

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Mirko Meerits

Tarkvaralise raadio transiiveri seadistamine ja selle kasutajaliidese loomine

Bakalaureusetöö (12 EAP)
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Toomas Ruuben, PhD

Kaasjuhendaja:

Erik Amor, MSc

Tartu 2025

Resümees/Abstract

Tarkvaralise raadio transiiveri seadistamine ja selle kasutajaliidese loomine

Tarkvaralised raadiod on laia kasutusvaldkonnaga seadmed, millega on võrdlemisi mugav luua ja testida raadiosidel põhinevaid süsteeme. On olemas tarkvaralisi raadioid, mis võimaldavad samaaegselt võtta vastu ja saata välja signaale. Selles töös seadistatakse *GNU Radio Companion* keskkonnas selline USRP X300 tarkvaralisel raadiol põhinev platvorm, mis võimaldab üheaegselt segada raadiosidet ning vaadelda vabalt valitud sagedusspektri osa. Valminud lahendusega käib kaasas kasutajaliides, kus saab luua etteantud parameetritel põhinev segav signaalikuju, vaadelda segava signaali mõju spektrile ning salvestada tulemused andmefaili. Süsteemi töö hindamiseks testitakse HARRISE raadiojaama segamist varjestatud ruumis, mille käigus antakse hinnang erinevatele signaalikujudele. Platvormi seadistamise ja kasutamise lihtsustamiseks on töösse lisatud kasutusjuhend.

CERCS: T121 Signaalitöötlus, T180 Telekommunikatsioonitehnoloogia

Märksõnad: tarkvaraline raadio, raadioside segamine, USRP X300

Configuration of a Software-Defined Radio Based Transceiver and Development of Its User Interface

Software-defined radios are versatile systems that enable convenient development and testing of radio communications solutions. Some of those systems allow simultaneous transmission and reception of RF signals. In this paper, a platform based on USRP X300 software-defined radio is configured in GNU Radio Companion environment for simultaneous jamming of RF signals, and observation of a selected frequency range of the RF spectrum. The platform includes a user interface which allows the generation of jamming signals based on parameters, visualisation of the jammer's impact on the spectrum, and saving of the observed results to a data file. The system's functionality is assessed through jamming experiments in a shielded room targeting a Harris handheld radio. Based on the data obtained from the experiment, an analysis of the different types of jamming signals is given. For simplification of the setup and operation of the platform, a user manual is provided.

CERCS: T121 Signal processing, T180 Telecommunication engineering

Keywords: software-defined radio, radio frequency jamming, USRP X300

Sisukord

Resümees/Abstract	2
Jooniste loetelu	5
Lühendid, konstandid, mõisted	7
Sissejuhatus	8
1. Ülevaade seadmetest ja tehnoloogiast	9
1.1. SDR	9
1.2. Levinumad SDR-id.....	9
1.3. Katses kasutatavad seadmed.....	12
1.4. Raadioside	14
2. Metoodika ja nõuded	19
2.1. Nõuded	19
2.2. Metoodika.....	19
3. Loodud lahendus	21
3.1. Ideest lahenduseni.....	21
3.2. Kasutajaliides	29
4. Tulemused ja arutelu	33
4.1. Mõõtetulemused	33
4.2. Analüüs ja ülevaade.....	36
Kokkuvõte	39
Tänuavaldused	41
Viited	42
Lisa 1. Transiiveri kasutusjuhend	44
Lihtlitsents	46

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: HackRF One SDR	10
Joonis 1.2 USRP B205mini-i SDR.....	11
Joonis 1.3: USRP X300 SDR	12
Joonis 1.4: UBX-160 raadiomoodul.....	12
Joonis 1.5: Raadiojaam Harris Falcon II RF-5800V-HH101	13
Joonis 1.6: Spektrianalüsaator FSH8.....	13
Joonis 1.7: Tõkestava segamise spektraalne esitus	16
Joonis 1.8: Konkreetse sageduse segamist võimaldava signaali spektraalne esitus.....	16
Joonis 1.9: Kammsignaali spekter.....	17
Joonis 1.10: Harrise raadiojaama saatesignaali spekter.....	18
Joonis 2.1: Katse läbiviimise skeem.....	20
Joonis 3.1: GRC keskkonna voodiagrammi näidis FM vastuvõtja põhjal	21
Joonis 3.2: Tõkestava segamise signaali genereerimine	22
Joonis 3.3: Konkreetse sageduse segamist võimaldava signaali genereerimine	22
Joonis 3.4: Harrise raadiojaama saatesignaali genereerimine segamiseks	23
Joonis 3.5: Pühkesegamise signaali loomine.....	24
Joonis 3.6: Kammsignaali loomine	25
Joonis 3.7: Segava signaali valimise, ribalaiuse piiramise ning tingimusliku väljundisse saatmise voodiagramm	26
Joonis 3.8: Raadiospektri kujutamise ja salvestamisega tegelev voodiagrammi osa.....	27
Joonis 3.9: Lahenduse voodiagrammis kasutatavad muutujad.....	28
Joonis 3.10: Salvestatud signaalide vaatlemise voodiagramm.....	29
Joonis 3.11: Signaalikuju genereerimise akna ülemine osa.....	30

Joonis 3.12: Signaalikuju genereerimise akna alumine osa	30
Joonis 3.13: Saatmise-vastuvõtmise akna ülemine vaade	31
Joonis 3.14: Saatmise-vastuvõtmise akna alumine vaade	31
Joonis 3.15: Spektrogrammi akna vaade	32
Joonis 4.1: Katse läbiviimine varjestatud ruumis	35

Lühendid, konstandid, mõisted

Raadiomoodul – erineva funktsionaalsusega laiendusplaat, mis ühendatakse emaplaadi külge

dBm – detsibelli millivati suhtes, võimsusühik, kus võimsust võrreldakse detsibell-skaalas 1 mW suhtes

FPGA – *field-programmable grid array*

GRC – *GNU Radio Companion*, tarkvaraliste raadiote programmeerimise liides

Metaandmed – andmed andmete kohta

MIMO – *multiple-input multiple-output*, mitu sisendit, mitu väljundit

RF – *radio frequency*, raadiosagedus (kasutatakse üldisemalt raadiosageduslikele süsteemidele viitamiseks)

RX/TX – *receive/transmit*, vastuvõtmine/edastamine (üldjuhul kasutatakse telekommunikatsioonitehnoloogia valdkonnas)

SDR – *software-defined radio*, tarkvaraline raadio

SNR – *signal-to-noise ratio*, signaali-müra suhe

Sämplimissagedus – signaali järjestikuste hetkväärtuste mõõtmiste arv sekundis

Varjestatud ruum – ruum, mille seinad tõkestavad elektromagnetlainete levikut

Sissejuhatus

Tarkvaralised raadiod on kaasaegse raadioside lahutamatu osa, mis võimaldavad kiiret raadiotehniliste süsteemide arendamist ja testimist. Nende seadmete eripära seisneb selles, et suurem osa signaalitöötlustest toimub tarkvaraliselt, mitte riistvaraliselt, mis muudab need kergesti ümber seadistatavateks. SDR-e on kasutatud mitmesuguste rakenduste loomiseks: FM-raadioringhäälingu vastuvõtjad, asukoha tuvastajad, raadiosaatjad, raadioside segajad ja mitmesugused muud sidesüsteemid. Arendustegevus jätkub aktiivselt, keskendudes veelgi kiiremate, paindlikumate ja tõhusamate lahenduste väljatöötamisele.

Käesolevas töös luuakse *GNU Radio Companion* arenduskeskkonnas SDR-platvormil põhinev mitmeotstarbeline transiiver, mis võimaldab nii raadiosignaali segamist kui ka selle segamise mõju jälgimist sagedusspektris. Töös kasutatav SDR on USRP X300, kuna see on üks võimekamaid SDR-seadmeid, mis on mõeldud universaalseks kasutuseks. Seadme töösagedusvahemik on lai ning see toetab kuni nelja täisdupleks režiimil kasutatavat porti, mis jätab võimaluse süsteemi edasiarenduseks.

Sellise platvormi loomise eesmärk on arendada uurimisvahend, mis võimaldab analüüsida raadioside segamise mõju sõltumata segatavast seadmest, toetades nii hariduslikke kui ka teaduslikke eesmärke. Tänapäevase elektroonilise sõjapidamise, integreeritud targa kodu lahenduste ja droonide laia leviku kontekstis on oluline mõista raadioside segamise võimalusi ja ohte. Eesmärgi saavutamist toetab kasutajasõbraliku ja intuitiivse kasutajaliidese loomine, millega saab tekitada segavaid signaale etteantud parameetrite alusel ning valida segavat sagedusspektri piirkonda.

Töös antakse esmalt ülevaade SDR-i tehnoloogiast ja tööga seotud seadmetest. Seejärel tutvustatakse raadioside segamise põhimõtteid ja töös kasutatavaid segamise meetodeid. Järgmiseks seatakse nõuded loodavale seadmele, tutvustatakse lahenduse loomise protsessi ning kirjeldatakse süsteemi juhtivat kasutajaliidest. Lõpuks analüüsitakse seadme vastavust nõuetele kasutusolukorra testimise põhjal. Eesmärgi täitmise kontrollimiseks viiakse läbi katse varjestatud ruumis, kus veendutakse segaja ja spektrianalüsaatori töös, segades raadiojaama Harris Falcon II RF-5800V-HH101 sidet erinevate segavate signaalidega. Mõõdetud tulemuste põhjal analüüsitakse erinevate segamisrežiimide efektiivsust.

1. Ülevaade seadmetest ja tehnoloogiast

1.1. SDR

SDR ehk tarkvaraline raadio on seade, mille riistvaralised komponendid on asendatud võimalikult suure mahus tarkvaraliste lahendustega [1]. See tähendab, et raadiosignaali modulatsiooni, filtreerimist ja muud töötlust ei tehta üldiselt mitte riistvaraliste elektroonikakomponentidega vaid digitaalse signaalitöötlusega võimalikult suure osas. Selline lahendus pakub suuremat paindlikkust ja võimekust raadiotehnoloogia rakendusteks.

SDR tehnoloogia arengut ajendas eelkõige militaarsektori huvi paindlike raadiotehnoloogiate vastu. Otsiti kommunikatsiooni-lahendusi, mis oleksid töökindlad ja vastavalt vajadusele ümber programmeeritavad. Tehnoloogia arenguga kandus see huvi tsiviilsektorisse edasi. Standardite ja protokollide rohkus nõudis uutset lähenemist, kuidas raadiosidel põhinevaid rakendusi efektiivselt turule tuua. SDR-id pakuvad seda lahendust. [2]

Tulenevalt klassikaliste raadiosüsteemide pikemast tootmistsüklist ja suuremast rahalisest kulust, on hakatud eksperimenteerima olemasolevate lahenduste loomist SDR-ide peal, kasutades selleks SDR-i eeliseid eelmainitu ees. Näiteks on uuritud objektide täpse asukoha tuvastamist SDR-ide abil. Mõned eelised klassikaliste raadiote ees on näiteks MIMO ja *multiband* lahenduste loomise lihtsustamine SDR-idel võrdlemisi madala võimsustarbiga. Samuti on võimalik SDR-idel sama riistvara taaskasutada olemasolevate lahenduste edasiarendamiseks, luues näiteks efektiivsemaid algoritme. [3] Lisaks eelnevale, saab sama riistvara pealt jooksutada mitmeotstarbelisi lahendusi, tegeledes näiteks raadioside segamisega ja spektriosa analüüsiga samaaegselt – sellega tegeletakse antud lõputöös täpsemalt.

1.2. Levinumad üldotstarbelised SDR-id

HackRF One

HackRF One on avatud lähtekoodiga SDR, mille tehnilised parameetrid on järgmised:

- töösagedus: 1 MHz – 6 GHz;
- maksimaalne ribalaius: 20 MHz;

- integraallülitus: LPC4320 ARM Cortex-M4 [4];
- dupleksrežiim: pooldupleks;
- toide: USB;
- kommunikatsioon tarkvaraga: Hi-Speed USB 2.0. [5]

Kuigi tegemist on hariduses ja raadioamatööride seas levinud seadmega ning autor kasutas seda SDR-ide kohta õppimiseks, siis selle töö lahenduse jaoks jääb selle pooldupleks režiim piiravaks faktoriks. HackRF One on kuvatud joonisel 1.1 [6].



Joonis 1.1: HackRF One SDR

USRP B205mini-i

USRP B205mini-i on pangakaardi-suurune ent võimekas SDR, mille tehnilised parameetrid on järgmised:

- töösagedus: 70 MHz – 6 GHz;
- maksimaalne ribalaius: 56 MHz;
- integraallülitus: Xilinx Spartan-6 XC6SLX150 FPGA;
- dupleksrežiim: täisdupleks (1x RX port, 1x TX port);
- toide: USB;
- kommunikatsioon tarkvaraga: USB 3.0. [7]

See seade omab täisdupleks võimekust ning laia maksimaalse ribalaiuse tõttu kasutati seda peamise katsevahendina GRC-s loodud tarkvara testimisel. USRP B205mini-i on kuvatud joonisel 1.2 [7].



Joonis 1.2 USRP B205mini-i SDR

USRP X300

USRP X300 on võimekas SDR süsteem, mille riistvara võimaldab sellega ühendada kaks eraldiseisvat MIMO raadiomoodulit, luues 2x2 sisend-väljund ühendust raadioside jaoks. Töös kasutatava seadme tehnilised parameetrid on järgmised:

- raadiomoodulid: 2x UBX-160 (1x TX port, 1x RX port):
 - töösagedus: 10 MHz – 6 GHz;
 - maksimaalne ribalaius: 160 MHz;
 - dupleksrežiim: täisdupleks;
- integraallülitus: Kintex 7-325T FPGA;
- toide: 12V toiteallikas;
- kommunikatsioon tarkvaraga: Dual 1 Gigabit Ethernet, millega on võimalik arvutiga suhelda täisdupleks režiimis andmeedastuskiirusega kuni 25 MHz. [8]

Töös kasutatav USRP X300 võimaldab suhelda täisdupleks režiimis neljas raadiosageduslikus pordis, raadiomoodulite töösageduste vahemik on laiem kui USRP B205mini-i oma ning selle võimekus ja omadused võimaldavad tehtud tööd edasi arendada - seetõttu valiti see SDR

lahenduse loomiseks. USRP X300 ja sellega ühendatud UBX-160 raadiomoodulid on kujutatud vastavalt joonistel 1.3 ja 1.4.[8], [9]



Joonis 1.3: USRP X300 SDR



Joonis 1.4: UBX-160 raadiomoodul

1.3. Katses kasutatavad seadmed

Raadiojaam Harris Falcon II RF-5800V-HH101

Harris Falcon II RF-5800V-HH101 (edaspidi raadiojaam Harris) on militaar-otstarbeline käsiraadiojaam. See töötab VHF-sagedusalas (30 MHz – 108 MHz) ning on loodud pakkuma usaldusväärset ja töökindlat raadiosidet. Raadiojaama kanalid on ümber programmeeritavad ja kiiresti vahetatavad. Väljundvõimsuse valikus on kas 250 mW, 2 W või 5 W. Lisaks häälsidele saab raadiojaamaga Harris pidada andmesidet. [10] Raadiojaam Harris on kujutatud joonisel 1.5 [11].



Joonis 1.5: Raadiojaam Harris Falcon II RF-5800V-HH101

Spektrianalüsaator Rohde & Schwarz FSH8

Spektrianalüsaator Rohde & Schwarz FSH8 (edaspidi spektrianalüsaator FSH8) on kaasaskantav ja täpne spektrianalüsaator, mille sagedusvahemik on 9 kHz – 8 GHz. Spektrianalüsaatoriga FSH8 saab teha reaajalist signaali analüüsi. Seadme müratase on -163 dBm/Hz ning signaali amplituudi mõõtmise täpsus on $< 0,5$ dB. Spektrianalüsaator FSH8 on kujutatud joonisel 1.6. [12]



Joonis 1.6: Spektrianalüsaator FSH8

1.4. Raadioside

Raadioside on kommunikatsiooniviis, kus infokandjatena kasutatakse elektromagnetlaineid. Informatsiooni ülekandeks kasutatakse etteantud raadiosageduste vahemikku ja nende kesksagedust kutsutakse tavaliselt kandevasageduseks. Kandevasagedusele kodeeritakse informatsioon peale suhtlusprotokollis kindlaks määratud moduleerimise teel. Raadiosagedused on piiratud looduslik ressurs. Et raadiosüsteemid saaksid töötada üksteist häirimata, kasutatakse raadiosagedusliku spektri haldamist, kus igale spektri osale on tavaliselt määratud oma kasutusvaldkond. Näiteks fikseeritud, mobiilne või militaarotstarbeline side. Elektromagnetlainete levimine valguskiirusel võimaldab Maa peal pea reaalsel ajal informatsiooni edastamist ja vastuvõtmist, mistõttu on see laialdast kasutust leidev suhtlemisviis. [13]

Nii kaua kui on kasutusele võetud uusi kommunikatsioonivahendeid, on paralleelselt otsitud viise selle suhtluse tõkestamiseks. Põhjusteks võivad olla nii sõjalised kui ka hariduslikud eesmärgid. Raadioside segamine on tahtlik traadita side häirimine eesmärgiga takistada segataval sagedusel suhtlust [14]. Seda eesmärki võib saavutada erinevate meetoditega, kuid segamine põhineb eeskätt sellel, et segaja poolt tekitatav signaal on vastuvõtja sisendus võimsam kui saatja signaal, mille tõttu ei jõua kasulik, informatiivne signaal vastuvõtjasse.

Raadiosideks kasutatavad seadmed kasutavad kommunikatsiooniks kindlat sagedusvahemikku. Seega tekitatakse suhtlemiseks vastavas sagedusvahemikus kandevasagedus, millele informatsioon peale kodeeritakse. Kui samas sagedusalas peaks olema pahatahtlikult genereeritud võimsam signaal, siis tavapärase RF vastuvõtja ei tee kasulikult ja segaval signaalil vahet ning vastuvõtjasse jõuab võimsam signaal. Selle tulemusel läheb saadetud kasulik informatsioon kaduma. [15] Segamise efektiivsuse hindamiseks saab kasutada signaali-müra suhet (SNR), kus

$$SNR = \frac{P_{\text{signaal}}}{P_{\text{müra}}}. \quad (1.1)$$

Siinkohal on P_{signaal} signaali keskmine võimsus ning $P_{\text{müra}}$ igasuguse mittekasuliku signaali keskmine võimsus. Segamist võib pidada edukaks, kui

$$SNR < 1 \quad (1.2)$$

ehk kasuliku signaali keskmine võimsus on väiksem kui genereeritud müra oma. [16] Raadiosignaali keskmist võimsust mõõdetakse tihti detsibell-skaalas. Signaali-müra suhet saab detsibell-skaalas kujutada, kus

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signaal}}}{P_{\text{müra}}} \right). \quad (1.3)$$

Logaritmi jagatise omaduse tõttu saab valemi kirjutada lahti, kus

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(P_{\text{signaal}}) - 10 \log_{10}(P_{\text{müra}}) = P_{\text{signaal},dB} - P_{\text{müra},dB}. \quad (1.4)$$

Kuna segamist saab pidada edukaks, kui

$$SNR < 1 \Rightarrow P_{\text{signaal}} < P_{\text{müra}}, \quad (1.5)$$

siis on detsibell-skaalas esitatud signaali-müra suhte tingimus segamise edukaks lugemiseks järgmine:

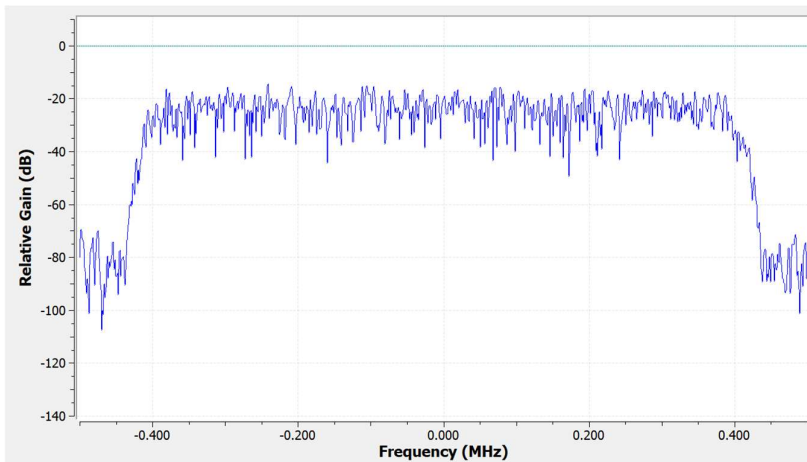
$$SNR_{dB} < 0. \quad (1.6)$$

Lihtsa kommunikatsiooniprotokolliga raadiosidet on teoorias lihtne segada: tuleb suunata võimsam signaal kanalile ja side on häiritud. Seetõttu on protokolle edasi arendatud ning on loodud meetodeid segamise vastu, et kasulik signaal ei läheks kaduma. Näiteks on üks meetod sagedushüppamine, kus peale igat informatsioonikaadri edastamist vahetatakse kandevasagedust [17]. See tagab selle, et ühte sagedust segades pole enam võimalik raadiosidet täielikult häirida.

Vastavalt segatavale raadiosidele ning soovitud tulemusele on töötatud välja erinevad segamise tüübid [15]. Varasemalt on uuritud teadustöös *Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms* erinevate segavate signaalide lainekujude mõju GPS-i signaalile [18]. Järgnevalt tutvustan mõne käsitletud signaalikuju kontseptsiooni, mida kasutatakse selles töös segaja loomisel.

***Barrage jam* ehk tõkestav segamine**

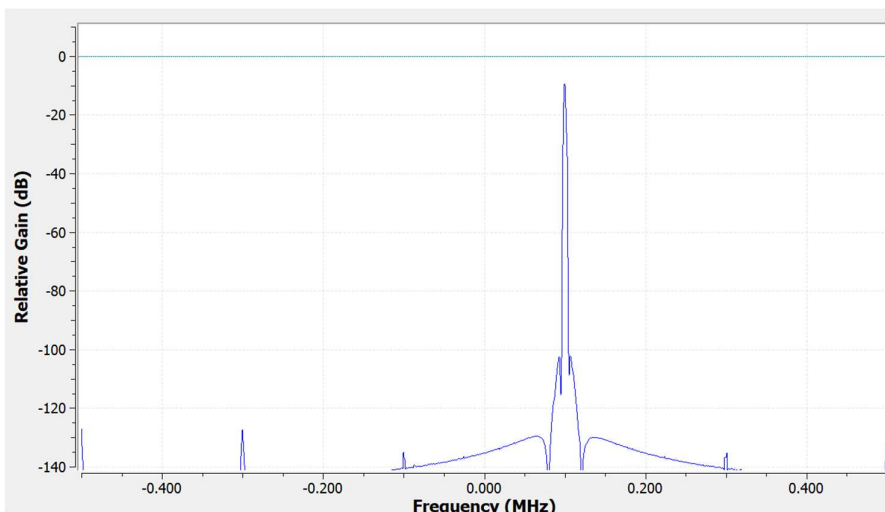
Tõkestav segamine on kindlasse ribalaiusesse võimendatud müra edastamine [18]. See võimaldab segatava teenuse eeldatavasse sagedusvahemikku müra suunata, teadmata selle raadioside signaali täpsemat kirjeldust. Kuigi selle meetodiga on võimalik segada mitut sagedust samaaegselt, tuleb segatava ribalaiuse piir valida nii kitsas kui võimalik, sest segava signaali keskmine võimsus väheneb segatava ribalaiuse suurenemisel [16]. Tõkestava segamise spektraalne esitus on joonisel 1.7.



Joonis 1.7: Tõkestava segamise spektraalne esitus

***Tone jam* ehk konkreetse sageduse segamine**

Konkreetse sageduse segamine on võimendatud ühesagedusliku sinusoidi saatmine raadiospektrisse. Selle eesmärk on segatava teenuse kanali kesksesse sagedusse suunata väga tugeva võimsusega signaal. [18] Tegemist on kõige laiemalt levinud segamise meetodiga, sest seda on lihtne implementeerida ning genereeritud signaal on suure keskmise võimsusega. Küll aga on sellist segamist lihtne vältida: kandevasagedust ehk kanalit vahetades kaob selle segav mõju. [16] Sagedust segav signaal on kujutatud joonisel **1.8**.



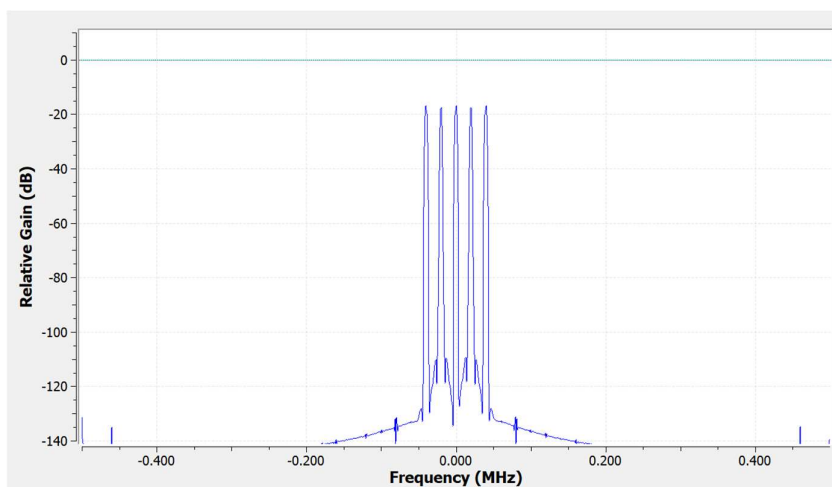
Joonis 1.8: Konkreetse sageduse segamist võimaldava signaali spektraalne esitus

***Sweep jam* ehk pühkesegamine**

Pühkesegamine on segamise meetod, kus segava signaali sagedust ühtlaselt ja pidevalt muutes läbitakse kitsama ribalaiusega kuid võrdlemisi suure võimsusega signaaliga kogu segatav ribalaius raadiospektris [18]. Nõnda saab segada erinevaid sagedusi lühikese aja jooksul, kuid mitte üheaegselt, andes tõkestavale segamisele sarnase, aga suurema keskmise võimsusega mõju [16]. Selle efektiivsus sõltub peamiselt kahest tegurist: segatava sagedusvahemiku laiuselt ning selle läbimise ajast. Sellise segamise puhul tekitatakse erinevate sagedustega signaalid järjestikuste pulssidena. Mida kitsam on segatav sagedusvahemik ja mida pikem selle läbimiseks kulub aeg, seda suurem on hetkeline segav võimsus konkreetse sageduse kohta. Samas kui sagedusvahemiku läbimise aeg on muutub liiga pikaks, väheneb erinevate sageduste segamise reaajalisus. Kui aga segatav sagedusvahemik on liiga kitsas, jäävad sellest vahemikust väljas olevad sagedused segamata. Seetõttu tuleb nende kahe parameetri valimisel arvestada konkreetset kasutusolukorda.

***Successive pulses jam/Comb jam* ehk kammsignaali segamine**

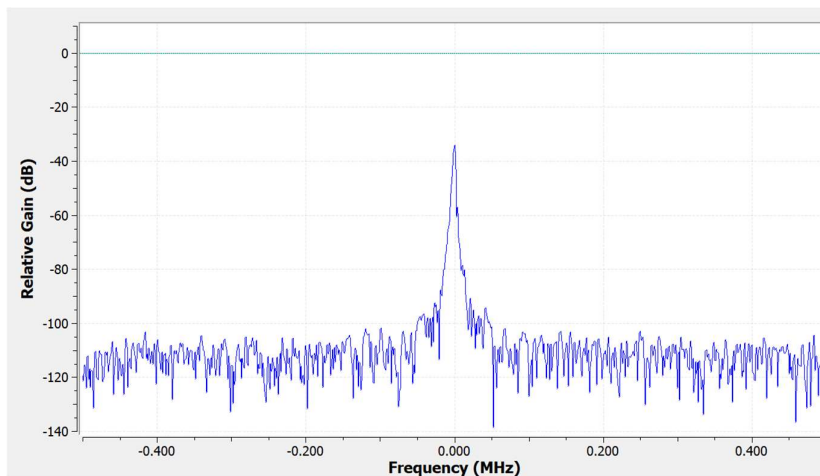
Kammsignaali segamine on tehnika, kus segav signaal moodustub ühesageduslike sinusoidide summast, mis on võrdselt jaotunud segatava teenuse kanali ribalaiuse ulatuses. Nõnda saab ühe segava kandevasageduse pealt segada mitut sagedust. Sellise signaali sagedusesituse graafikul on näha sagedusruumi jaotunud teravikke, mis meenutab kammi – sellest mõiste kammsignaali. Nõnda saab suure võimsusega pulsse tekitada kogu sidekanali ulatuses. [18] Kammsignaali spekter on toodud joonisel 1.9.



Joonis 1.9: Kammsignaali spekter

Harrise raadiojaama lainekujuga segamine

Ühe segamise meetodina rakendatakse *deceptive jamming* ehk petliku segamise põhimõtet. Näiteks kasutades selleks Harrise raadiojaama poolt saadetavat signaali. Petlik segamine, erinevalt eelnevatest, hõlmab endas nii RF vastuvõtja kui ka selle kasutaja ära petmist, kasutades segavaks signaaliks päris saatesignaali. [19] Selle töö raames kasutatakse ühe segava signaalikujuna salvestust Harrise raadiojaama saatesignaalist. Kasutades sellist segavat signaali olukorras, kus on aktiivne Harrise raadiojaama kasutamine, meenutab see sagedusruumis ja vastuvõtjate kõlarites esialgu pigem raadiojaama saatel olekut või kahisevat edastust kui et tahtlikku segamist. Joonisel 1.10 on näha Harrise raadiojaama saatesignaali sagedusruumis.



Joonis 1.10: Harrise raadiojaama saatesignaali spekter

SigMF

Raadiosignaale saab salvestada erinevatesse andmefaili formaatidesse. Selles töös kasutatakse salvestamiseks SigMF formaati. SigMF on arenduses olev andmehõive formaat, mille puhul salvestatakse lisaks signaali andmetele ka metaandmed salvestatava signaali kohta. Selle eesmärk on standardiseerida jagatavat informatsiooni signaali kohta. Metaandmed salvestatakse JSON formaadis ning nendeks võivad olla näiteks signaali sagedus, sãmplimissagedus, kasutatav riistvara või salvestuse alguse aeg. Sealhulgas on salvestatavad metaandmed kasutaja poolt valitavad. [20]

2. Metoodika ja nõuded

Töö eesmärk on luua USRP X300-l põhinev transiiver koos GRC-l põhineva kasutajaliidesega, millega oleks võimalik teha järgmist:

- etteantud parameetritele vastava signaalikuju loomine;
- valitud sageduspiirkonna segamine loodud signaalikujuga;
- soovitud spektrivahemiku vaatlemine;
- signaali salvestamine vaadeldavas spektrivahemikus.

Laiem eesmärk sellel töö on luua platvorm, millega saab vaadelda ja analüüsida, kuidas spektripiirkond reageerib erineva kujuga segavate signaalide mõjule, toetades hariduslikke ja teaduslikke eesmärke.

2.1. Nõuded

Kasutajaliidese tingimuste kirjeldamiseks on esitatud järgmised nõuded:

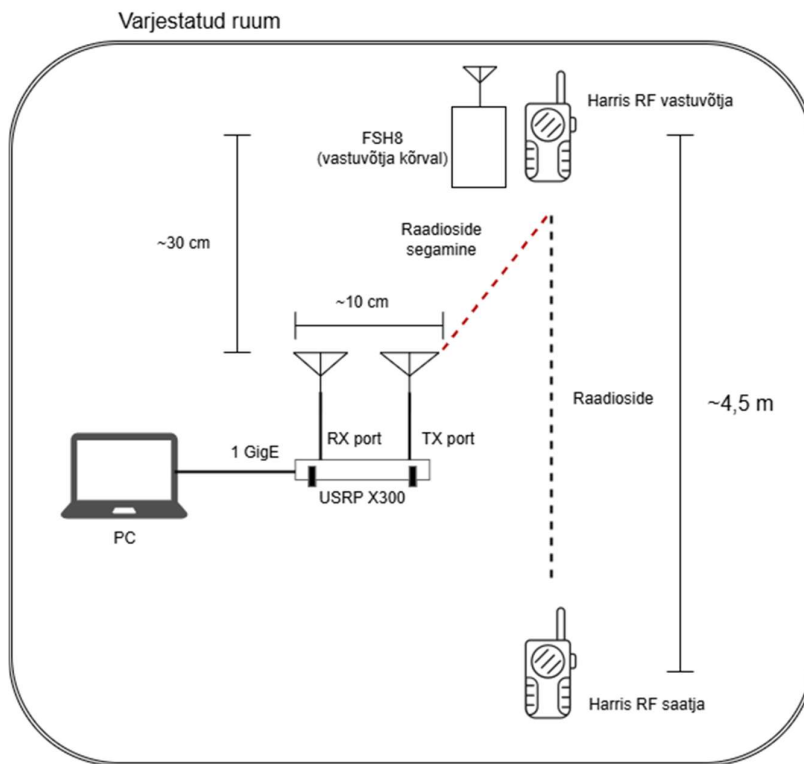
1. kasutajaliides peab võimaldama samaaegset või järjestikust sagedusspektri segamist ja vaatlemist;
2. kasutaja poolt määratavad signaaliparameetrid peavad olema selliselt piiratud, et nende rakendamine ei ületaks kasutatava riistvara võimekust;
3. kasutajaliides võiks olla keskmisele kasutajale intuiitiivselt arusaadav;
4. loodud lahendus peab olema edasiarendatav.

2.2. Metoodika

Süsteemi töö katsetamine viiakse läbi varjestatud ruumis. Selleks seadistatakse kaks Harrise raadiojaama suhtlema 250 mW väljundvõimsusega ning 31,675MHz kanali sagedusel. Antud töös kasutati sellist Harrise lainevormi, mis kasutas digitaalset modulatsiooni. Seejärel käivitatakse SDR-transiiveri segamisfunktsioon, mille kandevasagedus vastab raadiojaama kanali sagedusele. Raadiosidet segatakse kõigi viie valikus oleva segava signaalikujuga. Iga

signaalikuju parameetrid valitakse selliselt, et maksimeerida nende mõju Harrise sidekanali sagedusvahemiku ulatuses.

Paralleelselt seadistatakse nii SDR-i kui ka FSH8 spektrianalüsaator vaatlema sagedusvahemikku, kus suhtlus toimub. FSH8 spektrianalüsaatorit kasutatakse signaalide keskmiste võimsuste hindamiseks. Esmalt mõõdetakse Harrise raadiojaama saatesignaali võimsus ilma seda segamata. Seejärel salvestatakse iga segava signaalikuju puhul ligikaudu 10-sekundiline andmefail vaadeldavast spektriosast, mõõdetakse nende signaalide keskmine võimsus ning antakse subjektiivne hinnang side kvaliteedile kas ja mil määral on side häiritud. Katsete lõpus üldistatakse tulemused segamise meetodite efektiivsuse kohta. Joonisel 2.1 on esitatud katse ülesseadmise skeem.

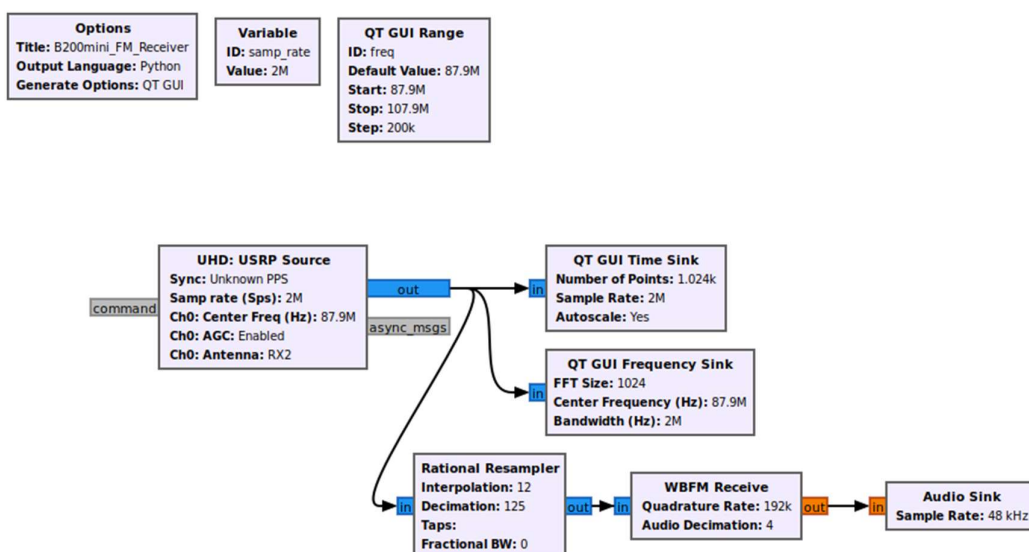


Joonis 2.1: Katse läbiviimise skeem

3. Loodud lahendus

3.1. Ideest lahenduseni

Töö algas GRC keskkonna õppimisega SDR-ide programmeerimiseks. Esmalt sai proovitud nii USRP B205mini-i kui ka USRP X300 peal FM vastuvõtja loomist. Sellist programmi peetakse SDR-ide „Hello world“ programmiks. Joonisel 3.1 on B205mini-i FM vastuvõtja juhendist [21] võetud joonis, kus on näide sellisest voodiagrammist GRC keskkonnas.



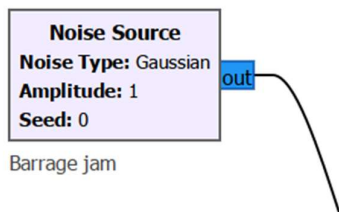
Joonis 3.1: GRC keskkonna voodiagrammi näidis FM vastuvõtja põhjal

Sellise programmiga sai teha tutvust mitmete GRC ja SDR-ide tööpõhimõtetega: muutujaplokid (*Variable*), allika- ja väljundplokid (*Source*, *Sink*), sãmplimissagedus, kesksagedus (*Center Freq*), vastuvõtja võimendus ning digitaalse signaali töötlemine. Allikaplokid genereerivad signaali programselt vastavalt valemile või edastavad SDR-i sisendkanalist mõõdetud ja digitaliseeritud signaali. Väljundplokid on lõplikud otspunktid, kuhu keskkonnas olev signaal jõuab. Seal võidakse see signaal suunata näiteks füüsilisse väljundisse (SDR-i väljund, helikaart), graafikule (*Time Sink*, *Frequency Sink*) või siis ei tehta selle signaaliga midagi.

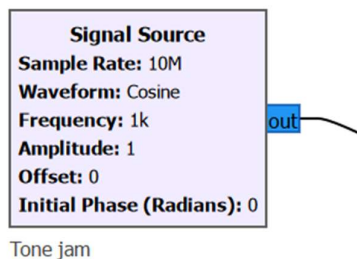
Järgmisena valiti millised signaalikujud võtta segavate signaalide genereerimise aluseks. Suures osas kattuvad need alampeatükis 1.3 väljatoodud segavate signaalidega. Nendeks valiti:

- tõkestav segamine;
- konkreetse sageduse segamine;
- pühkesegamine;
- segamine kammsignaaliaga;
- Harrise raadiojaama signaalikujuga segamine.

Tõkestava segamise rakendamiseks kasutati Gaussi müra genereerivat allikaplokki (joonis 3.2). Konkreetse sageduse segamise jaoks kasutati signaaligeneraatorit, millega tekitati soovitud sagedusele sinusoid (joonis 3.3). Harrise raadiojaama signaalikuju kasutamiseks salvestati eelnevalt umbes 5-sekundilise signaalikuju eetris olevast Harrise raadiojaamast ning suunati signaal GRC programmi kasutades faili allikaplokki (joonis 3.4). Harrise raadiojaama signaali andmefaili nimi on „sigmf_harris_00.sigmf-data“.



Joonis 3.2: Tõkestava segamise signaali genereerimine



Joonis 3.3: Konkreetse sageduse segamist võimaldava signaali genereerimine



Joonis 3.4: Harrise raadiojaama saatesignaali genereerimine segamiseks

Pühkesegamise ja kammsignaali loomine nõudis digitaalse signaalitötluse kasutamist. Pühkesegamise spektrivahemiku järjepidevaks läbimiseks kasutati pingega tüüritava ostsillaatori ploki (VCO), mille sisendiks anti allikaploki poolt tekitatav saehamba tüüpi signaal. Spektrivahemiku läbimise aja muutmiseks väärtustati saehamba sagedus väärtusega

$$f = \frac{1}{t_{sweep}}, \quad (3.1)$$

kus t_{sweep} on soovitud spektrivahemiku läbimise aeg sekundites. Läbitava spektrivahemiku laiuse (*sweep bandwidth*) määramiseks leiti VCO ploki tundlikkus (*sensitivity*) järgmise avaldise alusel:

$$tundlikkus = 2\pi * \text{spektrivahemiku laius}. \quad (3.2)$$

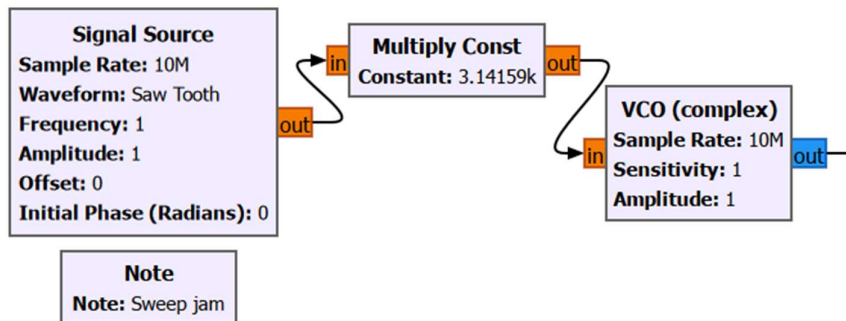
Selle valemi selgituseks on GRC-ga tegelev teadlane Jean-Michel Friedt kirjutanud ühes blogipostituses, et VCO plokk genereerib sinusoidaalse funktsiooni väljundeid sagedusel

$$f_{\text{väljundia}} = \frac{tundlikkus}{\text{sämplimissagedus}} \quad (3.3)$$

nõnda, et faas suureneb 2π võrra iga

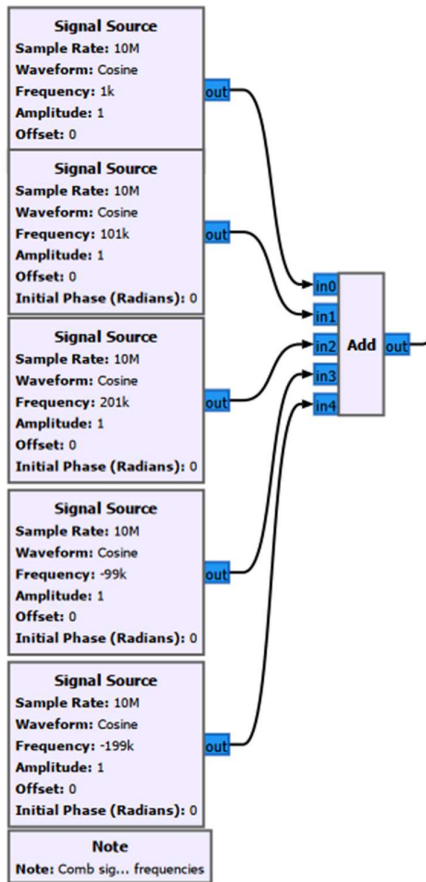
$$n = \frac{\text{sämplimissagedus}}{tundlikkus} \quad (3.4)$$

sämpli järel. [22] Antud genereerimise ahel on esitatud joonisel 3.5.



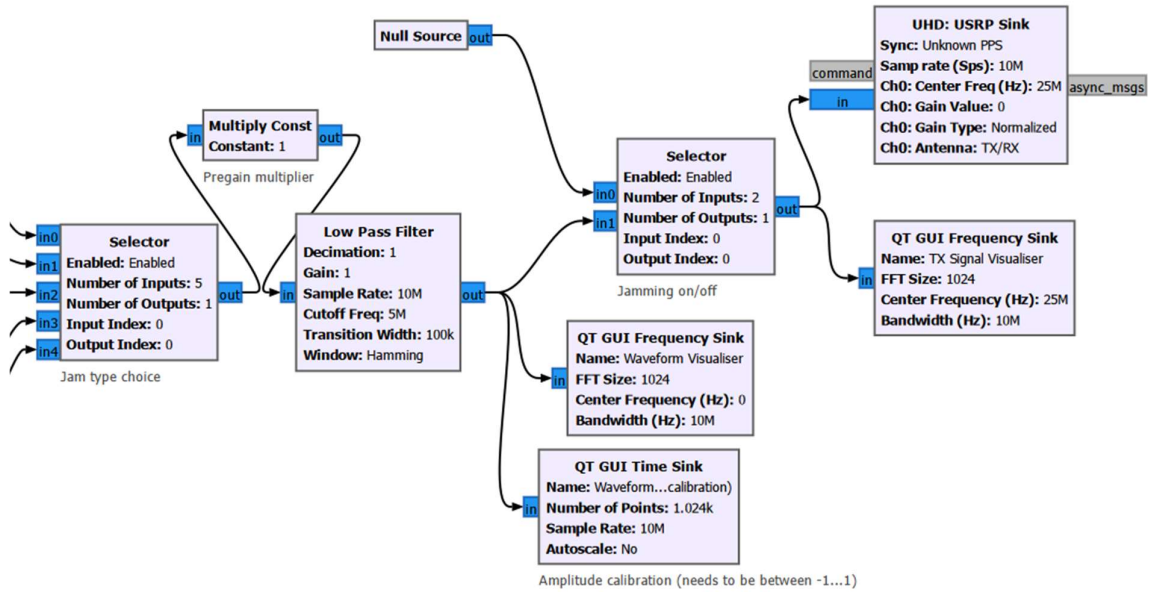
Joonis 3.5: Pühkesegamise signaali loomine

Kammsignaali tekitamiseks summeeriti signaaligeneraatorite poolt loodud sinusoidid kokku. Selles projektis summeeriti 5 erinevat sinusoidi kokku. Kammi sageduslike komponentide omavahelise kauguse määramiseks loodi kasutaja poolt muudetav muutuja, mille võrra erineb iga sagedus eelnevast ja/või järgnevast komponendist. Kammsignaali loomist on kujutatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6: Kammsignaali loomine

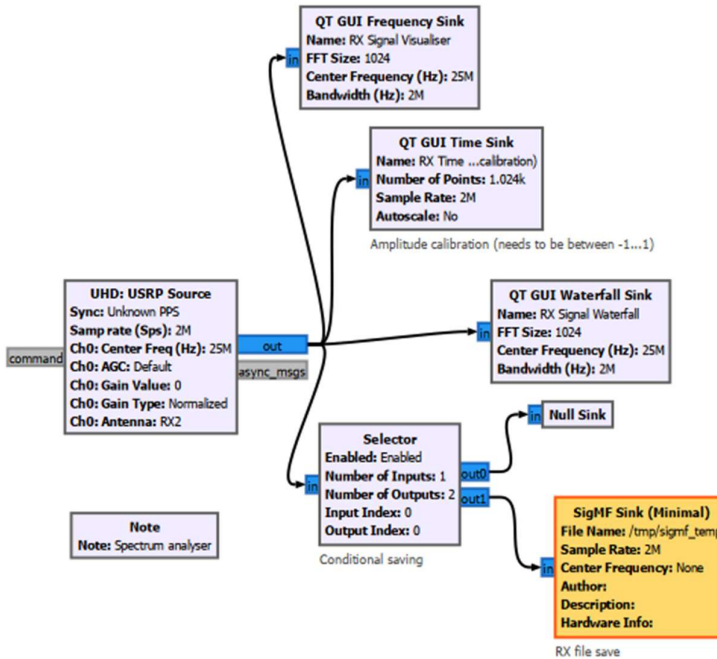
Kui kõik signaalid on genereeritud, siis on kasutajal võimalik valida nende viie alussignaali vahel. Sealhulgas saab muuta erinevaid parameetreid nende signaalide juures, näiteks pühkesegamise pühkelaius ja spektriosa läbimiskiirus, kammsignaali komponentide vahe sagedusruumis, segava signaali ribalaius, mida juhitakse madalpääsfiltriga. Sellest kõigest saab kasutaja tagasisidet sagedusegraafikult. Leidnud sobiva lainekuju, on kasutajal võimalik see saata SDR-i väljundisse, valides sealhulgas sobiva saatjalaine sageduse ning võimenduse. Eelnevalt kirjeldatud protsessi kujutab voodiagramm joonisel 3.7.



Joonis 3.7: Segava signaali valimise, ribalaiuse piiramise ning tingimusliku väljundisse saatmise voodiagramm

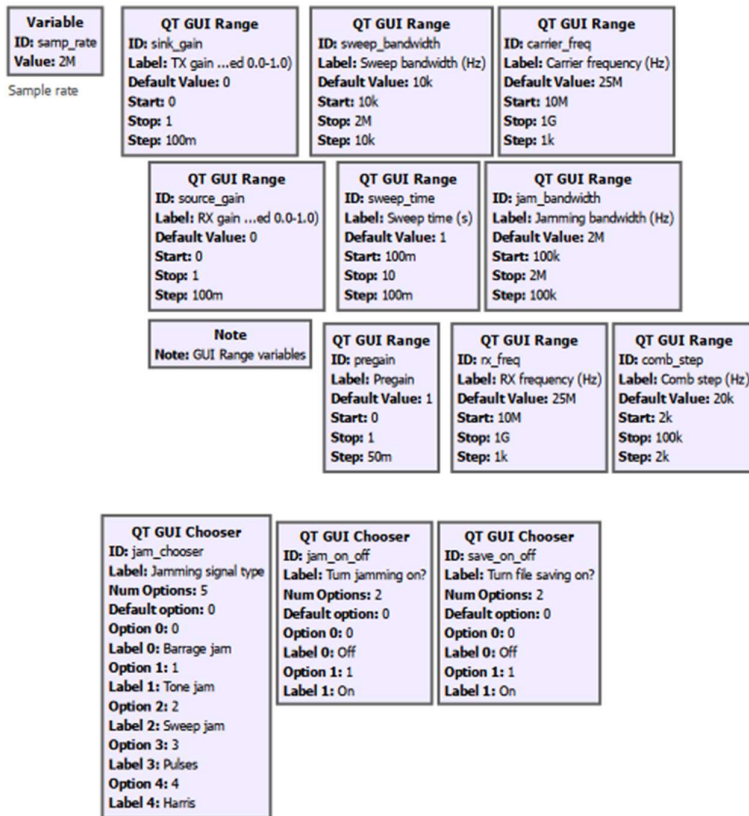
Joonise 3.7 põhjal on näha, et lisaks eelnevas lõigus mainitule, on seal ka *Pregain multiplier* ja *Amplitude calibration* kommentaaridega plokid. Need on vajalikud segava signaalikuju kalibreerimiseks, et ei tekiks küllastusest tulenevat signaalikuju muutust. Töö käigus avastati, et kui segava või vastuvõetava signaalikuju amplituud ületab vahemikku $-1 \dots 1$, siis hakkavad tekkima sagedusruumi vaates harmoonikud ning segav lainekuju pole enam soovitud kuju ega võimsusega. Seetõttu tuleb enne raadioside segamist veenduda *Amplitude calibration* kommentaariga signaali ajalise esitamise ploki väljundi pealt, kas genereeritud signaali amplituud jääb vajalikkesse piiridesse ja vajadusel *Pregain multiplier* kordaja abil seda vähendada.

Sellela paralleelselt töötab raadiospektri vaatlemine SDR-i vastuvõtvast pordist. Spektrit kujutatakse nii tavapärasel sagedusruumi graafikul kui ka spektrogrammil. Lisaks sellele saab kasutaja lülitada sisse ja välja sisendsignaali salvestamist SigMF formaadis, et hiljem seda taasesitada ja analüüsida. Selles osas tuleb veenduda spektraalse esituse ja kalibreerimise ajagraafiku pealt, et nii saatja kui ka vastuvõtja riistvaralise võimenduse tõttu ei tekiks amplituudi suuruse tõttu vastuvõtuahelas olevas analoog-digitaalmuunduris küllastumist. Spektrianalüsaatori voodiagramm on toodud joonisel 3.8.



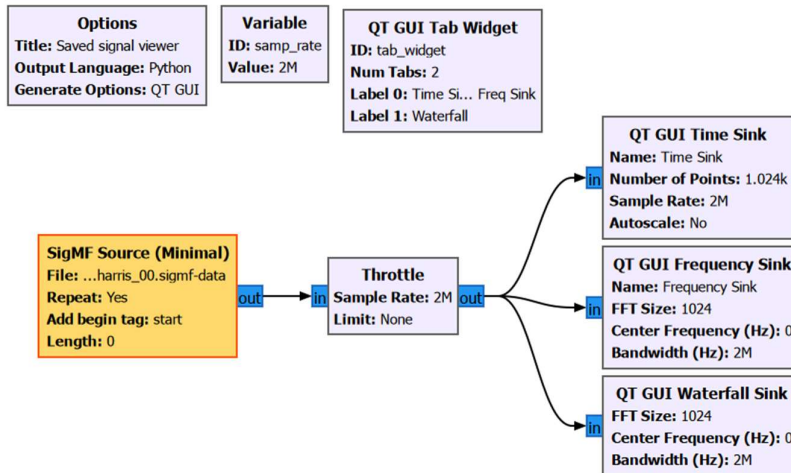
Joonis 3.8: Raadiospektri kujutamise ja salvestamisega tegelev voodiagrammi osa

Suur osa eelmainitud plokkidest käituvad neile määratud parameetrite alusel. Muudetavateks parameetriteks võivad olla näiteks kesksagedus (*Center Freq*), võimendus (*Gain Value*), sãmplimissagedus (*Sample Rate*). Selle jaoks on programmi lisatud piiritletud vãrtustega liugurid, et nende vãrtuseid tãõ ajal muuta saaks. Muutujate vãrtuste piirid sõltuvad sãmplimissagedusest, et need oleksid sellele vastavas suurusjãrgus ning ei põhjustaks matemaatiliste vigade tõttu programmis tõrkeid. Erinevad programmi tãõd mõjutavad muutujad on toodud vãlja joonisel 3.9.



Joonis 3.9: Lahenduse voodiagrammis kasutatavad muutujad

Salvestatud signaalide vaatlemiseks loodi lihtne GRC voodiagramm „saved_signal_viewer.grc“. See koosneb SigMF failitüübi allikaplokkist, *Throttle*-nimelisest tarkvaralisest sãmplipiirajast ja signaali kujutavatest spektrogrammi ning aja- ja sagedusgraafiku väljundplokkidest. Seda kasutatakse segamise testimisel loodud ja salvestatud signaalide vaatlemiseks. Vastav voodiagramm on toodud joonisel **3.10**.

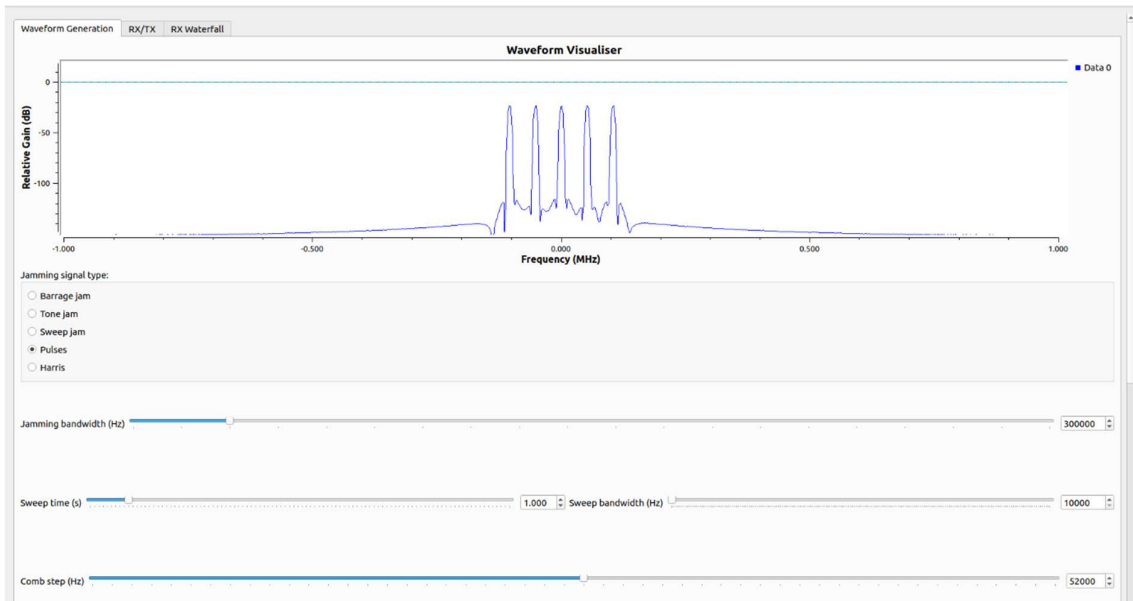


Joonis 3.10: Salvestatud signaalide vaatlemise voodiagramm

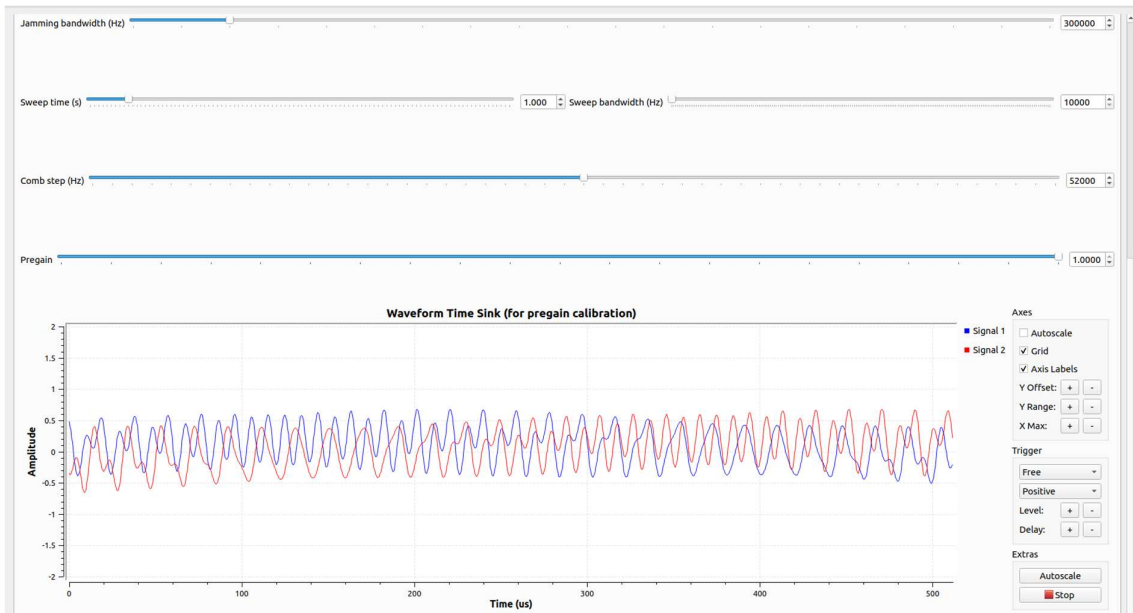
3.2. Kasutajaliides

Kasutajaliidest disainides peeti silmas, et see oleks intuiitiivselt mõistetav ja kasutatav ka neile, kes ei ole kursis antud programmi tööpõhimõttega. Platvormi kasutuselevõtu lihtsustamiseks loodi selle riistvaralise ja tarkvaralise seadistamise juhend, mis on kättesaadav **Lisa 1** alt. Kasutajaliides koosneb kolmest eraldiseisvast aknast: signaalikuju genereerimine (*Waveform generation*), vastuvõtmine-edastamine (*RX/TX*) ja spektrogrammi vaade (*RX waterfall*).

Signaalikuju genereerimise aknas on võimalik valida üht viiest segava signaali alusest (*Jamming signal type*), kalibreerida signaali eelvõimendusega (*Pregain*), muuta segava signaali ribalaiust (*Jamming bandwidth*), pühkesegamise pühkeperioodi ja ribalaiust (*Sweep time* ja *Sweep bandwidth*) ning kammsignaali sinusoidide vahet sagedusruumis (*Comb step*). Sealhulgas on parameetreid muutes võimalik saada kohest tagasisidet sagedusgraafikule ja ajagraafikule genereeritud signaalikujudelt. Signaalikuju genereerimise aken on toodud joonistel **3.11** ja **3.12**.



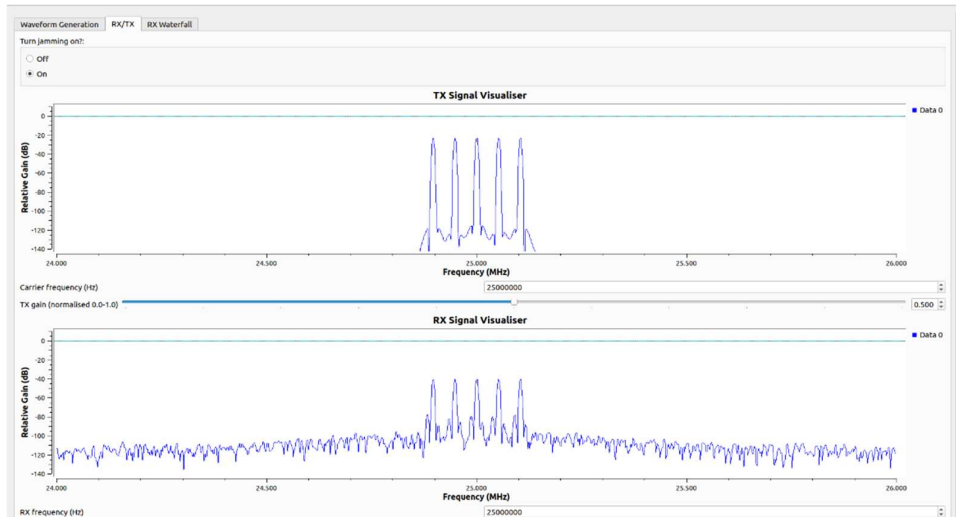
Joonis 3.11: Signaalikuju genereerimise akna ülemine osa



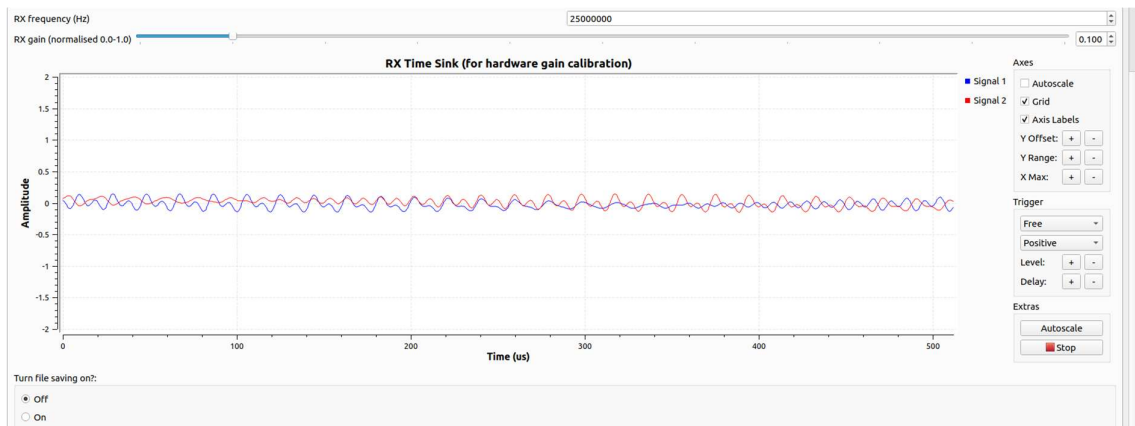
Joonis 3.12: Signaalikuju genereerimise akna alumine osa

Vastuvõtmise-saatmise aknas saab lülitada spektriosa segamist sisse ja välja. Sellekohast infot on näha nii saatva signaali kui ka vastuvõtava signaali sagedusgraafikutel. Samuti on kasutaja poolt muudetavad saatja ja vastuvõtja sagedus ning võimendus. Selles aknas on võimalik ka

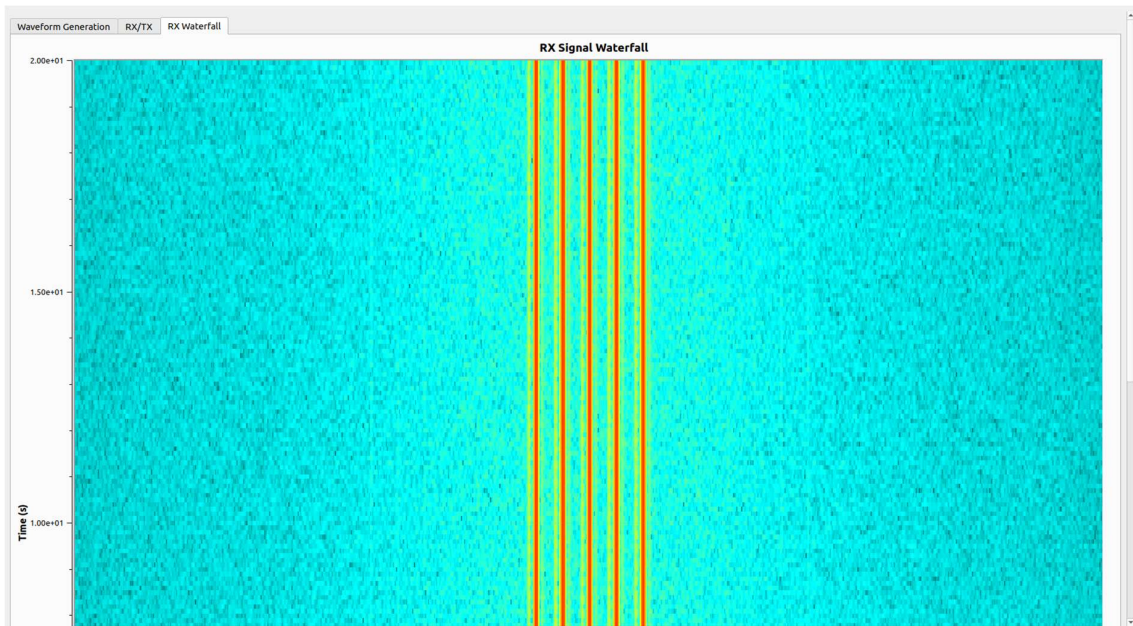
vastuvõetava signaali salvestamist sisse lülitada. Kuna spektrogrammi on mugav suurelt vaadelda, siis see asub eraldiseisvas aknas. Vastuvõtmise-saatmise akent näeb joonistel 3.13 ja 3.14 ning spektrogrammi vaadet näeb joonisel 3.15.



Joonis 3.13: Saatmise-vastuvõtmise akna ülemine vaade



Joonis 3.14: Saatmise-vastuvõtmise akna alumine vaade



Joonis 3.15: Spektrogrammi akna vaade

4. Tulemused ja arutelu

4.1. Mõõtetulemused

Katse seati üles skeemi (joonis 2.1) põhjal. Mõõtmisteks seadistati transiiveri sãmplimissageduseks 2 MHz ning segaja riistvaraline vãljundvõimsus maksimaalseks. Harrise raadiosaatja saatesignaali mõõdetud keskmine võimsus 4,5 meetri kaugusel oli -52 dBm. Raadioside segamisel selgus, et kõik segavad signaalid segasid kommunikatsiooni täielikult, kui Harrise raadiosaatjate vaheline distantis oli ligikaudu 4,5 meetrit, mistõttu sooritati lisamõõtmised 3-meetrise distantisi pealt. Segamise mõju hindamisel kasutati lühikesi distantse, kuna SDR-i vãljundvõimsus on väike ning varjestatud ruumi mõõtmised seadsid samuti omad piirid. Reaalsed segajad vajavad distantisi saavutamiseks suurt vãljundvõimsust, kuid tehtud mõõtmised keskenduvad segamise mõju hindamisele SNR põhjal ning ei hõlma endas segamise leviulatuse hindamist reaalsetes tingimustes. Katse läbiviimist on kujutatud joonisel 4.1. Järgnevalt esitatakse erinevate segavate signaalikujude parameetrid ja mõõtmistulemused.

Tõkestav segamine

Tõkestava segamise signaalikuju tarkvaraliseks eelvõimenduseks määrati 3,3 ning segamise ribalaiuseks valiti 50 kHz. Vaadeldud signaal on nähtav andmefailist „sigmf_measurement_barrage_01.sigmf-data“. Mõõtetulemused olid järgnevad:

- segava signaali keskmine võimsus vastuvõtu punktis: -37 dBm;
- signaali-müra suhe detsibell-skaalas vastuvõtu punktis: -15 dBm;
- hinnang sidekvaliteedile 4,5 m kaugusel: kommunikatsioon ei alga;
- hinnang sidekvaliteedile 3 m kaugusel: häält on kahisevalt kuulda.

Konkreetsed sageduse segamine

Konkreetsed sageduse segamiseks määrati tarkvaraliseks eelvõimenduseks 0,85 ning segamise ribalaiuseks valiti 20 kHz. Vaadeldud signaal on nähtav andmefailist „sigmf_measurement_tone_01.sigmf-data“. Mõõtetulemused olid järgnevad:

- segava signaali keskmine võimsus vastuvõtu punktis: -30 dBm;
- signaali-müra suhe detsibell-skaalas vastuvõtu punktis: -22 dBm;
- hinnang sidekvaliteedile 4,5 m kaugusel: kommunikatsioon ei alga;

- hinnang sidekvaliteedile 3 m kaugusel: häält on kahisevalt kuulda.

Pühkesegamine

Pühkesegamise signaalikuju tarkvaraliseks eelvõimenduseks määrati 1.0, segamise ribalaiuseks valiti 50 kHz, signaali poolt läbitava spektrivahemiku laiuseks määrati 40 kHz ning spektrivahemiku läbimise ajaks 0,41 s. Pühkesegamise ajal hakkas Harrise raadiosaatjates kõlama löökide hääl ja piiksumine, kus löökide sagedus sõltus pühkesignaali spektrivahemiku läbimise ajast. Heli on kuuldav failis „sweep_jam_sound.wav“. Vaadeldud signaal on nähtav andmefailist „sigmf_measurement_sweep_01.sigmf-data“. Mõõtetulemused olid järgnevad:

- segava signaali keskmine võimsus vastuvõtu punktis: -29 dBm;
- signaali-müra suhe detsibell-skaalas vastuvõtu punktis: -23 dBm;
- hinnang sidekvaliteedile 4,5 m kaugusel: kommunikatsioon ei alga, kõlab iseloomulik heli;
- hinnang sidekvaliteedile 3 m kaugusel: häält on väga kahisevalt kuulda, raadioside ajaks kaob iseloomulik heli.

Kammsignaali segamine

Kammsignaali eelvõimenduseks määrati 1.0, segamise ribalaiuseks valiti 60 kHz ning kammi sageduslike komponentide omavahelise kauguseks määrati 10 kHz. Vaadeldud signaal on nähtav andmefailist „sigmf_measurement_comb_01.sigmf-data“. Mõõtetulemused olid järgnevad:

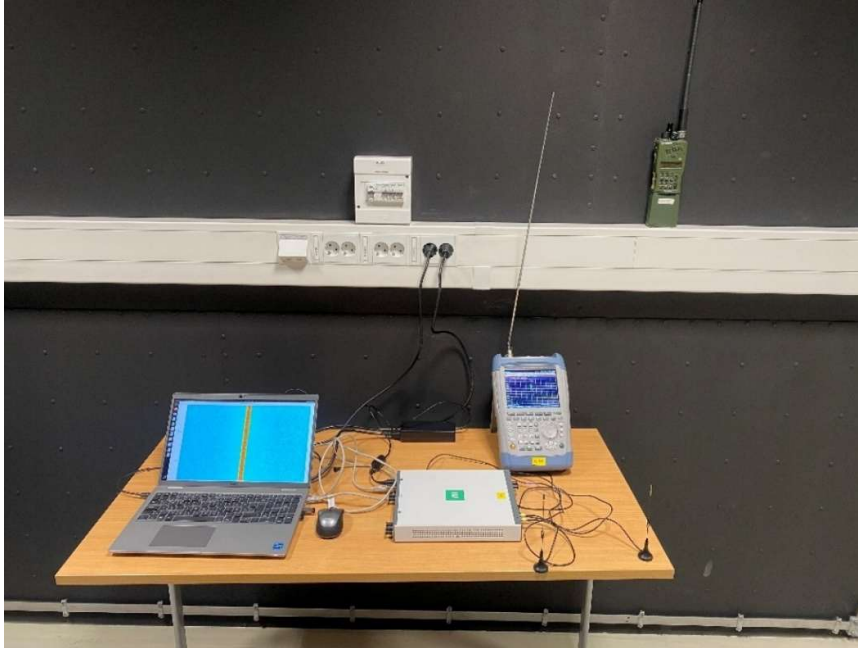
- segava signaali keskmine võimsus vastuvõtu punktis: -36 dBm;
- signaali-müra suhe detsibell-skaalas vastuvõtu punktis: -16 dBm;
- hinnang sidekvaliteedile 4,5 m kaugusel: kommunikatsioon ei alga;
- hinnang sidekvaliteedile 3 m kaugusel: hääl on õrnalt kahisev.

Harrise raadiojaama saatesignaali segamine

Eelnevalt salvestatud Harrise raadiojaama saatesignaali eelvõimenduseks määrati 10,0 ning segamise ribalaiuseks valiti 100 kHz. Segav signaal alustab raadiojaamadega suhtlust ning laseb eetrisse pidevat kahinat ja piiksumist. Heli on kuuldav failis „harris_jam_sound.wav“. Vaadeldud signaal on nähtav andmefailist „sigmf_measurement_harris_01.sigmf-data“. Mõõtetulemused olid järgnevad:

- segava signaali keskmine võimsus vastuvõtu punktis: -33 dBm;

- signaali-müra suhe detsibell-skaalas vastuvõtu punktis: -19 dBm;
- hinnang sidekvaliteedile 4,5 m kaugusel: kommunikatsioon ei alga, eetris kõlab iseloomulik segav kahin;
- hinnang sidekvaliteedile 3 m kaugusel: hääl on kahisev.



Joonis 4.1: Katse läbiviimine varjestatud ruumis

Efektiivse segamise alampiir

Eelnenud mõõtmistulemuste põhjal oli näha, et segaja poolt loodud segavad signaalid ei võimaldanud üksteisest 4,5 meetri kaugusel olevatel raadiojaamadel raadioside loomist. Seetõttu otsiti segamise võimsuse alampiiri, mille puhul segamine veel toimub.

Esmalt genereeriti katses kasutatud parameetrite alusel tõkestava segamise signaal ning hakati järk-järgult SDR-i väljundvõimsust vähendama. 0,5 TX võimsuse juures oli segava signaali keskmine võimsus -53 dBm ehk signaali-müra suhe oli 1 dBm. Sellise võimsuse juures mõnel juhul kommunikatsiooni ei alanud, kuid teisel juhul side tekkis, aga kahina tõttu polnud hääl eristatav. 0,4 TX võimsuse juures oli segava signaali keskmine võimsus -56 dBm, kust signaali-müra suhe on 4 dBm. Selle võimsuse juures algas raadioside ilma probleemideta.

Sama katset korrati pühkesegamisega. 0,2 TX võimsuse juures oli segava signaali keskmine võimsus -53 dBm ehk signaali-müra suhe oli 1 dBm. Sellise võimsuse juures kordus eelnev:

mõnel juhul tekkis side, teisel juhul mitte. 0,1 TX võimsuse juures oli segava signaali keskmine võimsus -56 dBm, kust signaali-müra suhe on 4 dBm. Selle võimsuse juures algas raadioside samuti ilma probleemideta.

4.2. Analüüs ja ülevaade

Katsetulemuste analüüs

Katsetingimustes suutis loodud transiiveri segaja häirida Harrise raadiojaama raadiosidet kõigi kasutatud segavate signaalide korral. Samas näitasid mõõtmised, et erinevate segamisrežiimide tulemuste vahel leidis teatud erisusi.

Pühkesegamise ja konkreetse sageduse segamise signaalide keskmised võimsused olid teistest suuremad. See-est olid nõrgema keskmise signaali võimsusega kammisignaal ja tõkestava segamise signaal. Siit tuleneb, et segavat signaali valides tuleb lähtuda kasutusjuhust. Mida suurem on samaaegselt segatavate sageduste hulk, seda nõrgem on segava signaali võimsus. Ehkki pühkesegamise signaal ei võimalda mitme sageduse samaaegset segamist, teevad selle suurem keskmine võimsus ning omadus läbida spektrivahemikku sageduse pideval muutumisel tõhusaks segamissignaaliks.

Pühkesegamine ja Harrise raadiojaama saatesignaaliga segamine tekitasid vastuvõtjas aktiivset müra. Selline mõju võib olla soovitud efekt raadiojaama kasutajate häirimiseks või siis vastupidi soovimatu kõrvalnähtus, mis viitab kasutajatele segamise toimumisest. Seetõttu tuleb taaskord määratleda raadiosageduse segamise eesmärk.

Segamise võimsuse alampiiri otsingul, kus segamine veel toimub, leiti, et isegi, kui SNR_{dB} väärtus on natukene suurem kui null, siis toimub raadioside segamine veel osaliselt. Küll aga kui signaali-müra suhe hakkab lähenema neljale, siis suudavad raadiojaamad sidet luua.

Kasutajaliidese vastavus nõuetele

Lisaks transiiveri segamise funktsionaalsusele võimaldab loodud kasutajaliides sagedusspektri samaaegset vaatlemist. Signaaliparameetrite muutujate väärtuste piirid on seadistatud vastavalt valitud sãmplimissagedusele. Samas puuduvad tarkvaralised kaitsemehhanismid, mis välistaksid USRP X300 riistvaraliste piiride ületamise. Kasutajaliides sisaldab täpselt neid funktsioone, mis on vajalikud seadme eesmärgipõhiseks kasutamiseks. Kõikidel graafikutel ja liuguritel on neid kirjeldavad nimed ning muudatused parameetrites kajastuvad koheselt

graafikutel – need asjaolud teevad kasutajaliidese intuiitiivselt mõistetavaks. Kasutajaliides on arendatud GRC keskkonnas ning on seetõttu hõlpsasti edasiarendatav. Eelneva põhjal võib kasutajaliidest hinnata seatud nõuetele osaliselt vastavaks.

Töö vastavus eesmärgile

Loodud platvorm võimaldab GRC-põhise kasutajaliidese abil genereerida määratud parameetritele vastavaid segamissignaale. Katse põhjal võib järelda, et transiiveriga saab segada valitud sageduspiirkonda loodud signaaliga. Lisaks võimaldab lahendus vaadelda segava signaali mõju sagedusspektrile ning salvestada spektris esinevaid signaale edasiseks analüüsiks. Kokkuvõtvalt võib eduka katsetuse põhjal hinnata, et töö vastab püstitatud eesmärgile, kuna loodud platvorm võimaldab vaadelda ja analüüsida, kuidas erineva kujuga segamissignaale mõjutavad segatavat spektripiirkonda.

Platvormi edasiarendamise võimalused ja uurimissuunad

Platvormi on võimalik edasi arendada ja täiendavalt konfigureerida nii riistvaraliselt kui ka tarkvaraliselt. Lahenduses kasutati USRP X300 neljast pordist vaid kahte, mis jätab avatuks kahe ülejäänud pordi rakendamise võimaluse. Nende abil saaks luua näiteks *multiband*-segamise ning mitme sagedusala vaatlemise funktsionaalsust. Sel juhul oleks otstarbekas arvuti ja transiiveri vaheliseks andmeedastuseks kasutada parema andmeedastuskiiruse eesmärgil Dual 10 Gigabit Ethernet ühendust senise töös kasutatud Dual 1 Gigabit Ethernet asemel.

GRC-s kasutatud SigMF plokid on veel algelised, mis ei salvesta suurt osa metaandmetest, mida see formaat toetab. Tarkvaralise edasiarenduse käigus saaks lisada näiteks signaali salvestamise täpse algusaja määramise võimaluse, mis annaks mõõtmiste ajalise konteksti hilisemal analüüsil.

Praeguses lahenduses koosneb loodav kammsignaal fikseeritult viiest sinusoidist. Kasutajaliidese arendamisel saaks selle arvu muuta kasutaja poolt määratavaks parameetriks. Samuti toimub segava signaali kalibreerimine manuaalselt, kasutades eelvõimenduse muutujat. See protsess oleks võimalik automatiseerida, et kasutaja ei peaks tegelema signaali üleküllastumisest tulenevate harmoonikute probleemiga.

Platvormi testiti varjestatud ruumis, keskendudes ühe konkreetse raadiojaama segamisele. Signaale töötlev arvuti ei olnud suure arvutusvõimsusega, mis piiras süsteemi täit potentsiaali. Edaspidi tuleks kaaluda võimsama arvuti kasutamist, et uurida transiiveri riistvaralisi piire. Asjakohane oleks katsetada platvormi erinevate raadiojaamade segamisel, mis töötavad teistes

sagedusvahemikes. Lisaks tuleks testida süsteemi väljaspool varjestatud ruumi, kasutades võimsamaid saatevõimsusi ja antenne ning pikemaid vahemaid raadiojaamade vahel. Nõnda saaks hinnata transiiveri segamisvõimekust reaalsetes kasutusolukordades ja leida selle praktilised piirid.

Kokkuvõte

Käesolevas töös loodi GRC arenduskeskkonnas USRP X300 SDR-il põhinev platvorm, mis võimaldab nii sagedusspektri segamist kui ka segamise mõju vaatlemist reaajas. Selle platvormi kasutajaliidese abil on kasutajal võimalik luua erineva kuju ja omadustega segamissignaale ning vaadelda nende mõju etteantud sagedusvahemikus. Samuti saab salvestada spektris vaadeldud signaali SigMF formaadis edasiseks analüüsiks.

Töö vastavust eesmärgile kontrolliti katse käigus, kus hinnati platvormi toimimist HARRISE raadiojaama segamisel viie erineva segamisrežiimiga. Tulemused näitasid, et seadmega on võimalik raadiosidet efektiivselt häirida valitud sagedusalas ning kasutajaliides andis graafiliselt reaajalist informatsiooni spektri kohta. Kasutajaliides oli intuitiivne ja funktsionaalne ning vastas suures osas seatud nõuetele.

Katsetulemuste põhjal selgusid mõned olulisemad järeldused. Töö tulemusena valminud toimiv lahendus tõestas, et SDR platvorm võimaldab tehniliselt võrdlemisi lihtsasti luua konfigureeritavaid raadiotehnilisi lahendusi. Samuti sai kinnitust töö teoreetilises osas väidetu, et raadioside segamisrežiimi valikul tuleb lähtuda konkreetsest segamise kasutusjuhust, sest erinevatel segamissignaalidel on erinevad keskmised signaali võimsused ning erinev segatavate sageduste hulk. Katse käigus leiti, et olenevalt segamisrežiimist on võimalik raadiojaama eetrisse tekitada ka müra. Selline mõju tekkis pühkesegamisel ja HARRISE raadiojaama saatesignaali segamisel. Katseandmete põhjal osutus kõige paremaks segamisrežiimiks pühkesegamine, sest sellise segamise korral oli segava signaali keskmine võimsus võrdlemisi suur ning sellega oli võimalik segada suurt hulka sagedusi. Segava signaali võimsuse alampiiri otsimisel, mille puhul segamine veel toimub, leiti, et raadioside on häiritud ka siis, kui SNR_{dB} väärtus on veidi üle nulli. Küll, kui SNR_{dB} väärtus lähenes juba neljale, sai toimuda raadiojaamade vaheline side.

Töö tõi välja mitmeid edasiarenduse võimalusi. Riistvaraliselt kasutati USRP X300 neljast pordist ainult kahte, mis jätab avatuks kahe ülejäänud pordi rakendamise võimaluse. Tarkvaraliselt saaks SigMF plokked edasi arendada, et nendega rohkem metaandmeid signaali kohta salvestada. Kuna katsetingimustel testiti platvormi varjestatud ruumis, kus raadiojaamade vaheline distantis oli lühikene, siis edaspidi tuleks seadet katsetamisel kasutada

võimsamaid antenne ning pikemaid vahemaid segavate raadiojaamade vahel, et hinnata seadme toimivust reaalsetes kasutusolukordades.

Tehtud töö tõestas, et tarkvaraliste raadiotega on võimalik luua paindlikke ning teaduslikke lahendusi. Loodud lahendus täitis töös seatud eesmärgi ning lõi tugeva aluse edasisteks katsetusteks ja arendusteks.

Tänuavaldused

Täna juhendajat Toomas Ruubenit ja kaasjuhendajat Erik Amorit keerulise raadiosagedusliku maailma ja tarkvaraliste raadiote kontseptsiooni tutvustamise eest. Samuti on tänuväärsed ühised mõtisklused ja nendelt saadud tagasiside, mis on viinud selle töö valmimiseni. Täna ka Kaitseväge Akadeemia elektroonilise võitluse kompetentsikeskust, mis pakkus mulle töö tegemiseks vajalikku riistvara ja võimalust kasutada testimiseks nende varjestatud ruumi.

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping letters that appear to be 'AM' or similar initials.

Viited

- [1] M. N. O. Sadiku ja C. M. Akujobi, „Software-defined radio: a brief overview“, *IEEE Potentials*, kd 23, nr 4, lk 14–15, okt 2004, doi: 10.1109/MP.2004.1343223.
- [2] T. Ulversoy, „Software Defined Radio: Challenges and Opportunities“, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, kd 12, nr 4, lk 531–550, 2010, doi: 10.1109/SURV.2010.032910.00019.
- [3] Y.-K. Kwag, J.-S. Jung, I.-S. Woo, ja M.-S. Park, „Modern Software Defined Radar (SDR) Technology and Its Trends“, *Journal of electromagnetic engineering and science*, kd 14, nr 4, lk 321–328, dets 2014, doi: 10.5515/JKIEES.2014.14.4.321.
- [4] Great Scott Gadgets, „Hardware Components — HackRF documentation“. Vaadatud: 20. mai 2025. [Online]. Available at: https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/hardware_components.html
- [5] Great Scott Gadgets, „HackRF One — HackRF documentation“. Vaadatud: 24. aprill 2025. [Online]. Available at: https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/hackrf_one.html
- [6] Great Scott Gadgets, „HackRF One - Great Scott Gadgets“. Vaadatud: 24. aprill 2025. [Online]. Available at: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>
- [7] Ettus Research, a National Instruments Brand, „USRP B205mini-i“, Ettus Research. Vaadatud: 24. aprill 2025. [Online]. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b205mini-i/>
- [8] Ettus Research, a National Instruments Brand, „USRP X300 High Performance Software Defined Radio Ettus Research“, Ettus Research. Vaadatud: 24. aprill 2025. [Online]. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/x300-kit/>
- [9] Ettus Research, a National Instruments Brand, „UBX 10 MHz - 6 GHz Rx/Tx, 160 MHz BW“, Ettus Research. Vaadatud: 14. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/ubx160/>
- [10] Harris, „RF-5800V-HH FALCON II® ADVANCED VHF TACTICAL HANDHELD RADIO Specifications“. railce. Vaadatud: 20. mai 2025. [Online]. Available at: <http://www.railce.com/cw/casc/harris/harris.htm>
- [11] „Harris RF-5800V-HH Falcon II“. Vaadatud: 20. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.prc68.com/I/HarrisRF5800VHH.shtml>
- [12] „Rohde & Schwarz FSH8 handheld spectrum analyser“. Vaadatud: 20. mai 2025. [Online]. Available at: <https://eleshop.eu/rohde-schwarz-fsh8-handheld-spectrum-analyser.html>
- [13] K. R. Sturley, „Radio technology“, Britannica. Vaadatud: 7. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.britannica.com/technology/radio-technology>
- [14] U. Zieniūtē, „What is signal jamming, and how does it work? | NordVPN“. Vaadatud: 4. mai 2025. [Online]. Available at: <https://nordvpn.com/blog/signal-jamming/>

- [15] P. Zen, „How Frequency Jamming Works: Understanding Deliberate Signal Interference | Leet Sheets“. Vaadatud: 17. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.1337sheets.com/p/how-frequency-jamming-works-understanding-deliberate-signal-interference>
- [16] A. Mpitiopoulos, D. Gavalas, C. Konstantopoulos, ja G. Pantziou, „A survey on jamming attacks and countermeasures in WSNs“, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, kd 11, nr 4, lk 42–56, 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090404.
- [17] Rohde & Schwarz GmbH & Co KG, „Technology fundamentals of hopper signals“. Vaadatud: 17. mai 2025. [Online]. Available at: https://www.rohde-schwarz.com/tw/knowledge-center/technology-fundamentals/hopper-signals/hopper-signals_256050.html
- [18] R. Ferreira, J. Gaspar, P. Sebastião, ja N. Souto, „Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms“, *Wireless Pers Commun*, kd 115, nr 4, lk 2705–2727, dets 2020, doi: 10.1007/s11277-020-07212-6.
- [19] H. Pirayesh ja H. Zeng, „Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey“, 2021, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2101.00292.
- [20] „SigMF“. Vaadatud: 20. mai 2025. [Online]. Available at: <https://sigmf.org/>
- [21] Wavewalkersp, *B200mini_FM_Receiver_flowgraph_rational_resampler.png (878×466)*. Vaadatud: 4. mai 2025. [Online]. Available at: https://wiki.gnuradio.org/images/d/da/B200mini_FM_Receiver_flowgraph_rational_resampler.png
- [22] J.-M. Friedt, „[Discuss-gnuradio] VCO“. Vaadatud: 4. mai 2025. [Online]. Available at: <https://lists.gnu.org/archive/html/discuss-gnuradio/2018-05/msg00178.html>

Lisa 1. Transiiveri kasutusjuhend

21.05.2025 seisuga kehtiv

Seadistage arvuti USRP X300-ga suhtlema järgnevate manuaalide alusel:

- *USRP X3x0 Series*: https://files.ettus.com/manual/page_usrp_x3x0.html;
- *System Configuration for USRP X3x0 Series*: https://uhd.readthedocs.io/en/uhd-4.7/page_usrp_x3x0_config.html.

Ühendage RF A kirja all olevad TX/RX ja RX2 pordid antennidega. Samuti võib testimise eesmärgil ühendada pordid üksteisega juhtme abil, sel juhul on vaja vähemalt -30 dBm atenuatsioonile lisada, et seadet mitte kahjustada.

Avage *GNU Radio Companion* keskkonnas fail „x300_tranceiver.grc“. Määrake sobiv sãmplimissagedus (muutuja ID: `samp_rate`): see kohandab kõik teised muudetavate muutujate vahemikud suurusjärgule vastavaks. Seejärel otsige projektikaustast fail „sigmf_harris_00.sigmf-data“ ning kopeerige selle failitee SigMF allikaploki (kommentaariga *Harris waveform*) File lahtrisse. Samuti määrake SigMF väljundploki (kommentaariga *RX file save*) File lahtris failitee, kuhu soovite vastuvõetud signaalikuju andmefaili salvestada.

Faili käivitades avaneb vaade, kus on kolm lahtrit: *Waveform Generation*, *RX/TX* ja *RX Waterfall*. *Waveform Generation* aknas on võimalik genereerida segava signaali lainekuju muudetavate parameetrite alusel, *RX/TX* aknas saab lülitada sisse segamist, vaadelda soovitud osa spektrist ning juhtida signaali andmefaili salvestamist ja *RX Waterfall* aknas saab vaadelda vastuvõetud signaali spektrogrammi.

Genereerige lainekuju, lülitage sisse segamine ja tutvuge seadme erinevate võimalustega!

Sagedasemad vead:

- Alavoolu tekkimine ehk terminalis tekivad „UUU...“ – sãmplimissagedus on liiga kiire konkreetse arvuti võimsuse jaoks, seega tuleb seda vähendada.
- RX signaalikuju ei vasta segavale signaalile:

- segava signaali amplituud on liiga suur, tuleb kalibreerida *Waveform Generation* aknas *Pregain* liuguriga *Waveform Time Sink* peal signaali amplituud -1 ja 1 vahemikku;
- riistvaraline võimendus on liiga suur, tuleb kalibreerida *RX/TX* aknas *TX gain* ja *RX gain* liuguritega *RX Time Sink* graafikul amplituud -1 ja 1 vahemikku.
- USRP X300 FPGA versioon ei ühti GRC jaoks sobivaga (*RuntimeError: Expected FPGA compatibility number x, but got y*):
 - kui $x > y$, siis SDR-il olev FPGA versioon on liiga vana, see tuleb terminalis oleva juhendi alusel uuendada;
 - kui $x < y$, siis arvutis olev UHD mooduli versioon on uuem kui GRC-s olev ning FPGA on tarkvara versioon on liiga uus, tuleb märkida üles GRC UHD mooduli versioon, eemaldada teised UHD moodulid arvutist ning taasinstallida sellised versioonid, et need vastaks GRC UHD moodulile. FPGA tarkvara tuleb seejärel uuendada.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mirko Meerits

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
„Tarkvaralise raadio transiiveri seadistamine ja selle kasutajaliidese loomine“
mille juhendaja on Toomas Ruuben
ja kaasjuhendaja Erik Amor
reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace
kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu
Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative
Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost
reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja
kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Mirko Meerits

Tartu, **22.05.2025**