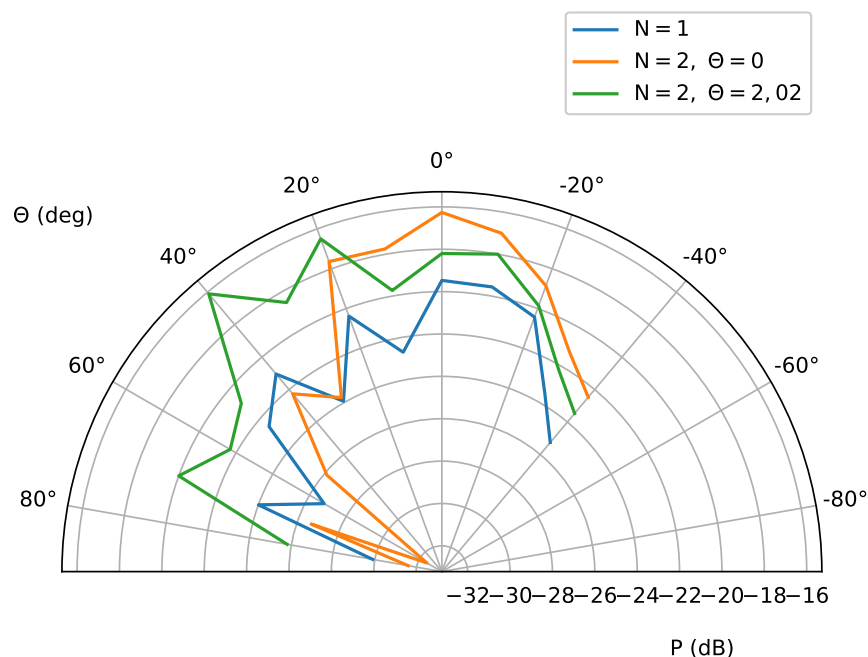
Matavimai stendu pradedami vertikaloje padėtyje, įjungiamas siųstuvas ir abu imtuvai. Atliekant signalų koreliaciją priimtų iš atskirų antenų, patikrinama laikinė sinchronizacija ir randamas fazių skirtumas, kuris yra išsaugomas ir pritaikomas vienam iš imtuvų.

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

### 1.5.2 Spindulio formavimo rezultatai

Matavimai atliekami su 2 spindulių sistema, pirmas matavimas atliekamas su viena antena, antrasis - su dviem antenomis esant 0 fazės skirtumui ir trečias matavimas - su dviem spinduliais ir esant 2 rad fazės skirtumui. Spinduliai yra išdėstyti  $\lambda/2$  atstumu, todėl esant 2 rad fazės skirtumui, tikimasi, kad diagramos maksimumas bus nukreiptas 40 laipsnių kampu.

Iš 7 pav. matome, kad naudojant viena spindulį, diagramos maksimumas yra  $-19,4$  dB ir yra nukreiptas 0 laipsnių kampu. Įjungus antrą anteną iškarto stebimas 3 dB maksimumo



7 pav. Antenų sistemos spinduliavimo diagramos esant skirtingam spindulių skaičiui ir skirtingai fazei tarp spindulių.

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 toks pat kaip atveju kai fazės pokyčio nebuvo. Šis rezultatas sutampa su (??) lygties rezultatu.

Visi matavimų grafikai turi tam tikrus minimumus, ten kur jų neturėtų būti. Jie atsiranda dėl stovinčių bangų, kadangi matavimai buvo atlikti patalpoje nuo kurios sienų signalai gali atspindėti. Norint gauti tikslines spinduliavimo 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 spindulių sistemos kryptingumo diagramą.

## 1.6 GNSS imtuvo matavimai