

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Mattias Avi

## **LTE-põhise passiivradari simuleerimine**

Magistritöö (30 EAP)

Arvutitehnika ja robotika eriala

Juhendajad:

Teadur Toomas Ruuben

Nooremteadur Jaanus Kalde

Tartu 2025

# Resümee/Abstract

## LTE-põhise passiivradari simuleerimine

Antud magistritöö käigus uuris autor passiivradarisüsteemide toimimise, olemasolevate süsteemide ja simuleerimise võimaluste kohta.

Töö annab ülevaate passiivradari geomeetristest omapäradest ning muudest eelistest ja puudustest. Samuti veendutakse LTE tehnoloogia sobivuses passiivradari tööks. Tuuakse välja mõned märkimisväärsed eksperimendid, kus LTE tehnoloogial põhinev passiivradar on edukalt kontrollitud tingimustes suutnud tuvastada erinevaid objekte.

Passiivradari süsteemi osasid uuriti, et selgitada välja milliseid on mõistlik simuleerida, et passiivradari arendamist lihtsustada. Seejärel töötati välja vahendid, mis suutsid seda ülesandeid täita ideaalsetes tingimustes.

**CERCS:** T180 Telekommunikatsioonitehnoloogia; T181 Kaugseire; T191 Kõrgsagedustehnoloogia, mikrolained

**Märksõnad:** passiivradar, bistatic radar, *LTE*, simuleerimine

## Simulating LTE-based passive radar

Author of this master's thesis researched passive radars. This includes describing principles, describing existing systems and investigating simulating opportunities.

Thesis gives an overview of geometrical properties of passive radar and its pros and cons. Suitability of LTE technology for passive radar is investigated and some experiments are discussed where LTE-based passive radar was able to detect objects under controlled conditions.

Different parts of passive radar were investigated for simulating purposes. Author developed tools to simulate parts of the system which would help simplify development of real passive radar systems under ideal circumstances.

**CERCS:** T180 Telecommunication engineering; T181 Remote sensing; T191 High frequency technology, microwaves

**Keywords:** passive radar, bistatic radar, *LTE*, simulating

# Sisukord

Resümee/Abstract.....	2
Jooniste loetelu.....	5
Tabelite loetelu .....	6
Valemite loetelu.....	7
Lühendid, konstandid, mõisted .....	8
1 Sissejuhatus .....	9
2 Kirjanduse Ülevaade .....	11
2.1 Passiivradar ja selle olemus.....	11
2.2 Passiivradari parameetrid .....	14
2.2.1 Tööulatus ja selle lahutusvõime .....	14
2.2.2 Doppleri efekt ja selle lahutusvõime .....	14
2.3 Valgustajate valik .....	15
2.4.1 LTE signaali määramatuse funktsioon .....	16
2.4.2 LTE võrdlus teiste tehnoloogiatega .....	17
2.5 Eksperimentaalsed lahendused.....	19
2.6 5G-NR tehnoloogia potentsiaal.....	19
3 Metoodika.....	21
3.1 Passiivradari simuleerimine .....	21
3.2 Simuleerimise tööriistad.....	22
4 Tulemused .....	23
5 Tulemuste analüüs ja järeldused.....	35
5.1 Raadiolingi bilanssi arvutus .....	35
5.2 Radari ristlõike järgi objekti määramine ja bistaatiline määramatus .....	35
5.3 Valgustaja levikaardi loomine .....	36
6 Kokkuvõte .....	37
Viited .....	39
Lisad .....	41
Lisa 1 – bilansi_arvutus.mlx .....	41
Lisa 2 – rcs_arvutus.mlx .....	45

Lisa 3 – leviulatus_arvutus.mlx.....	47
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	48

# Jooniste loetelu

Joonis 1. Bistaatilise passiivradari geometria.....	11
Joonis 2. Väljalõige määramatuse funktsioonist null kauguse pealt. [6] .....	16
Joonis 3. Väljalõige määramatusfunktsioonist null Doppleri sagedusnihke pealt. [6] .....	17
Joonis 4. Raadiolingi bilansi arvutamise väljundi näide .....	23
Joonis 5. Raadiolingi bilansi arvutamine lennuteekonna iga punkti kohta. Kaardil näitab punkti värv signaali tugevust vastuvõtjas. Täpsed parameetrid leiab lisast 1. ....	24
Joonis 6. Vasakul kera tüüpi objekt, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.....	25
Joonis 7. Vasakul ruudu kujuline plaat, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.....	26
Joonis 8. Vasakul on lennuki tüüpi objekt, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal. ....	27
Joonis 9. Vasakul on drooni tüüpi objekt, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.....	27
Joonis 10. Üks võimalik LTE tugijaama rakkude jaotus.....	29
Joonis 11. Väljavõte Tele2 interaktiivsest levikaardist Tartu piirkonnas, kus sinise värvi erinevad toonid märgivad signaali tugevust. [21] .....	30
Joonis 12. Väljavõte Cellmapper veebilehelt, kus aktiivsena on Tele2 tugijaam [22]. Roheliselt on märgitud kasutaja andmete põhjal koostatud sektorid sagedusel 857 MHz töötava sidekanali jaoks.[22].....	31
Joonis 13. Cellmapper keskkonnas raku kohta saadaval olevad andmed. [22] Valitud Cell 1 raku kasutati joonisel 5 tehtud katselennul.....	32
Joonis 14. Raadiolevi katvuse analüüs Matlab tarkvaraga kasutades Tele2 Elva tugijaama. ..	34

## Tabelite loetelu

Tabel 1. Passiivradari eelised ja puudused .....	13
Tabel 2. Võrdlus kommunikatsioonitehnoloogiate vahel kasutades kauguse ja kiiruse lahutusvõimet. [6].....	18
Tabel 3. Erinevate telekommunikatsiooni tehnoloogiate raadiotehnilised parameetrid. Kaod arvestatud vabaruumi kohta kui olemas on otsenähtavus. [4].....	18
Tabel 4. Tele2-st saadud informatsioon Tõravere Observatooriumi valgustavate tugijaamade kohta.....	32

## Valemite loetelu

Valem 1. Passiivradari kauguse lahutusvõime valem. [6].....	14
Valem 2. Doppleri sagedusnihke valem. ....	14
Valem 3. Doppleri sagedusnihke lahutusvõime valem.....	15
Valem 4. Bistaatiline radari põhivalem [4].....	23

# Lühendid, konstandid, mõisted

LTE – *Long Term Evolution* on standard juhtmevaba mobiilside pakkumiseks lõpptarbijale.

3G – kolmanda generatsiooni mobiilside standard

4G – neljanda generatsiooni mobiilside standard

5G – viienda generatsiooni mobiilside standard

3GPP – *3rd Generation Partnership Project* on telekommunikatsiooni standardeid väljatöötavaid organisatsioone ühendav katusorganisatsioon.

NR – *New Radio* on 5G jaoks väljatöötatud standard juhtmevaba mobiilside pakkumiseks lõpptarbijale.

VHF – *Very High Frequency* on raadiosageduste vahemik elektromagnetilisel spektril 30 MHz kuni 300 MHz.

UHF – *Ultra High Frequency* on raadiosageduste vahemik elektromagnetilisel spektril 300 MHz kuni 3 GHz.

OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* on ortogonaalsetel sagedustel põhinev ühispöördus meetod.

WiMAX – *Worldwide Interoperability for Microwave Access* on juhtmevaba tehnoloogia kiire internetiühenduse pakkumiseks üle pika vahemaa.

MIMO - *multiple-input and multiple-output* on meetod raadiolingi läbilaskevõime suurendamiseks.

FDD - sagedusjaotusega dupleksimine on sidemeetod, milles on saate- ja vastuvõtukanal sagedusega eraldatud.

TDD - ajajaotus-dupleksimine on sidemeetod, mis kasutab saate- ja vastuvõtukanalina üht ja sama kanalit, eraldades need teineteisest erinevate ajapiludega.

GPX failitüüp – faili formaat GPS andmete hoiustamiseks.

eNB – *Evolved Node B* on riistvara, mis suhtleb otse mobiilivõrgu lõpptarbijate seadmega.

# 1 Sissejuhatus

## 1.1 Probleemi tutvustus

Maailmas tekitavad aina enam probleeme väikesed ilma loata lendavad droonid, mis tihtipeale satuvad keelatud lennualadesse ja võivad tekitada tõsiseid kahjustusi varale ja ohtu elule. Nende tuvastamiseks nii tsiviil- kui ka militaarmaailmas on vaja üha efektiivsemaid vahendeid. Sellised vahendid võivad olla kallid ja nende kasutamine piiratud. Ebaseaduslike lennudevahendite tuvastamiseks on mitmeid variante:

- Optiline tuvastamine – heade tingimuste korral suudab anda väga täpseid tulemusi, kuid on tugevalt mõjutatud ilmast ja valguse tingimustest. [1]
- Akustiline tuvastamine – Passiivne kuulaja, mis tuvastab hästi lähiümbruses viibivaid droone. Süsteemi ei tööta müraarikastes keskkondades. [1]
- Raadiosignaali analüüs – analüüsib raadiosignaale keskkonnas ja tuvastab selle alusel ümbruskonnas viibivaid droone. Meetod ei suuda tuvastada droone, mis on autonoomsed või kasutavad kitsa kiirega suundantenni. [1]
- Traditsiooniline radar – suure tööulatusega ja suudab jälgida väga suurt hulka õhuruumist samaaegselt. Samas ei suuda meetod eristada linde droonidest ja vajab tööks osa raadiospektrist. [1]

Selle töö raames uuris autor passiivradarisüsteemi kasutamist objektide tuvastamiseks. Passiivradar töötab sarnaselt traditsioonilisele radarile, kuid pakub teatud eeliseid, mis teevad sellest hea kandidaadi just väiksemate ja lähipiirkonnas olevate droonide tuvastamiseks. LTE tehnoloogia esmane standard avalikustati 3GPP organisatsiooni poolt algselt 8. väljalaskega. Tegu oli 3G tehnoloogia edasiarendusega, kuid ei vastanud veel defineeritud 4G nõuetele. 3GPP 10. väljalaskes kirjeldatud LTE *Advanced* ehk LTE edasiarendust nimetatakse 4G tehnoloogiaks. Ka 5G tehnoloogia põhineb LTE tehnoloogial, kuna *New Radio* (lüh NR) tehnoloogia vajab pikemat arendamisaega ja tagasiühilduvus oli oluline uue tehnoloogia turule toomiseks. Selle töö raames kasutatakse LTE tugijaamasid passiivradarisüsteemi osana. [2]

## 1.2 Töö eesmärk ja ülevaade

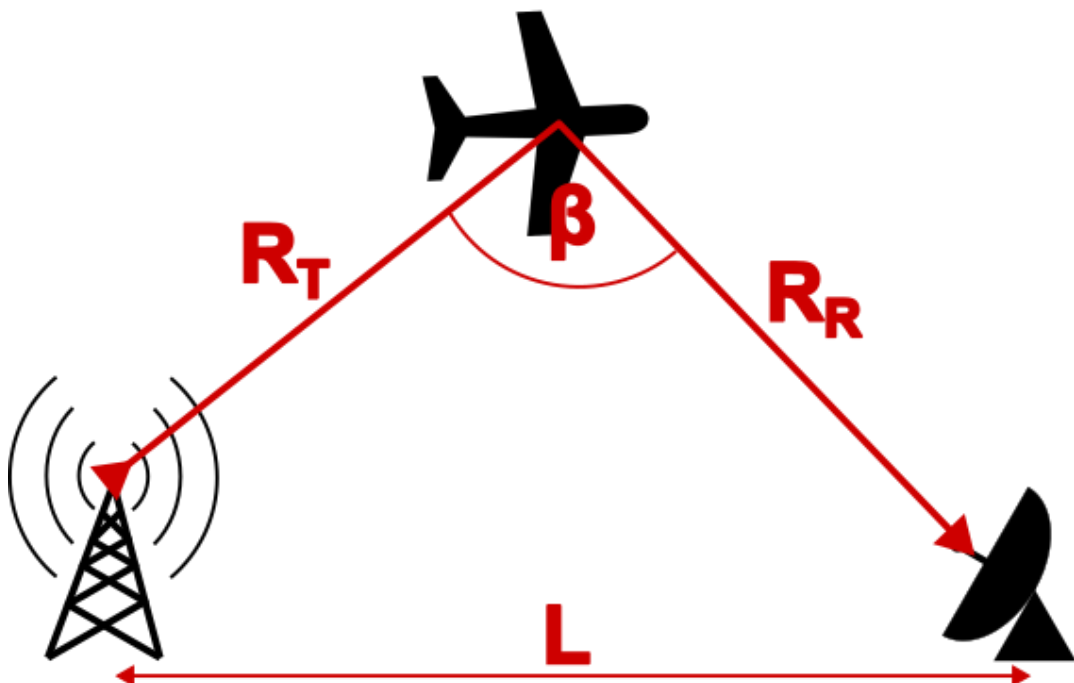
Töö autor osaleb Eesti Kaitseväge Akadeemia elektroonilise võitluse kompetentsikeskuse projektis, mille käigus arendatakse koostöös Tartu Ülikooliga välja kulutõhusat passiivradarisüsteemi [3]. Väljatöötamisel on süsteem, mis võimaldab ideaalsetes

tingimustes tuvastada nii väikelennukeid kui ka mehitamata lennuvahendeid. Kulude säästmiseks ei ole alati mõistlik kõike kontrollida eksperimendi teel kontrollida. Selle töö käigus tutvus autor passiivradarisüsteemi teooriaga ja olemasolevate süsteemidega, et mõista nende tööd ning töötada välja simuleerimise vahendeid, et lihtsustada kulutõhusa passiivradari arendamist. Arvutisimulatsioonid aitavad kiiremini kontrollida reaalsete mõõtmistulemuste õigsust ja anda arendajale aimu probleemist enne selle tekkimist eksperimendi käigus.

## 2 Kirjanduse Ülevaade

### 2.1 Passiivradar ja selle olemus

Passiivradar on radarisüsteem, mis tuvastab erinevaid objekte ise märkamatuks jäädes. Selline radarisüsteem suudab märkamatuks jääda, kuna kasutab juba eksisteerivaid raadiosaatejaamasid nagu televisiooni, raadioside või mobiilside jaamad. Raadioside saatejaam nii-öelda valgustab objekti ning seda kutsutakse vahel valgustajaks ja passiivradari vastuvõtja võtab vastu objektilt peegeldunud signaali. Passiivradar erineb traditsioonilisest monostaatilisest radarist, sest monostaatiline kasutab ühte antenni nii saatmiseks kui ka vastuvõtmiseks või samas asukohas paiknevat saatjat ja vastuvõtjat. Passiivradarit kutsutakse vahel ka bistaatiliseks passiivradariks, et rõhutada saatja ja vastuvõtja geograafilist eraldatust. Joonisel 1 üks on kujutatud kahedimensionaalne passiivradari geomeetria.  $R_T$  on kaugus raadiosaatja ja objekti ning  $R_R$  on kaugus objekti ja vastuvõtja vahel.  $L$  on kaugus saatja ja vastuvõtja otsesignaali vahel. Nimetatud kauguste asemel kasutatakse vahel ka ajalisi viisist, sest praktikas teisendatakse signaali kaja hilinemisest tulenev viivis vahemaaks. Beeta ( $\beta$ ) objektile langeva ja sealt vastuvõtja suunas peegeldunud signaali omavaheline nurk. [4]



Joonis 1. Bistaatilise passiivradari geomeetria

Eeltoodud bistaatiline geomeetria on paljude reaalseste passiivradarisüsteemide töö aluseks. Niinimetatud bistaatiline paar koosneb raadiosaatjast ja vastuvõtjast. Radarisüsteem

koosneb enamasti mitmetest paaridest, mille mõõtmistulemuste ühildamisel saame määrata otsitava objekti asukohta. Iga vastuvõtja saab mõõta kolme olulist parameetrit otsitava objekti kohta:

1. Objekti bistaatiline kaugus või viivitus, mis on vahe peegeldunud signaali ja otsesignaali vahel ehk  $R_T + R_R - L$ .
2. Objekti liikumisest tekitatud sageduslik Doppleri nihe, millega saame määrata objekti liikumise.
3. Kui kasutusel on suundantenn, siis saab tuvastada ka peegeldunud signaali suuna ja asukohta võib olla võimalik määrata ühe paariga.

Ainuüksi ühe bistaatilise paariga ei ole võimalik määrata otsitava objekti asukohta, kui tegu on ringdiagrammi omavate antennidega raadiosaatjate ja -vastuvõtjatega. Täpse asukohta määramiseks on tarvis vähemalt kolme sellist paari. Kolmemõõtmelises ruumis on objektide asukoht määratud 3 ellipsi ristumiskoha järgi. Mitmest bistaatilisest paarist koosnevat süsteemi kutsutakse multistaatiliseks. Nagu juba mainitud, siis iga paar koosneb saatjast ja vastuvõtjast, kuid kui kasutusel on olemasolevad valgustajad, siis on võimalik moodustada mitmeid paare ühe füüsilise vastuvõtjaga. Seega multistaatiline radarisüsteem võib vajada tööks ainult ühte füüsilist vastuvõtjat. Praktikas on erinevaid võimalikke kombinatsioone palju ja valida tuleb olukorrale sobiv kombinatsioon. [4]

Passiivradari süsteemid võivad üksteisest märkimisväärselt erineda. Radari süsteem võib kasutada nii koostöövõimelisi raadiosaatjaid kui ka mittekoostöövõimelisi. Esimese puhul on passiivradari operaatoril kontroll saatejaama üle ehk on teada täpsed parameetrid raadiosignaali kohta. Teisel ja levinumal juhul on kasutusel signaal ja saatejaam, mis pole normaalolukorras mõeldud passiivradari tööks, kuid praktikas on siiski võimalik paljusid erinevaid signaale ja lainekujusid kasutada passiivradari tööks. [4]

Passiivradariks loetakse ka süsteemi, kus määratakse objekti asukoht sellel paikneva saatejaama kiirguse järgi. Kolm eri punktis paiknevat vastuvõtjat saavad määrata objekti asukohta, sest objektile olev saatejaam kiirgab ja vastuvõtjad saavad võrrelda ajalisi viiviseid, et määrata objekti asukoht. Kõige levinum on sel moodusel lennuvahendite märkamatu tuvastamine. Sellist süsteemi kutsutakse passiivseks saatja jälgijaks (ingl passive emitter tracker). [4]

Passiivradaril on mitmeid eeliseid ja puudujääke, mis on toodud tabelis 1. Kui passiivradar kasutab kommertssaatejaid, siis on enamasti garanteeritud suurepärane katvus, sest saatjad

paigutatakse geograafiliselt kõrgetele kohtadele. Tähele tuleb panna, et katvus on tihti parim maapinna lähedal, sest kommertssaatjad teenindavad maapeal olevaid kliente. See võib mõjutada kõrgel lendavate õhuobjektide tuvastamise võimet. Kasutada saab laia valikut erinevaid saatjaid, millel on erinevad sagedused, seega on kasulik valida sagedus, mille lainepikkus võimaldab paremini tuvastada otsitavat objekti. Kui lainepikkus on võrdne või väiksem kui objekti mõõtmed, siis peegeldub kogu raadiolaine objektilt [5]. Kuna kasutatakse olemasolevaid saatjaid, siis ei vaja passiivradari osa raadiospektrist. See võimaldab vältida litsentseerimisest tingitud lisakulusid. Süsteemi kuludeks on ainult vastuvõtjad ja tarkvara, seega võib passiivradar osutada soodsamaks. Kuna passiivradar ise ei kiirga, siis on sellist süsteemi oluliselt raskem märgata. Samas on passiivradaril ka mõned väga olulised puudused, mis võivad osutada kriitiliseks süsteemi arendamisel. Enamuste passiivradarite puhul on kasutusel raadiosignaali, mis pole optimeeritud radari tööks. Samuti saadavad enamus saatjaid välja katkematu raadiosignaali, erinevalt monostaatilise radarist, kus kasutatakse pulsse või muid lühikese kestvusega signaale. See kõik tähendab, et olulist rõhku tuleb panna raadiosignaali töötlemisele vastuvõtjas. Kuna puudub otsene kontroll saatejaama üle, siis mõjutavad kõik muutused selle töös ka otseselt passiivradari tööd. Passiivradari suureks puudujäägiks on ka pimedad sektorid, mis tekivad radaripildis tingituna selle bistaatilise konfiguratsioonist. Selliseid sektoreid aitab vältida multistaatiline süsteem, mis on geograafiliselt laialdasele alale paigutatud. [4]

Eelised	Puudused
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saatjate suurepärane katvus</li> <li>• Lai valik erinevaid sagedusi</li> <li>• Ei vaja osa raadioside spektrist</li> <li>• Võimalik madalam hind</li> <li>• Nähtamatu ja lihtne peita</li> <li>• Raske segada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimeerimata raadiosignaali</li> <li>• Katkematu signaal</li> <li>• Puudub kontroll saatejaama üle</li> <li>• Pimedad sektorid</li> </ul>

Tabel 1. Passiivradari eelised ja puudused

## 2.2 Passiivradari parameetrid

### 2.2.1 Tööulatus ja selle lahutusvõime

Kuigi teoreetiliselt on võimalik kasutada väga erinevaid olemasolevaid raadiosaatjaid ja -signaale, siis praktikas on valik piiratud. Radarisüsteemi tööks on vajalik piisav kauguse lahutusvõime ja tööulatus. Radari tööulatus sõltub erinevatest omadustest, mis määravad radari raadiolingi bilansi, kuid olulisemaid on saatja saatevõimsus ja teadmine, et madalamatel sagedustel on vabaruumi kaod väiksemad. Viimase tõttu on kõige otstarbekam kasutada VHF ja UHF sagedusi ehk populaarsed passiivradarid kasutavad sagedusi vahemikus 30 MHz kuni 3 GHz. Radarisüsteemi lahutusvõime on toodud valemis 1, kus on kolm muutujat: laine levimiskiirus  $c$ , signaali ribalaius  $B$  ja beeta ( $\beta$ ). Beeta on bistaatiline nurk, mis moodustub saatja ja vastuvõtja vahel kui signaal peegeldub objektist. [4]

$$\Delta r = \frac{c}{2B \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}$$

Valem 1. Passiivradari kauguse lahutusvõime valem. [6]

Traditsioonilise monostaatilise radari kauguse lahutusvõime on määratud radarisignaali parameetritega ja sealhulgas impulssi pikkusega. Passiivradari kauguse lahutusvõime võib väheneda kui otsingualas on mitu objekti, seega on passiivradari kauguse lahutusvõime arvutamises palju rohkem tundmatuid. [4]

### 2.2.2 Doppleri efekt ja selle lahutusvõime

Doppleri efekt lisab raadiosaatja signaalile sagedusnihe ning võimaldab mõõta objekti liikumiskiirust ja suunda kui saatja ja vastuvõtja on statsionaarsed või teame mõlema kiiruse vektoreid. Doppleri sagedusnihe on üks passiivradari mõõtetavatest parameetritest ja see on leitav valemiga 2. Radari puhul on oluline märgata ka võimalikku mikro-Doppleri efekti, mis tekib objekti küljes olevate liikuvate osade tõttu. Kõige levinumaks mikro-Doppleri allikaks on lendava objekti propellerid. [4]

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos\delta \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Valem 2. Doppleri sagedusnihe valem.

Valemis 2 tähistab  $f_D$  Doppleri nihet,  $v$  on objekti radiaalne kiirus bistaatilisel kaugusel,  $\delta$  on nurk bistaatilise nurga nurgapoolitaja ja objekti kiirusvektori vahel ning  $\beta$  on varem mainitud bistaatiline nurk.

Doppleri efektist tingitud sagedusnihke lahutusvõime on otseselt määratud integreerimisakna suuruselt, mida kasutame signaali üle viimiseks sagedusruumi. Suurem aken tagab parema lahutusvõime. [4]

$$\Delta f_D = \frac{1}{T}$$

Valem 3. Doppleri sagedusnihke lahutusvõime valem.

Doppleri sagedusnihke lahutusvõime on  $\Delta f_D$  ja  $T$  tähistab integreerimisaega.

### 2.3 Valgustajate valik

Passiivradari süsteemi olemasolevad raadiosaatejaamad ehk valgustajad võivad kasutada üpris erinevaid tehnoloogiaid. Igal tehnoloogial on omad eelised ja puudused. Üks olulisemaid parameetreid on raadiosignaali võimsustihedus objektile, sest see määrab peegeldunud signaali tugevuse ja mõjutab otseselt radarisüsteemi tööulatust. Samuti mängib suurt rolli ka signaali lainekuju (sh. modulatsiooni tüüp) ja viimaks ka valgustajate geograafiline kattuvus. [4]

Signaali lainekujude sobivuse hindamisel passiivradari töös on kasutusel nende määramatuse funktsioon (ingl ambiguity function). See funktsioon annab hinnangu teoreetilise kauguse ja Doppleri nihke lahutusvõime kohta, visualiseerib võimalikke külglehti ja aitab tuvastada perioodilisusest tingitud määramatust. Enamasti kujutatakse seda spektrogrammil või kolmemõõtmelise graafikuna, kuid kiireks analüüsiks piisab ka ristlõikest. [4]

### 2.4 LTE tehnoloogia

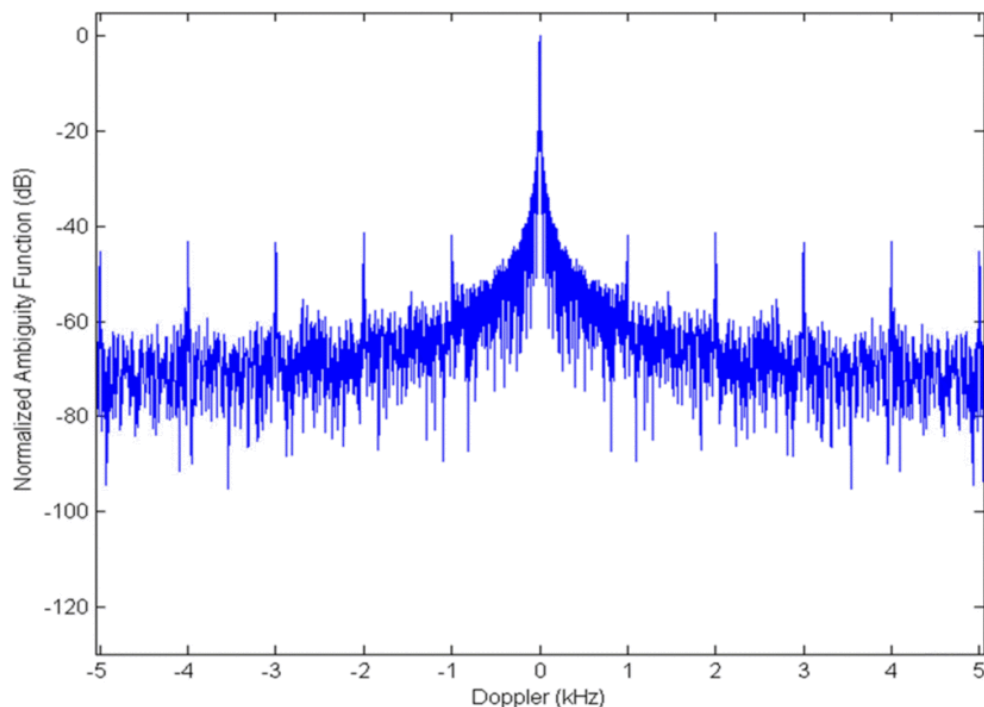
*Long Term Evolution* (lüh LTE) tehnoloogia on laialt kasutusel neljanda generatsiooni juhtmevabades kommunikatsioonivõrkudes. LTE ühendab lõppkasutaja telekommunikatsiooni teenuse pakkuja lairibaühendusega. LTE pakub mitmeid eeliseid, et seda kasutada passiivradarisüsteemis. Tegu on laiaribaliste signaalidega mille ribalaiused on vahemikus 1.4-20 MHz, mis tagab hea kauguse lahutusvõime. Kuni viis signaalikandjat saab liita ühte ja see võimaldab ribalaiust kuni 100 MHz, mis suurendab võimekust veelgi. Samuti kasutatakse OFDMA digitaalset moduleerimisskeemi, mis tagab väiksed külglehed

määramatuse funktsioonis. Lisaks on LTE tehnoloogiat kasutavad nn. valgustajad laialt levinud ja see tagab suurepärase levikuvuse. [2]

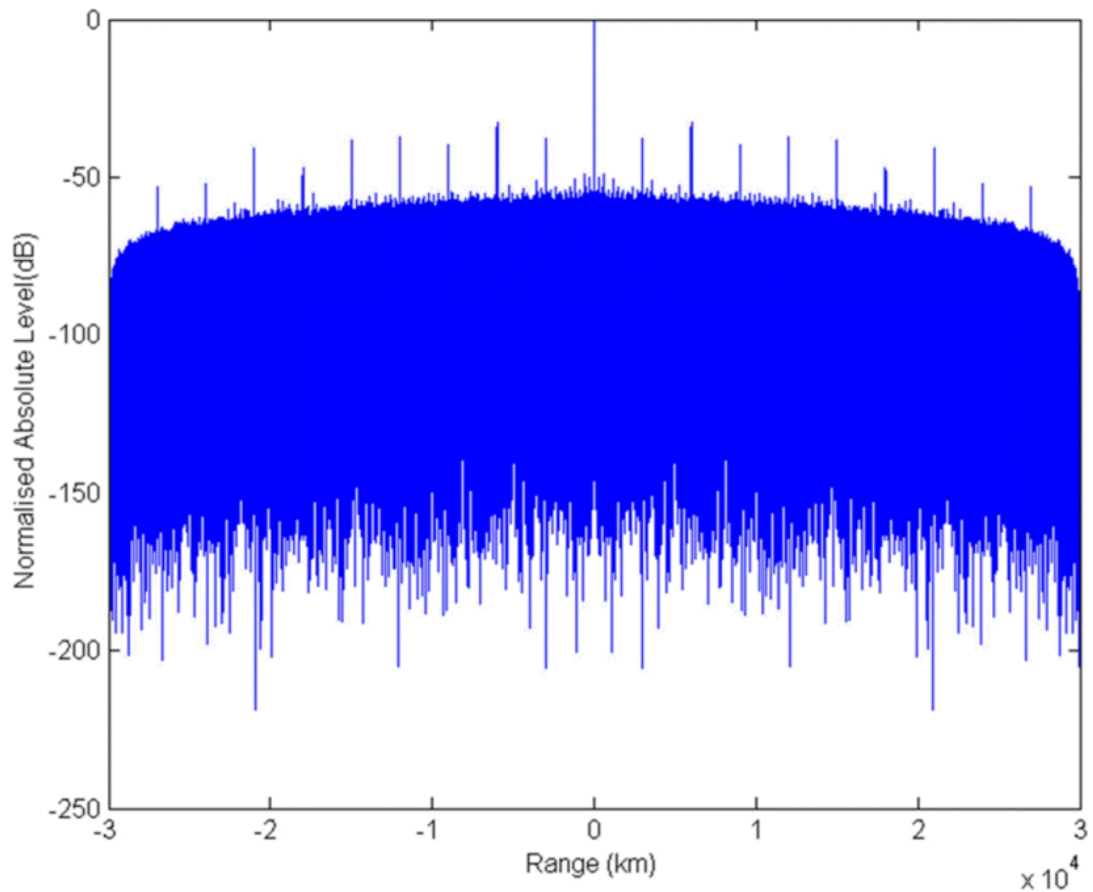
#### 2.4.1 LTE signaali määramatuse funktsioon

Selleks, et määrata LTE tehnoloogia sobivus passiivradarisüsteemile, on kasulik esmalt vaadata, kuidas näeb välja selle määramatuse funktsioon. A. A. Salah jt. leidsid, et LTE sobib suurepäraselt passiivradari jaoks ning määramatus tekitab probleeme alles suurte kaugustel. Kasutati LTE standardist pärinevat signaali lainekuju, kus iga kaader on 10 ms pikk ning koosneb 10-st alamkaadrist. Iga alamkaader on jaotatud kaheks pesaks ning iga pesa sisaldab endas 7 või 6 sümbolit, kuhu on moduleeritud andmed. [6], [7]

Jooniselt 2 on näha, et määramatus on suurim, kui puudub Doppleri sagedusnihe, kuid samuti on iga 1 kHz tagant näha tippe, mis tekivad kuna igas 10 ms kestva kaadri alguses korduvad signaali enda kohta käivad andmed. Joonisel 3 on sama määramatuse funktsiooni väljalõige, kuid teiselt teljelt. Sel juhul on samuti kõrgeim määramatus null kaugusel, kuid samuti on määramatuse tipud iga 3000 km tagant, seega need tipud ei mõjuta meid, sest ühe LTE masti tööulatus on oluliselt väiksem. Seega määramatuse funktsioon ei pane olulist piirangut LTE kasutamisele passiivradari töös. [6]



Joonis 2. Väljalõige määramatuse funktsioonist null kauguse kohalt. [6]



Joonis 3. Väljalõige määramatusfunktsioonist null Doppleri sagedusnihke kohalt. [6]

#### 2.4.2 LTE võrdlus teiste tehnoloogiatega

Võrreldes lahutusvõimeid A. A. Salah jt. uurimistöodes tabelis 2 ilmneb, et LTE tehnoloogia on eelistatud valik passiivradari valgustajana. Siiski need väärtused on saadud ideaalsetes tingimuses, kus bistaatiline nurk on 0 kraadi ehk saatja, vastuvõtja ja otsitav objekt on samal sirgel. Ning vastuvõtja jääb saatja ja objekti vahele. [6]

Valgustav tehnoloogia	Kesksagedus (MHz)	Efektiivne ribalaius (kHz)	Kauguse lahutusvõime (m)	Kiiruse lahutusvõime (m/s)
FM raadio	94.4	50	3000	3.29
DVB-T	505.0	6000	25	0.61
DAB	219.4	220	682	1.41
GSM-900	947.5	81.3	1845	0.33
GSM-1800	1833.6	57.2	2620	0.17
WiFi (802.11b/g)	2437	20000	7.5	0.13
Mobile WiMAX	2118	20000	7.5	0.15
LTE	2635	20000	7.5	0.11

Tabel 2. Võrdlus kommunikatsioonitehnoloogiate vahel kasutades kauguse ja kiiruse lahutusvõimet. [6]

Hugh D. Griffiths jt. toovad oma raamatus välja ka signaali võimuse tihedused etteantud kaugustel, mille kokkuvõtte on toodud tabelis 3, mis annab aimu erinevate tehnoloogiate tööulatuse kohta. LTE pole eraldi välja toodud, kuid saame suurusjärku kui vaatame WiMAX tehnoloogiat, mis sarnaneb enim LTE tehnoloogiale. [4]

Valgustav tehnoloogia	Sagedus	Modulatsioon, Ribalaius	$P_t G_t$	Võimsus tihedus $\Phi = \frac{P_t G_t}{4\pi R_T^2}$
DVB-T	~750 MHz	Digital, 6 MHz	8 kW	-72 dBW/m <sup>2</sup> kui R <sub>T</sub> =100 km
DAB	~220 MHz	Digital, OFDM, 220 kHz	10 kW	-71 dBW/m <sup>2</sup> kui R <sub>T</sub> =100 km
GSM	900 MHz, 1.8 GHz	GMSK, FDMA/TDMA/FDD, 200 kHz	100 W	-71 dBW/m <sup>2</sup> kui R <sub>T</sub> =10 km
WiFi 802.11	2.4 GHz	DSSS/OFDM, 5 MHz	100 mW	-41 dBW/m <sup>2</sup> kui R <sub>T</sub> =10 m
WiMAX 802.16	2.4 GHz	QAM, 1.25-20 MHz	20 W	-88 dBW/m <sup>2</sup> kui R <sub>T</sub> =10 km

Tabel 3. Erinevate telekommunikatsiooni tehnoloogiate raadiotehnilised parameetrid. Kaod arvestatud vabaruumi kohta kui olemas on otsenähtavus. [4]

## 2.5 Eksperimentaalsed lahendused

LTE tehnoloogial põhinevaid passiivradareid pole avalikult palju välja töötatud. Teostatud on eksperimendid, kus on saadud kindlust töövõime kohta. Kuid bistaatilised ulatused nende tööde puhul on siiski väga väikesed, et veenduda süsteemi töös suurematel distantsidel.

Y. Dan jt. suutsid tuvastada DJI Phantom 4 tüüpi mehitamata lennubahendit ligi 200 meetri kauguselt, kusjuures valgustaja oli kõrvalhoone katusel ja kasutatud suundantenni jäi ligikaudu valgustaja ja mehitamata lennubahendi vahele. Seega oli bistaatiline nurk optimaalne. Kasutati kesksagedust 1.8675 GHz ja ribalaiust 15 MHz. [8]

A. Taylor ja D. Poullin töötasid välja passiivradari, mis kasutab LTE valgustajaid [9]. Nende töös suutsid nad tuvastada DJI Mavic 3 mehitamata lennubahendit tuvastada üle 200 meetri kauguselt, kuid töid samas välja, et töö käigus esines probleeme. Elektromagnetiline keskkond oli täidetud tihti rohkema kui kolme süsteemis arvestatud saatja signaaliga. Signaali sümbolite vahelised võimsuse kõikumised mõjutasid oluliselt tuvastamise täpsust. Viimaks tekitas valgustajate signaalide interferents vahel suuremaid sektoreid, kus radar objekti ei näinud. [10]

R. S. A. R. Abdullah jt. arendasid passiivradari süsteemi maismaa sõidukite ja isegi inimeste tuvastamiseks. Nende eksperimendi puhul oli valgustaja vastuvõtjast ainult 400 meetri kaugusel ja nad suutsid edukalt tuvastada liikuvat autot, mootorratast või inimest üle 100 meetri kauguselt. [11]

## 2.6 5G-NR tehnoloogia potentsiaal

5G-NR tähistab viienda generatsiooni raadiotehnoloogiat (ingl Fifth Generation – New Radio), mis ühendab lõppkasutaja telekommunikatsiooni teenuse pakkuja võrguga. Uus tehnoloogia on suuresti ehitatud eelmise põlvkonna mobiilside tehnoloogia 4G peale, et täita selle puudujäägid ja lisada uut võimekust. Raadioside allalink kasutab sarnaselt eelmisele põlvkonnale OFDM modulatsiooni koos tsüklilise prefiksiga. Üleslinki on täiustatud võrreldes eelmisele põlvkonnaga ja kasutusel on DFT-s-OFDM, mis on OFDM diskreetse Fourier teisenduse eelkodeeringuga. 5G-NR tehnoloogia võib kasutada kuni 100 MHz laiust riba ka sagedustel, mis jäävad alla 1 GHz. Neid sagedusi soovitakse standard kasutada maapiirkondades, kus on oluline signaali laialdane kattuvus. [12]

P. Samczyński jt. teostasid eksperimendi, kus kasutati koostöövõimelist raadiosaatejaama, vastuvõtjat ja tuvastatavat objekti. Nad suutsid tuvastada objekti passiivradariga, kuid töid välja mitmeid 5G-NR omadusi, mis muudavad selle rakendamist keerulisemaks võrreldes 4G tehnoloogiaga. [13]

- Raadiosignaalis olevad lõppkasutajale mõeldud andmed omavad olulist rolli signaali parameetrite üle. Kui võrgus ei toimu parajasti andmete vahetamist saadetakse ainult sünkroniseerimissignaali, millest ei piisa passiivradari tööks ja passiivradari süsteem on nii-öelda pime. Nende hinnangul töötab 5G-NR passiivradar ainult siis kui võrgus on pidev ja laiaribaline andmevahetus. [13]
- 5G-NR baasjaamad kasutavad kiiresuunamise ja MIMO tehnoloogiaid, mis tähendab, et antennide suunadiagrammid andmete vahetamise hetkel suunatud mobiilsete terminalide suunas ja objekt, mida tuvastatakse ei ole valgustatud baasjaama poolt. Samuti tähendab antenni peakiire suunamine terminali poole, et tarvis on väiksemat võimsust, mis vähendab oluliselt signaali taset passiivradari vastuvõtjas. [13]
- 5G-NR saab kasutada ka ajajaotus-dupleksimist (ingl lüh TDD), mis tähendab et allalink ja üleslink võivad olla üksteisest eraldatud. Selleks on tarvis isekohanevat algoritmi, sest TDD muster muutub ajas vastavalt andmetele. [13]

## 3 Metoodika

Selles peatükis tuuakse välja milliseid passiivradari süsteemi komponente on kõige otstarbekam simuleerida ja kuidas seda teha.

### 3.1 Passiivradari simuleerimine

Passiivradari süsteemi simuleerimisel tuleb arvestada erinevate parameetrite ja omadustega. Simuleerimine tähendab reaalse maailma imiteerimist või teaduslikku prognoosimist [14]. Ükski mudel või imitatsioon ei suuda arvestada kõigi füüsilise maailma omapäradega, seega on oluline määrata parameetrid või omadused, mida soovitakse simulatsiooniga määrata. Juba mainitud kulutõhusa passiivradari arendamiseks on mõistlik simuleerida süsteemi, sest see võimaldab verifitseerida mõõtetulemusi ja leida süsteemis olevad vead kiiremini kui eksperimenteerides.

Passiivradari süsteemi kohalt on töögrupi jaoks olulisemad parameetrid, mida simuleerida järgmised:

- Valgustajate poolt kiiratud raadiosignaalide kaod, et anda süsteemi arendajale parim ülevaade võimalikust töökaugusest
- Tuvastatava objekti bistaatiline ristlõige ja selle abil objekti tüübi tuvastamine
- Olemasolevate raadiosaatejaamade leviulatuse simuleerimine, et optimeerida vastuvõtjate paigutust.

Käesoleva töö raames uuris autor eelnevalt mainitud parameetrite simuleerimist eesmärgiga pakkuda kulutõhusa radari töögrupile vahendeid oma töö lihtsustamiseks.

## 3.2 Simuleerimise tööriistad

Arvutisimulatsioonide koostamiseks kasutas autor Matlab R2024a tarkvara. Sellel tarkvaral on olemas erinevaid tööriistapakette, mis võimaldavad kiiret arendamist ja võimekust tutvustavaid demonstratsioone koos lähtekoodiga. Käesolevas töös koostamisel kasutati järgnevaid tööriistapakette:

- Antennide tööriista pakett (ingl Antenna Toolbox)
- Kommunikatsiooni tööriista pakett (ingl Communications Toolbox)
- Digitaalse signaalitöötuse tööriista pakett (ingl DSP System Toolbox)
- LTE tööriistapakett (ingl LTE Toolbox)
- Kaardistamise tööriista pakett (ingl Mapping Toolbox)
- Faseeritud antennivõre süsteemi tööriista pakett (ingl Phased Array System Toolbox)
- Radari tööriista pakett (ingl Radar Toolbox)
- Raadiosageduslike süsteemide tööriista pakett (ingl RF Toolbox)
- Sensorite ühildamise ja jälgimise tööriista pakett (ingl Sensor Fusion and Tracking Toolbox)
- Signaalitöötuse tööriista pakett (ingl Signal Processing Toolbox)

Siiski kõiki neid tööriista pakette ei kasutatud lõppversioonis, kuid nende tundma õppimine aitas leida efektiivseima lahenduse.

## 4 Tulemused

### 4.1 Raadiosignaali kadude arvutamine bistaatilises passiivradarisüsteemis

Bistaatilise passiivradarisüsteemi jaoks, mis koosneb ühest saatjast ja vastuvõtjast saab radari võrrandit kirjeldada valemiga 4:

$$\frac{P_R}{P_N} = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \times \sigma_b \times \frac{1}{4\pi R_R^2} \times \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \times \frac{1}{kT_0 B F}$$

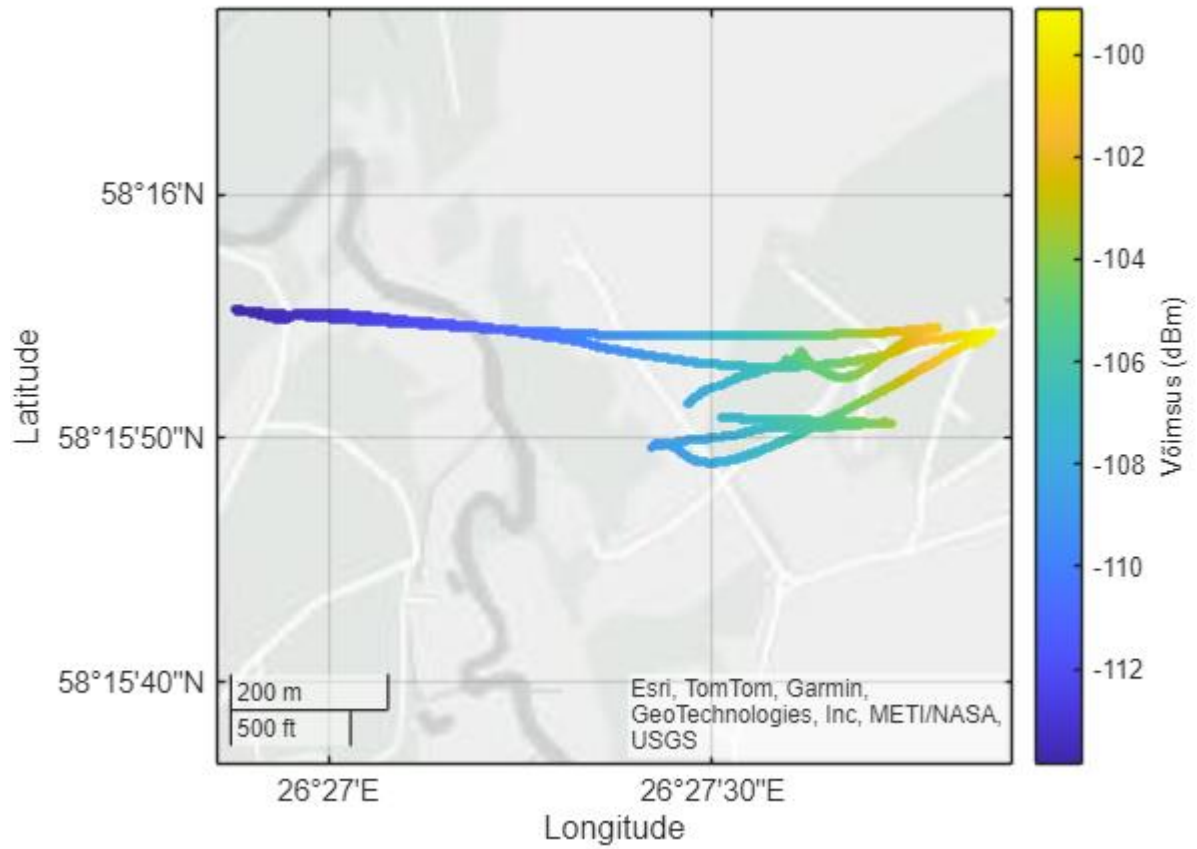
Valem 4. Bistaatiline radari põhivalem [4].

Valemis tähistab  $P_R$  vastuvõetud signaali võimsust,  $P_N$  vastuvõetud müra võimsust,  $P_T$  raadiosaatja ehk valgustaja võimsust,  $G_T$  on saatja antenni võimendus,  $R_T$  on vahemaa saatja ja objekti vahel,  $\sigma_b$  on bistaatiline radariristlõige,  $R_R$  on vahemaa objekti ja vastuvõtja vahel,  $G_R$  on vastuvõtja antenni võimendus,  $\lambda$  on signaali kesksageduse lainepikkus,  $k$  on Boltzmanni konstant,  $T_0$  on keskkonna temperatuur Kelvinites (ingl Reference Noise Temperature),  $B$  on efektiivne ribalaius ja  $F$  on efektiivne mürafaktor. Valem hõlmab endas peamisi passiivradari parameetreid, kuid on sobilik ainult lihtsate arvutuste jaoks ning keerukama süsteemi jaoks on vaja lähtuda süsteemi parameetritest ja selle geomeetriast. [4]

See valem sai aluseks simulatsioonile Matlab keskkonnas, mis arvutab etteantud GPX-tüüpi failis olevate koordinaatpunktides olevad kaod kui ette on antud ka saatja ja vastuvõtja parameetrid. Joonistel 4 ja 5 on näha sellise programmi näidisväljund. Programmi lähtekood on töös lisa 1.

```
Signaali statistika on järgmine:  
Minimaalne: -110.84 dBm; Maksimaalne: -  
96.09 dBm  
Keskmine: -102.90 dBm  
Võimus: 8.012e-14 W
```

Joonis 4. Raadiolingi bilansi arvutamise väljundi näide

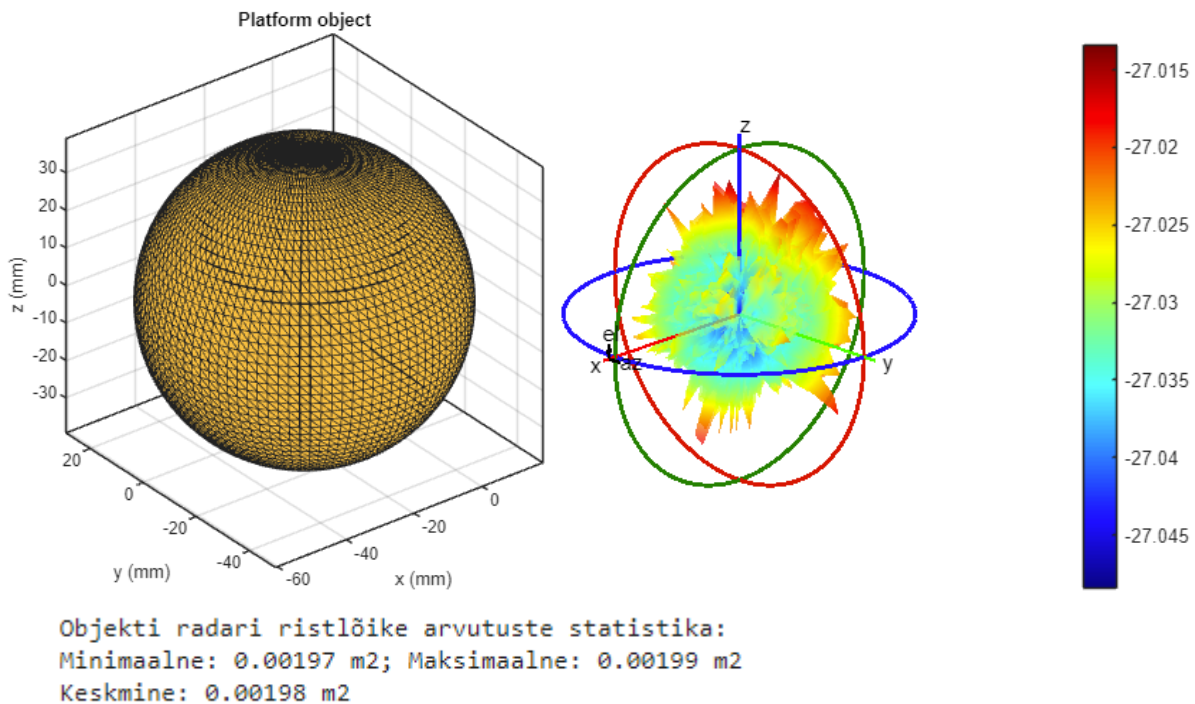


Joonis 5. Raadiolungi bilansi arvutamine lennuteekonna iga punkti kohta. Kaardil näitab punkti värv signaali tugevust vastuvõtjas. Täpsed parameetrid leiab lisast 1.

## 4.2 Radari ristlõike määramine objekti kuju järgi

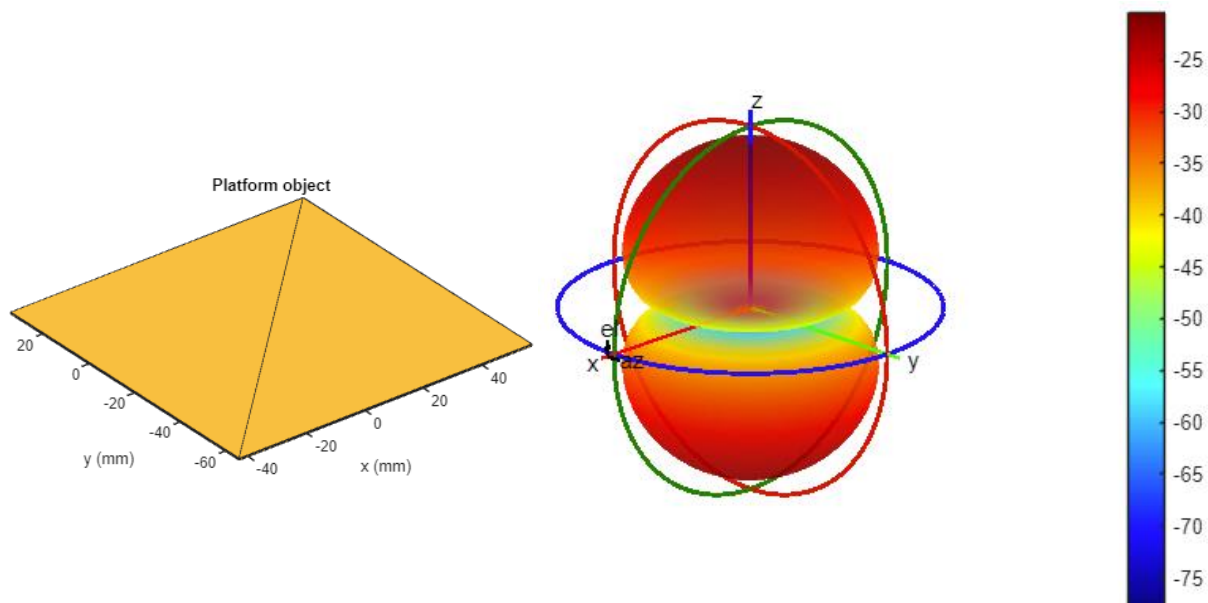
Töö käigus uuriti ka radariristlõiked erinevat tüüpi objektide puhul. Matlab tarkvara radari tööriista pakettis on vahendid, mis aitavad määrata objekti kuju järgi kolmedimensionaalse radari ristlõike (ingl *radar cross section*, lüh RCS). Töö raames võrreldi radari ristlõiget kera, õhukese plaadi, lennuki ja drooni vahel. Arvutusaja lühendamiseks genereeritakse ristlõige iga 5 kraadi järelt. Arvutuse eesmärk on anda ülevaade millistes suundades kiirgus enim levib ja uurida Matlab tarkvara võimekust.

Kera puhul hajub ootuspäraselt kiirgus ühtlaselt kõigis suundades, mis on näha joonisel 6. Kiirgusdiagramm on ideaalis perfektne kera, kuid mudeli puhul omab teravaid tippe, kuna kasutatud „stl“ failis olev objekt koosneb polügoonidest. Kera mudel pärineb veebikeskkonnast CGTrader [15].



Joonis 6. Vasakul kera tüüpi objekt, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.

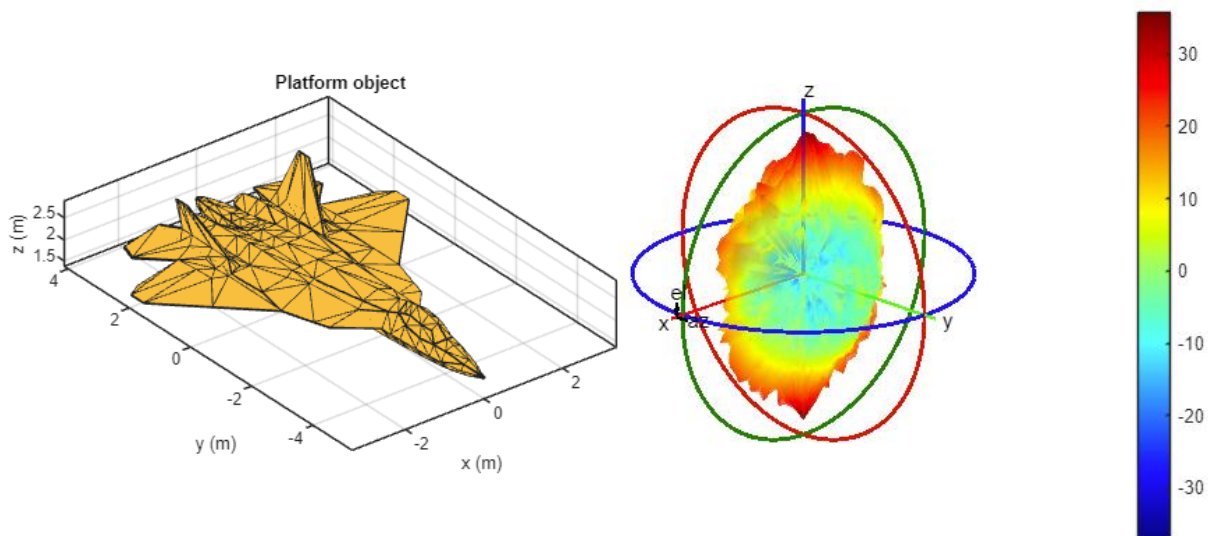
Arvutades kiirguse jaotuse õhukese plaadi jaoks on näha jooniselt 7, et kiirgus peegeldub ainult suuresti plaadi pealt ja alt. Selle ruudukujulise plaadi üks külg on 0.1 meetrit, seega kahe suurema külje pindala 0.01 m<sup>2</sup>. Külgedelt peegeldub tagasi peaaegu null võimsust. Plaadi mudel pärineb veebikeskkonnast Printables [16].



Objekti radari ristlõike arvutuste statistika:  
 Minimaalne: 0.00000 m<sup>2</sup>; Maksimaalne: 0.00909 m<sup>2</sup>  
 Keskmine: 0.00131 m<sup>2</sup>

Joonis 7. Vasakul ruudu kujuline plaat, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.

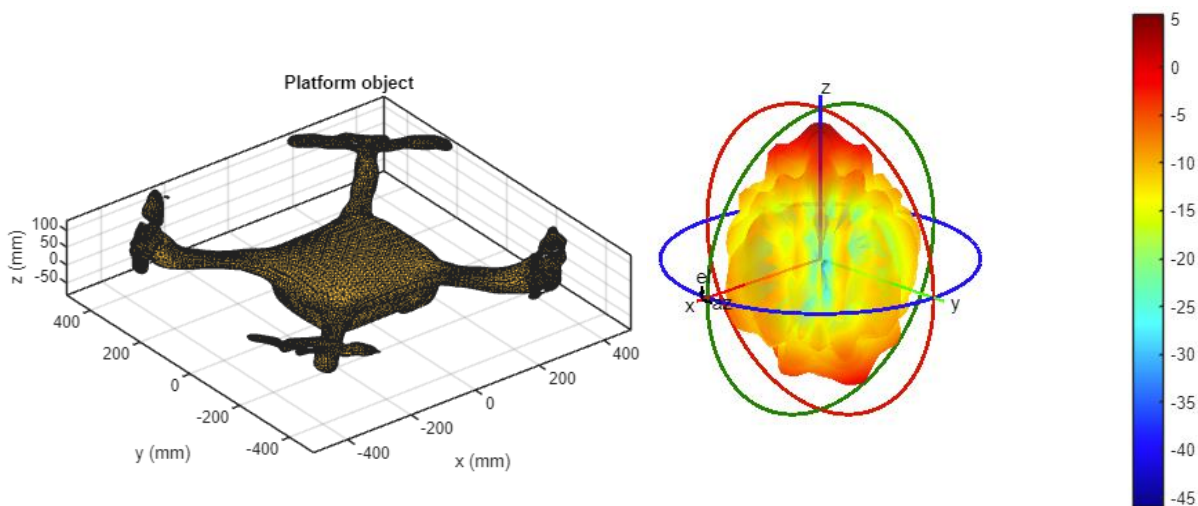
Joonisel 8 oleva lennuki puhul on tegu lapiku kujuga objektiga, seega kiirusdiagramm on suuresti suunatud lennuki alla ja kohale. See tähendab, et objekt on kõige paremini nähtav kui radarisüsteem jälgib seda alt või ülalt. Lennuki mudel pärineb veebikeskkonnast CGTrader [17].



Objekti radari ristlõike arvutuste statistika:  
 Minimaalne: 0.00019 m<sup>2</sup>; Maksimaalne: 3820.38414 m<sup>2</sup>  
 Keskmine: 2.89785 m<sup>2</sup>

Joonis 8. Vasakul on lennuki tüüpi objekt, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.

Joonisel 9 oleva drooni puhul on tegu väikse objektiga, millel on neli haru. Suurimad pinnad on samuti all ja üleval, kuid need ei domineeri oluliselt. Seega meenutab kiirusdiagramm suuresti ümara kujuga kogumit. Drooni mudel pärineb veebikeskkonnast CGTrader [18].

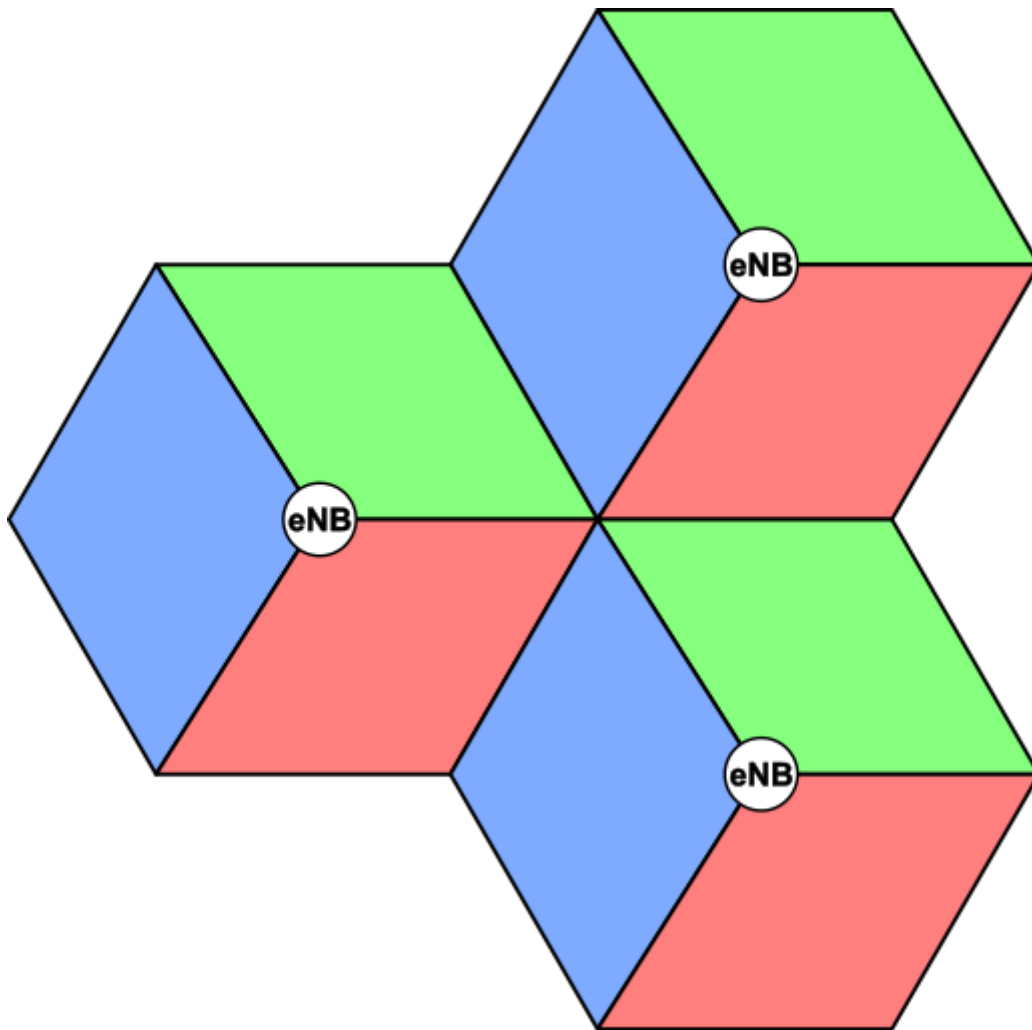


Objekti radari ristlõike arvutuste statistika:  
 Minimaalne: 0.00002 m<sup>2</sup>; Maksimaalne: 3.59718 m<sup>2</sup>  
 Keskmine: 0.10227 m<sup>2</sup>

Joonis 9. Vasakul on drooni tüüpi objekt, mille radari ristlõike kuju on paremal. All on arvutatud numbrilised väärtused objekti radari ristlõike kohta. Paremal paiknev legend kasutab dBsm ühikuid, mis väljendavad radari ristlõiget logaritmilisel skaalal.

### 4.3 LTE valgustajate kaardistamine

Selle töö raames uuriti Eesti Vabariigi territooriumil olevate LTE tugijaamade katvust. Täpse levikaardi jaoks, mille põhjal saaks ka passiivradarit simuleerida, on tarvis vaja teada saatejaamade parameetreid. Iga saatejaam katab teatud geograafilist territooriumi. Saatejaamad ei ole igasuunalised ja nende katvus on jaotatud osadeks, mida kutsutakse rakuks ehk tugijaama teeninduspiirkonnaks. Ideaalsel juhul, mis on kujutatud joonisel 10, katab iga tugijaam kolme rakku. See võimaldab kasutada 120-kraadise suunadiagrammiga suundantenne ja jagada koormust erinevate terminalide vahel. Rakud kasutavad erinevaid kesksagedusi, et vältida kõrvaloleva raku häirimist. Joonisel 10 on üks võimalikust katvus jaotusest kolme tugijaama vahel (ingl Evolved Node B, lüh eNB). Iga värv märgib erineva kesksagedusega geograafilist ala ja alas võib olla kasutusel erinev ribalaius sellepärast, et ribalaius valitakse vastavalt piirkonna nõudlusele. Tihedama asustuse või suurema nõudlusega piirkondades võib ühe tugijaama kohta olla rakke rohkem ning nende kuju optimeeritud sobilikuks. [19]



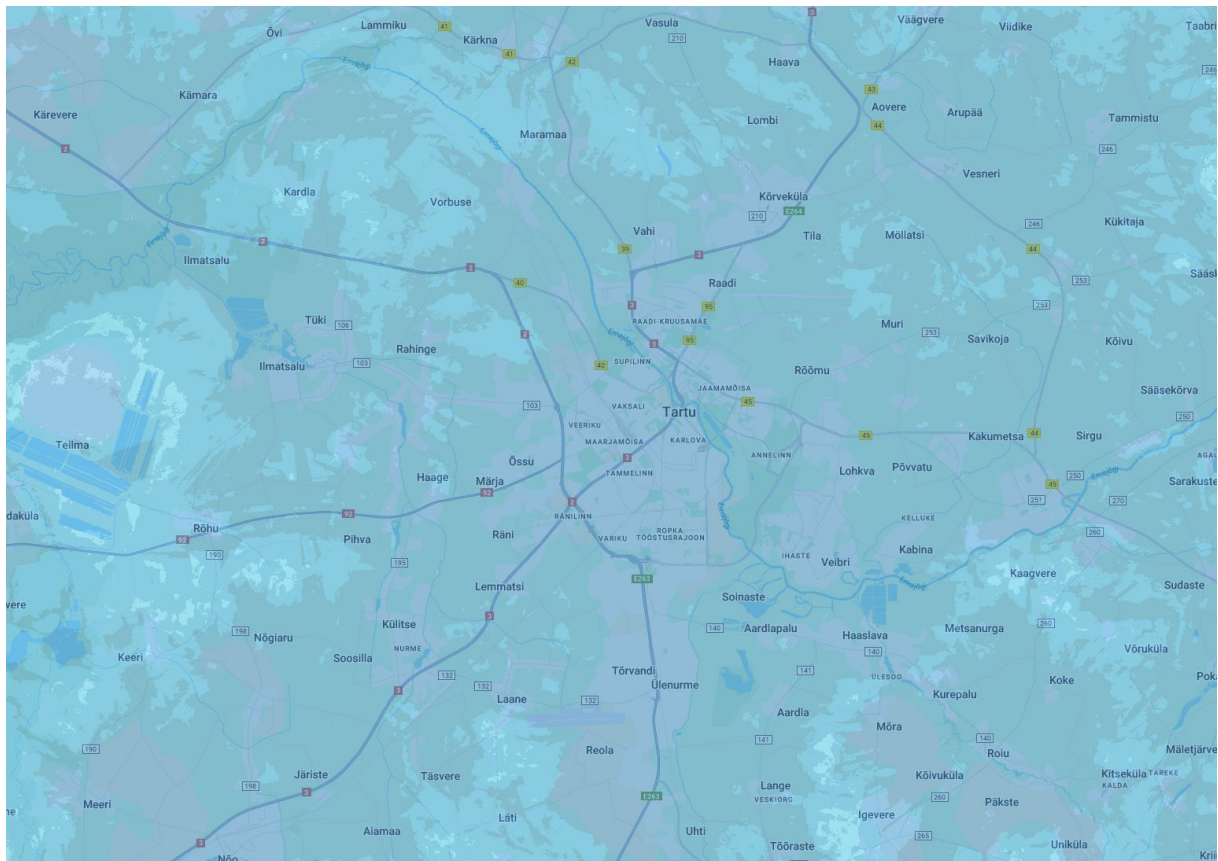
Joonis 10. Üks võimalik LTE tugijaama rakkude jaotus.

Avalikult saadaval olevad tugijaamade andmed ei ole piisavad, et koostada passiivradari jaoks sobiliku täpsusega levikaarti. Eesti Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Ameti kodulehel võib leida mõõtmistulemusi internetikiiruse kohta Eesti eri paigus ja lisatud on ka igas mõõtmispunktis saadaval olnud tehnoloogia, kuid sellest ei saa teha järeldusi raadiosignaali tugevuse või tugijaama kohta. Viimased mõõtmised pärinevad aastast 2022. [20]

Tele2 on ainuke telekommunikatsiooni ettevõtte Eestis, mille kodulehel on olemas nii tavaline kui ka interaktiivne kaart levi kohta (joonis 11), kuid sellelt leiab vaid kolm taset:

- Keskmine levi välistingimustes,
- Väga hea levi välistingimustes,
- Väga hea levi välistingimustes ja siseruumides.

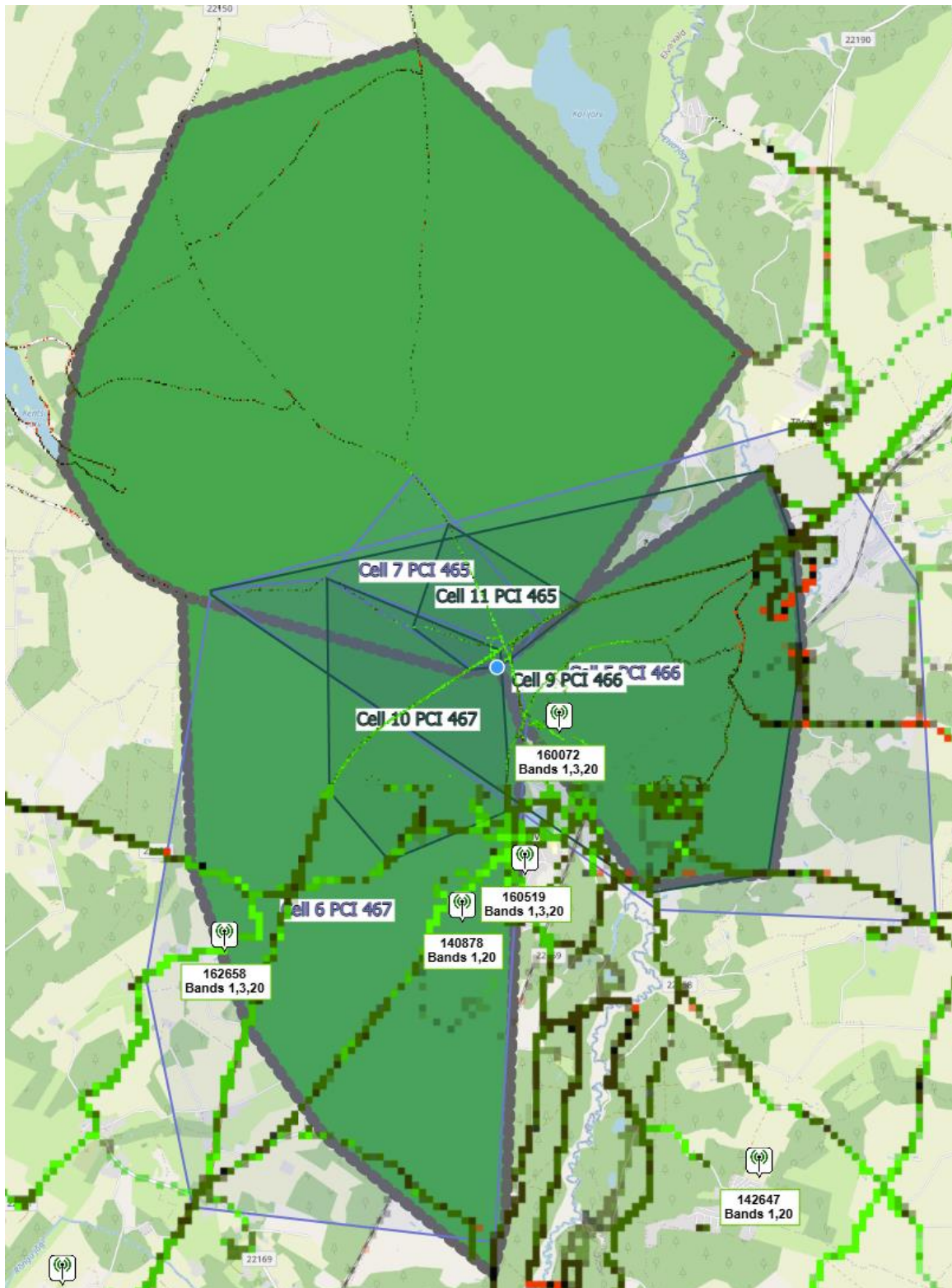
See ei anna jätkuvalt mitte mingit hinnangut tugijaama täpsete parameetrite kohta, kuid teatud juhtudel saab eeldada tugijaama umbkaudset asukohta. [21]



Joonis 11. Väljavõte Tele2 interaktiivsest levikaardist Tartu piirkonnas, kus sinise värvi erinevad toonid märgivad signaali tugevust. [21]

Avalikult saadavalolevaid kõige täpsemaid parameetreid mobiilside tugijaamade kohta pakub Cellmapper veebilehekül, millelt leiab erinevate saatejaamade täpsed asukohad ja isegi individuaalse raku parameetrid. Joonisel 11 on väljavõte Cellmapper veebilehelt, kus on aktiivsena valitud Tartu-Valga maantee ääres paiknev tugijaam, mis toimis valgustajana joonisel 5 toodud katselennul. Näha on kõik kaardistatud rakud ja joonisel 9 on näha raku parameetrid, mida lehekülj samuti pakub. Selle rakenduse suurim puudujääk on andmete robustsus ehk kuna andmed kogutakse telefonirakenduse kasutajate signaali kogudes, siis on hästi kaardistatud ainult maanteed ja tiheasustusega alad. Maapiirkondades on kaardistatud

ainult üksikud alad. Need efektid moonutavad rakkude kuju ja ei anna siiski piisavalt head ülevaadet, et luua reaalne levikaardi mudel. [22]



Joonis 12. Väljavõte Cellmapper veebilehelt, kus aktiivsena on Tele2 tugijaam [22].

Roheliselt on märgitud kasutaja andmete põhjal koostatud sektorid sagedusel 857 MHz töötava LTE sidekanali jaoks.

Cell 1	
Cell Identifier	35954945
System Subtype	LTE
PCI	466 (155/1)
Bandwidth	10 MHz
EARFCN	6400
Maximum Signal (RSRP)	-66 dBm
Direction	S (191°)
Max / Avg DL Speed	39.Mbps / .15.Mbps
Max RSRQ	-6 dB
Max SNR	19 dB
First Seen	9.5.2017
Last Seen	23.3.2025
Actions	• <a href="#">Go to Cell</a>
Uplink Frequency	857 MHz
Downlink Frequency	816 MHz
Frequency Band	EU Digital Dividend (B20 FDD)

Joonis 13. Cellmapper keskkonnas raku kohta saadaval olevad andmed. [22] Valitud Cell 1 raku kasutati joonisel 5 tehtud katselennul.

Töö käigus tehti ka päring Tele2-le, et saada täpsemaid andmeid tugijaamade kohta. Päringus küsiti milliste tugijaamade peakirte suundade ja kiirusvõimsuste kohta.

Tugijaama nimi	Asukoht	Kirte peasuunad	Kiirusvõimsus
Elva TJ	58.240657N, 26.405549E	80°, 230° ja 340°	LTE 800/1800/2100@40W
Nõo TJ	58.281665N, 26.509706E	220°	LTE 800/1800/2100@40W

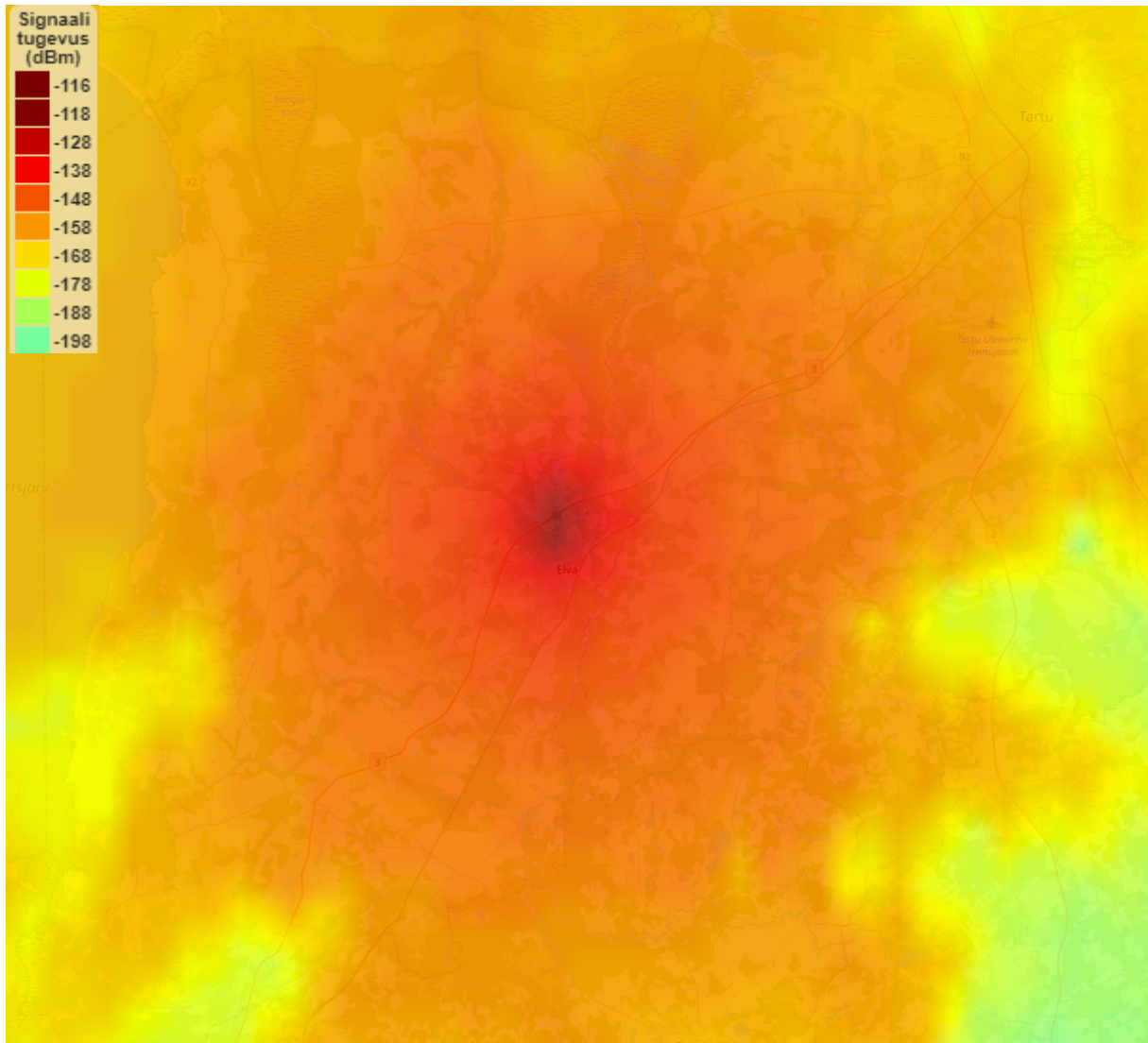
Tabel 4. Tele2-lt saadud informatsioon Tõravere Observatooriumi valgustavate tugijaamade kohta.

Antud andmete põhjal koostati Matlab tarkvara kasutades koostada mudel, mis annab infot LTE signaali levimise kohta. Koostatud mudel joonisel 13 kasutab V-kujulist dipool antenni, et luua mõlema tugijaama jaoks igasuunaline antenni suunadiagramm. Mudelis joonisel 14 arvutatakse Tartu-Valga maantee ääres paikneva Tele2 tugijaama teoreetiline tööulatus ideaalsetes tingimustes passiivradarisüsteemis. Arvutuse lihtsustamiseks tehti järgmised eeldused:

- Reaalsuses on mõlema antenni tugijaama ala kaetud kolme 120-kraadise sektorantenniga, mis annab signaalile suurema võimenduse. Mudel kasutab V-kujulist dipool antenni.
- objekti ristlõige on fikseeritud konstant. Kasutame joonisel 9 oleva drooni keskmist ristlõiget  $0.1 \text{ m}^2$ .
- Bistaatilise geomeetria lihtsustamiseks paigutame vastuvõtja alati 2 km kaugusele objektist endast.
- Tugijaam, passiivradari vastuvõtja ja tuvastatav objekt asuvad samal sirgel. Vastuvõtja paikneb tugijaama ja objekti vahelisel lõigul.

Joonisel 14 on näha levi katvus ja signaalitugevus vastuvõtjas peale objektilt peegeldumist. Iga värvitud punkt on objekti võimalik asukoht. Näiteks kindlat tooni kollast värvi ala punkt tähistab objekti võimalikku asukohta ja värv tähendab sellest 2 km kaugusel asuvasse vastuvõtjasse jõudva signaali taset. Joonis 14 võimaldab visualiseerida radarisüsteemi pimekohti, sest kasutab Longley-Rice levimudelit, mis võtab arvesse vabaruumi kadu, keskkonna difraktsiooni, maapinna ja atmosfääri peegeldusi ning ka troposfääris hajumist [23].

Maksimaalne signaali tase on  $-116 \text{ dBm}$  ja kui soovitakse suuremat tööulatust saavutada tuleb suurendada vastuvõtja tundlikust kuni soovitud tasemeni.



Joonis 14. Raadiolevi katvuse analüüs Matlab tarkvaraga kasutades Tele2 Elva tugijaama.

## 5 Tulemuste analüüs ja järeldused

### 5.1 Raadiolingi bilanssi arvutus

Kadude arvutamise programm suutis edukalt täita oma eesmärgi ja see lihtsustab kulutõhuga passiivradarisüsteemi väljatöötava töögruppi edasist tulemuste kontrollimist. Arvutuste täpsemaks muutmiseks saab programmile lisada täpsemad saatja ja vastuvõtja parameetrid nagu antennide suunadiagrammid ja täpsed võimsused. Samuti tuleks täpsema tulemuse saamiseks lisada süsteemi ka müratase. Viimaks on võimalik teha programm, mis võtab arvesse täpsed passiivradari parameetrid ja suudab simuleerida süsteemi täielikult ning väljastada kasutajale objekti tuvastamise tõenäosuse.

### 5.2 Radari ristlõike järgi objekti määramine ja bistaatiline määramatus

Radari ristlõiget on võimalik modelleerida erinevate omaduste järgi. Selles töös modelleeriti radari ristlõiget ainult objekti kuju ja sageduse järgi. Reaalsuses on vaja arvestada ka pindade elektriliste omadustega.

Töös leiti radari ristlõike monostaatilise juhu jaoks, kus tugijaam, vastuvõtja ja objekt asuvad samal sirgel ja vastuvõtja paikneb tugijaama ja objekti vahel. Bistaatilisel juhul sõltub ristlõige suuresti bistaatilisest nurgast, mis on tingitud süsteemi osade geograafilisest eraldatusest.

Objektideks olid veebikeskkondadest hangitud stl-tüüpi failid. Objekti detailsus ehk kui mitmest polügoonist see koosneb määrab arvutatud radari ristlõike täpsuse eriti keerukate omadustega objektide puhul. Plaadi puhul koosneb üks külg vaid kahest polügoonist ja radari ristlõige moodustub kerakujuline ning ilma teravate tippudega. Samas kera puhul on ootuspärane, et ka peegelduv kiirgus on kera, kuid objekti omapärade tõttu on see teravate tippudega, mis jäävad kitsasse vahemikku.

Arvutuste tulemusel saadi tugijaama signaali objektilt hajumise kuju ja ka ristlõike ulatus koos keskmise väärtusega. Tarkvara arvutas väärtused ootuspäraselt. Ainsad väärtused, mis tekitavad kahtlust on lennuki ja drooni maksimaalsed väärtused. Need on oluliselt suuremad objekti enda mõõtmetest. Objekti enda kuju võib kere kuju tõttu toimida võimendina radarisignaalile.

Passiivradari puhul on väga oluline bistaatiline nurk, sest see määrab otseselt peegeldunud signaali võimsuse ja seega ka radarisüsteemile nähtava ristlõike. Bistaatilise passiivradari

mõõtmistest saab tuletada radari ristlõike kasutades bistaatilise passiivradari põhivalemit (Valem 4). Kuna bistaatiline radariristlõike sõltub väga suuresti radarisüsteemi enda geometriast ja tuvastatava objekti asendist, siis on selle järgi objekti tüübi määramine keeruline. Doppleri nihke abil saame leida kiiruse ja aitab määrata objekti klassi, sest erinevad lennuvahendid liiguvad väga erineva kiirusega. Samuti saab teha eeldusi asendi kohta, kuid see suurendab määramatust objekti tüübi määramisel. Paigal seisva objekti kohta on äärmiselt keeruline anda hinnangut objekti tüübi kohta, sest pole infot selle umbkaudse asendi kohta.

### 5.3 Valgustaja levikaardi loomine

Töö käigus selgus, et töökindla tugijaamade leviulatuse kaardi loomiseks on vajalikud lähteandmed otse telekommunikatsiooniteenuse pakkujalt, sest avalikes allikates olev info on puudulik ja võib olla teatud juhtudel aegunud. Avalikes allikates olevate andmetega on võimalik koostada kaart tugijaamade asukohtadest ja rakkude mõnedest parameetritest. Täpsete suundade jaoks tuleb teostada vaatlus ja võimsuste jaoks täiendavaid mõõtmisi. Samas vastas Tele2 päringule ja andis lihtsamaid andmeid tugijaama kohta. Täpsemad andmed võivad olla konfidentsiaalsed. Edasise sammuna oleks võimalik kombineerida Cellmapper-i ja ametlike allikate andmed, et saada parem levikaart koos rohkemate tugijaamadega. Passiivradari geometria tõttu objekti, tugijaama ja vastuvõtja vahel sõltub tuvastusulatus tugevalt tegelikest asukohtadest. Iga tugijaama kohta on võimalik palju erinevaid vastuvõtja asukohti, mistõttu muutub raadiolingi bilanss ja seeläbi ka tööulatus. Samuti tuleb edasiarenduses arvestada ka võimalusega, et otsesignaal jõuab tuvastamiseks mõeldud vastuvõtjasse lisaks referents antennile, mistõttu toimub üleküllastamine ja passiivradaril ei suuda mingi suurusega sektorist objekte tuvastada. Täpne sektori suurus sõltub kasutatud antennide suunadiagrammidest ja saadetavastest võimsustest.

## 6 Kokkuvõte

Magistritöö käigus uuriti passiivradari arendamise teoreetiliste piirangute kohta. Selleks kasutati erinevaid allikaid, mis räägivad nii lihtsast passiivradarist, kuid ka radarisüsteemist, mis kasutab mobiilside tehnoloogiat LTE enda kasuks. Varasemad uuringud kinnitavad, et LTE on sobilik tehnoloogia passiivradari tööülesannete täitmiseks, kuid eksperimendid piirduvad lühikese tööulatusega. Samuti uuriti uuema tehnoloogia 5G-NR kasutamist passiivradarisüsteemis, mis on parameetrite poolest parem kui LTE, nagu näiteks suurem ribalaius, kuid uue tehnoloogia kasutab võtteid, mis muudavad rakendamise raskeks.

Passiivradarisüsteemi arendamise lihtsustamiseks töötas autor välja tarkvaralised vahendid, mis võimaldavad kontrollida reaalse süsteemi tööd ja valideerida mõõtmistulemusi.

Esimene selline vahend võimaldab süsteemi arendajal näha radarisignaali bilanssi, et teha kindlaks kas probleem on süsteemi tundlikkusega või esineb mõni muu probleem. Programm võtab sisendiks testlennu GPX-tüüpi logifaili ja väljastab iga lennu punkti kohta raadiolingi bilanssi kui teada on otsitava objekti radari ristlõige.

Teine vahend on erinevate objektide ristlõigete analüüsimiseks. Matlab tarkvaras koostatud programm suudab arvutada radari ristlõike ideaal juhu jaoks kui passiivradari geomeetria sarnaneb monostaatilise juhuga. Kasutajale väljastatakse kolmemõõtmeline diagramm, kus on näha igast suunast tuvastav radari ristlõige logaritmisel skaalal dBsm ühikutes. Samuti antakse kasutajale ka info minimaalse, maksimaalse ja keskmise radari ristlõike kohta.

Kolmas vahend annab kasutajale informatsiooni kui kaugelt suudab passiivradarisüsteem tuvastada objekti ideaalsel juhul kui teada on süsteemi tundlikkus. Vahendi väljatöötlemisel uuriti vabavarana saadaval olevate tugijaama andmete kohta ja tehti päring mobiilside teenuse pakkuja, kust saadi täiendavaid andmeid.

Edasise sammuna on võimalik vahendeid edasi töötada, et need töötaks ka mitte ideaalsetel juhtudel ja arvetaks rohkem töö teooria osas kirjeldatud passiivradari omadustega.

# Tänuavaldused

Töö teiseks eesmärgiks on tekitada juurde eestikeelset kirjandust passiivradari teemal. Hetkel olemasolev kirjandus internetis on ainult uudisartiklid või definitsioon. Autoril ei õnnestunud leida avalikult saadaval olevat kirjandust, mis kirjeldaks passiivradari tööpõhimõtte lihtsalt lahti.

Autor tänab oma lõputöö juhendajaid, kes aitasid mul tööd kohandada vastavaks akadeemilisele standardile ja sisu sobivaks magistritöö tasemele. Täna neid ka panustatud töövälise aja eest, mis aitas mind meeletult.

Viimaks tahan ka avaldada tänu muudele inimestele, kes on aidanud mulle tutvustada kaugseiret ja passiivradarit.



## Viited

- [1] Robin Radar Systems, „10 Types of Counter-drone Technology to Detect and Stop Drones Today“. Vaadatud: 16. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.robinradar.com/resources/10-counter-drone-technologies-to-detect-and-stop-drones-today>
- [2] „The 3GPP’s System of Parallel Releases“, 3GPP. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases>
- [3] K. Piip, „Elektroonilise võitluse kompetentsikeskuses on eeter laetud“, *Acad. Mil.*, nr 7, juuni 2024, [Online]. Available at: [https://www.kvak.ee/files/2024/06/academia\\_militaris\\_juuni\\_2024\\_WEB.pdf](https://www.kvak.ee/files/2024/06/academia_militaris_juuni_2024_WEB.pdf)
- [4] H. D. Griffiths ja C. J. Baker, *An Introduction to Passive Radar, Second Edition*. Artech House, 2022.
- [5] „Radar“, *Wikipedia*. 20. mai 2025. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radar&oldid=1291314759>
- [6] A. A. Salah *et al.*, „Feasibility study of LTE signal as a new illuminators of opportunity for passive radar applications“, *2013 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*, dets 2013, lk 258–262. doi: 10.1109/RFM.2013.6757261.
- [7] J. Zyren ja W. McCoy, „Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer, white paper. Freescale Semiconductor“, *Inc 3GPPEVOLUTIONWP Rev 0*, 2007.
- [8] Y. Dan, J. Yi, X. Wan, Y. Rao, ja B. Wang, „LTE-based passive radar for drone detection and its experimental results“, *J. Eng.*, kd 2019, nr 20, lk 6910–6913, 2019, doi: 10.1049/joe.2019.0583.
- [9] C. Klöck, V. Winkler, ja M. Edrich, „LTE-signal processing for passive radar air traffic surveillance“, *2017 18th International Radar Symposium (IRS)*, juuni 2017, lk 1–9. doi: 10.23919/IRS.2017.8008105.
- [10] A. Taylor ja D. Poullin, „UAV Detection Using 4G-LTE-Based Passive Radar“, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, lk 1–18, 2025, doi: 10.1109/TAES.2025.3545000.
- [11] R. S. A. R. Abdullah, A. A. Salah, A. Ismail, F. Hashim, N. H. A. Aziz, ja N. E. Abdul Rashid, „Ground moving target detection using LTE-based passive radar“, *2015 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications (ICRAMET)*, okt 2015, lk 70–75. doi: 10.1109/ICRAMET.2015.7380777.

- [12] „5G System Overview“. Vaadatud: 16. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>
- [13] P. Samczyński *et al.*, „5G Network-Based Passive Radar“, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, kd 60, lk 1–9, 2022, doi: 10.1109/TGRS.2021.3137904.
- [14] „[VSL] Võõrsõnade leksikon“. Vaadatud: 15. mai 2025. [Online]. Available at: <https://arhiiv.eki.ee/dict/vsl/index.cgi?Q=simulatsioon>
- [15] „Sphere ball | 3D Print Model“, CGTrader. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.cgtrader.com/free-3d-print-models/art/other/sphere--4>
- [16] „Big Flat Square for Bed Level ZStep and Extrusion by David’s 3D Projects | Download free STL model“, Printables.com. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.printables.com/model/188437-big-flat-square-for-bed-level-zstep-and-extrusion>
- [17] „AirCraft Stylized Lowpoly | 3D model“, CGTrader. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.cgtrader.com/free-3d-models/aircraft/jet/aircraft-stylized-lowpoly>
- [18] „Drone | CGTrader“. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.cgtrader.com/items/5118896/download-page>
- [19] „4G LTE Cells, Sectors and Antenna Beamforming - 4G LTE Networks“. Vaadatud: 16. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.4g-lte.net/4g-lte-cells-sectors-and-antenna-beamforming/>
- [20] „Sideteenused ja nende kvaliteet | Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet“. Vaadatud: 16. mai 2025. [Online]. Available at: <https://ttja.ee/eraklient/side-ja-meediateenused/sideteenused-numeratsioon/mootmised>
- [21] „5G on siin, et jääda!“ Vaadatud: 16. mai 2025. [Online]. Available at: <https://tele2.ee/leviala>
- [22] „Cellular Tower and Signal Map“. Vaadatud: 13. mai 2025. [Online]. Available at: <https://www.cellmapper.net/map>
- [23] „LongleyRice - Longley-Rice propagation model - MATLAB“. Vaadatud: 23. mai 2025. [Online]. Available at: <https://se.mathworks.com/help/antenna/ref/rfprop.longleyrice.html>

# Lisad

Lisa 1 – bilansi\_arvutus.mlx

## LTE signaali kadude analüüs ehk bilansi arvutamine

Testlennu kuupäev: 19.03.2025

### Impordi lennutrajektor

```
tracks_points = readgeotable("<insert file path here>");

flight_path_shape = geoshape(tracks_points.Shape.Latitude,
tracks_points.Shape.Longitude);

webmap('openstreetmap')

wmline(flight_path_shape, 'Color', 'red')
```

### Saatejaama loomine

```
transmitter = txsite("AntennaHeight", 30, "Name","Tele2 LTE
saatejaam", "Latitude", 58.240657, "Longitude", 26.405549);

transmitter.TransmitterFrequency = 857000000; % Hz

transmitter.TransmitterPower = 20; % W
```

### Vastuvõtja loomine

```
receiver = rxsite("AntennaHeight", 10, "Name", "Tõravere parabool",
"Latitude", 58.265467, "Longitude", 26.465548);

Samuti loo punktid võrgustiku jaoks, et visualiseerida bilansi ka
trajektorilt kõrval.

center_point = [(transmitter.Latitude+receiver.Latitude)/2,
(transmitter.Longitude+receiver.Longitude)/2];

grid_array = zeros(100,100,2);

latitudes = center_point(1)-0.1:0.002:center_point(1)+0.098;
longitudes = center_point(2)-0.2:0.004:center_point(2)+0.196;

for i = 1:length(latitudes)
    for j = 1:length(longitudes)
        grid_array(i,j,1) = latitudes(i);
        grid_array(i,j,2) = longitudes(j);
    end
end
```

## Kauguse arvutamine

```
Earth_ellipsoid = wgs84Ellipsoid("m");
```

## Kaugus saatjast lennu punktideni

```
temp = distance(transmitter.Latitude, transmitter.Longitude, ...
                flight_path_shape.Latitude,
flight_path_shape.Longitude, ...
                Earth_ellipsoid);

distance_tx2tgt = sqrt(temp.^2 + (tracks_points.Elevation-
transmitter.AntennaHeight).^2. '); % Pythagorase for distance with
elevation
```

## Kaugus lennu punktidest vastuvõtjani

```
temp = distance(receiver.Latitude, receiver.Longitude, ...
                flight_path_shape.Latitude,
flight_path_shape.Longitude, ...
                Earth_ellipsoid);

distance_tgt2rx = sqrt(temp.^2 + (tracks_points.Elevation-
receiver.AntennaHeight).^2. '); % Pythagorase for distance with
elevation

Iga võrgustiku punkti bistaatilise kauguse määramine

distance_array1 = distance(transmitter.Latitude,
transmitter.Longitude, ...
                            grid_array(:, :, 1), grid_array(:, :, 2), ...
                            Earth_ellipsoid);

distance_array2 = distance(receiver.Latitude, receiver.Longitude, ...
                            grid_array(:, :, 1), grid_array(:, :, 2), ...
                            Earth_ellipsoid);
```

## Bistaatilise passiivradari põhivalem

$$\frac{P_R}{P_H} = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \cdot \sigma_b \cdot \frac{1}{4\pi R_R^2} \cdot \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{kT_0 B F}$$

## Defineeri konstandid ja muutujad

```
P_t = transmitter.TransmitterPower;
G_t = 5; % dBi
RCS = 0.5; % m^2 Bistatic Radar Cross Section
G_r = 20; % dBi
wavelength = physconst("Lightspeed")/transmitter.TransmitterFrequency;
% m
R_t = distance_tx2tgt;
R_r = distance_tgt2rx;
k = 1.38e-23; % Boltzmann constant
T_0 = 290; % K - Ambient temperature
B = 10e3; % Receiver Effective Bandwidth Hz
F = 0.99; % Effective noise figure = input SNR / output SNR
```

## Arvuta võimsus vastuvõtjas

```
% Calculate regular bistatic equation
temp = (R_t.^2).*(R_r.^2).*((4*pi)^3);
scalars = P_t*G_t*G_r*(wavelength^2)*RCS;
P_r = scalars./temp;

fprintf('Signaali statistika on järgmine:\nMinimaalne: %.2f dBm;
Maksimaalne: %.2f dBm\nKeskmine: %.2f dBm\nVõimus: %.3e mW\n',
min(pow2db(P_r*1e3)), max(pow2db(P_r*1e3)), mean(pow2db(P_r*1e3)),
mean(P_r))

Arvuta võimsus vastuvõtjas iga võrgustiku punkti jaoks

% Calculate regular bistatic equation
temp1 = (distance_array1.^2).*(distance_array2.^2).*((4*pi)^3);
scalars1 = P_t*G_t*G_r*(wavelength^2)*RCS;
P_r1 = scalars1./temp1;
```

## Visualiseeri lennutrajektori iga punkti bilansi kaardil ja ka võrgustik

```
data_tbl = table(tracks_points.Shape.Latitude,
tracks_points.Shape.Longitude, pow2db((P_r*1e3).'));

data_tbl.Properties.VariableNames = ["Laiuskraadid", "Pikkuskraadid",
"Võimsus"];

s = geosscatter(data_tbl,"Laiuskraadid","Pikkuskraadid","filled");
s.Marker = "o";
s.SizeData = 10;
s.ColorVariable = "Võimsus";
c = colorbar;
c.Label.String = "Võimsus (dBm)";

latitudes = reshape(grid_array(:, :, 1), 10000, []);
longitudes = reshape(grid_array(:, :, 2), 10000, []);
power_lvls = pow2db((reshape(P_r1, 10000, [])*1e3));
data_tbl2 = table(latitudes, longitudes, power_lvls);
data_tbl2.Properties.VariableNames = ["Laiuskraadid", "Pikkuskraadid",
"Võimsus"];
s2 = geosscatter(data_tbl2,"Laiuskraadid","Pikkuskraadid","filled");
s2.Marker = "o";
s2.SizeData = 5;
s2.ColorVariable = "Võimsus";
c2 = colorbar;
c2.Label.String = "Võimsus (dBm)";
```

Lisa 2 – rcs\_arvutus.mlx

## Radaristlõike kiirusdiagrammi loomine

```
Clear
tic
```

### Impordi slt-tüüpi failist kuju ja visualiseeri.

```
p = platform;
p.FileName = "object_models/5000_polygon_sphere_100mm.stl";
p.Units = 'm';
figure
show(p)
```

### Arvuta radari ristlõike tugevus iga 5 kraadi tagant nii horisonaal kui ka vertikaalteljel

```
az = 0:5:360;
el = -90:5:90;
parfor k = 1:numel(el)
    rcsval(:,k) = rcs(p,816e6,az,el(k));
end
```

### Visualiseeri kiirusdiagramm

```
phi = az';
theta = (90-el);
MagE = rcsval;
P = PatternPlotOptions;
minValue = min(MagE(:));
maxValue = max(MagE(:));
P.MagnitudeScale = [minValue maxValue];
P.SizeRatio = 1;
P.Transparency = 0.7;
figure
patternCustom(MagE,theta,phi,PatternOptions=P);
minRCS = db2pow(min(MagE(:)));
maxRCS = db2pow(max(MagE(:)));
meanRCS = db2pow(mean(MagE(:)));
medianRCS = db2pow(median(MagE(:)));
medianRCS = 6.6628e+04
```

## Arvuta minimaalne, maksimaalne ja keskmine RCS väärtus

```
fprintf('Objekti radari ristlõike arvutuste statistika:\nMinimaalne:
%.5f m2; Maksimaalne: %.5f m2\nKeskmine: %.5f m2', minRCS, maxRCS,
meanRCS)
toc
```

## Tugijaamade leviulatuse arvutamine

### Tugijaamade sagedus

```
fq = 857e6;
```

### Antenni loomine

```
ant = design(dipoleVee, fq);  
ant.TiltAxis = [0 1 0];  
ant.Tilt(1) = 90;  
pattern(ant, fq);
```

### Tugijaama saatevõimsuse defineerimine

```
LTE_transmitter_power = 40; % W
```

Arvestame signaali kaod 0.1 m<sup>2</sup> suuruse radari ristlõike ja objektist 5 km kaugusel asuva vastuvõtja jaoks.

```
RCS = 0.1; % m2  
transmitted_power = LTE_transmitter_power * (RCS/(4*pi*(2e3)^2))  
transmitted_power = 7.9577e-08
```

### Tugijaamade loomine

```
tj_nou = txsite("Antenna", ant, "Latitude", 58.281665, "Longitude",  
26.509706, "AntennaHeight", 80, "TransmitterPower", 40, "Name", "Nõo  
TJ", "TransmitterFrequency", fq);  
tj_elva = txsite("Antenna", ant, "Latitude", 58.240673, "Longitude",  
26.405600, "AntennaHeight", 80, "TransmitterPower", 40, "Name", "Elva  
TJ", "TransmitterFrequency", fq);
```

### Leviulatuse arvutamine

Vastuvõtja asub 20 meetri kõrgusel

```
data = coverage([tj_nou, tj_elva], "longley-rice",  
"ReceiverAntennaHeight", 20, "SignalStrengths", -100:5:-5,  
"MaxRange", 250e3);  
legendTitle = "Signaali" + newline + "tugevus" + newline + "(dBm)";  
contour(data, "LegendTitle", legendTitle, "Transparency", 0.8, "Map",  
siteviewer("Basemap", 'openstreetmap'));
```

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Mattias Avi

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

## **“ LTE-põhise passiivradari simuleerimine”**

mille juhendajad on Toomas Ruuben ja Jaanus Kalde,

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 Commons'i 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.

Mattias Avi

**20.05.2025**