



DROONITUVASTUSE SENSORVÕRGUSTIKU DROONIRADAR SENSORITE TUNDLIKKUSE PARANDAMINE

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Mattias Johan Kangur

Üliõpilaskood: YAFB213497

Juhendaja: Ivo Müürsepp

Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut
vanemlektor

Õppekava: Rakendusfüüsika

Tallinn 2025

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Mattias Johan Kangur

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Ivo Müürsepp

Sisukord

Sissejuhatus	7
1 Mehitamata õhusõidukite kaugtuvastus	8
1.1 DRI-paketi edastamine	8
1.2 DRI-paketi vastuvõtmine	9
2 Teoreetilised alused	10
2.1 Teoreetiline tuvastusulatus	10
2.2 Reaalsed levitingimused ja piirangud	12
2.2.1 Fresneli tsoon	12
2.2.2 Elektromagnetiline taustmüra	13
2.2.3 Raadiointerferents	14
2.2.4 Mitmekiireline levi	14
3 Wi-Fi adapteri valik	15
3.1 Tehnilised parameetrid	15
3.2 Adapterite testimise meetoodika ja katseseadistus	16
3.2.1 Üldpõhimõte ja eesmärk	16
3.2.2 Testimiseks kasutatav riistvara ja töövahendid	16
3.2.3 Keskkonna ettevalmistus ja häiringute vältimine	17
3.2.4 Tulemuste kogumine ja analüüs	17
4 Sensori antenni valik	20
4.1 Antenni võimendus	20
4.2 Antennide suunadiagramm	21
4.3 Omniantenn AOA-2412	22
4.4 Sektorantenn VH-Line Sektor Duo 14/120	24
4.5 Sektorantenn AM-2G16-90	26
5 Prototüübi testimine	30
5.1 Humala harjutusväli	30
5.2 Antenniahelate kaod ülekande liinides	31
5.2.1 Prototüübi mõõtetulemused	32
6 Järeldused ning arutelu	35
6.1 Soovitused edasiseks uurimis- ja arendustööks	35

Kasutatud kirjandus	38
Lisad	41
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	41
Lisa 2 – Testimistarkvara	42

Lühendite ja mõistete sõnastik

DRI	Mehitamata õhusõidukite kaugidentimissüsteem, mis edastab informatsiooni nii mehitamata õhusõiduki kui ka selle piloodi kohta (ingl <i>Direct Remote Identification</i>)
EASA	Euroopa Liidu Lennundusohutusamet (ingl <i>European Union Aviation Safety Agency</i>)
FAA	Ameerika Ühendriikide Föderaalne Lennuamet (ingl <i>Federal Aviation Administration</i>)
FSPL	Vaba ruumi levikadu (ingl <i>Free Space Path Loss</i>)
IEEE	Elektrotehnika ja Elektroonika Inseneride Instituut (ingl <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
MIMO	Mitme sisendi ja mitme väljundiga süsteem (ingl <i>Multiple Input Multiple Output</i>)
OÜ	Osühing
SNR	Signaali ja müra suhe (ingl <i>Signal to Noise Ratio</i>)
SSH	Turvaline kestühendus (ingl <i>Secure Shell</i>)
UAV	Mehitamata õhusõiduk (ingl <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
Wi-Fi	Traadita võrk (ingl <i>Wireless Fidelity</i>)

Jooniste loetelu

1	DRI-paketi tuvastust mõjutavad tegurid	9
2	Esimene Fresneli tsoon	13
3	Adapterite testimise tulemused	18
4	Omniantenn AOA-2412 ja sensor DRID 2.0 Kaitseliidu Harju Maleva katusel	22
5	Omniantenni AOA-2412 suunadiagramm (Alfa Network, 2025)	23
6	Sektorantenn Sektor Duo 14/120	24
7	Sektorantennid AM-2G16-90	26
8	Sektorantenni AM-2G16-90 suunadiagrammid (Ubiquiti, 2018)	27
9	Nelja AM-2G16-90 sektorantenniga suunadiagramm	28
10	Nelja AM-2G16-90 sektorantenniga katvusdiagramm	29
11	Humala harjutusvälja mõõtmiskoht	30
12	<i>Pigtail</i> -kaabel sensori korpuse ja Wi-Fi adapteri vahel	31
13	Antenn ja Wi-Fi adapter ilma HF400UF koaksiaalkaablita	32
14	Prototüübi kaugeim tuvastus Humala harjutusväljalt (Drooniradar, 2025) . .	33
15	Prototüübi katvusdiagramm	34

Tabelite loetelu

1	Testimisse valitud Wi-Fi adapterite tehnilised parameetrid	17
2	Omniantenni AOA-2412 tehnilised parameetrid	22
3	Sektorantenni Sektor Duo 14/120 tehnilised parameetrid	25
4	Sektorantenni AM-2G16-90 tehnilised parameetrid	26

Sissejuhatus

Mehitamata õhusõidukid (ingl *Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) on viimase kümnendi jooksul märgatavalt populaarsust kogunud, leides rakendust nii harrastajate seas kui ka erinevates majandusvaldkondades, nagu põllumajandus, ehitus ning hiljutise arenguna transport – näiteks Hiina otsus lubada autonoomsete õhusõidukite kommertskasutust (Kobie, 2025). Eriti on mehitamata õhusõidukite olulisus kasvanud sõjatööstuses, kus UAV-de kiirele arengule on kaasa aidanud eeskätt sõda Ukrainas, kus neid kasutatakse luure- ja ründeotstarbel. Mehitamata õhusõidukite laialdane kättesaadavus, taskukohasus ning väikesed mõõtmed muudavad need potentsiaalseks ohuks riiklikule julgeolekule. Sellest tulenevalt muutub üha olulisemaks võimekus neid õhusõidukeid tuvastada ja nende asukohta määrata.

Euroopa Liidus on mehitamata õhusõidukid, edaspidi droonid, alates 2024. aasta 1. jaanuarist kohustatud olema varustatud lennutransponderiga (ingl *Direct Remote Identification*, DRI), mis edastab teavet nii drooni asukoha, suuna, altituudi ja seerianumbri kui ka piloodi asukoha kohta (EASA, 2023). Antud kohustus aga ei rakendu enne 2022. aasta septembrit toodetud droonidele seoses Ameerika Ühendriikide Föderaalse Lennundusameti (ingl *Federal Aviation Administration*, FAA) kehtestatud nõudele (FAA, 2025). DRI on drooni poolt edastatav krüpteerimata pakett, mis võimaldab kolmandal osapoolel nagu näiteks vara haldajal või julgeoleku eest vastutaval isikul tuvastada rikkumisi ning hoida ära õnnetusi. Samuti toetab DRI drooniliikluse turvalist integreerimist muu lennuliiklusega.

Käesoleva lõputöö eesmärk on parandada Eesti kaitsetööstusettevõtte Hextech Solutions OÜ mehitamata õhusõidukite kaugidentimise (DRI) pakettide passiivsel kuulamisel põhineva sensorvõrgustiku Drooniradar seadmete tuvastusraadiust. Selle saavutamiseks analüüsitakse erinevaid turul kättesaadavaid vastuvõtjaid ja antennide lahendusi, hinnatakse nende tehnilisi näitajaid ning valitakse sobivaim kombinatsioon tundlikkuse ja praktilise kasutatavuse alusel. Töö tulemusena valmib sensori täiustatud prototüüp.

1. Mehitamata õhusõidukite kaugtuvastus

Euroopa Liidu standard EVS-EN 4709-002:2023 määratleb nõuded, mille kohaselt peavad tsiviildroonid kogu lennu vältel olema tuvastatavad ja nende asukoht reaalajas jälgitav. Lisaks drooni ja piloodi asukoha teabele peab pakett sisaldama drooni unikaalset identifitseerimisnumbrit ning droonipiloodi unikaalset käitaja registreerimisnumbrit, mida Transpordiamet väljastab üheks aastaks (Transpordiamet, 2025). Kõik nõutud andmed peavad olema edastatavad ühes Wi-Fi (ingl *Wireless Fidelity*) pakettis. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2023)

1.1 DRI-paketi edastamine

Standardis on lubatud DRI edastusmeetoditena loetletud Wi-Fi NAN (ingl *Neighbour Awareness Networking*), Wi-Fi majakas ja Bluetooth 5 *long range* režiim, kusjuures alternatiivselt on lubatud ka Bluetooth 4 kasutamine (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2023). Wi-Fi majakas kasutab ühesuunalist andmeedastust, mille käigus saadab droon oma identifitseerimisinfot passiivselt Wi-Fi SSID (ingl *Service Set Identifier*) kaudu. See tähendab, et kogu vajalik info on nähtaval võrgu nimena (SSID), võimaldades andmete vastuvõttu ilma, et oleks vaja võrku ühenduda (Airsight, 2022). Hextech Solutions OÜ poolt läbi viidud mõõtmiste põhjal kasutavad täna turul olevad tootjad just Wi-Fi majaka põhist edastust. Sellele tehnoloogiale tuginedes on välja töötatud ka seade, mida käesoleva töö raames arendatakse.

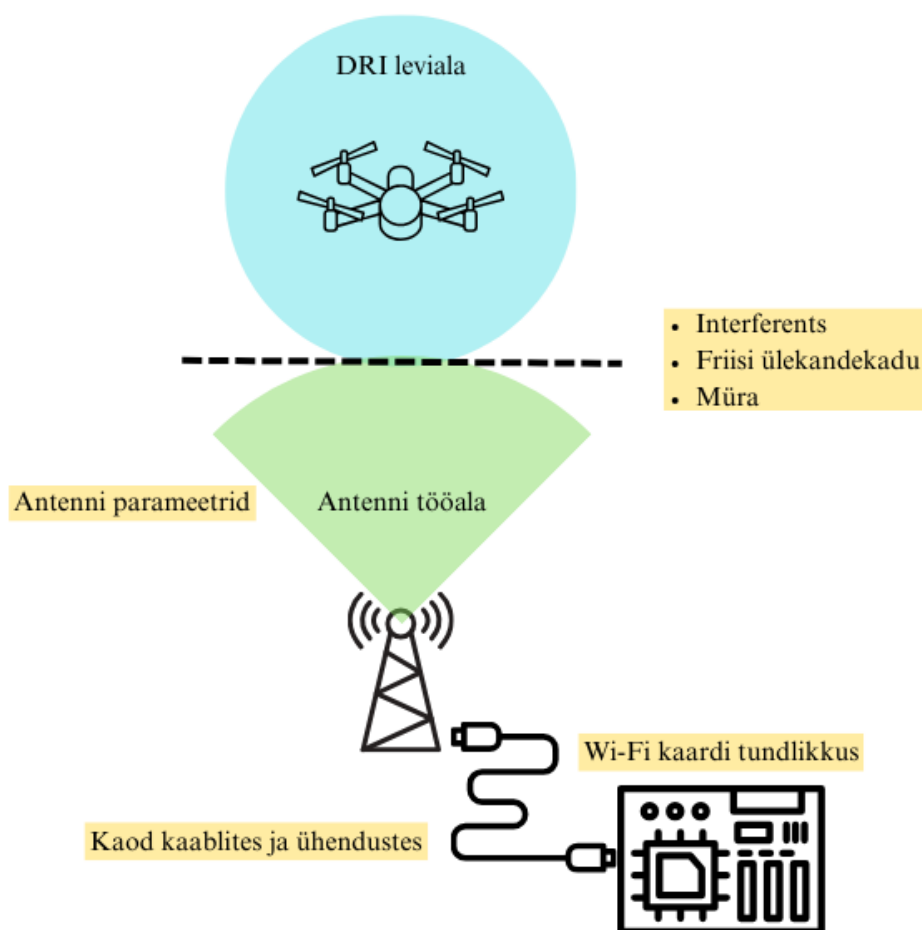
Wi-Fi majaka põhise edastuse jaoks on standardi alusel lubatud kasutada kõiki kanaleid nii 2400-2483,5 MHz kui ka 5725-5875 MHz vahemikus, lähtudes Elektrotehnika ja Elektroonika Inseneride Instituudi (ingl *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE) standardist IEEE 802.11-2016, mis määratleb traadita lähivõrkude tehnilised spetsifikatsioonid (IEEE, 2016). Paketti tuleb edastada võimalikult ringsuunaliselt ning väljundvõimsus peab tootja poolt olema seatud võimalikult kõrgeks järgides regionaalseid piiranguid (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2023).

Kõik Hextech Solutions OÜ poolt läbi viidud katse käigus testitud droonid kasutasid DRI-paketi edastamiseks kanalit 6 (2437 MHz). Autori hinnangul tuleneb see sellest, et kanal 6 võimaldab edastada andmeid madalama sagedusega (kuni kord sekundis), mis aitab vähendada energiatarbimist. Samuti lubab 2,4 GHz sagedus kõrgemat saatvõimsust (+11dBm) soodustades paremat leviala (IEEE, 2016).

1.2 DRI-paketi vastuvõtmine

DRI-paketid, mida droonid edastavad Wi-Fi majaka meetodil, levivad raadiosagedusel ühesuunaliselt ja ilma ühenduse loomiseta. See tähendab, et edastatud andmed ei ole suunatud konkreetsele vastuvõtjale, vaid on raadioside eetris kättesaadavad igale seadmele, mis oskab neid kuulata. Sellest tulenevalt on raadiosignaali leviala otseses korrelatsioonis vaid saatja võimsusega, mitte vastuvõtja tundlikkusega. (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2023) Sensori tööulatust mõjutavad nii antenni ja Wi-Fi adapteri tehnilised parameetrid kui ka välised mõjutajad, näiteks interferents (CRFS, 2025).

DRI-pakettide vastuvõtmiseks peab kasutatav Wi-Fi adapter olema võimeline töötama monitoorimisrežiimis, mis lubab passiivselt jälgida kõiki raadioside raampakette konkreetsel kanalil ilma võrguühendust loomata (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2023). Vastuvõetud DRI-pakettide analüüsimiseks kasutatakse võrguliikluse monitoorimise tarkvara, näiteks Wireshark'i, mis võimaldab visualiseerida raampakettide sisu ja ülesehitust inimesele arusaadavas vormingus (Wireshark, 2025).



Joonis 1. DRI-paketi tuvastust mõjutavad tegurid

2. Teoreetilised alused

2.1 Teoreetiline tuvastusulatus

Raadioside levikut ideaaltingimustes kirjeldab Friisi valem (ingl *Friis transmission equation*), mis määratleb raadiosignaali võimsuse vähenemist selle levimisel vabas ruumis, kus puuduvad teised mõjutegurid. Sellises keskkonnas väheneb lainefronti iseloomustav võimsustihedus võrdeliselt kauguse ruuduga. (Reisberg & Taklaja, 2005)

Käesolevas töös keskendutakse raadiosagedusele 2437 MHz (kanal 6), mis kuulub 2,4 GHz sagedusala hulka. Kuna sellisel sagedusel on lainepikkus võrdlemisi lühike ($\lambda = 12,3$ cm), mängib vaba ruumi levikadu (ingl *Free Space Path Loss*, FSPL) olulist rolli, sest Friisi valem ütleb, et vastuvõetav võimsus on pöördvõrdeline nii sageduse kui kauguse ruuduga (Reisberg & Taklaja, 2005).

Friisi valem isotroopsete, ideaalsete antennide vahelise signaali kadu kohta avaldub kujul:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (2.1)$$

kus:

- P_r – vastuvõetud võimsus [W];
- P_t – edastatud võimsus [W];
- G_t – saatva antenni võimendus (lineaarsel skaalal ühikuta);
- G_r – vastuvõtva antenni võimendus (lineaarsel skaalal ühikuta);
- λ – lainepikkus [m], arvutatav kui $\lambda = \frac{c}{f}$;
- d – kaugus saatjast vastuvõtjani [m].

Selleks, et leida maksimaalne teoreetiline distantis saatja ja vastuvõtja vahel tuleb esmalt leida minimaalne teoreetiline vastuvõetav võimsus ehk müratase. Müratase (ingl *noise floor*) tähistab madalaimat signaalitaset, mida saab usaldusväärselt tuvastada, arvestades süsteemi termilist- ja taustmüra. Ideaaltingimustes sõltub müratase ainult keskkonna temperatuurist ja vastuvõtukanali ribalaiusest ning esitatakse detsibellides millivattide suhtes (dBm). (International Telecommunication Union, 2024a)

Müratase on arvutatav järgmiselt:

$$P_n = 10 \log_{10}(1000 \cdot k \cdot T \cdot B), \quad (2.2)$$

kus:

- P_n – müratase [dBm];
- k – Boltzmanni konstant, $1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K];
- T – absoluutne temperatuur [K];
- B – süsteemi ribalaius [Hz].

DRI-paketti edastava kanali 6 ribalaius on 20 MHz. Arvutustes on keskkonna temperatuuriks võetud Eesti aastane keskmine temperatuur $T = 279,55$ K (ehk $6,4^\circ\text{C}$).

$$P_n = 10 \log_{10}(1000 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 279,55 \cdot (2 \cdot 10^7)) = -101,1 \text{ dBm}. \quad (2.3)$$

Teoreetiline minimaalne vastuvõetav signaalitugevus on antud juhul -101,1 dBm.

FSPL kirjeldab, kui suur osa edastatavast signaalienergiast hajub levikeskkonnas kauguse kasvades. DRI-paketi edastusvõimsus kanalil 6 on 11 dBm ning olgu saatva antenni võimendus 2 dBi, mis on tüüpiline väärtus omnisuunaliste antennide puhul. Vastuvõtva antenni võimendus olgu 16 dBi. Selleks, et tagada usaldusväärne ühendus ehk minimaalne signaali ja müra suhe (ingl *Signal to Noise Ratio*, SNR), peab signaal olema vähemalt 3 dB võrra müratasemest kõrgem, seega minimaalne vajalik signaalitugevus on -98,1 dBm. (International Telecommunication Union, 2024a), (International Telecommunication Union, 2024b)

Sellisel juhul on $FSPL_{\max}$ leitav kujul:

$$FSPL_{\max} = P_t + G_t + G_r - P_{n,\min} = 11 + 2 + 16 - (-98,1) = 127,1 \text{ dB}. \quad (2.4)$$

Avaldame kauguse:

$$d = \sqrt{\frac{FSPL_{\max, \text{linear}} \cdot c^2}{(4\pi f)^2}} = \sqrt{\frac{10^{\frac{127,1}{10}} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{(4\pi \cdot 2,437 \cdot 10^9)^2}} = 22,2 \text{ km}. \quad (2.5)$$

Leidsime, et Friisi valemi tingimuste täitmisel on teoreetiline tuvastusulatus 22,2 km. See väärtus on kooskõlas ITU-R (ingl *International Telecommunication Union - Radiocommunication sector*) soovitusel P.525 määratletud vaba ruumi kao L_{bf} mudeliga (International Telecommunication Union, 2024b). Kui aga minimaalset SNR-i mitte arvesse võtta ja 3 dB suurune puhver välja jätta, on teoreetiline tuvastusulatus 31,3 km.

2.2 Reaalsed levitingimused ja piirangud

Eelnev arvutus põhines ideaaltingimustel, kus raadiosignaali levik toimub takistusteta vabas ruumis, kuid tegelikkuses esinevad sellised tingimused harva. Reaalses keskkonnas tuleb arvesse võtta mitmeid mõjutegureid, sealhulgas füüsilisi takistusi (hooned, puud, maastik), atmosfääritingimusi, maapinna kumerust, mitmekiirelist levi ning Fresneli tsooni.

Vastavalt ITU-R soovitusel P.341-7 tuleb raadioside kadude hindamisel eristada:

- **vaba ruumi kadu** L_{bf} , mis eeldab isotroopseid antenne ja takistusteta levikeskkonda;
- **baaskadu** $L_b = L_{bf} + L_m$, kus L_m arvestab lisakadu, nagu difraktsioon, polarisatsioonikaod ja leviteel olevad takistused;
- **süsteemikadu** $L_s = L + L_{tc} + L_{rc}$, kus L_{tc} ja L_{rc} on vastavalt saatja ja vastuvõtja antenniringide sisekadudest tingitud lisakaod.

(International Telecommunication Union, 2019)

Seega avaldub tegelik levikadu kujul:

$$L = L_{bf} + L_m - G_t - G_r. \quad (2.6)$$

Käesolevas töös käsitletakse Fresneli tsooni, raadiomüra, interferentsi ja mitmekiirelise levi mõju kui olulisemaid levikadu mõjutavaid faktoreid.

2.2.1 Fresneli tsoon

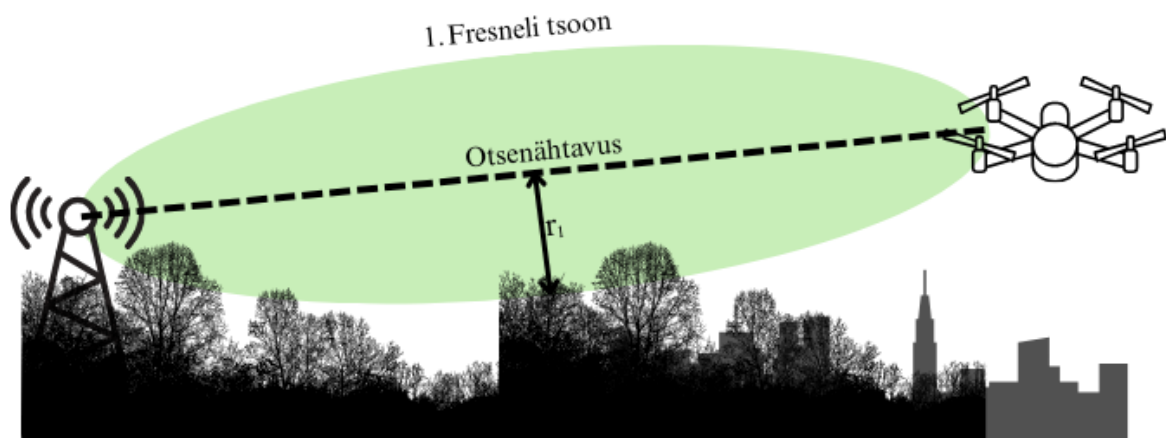
Fresneli tsoon kirjeldab piirkonda raadiosignaali leviteel, mille osaline või täielik varjamine põhjustab difraktsiooni ning sellest tulenevat signaali nõrgenemist. Kõige olulisem on esimene Fresneli tsoon, mille raadius ellipsi keskpunktis kaugusel d_1 saatjast ja d_2 vastuvõtjast on (International Telecommunication Union, 2021):

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}. \quad (2.7)$$

Sagedusel 2,437 GHz, mille lainepikkus on $\lambda = 0,123$ m, ja kogukaugusel $d = 22\,200$ m, kus $d_1 = d_2 = 11\,100$ m, on esimese Fresneli tsooni maksimaalne raadius:

$$r_1 = \sqrt{\frac{0,123 \cdot 11\,000 \cdot 11\,000}{22\,200}} = 26 \text{ m}. \quad (2.8)$$

Soovituslikult peab vähemalt 60% Fresneli tsoonist jääma vabaks takistustest, et minimeerida difraktsioonikadusid. Sellest tulenevalt peab sellise konfiguratsiooni puhul olema levitee keskel vaba tsoon vähemalt 16 m ulatuses. (International Telecommunication Union, 2021)



Joonis 2. Esimene Fresneli tsoon

2.2.2 Elektromagnetiline taustmüra

ITU-R soovitus P.372-17 kirjeldab kolme peamist raadiosagedusliku müra allikat:

- atmosfäärimüra;
- kosmiline ehk galaktiline müra;
- tehnogeenne ehk tehislük müra.

Kuigi atmosfääriline ja kosmiline müra on madalamatel sagedustel (alla 300 MHz) märkimisväärsed, on nende mõju 2,4 GHz sagedusel praktiliselt olematu. Kosmiline müratase on 2,4 GHz sagedusel hinnanguliselt alla:

$$P_{n,gal} \approx -135 \text{ dBm}. \quad (2.9)$$

(International Telecommunication Union, 2024a)

Atmosfäärilise müra tase on veelgi madalam, mistõttu nende allikate mõju käesolevas töös ei arvestata. Samas, tehnogeense ehk inimtekkelise taustmüra tase võib linnakeskkonnas 2,4 GHz sagedusalal ulatuda kuni -85 dBm-ni, mis on ligikaudu 16 dBm kõrgem kui vastav terminine müratase (Enge et al., 2004). Võttes arvesse minimaalset vajalikku signaali ja müra suhet ning asendades väärtused valemitesse (2.4) ja (2.5), selgub, et maksimaalne drooni tuvastusraadius võib sellistes tingimustes langeda kuni 3,5 km-ni.

2.2.3 Raadiointerferents

Raadiointerferents (ingl *radio frequency interference*) on nähtus, kus mitme raadiosignaali sagedusalad kattuvad, põhjustades signaali kvaliteedi halvenemist, moonutusi või andmekadu. Interferentsi ulatus ja mõju sõltuvad nii signaalide sageduslikust kattuvusest kui ka nende võimsusest. (International Telecommunication Union, 2024a)

Kui mitu saatjat kasutavad sama sageduskanalit, võib tekkida sama kanali interferents (ingl *co-channel interference*), mille korral signaalid kattuvad nii spektris kui ajaliselt. Sellises olukorras ei suuda vastuvõtja eristada soovitud signaali teiste segavate komponentide seast, mis toob kaasa pakettide kaotsimineku või andmete moonutusi. Sama kanali interferents on eriti probleemne just 2,4 GHz sagedusalas, sest seda kasutavad nii Wi-Fi ruuterid, Bluetooth kui ka mitmed IoT-seadmed. (International Telecommunication Union, 2015)

Lisaks tuleb arvestada ka spektriväliste häiretega, mille hulka kuuluvad näiteks harmoonilised signaalid. Näiteks on 800 MHz 2,4 GHz kolmekordne harmooniline ja 1,2 GHz kahekordne harmooniline. Samuti võivad häireid põhjustada signaalide kokkupõrked, mille käigus erinevad raadiolained ristuvad ja segunevad. Sellised häired võivad mõjutada signaali kvaliteeti isegi siis, kui sagedusalad on näiliselt lahus. (International Telecommunication Union, 2015)

2.2.4 Mitmekiireline levi

Raadiosignaalide levik ei toimu üksnes sirgjooneliselt saatjalt vastuvõtjale, vaid signaal võib levida kaudsete trajektooridena peegelduste, hajumiste või murdumiste kaudu erinevatelt pindadelt, nagu hooned, maapind või muud objektid. Sellise nähtuse tulemusena jõuab sama signaal vastuvõtjasse mitme eri teekonna kaudu ning erineva faasi, tugevuse ja ajaviitega. Seda nähtust nimetatakse mitmekiireliseks leviks (ingl *multipath propagation*). (International Telecommunication Union, 2021)

Mitmekiireline levi võib mõjutada signaali vastuvõttu mitmel viisil. Kui erinevad signaali-komponendid saabuvad vastuvõtjasse samas faasis, toimub konstruktiivne interferents, mille tulemuseks on signaali tugevnemine. Kui aga faasid on vastupidised, tekib destrukttiivne interferents, mis põhjustab signaali nõrgenemist või isegi täielikku kadu. Samuti võib signaalide ajanihete tõttu esineda sageduslikku kustumist (ingl *fading*), mille korral teatud sageduskomponendid nõrgenevad märgatavalt ning andmepakettides võivad tekkida vead. (International Telecommunication Union, 2021)

3. Wi-Fi adapteri valik

3.1 Tehnilised parameetrid

Edukas DRI-pakettide tuvastamine sõltub lisaks antennile suuresti ka vastuvõtuseadmest ehk Wi-Fi adapterist, mille ülesanne on elektromagnetilise laine vastuvõtt, selle muundamine digitaalseks signaaliks ning edasine töötlus. Adapteri kvaliteet ja tehnilised näitajad määravad, kui tundlikult suudab süsteem signaale tuvastada.

Wi-Fi adapteri sobivuse hindamisel tuleb arvesse võtta mitmeid olulisi omadusi. Esiteks peab adapter toetama monitoorrežiimi (ingl *monitor mode*), mis võimaldab raadioside raampakettide passiivset jälgimist konkreetsel kanalil ilma võrguühendust loomata. Teiseks on oluline adapteri tundlikkus (ingl *receiver sensitivity*), mis kirjeldab minimaalset signaalitaset, mida seade suudab usaldusväärselt tuvastada. Samuti peab Wi-Fi adapter töötama 2,4 GHz sagedusalas, mis üldiselt on tagatud. Olulist rolli mängivad ka adapteri kiibistik ja selle draiveritugi. Hextech Solutions OÜ kogemuse põhjal võib nende kvaliteet ja töökindlus märkimisväärselt varieeruda — mõnede tootjate draiverid on nii puuduliku ülesehitusega, et ei võimalda sensori usaldusväärset toimimist.

Siinkohal tuleb rõhutada, et antenn ise ei "tuvasta" signaale, vaid kogub elektromagnetlainet energiat ja suunab selle läbi kaablite adapterile. Kui adapteri kiibistik, sealhulgas madal-signaalivõimendi (ingl *Low-Noise Amplifier*, LNA), on madala kvaliteediga, võib signaal, mida antenn on edukalt vastu võtnud, jääda ikkagi tuvastamatuks. LNA ülesanne on signaali võimendada enne, kui müra jaoturid või digiteerimine seda kahjustavad. Halb või puuduv LNA tähendab, et antenni kõrgest tundlikkusest pole kasu, kuna nõrk signaal ei jõua töötluseni piisavalt hea kvaliteediga. (Sarkar, Sarrafinazhad, & Ghoncheh, 2023)

Adapteri tundlikkus ja vastuvõtuahela kvaliteet mõjutavad otseselt maksimaalset teoreetilist tuvastusraadiust. Nagu Friisi valemi põhjal järeldub, sõltub kauguse saavutamine sellest, kas vastuvõetav signaal ületab müra- ja tundlikkuse piiri. Kuna enamik turul saadaolevatest Wi-Fi adapteritest on loodud pigem lähiraadiuses toimuvaks aktiivseks andmesideks, mitte passiivseks kuulamiseks üle pika distantssi, on sobiva, tundliku ja stabiilselt töötava vastuvõtja leidmine keeruline.

3.2 Adapterite testimise metoodika ja katseseadistus

Wi-Fi adapterite võrdlemiseks töötati välja standardiseeritud ja taasesitatav testprotseduur, mille eesmärk on hinnata adapterite tundlikkust ning võimet pakette eri signaalitugevustel vastu võtta. Katsemetoodika põhineb põhimõttel, et saateseade edastab järjest signaale erinevatel võimsustel, samal ajal kui vastuvõtja registreerib, millised paketid suudetakse tuvastada ja millised mitte. See võimaldab objektiivselt hinnata adapteri tundlikkust ning võrrelda kvaliteedi deviatsiooni sama kiibistikuga adapterite vahel.

3.2.1 Üldpõhimõte ja eesmärk

Katse keskne eesmärk on määrata vastuvõtu lävi ehk teha kindlaks minimaalne edastustase, millest alates suudab konkreetne Wi-Fi adapter DRI-pakette usaldusväärselt vastu võtta. Testiprotseduur koosneb järgmistest sammudest:

1. **Saatja seadistamine:** DRI-pakette edastatakse erinevatel võimsustel vahemikus 0–20 dBm.
2. **Vastuvõtu režiim:** adapter töötab kogu katse vältel passiivses monitoorrežiimis.
3. **Andmete kogumine:** kõik vastuvõetud DRI-paketid logitakse koos vastava edastusvõimsuse infoga.
4. **Lävendi tuvastamine:** analüüsi käigus selgitatakse välja, millise võimsuse juures adapter veel töötab ning kus algab tuvastuspiir.

Tuleb arvestada, et erinevad adapterid ja antennid võivad mõjutada mõõdetavat signaalitugevust (ingl *Received Signal Strength Indicator*, RSSI), mistõttu dBm väärtused ei ole seadmete vahel otseselt võrreldavad. Seetõttu põhineb võrdlus ainult edukalt vastu võetud pakettide osakaalul.

3.2.2 Testimiseks kasutatav riistvara ja töövahendid

- **Saatja:** sülearvuti, mille külge on ühendatud üks adapter ja antennikomplekt.
- **Vastuvõtja:** sülearvuti, mille külge saab korraga ühendada mitu adapterit ja antenni kombinatsiooni.
- **Side:** katse juhtimiseks kasutatakse SSH-ühendust üle Etherneti kaabli. Vältida tuleb Wi-Fi ühenduse kasutamist, kuna see võib segada saatja ja vastuvõtja vahelist suhtlust testimise ajal.
- **Testimistarkvara:** testimistarkvara ja analüüsi skriptid on üles laetud lisas 2 leitavasse GitHub-i repositooriumi.

- **Logifailid:** vastuvõetud andmepaketid logitakse TSV-vormingus hilisemaks võrdlevaks analüüsiks.

3.2.3 Keskkonna ettevalmistus ja häiringute vältimine

Usaldusväärsete mõõtetulemuste tagamiseks tuleb katse viia läbi keskkonnas, kus elektromagnetilise taustmüra ja raadiointerferentsi mõju on viidud miinimumini. Katsekeskkonna sobivust hinnatakse eelkatsete põhjal järgmiste sammude kaudu:

1. Ühendatakse saatja ja vastuvõtja ning seatakse adapterid tööle monitoorrežiimis.
2. Saadetakse signaale võimsusel 0 dBm ja mõõdetakse vastuvõttu (oodatav tulemus: 0–10%).
3. Saadetakse signaale võimsusel 2 dBm ja mõõdetakse vastuvõttu (oodatav tulemus: 70–100%).
4. Valitakse testimiskaugus ja suund selliselt, et signaalide eristuvus madala ja kõrge võimsuse juures oleks maksimaalne.
5. Veendutakse, et katsepiirkonnas puuduvad teised seadmed, mis võiksid mõjutada mõõtetulemusi.

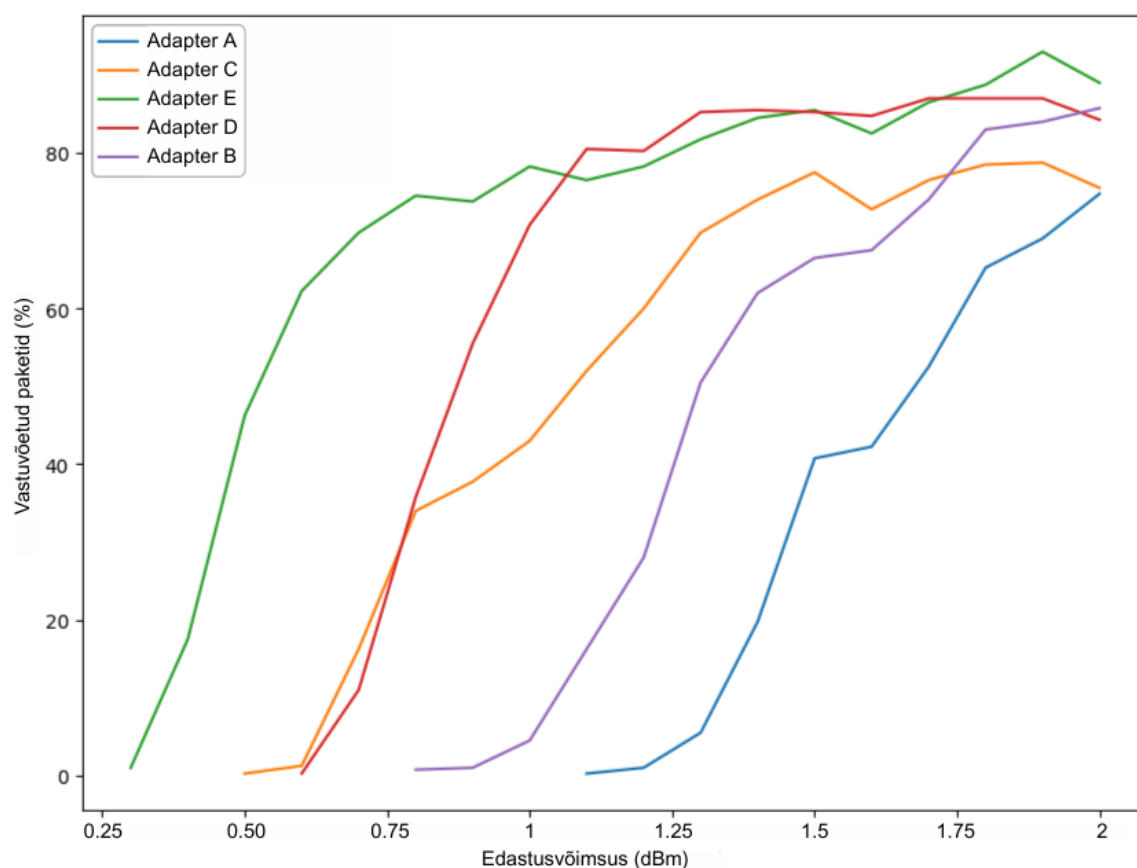
3.2.4 Tulemuste kogumine ja analüüs

Testimisse valiti viis erinevat Wi-Fi adapterit, valik tugines eelkõige adapterite saadavusele, kiibistikule ning tootja poolt reklaamitud tundlikkusele. Adapterite olulisemad tehnilised parameetrid on koondatud tabelisse 1.

Tabel 1. Testimisse valitud Wi-Fi adapterite tehnilised parameetrid

Adapter	Kiibistik	Väljundeid	Tundlikkus
Adapter A	Realtek	1	-85 dBm @ 11 MBps
Adapter B	Realtek	2	-85 dBm @ 11 MBps
Adapter C	Atheros	1	-96 dBm @ 1 MBps
Adapter D	Realtek	2	-85 dBm @ 11 MBps
Adapter E	MediaTek	2	-85 dBm @ 11 MBps

Iga testitsükli käigus salvestati logifailid, mis sisaldavad infot edastusvõimsuse, ajatemplite ja vastuvõetud DRI-pakettide arvu kohta. Need failid asuvad lisas 2 toodud GitHub-i repositooriumis, kus andmetöötluskriptide abil toimus automaatne andmeanalüüs. Analüüsis võrreldakse erinevate võimsustasemete juures vastu võetud pakettide osakaalu, et selgitada välja iga adapteri tuvastuslävend.



Joonis 3. Adapterite testimise tulemused

Kuigi tabelis 1 välja toodud tehnilised andmed viitavad paljuski sarnasele tundlikkusele, ilmnemiseks praktilistes testides märkimisväärsed erinevused. Mõned olulised tähelepanekud:

- **Adapter A** (Realtek) saavutas katse käigus kõige nõrgema tulemuse. Adapteri pakettide tuvastuslävend jäi võrreldes teistega oluliselt kõrgemaks ning isegi maksimaalse edastusvõimsuse juures olid tulemused ebahütlased ja ebastabiilsed.
- **Adapter B** (Realtek) näitas teoreetiliselt paremat tundlikkust võrreldes adapteriga A, tuvastuslävend langes umbes 33%. Praktilises osutus adapter aga väga ebastabiilseks: kolmest mõõtmisest andis usaldusväärseid tulemusi vaid üks. Ebastabiilsus võib olla seotud nii riistvaralise kvaliteedi kui draiveri ebahütlase tööga.
- **Adapter C** (Atheros) saavutas võrreldes kahe eelneva Realteki kiibistikul põhineva adapteriga umbes 32% madalama tuvastuslävendi. Tegemist oli ainsa adapteriga, mis kasutas Atherose kiibistikku.
- **Adapter D** (Realtek), mis oli varustatud kahe antenniväljundiga, saavutas väga sarnase tuvastuslävendi adapteriga C. Adapter D oli testitud adapteritest kõige stabiilsem, mis väljendub ka järsus, kuid stabiilses tõusus vastuvõetud pakettide arvus koos edastusvõimsuse kasvuga.

- **Adapter E** (MediaTek) oli mõõtmistulemuste põhjal kõige tundlikum adapter, selle tuvastuslävend oli teiste adapteritega võrreldes enam kui kaks korda madalam. Tegemist on kaasaegse adapteriga, mille MediaTeki kiibistikul on alates Linuxi kerneli versioonist 5.15 olemas sisseehitatud draiver. Siiski ilmnes testimisel mitmeid tõrkeid: adapteri tuvastamine USB kaudu ebaõnnestus mitmel korral, `lsusb` käsk põhjustas süsteemi hangumise ning pikemate tööseansside vältel vähenes vastuvõetud signaalide kvaliteet märgatavalt. Prooviti erinevaid draivereid, kuid sensor antud adapteriga siiski tööle ei hakanud.

Kuna adapter E draiverid osutusid ebastabiilseks ja esines probleeme ühilduvusega, jätkati testimist adapteriga D. See valik osutus sobivamaks kui Atherose kiibistikul põhinev adapter C, kuna Atherose tootmine on lõpetatud. Adapter D draiverid on ka arhitektuuriliselt kõige arusaadavama ehitusega ning lisaks on tal kaks antenniväljundit — nende rolli käsitletakse lähemalt järgmises peatükis.

4. Sensori antenni valik

4.1 Antenni võimendus

Tulenevalt asjaolust, et kõik turul olevad ja Hextech Solutions OÜ poolt testitud droonid edastavad DRI-pakette 2,4 GHz sagedusalas, on optimaalne valida just selle sagedusvahemiku jaoks kohandatud antenn. See tagab maksimaalse sobivuse antenni resonantse sageduskarakteristiku ja vastuvõetava signaali vahel, suurendades antenni võimendust ning seeläbi kogu süsteemi tundlikkust. Antenni optimeeritud tööpiirkond võimaldab paremat signaali vastuvõttu ning tagab parema tuvastusraadiuse ja efektiivsuse mürarikas keskkonnas. (Reisberg & Taklaja, 2005)

Antenni võimendus (ingl *antenna gain*) iseloomustab antenni suutlikkust fokuseerida elektromagnetilist energiat teatud suunas võrreldes isotroopse kiirgustriga. Võimendust väljendatakse tavaliselt detsibellides isotroopse antenni suhtes ning see on seotud antenni suunatavuse (ingl *directivity*) ja efektiivsusega järgmiselt:

$$G_{\text{dBi}} = 10 \cdot \log_{10}(e \cdot D) \quad [\text{dBi}], \quad (4.1)$$

kus:

- G_{dBi} – antenni võimendus detsibellides isotroopse antenni suhtes;
- e – antenni efektiivsus (väärtus vahemikus 0 kuni 1);
- D – antenni suunatavus ehk *directivity*, mõõtühikuta suhtarv.

(Reisberg & Taklaja, 2005)

Võimendus ei tähenda signaali tugevdamist elektrilises mõttes, vaid raadiosagedusliku energia ümberjaotamist ruumis — suurendades kiirgust eelistatud suundades ja vähendades seda teistes. Seetõttu võimaldavad suurema võimendusega antennid paremat signaalikvaliteeti ja tuvastusraadiust, kuid piiratud vaatenurgaga. (Reisberg & Taklaja, 2005)

Kuna käesolevas töös käsitletava sensori puhul on antenn passiivne seade, mängib võimendus olulist rolli kogu süsteemi ulatuses. Näiteks kui vahetada 2 dBi antenn 10 dBi antenni vastu, suureneb teoreetiline tuvastusraadius:

$$\Delta d = 10^{\frac{8}{20}} \cdot d_0 \approx 2,51 \cdot d_0. \quad (4.2)$$

See tähendab, et tuvastusraadius võib muid parameetreid muutmata kasvada üle 2,5 korra, mistõttu on antennivõimendus üks olulisemaid parameetreid, mida saab füüsilise riistvara valikuga parandada.

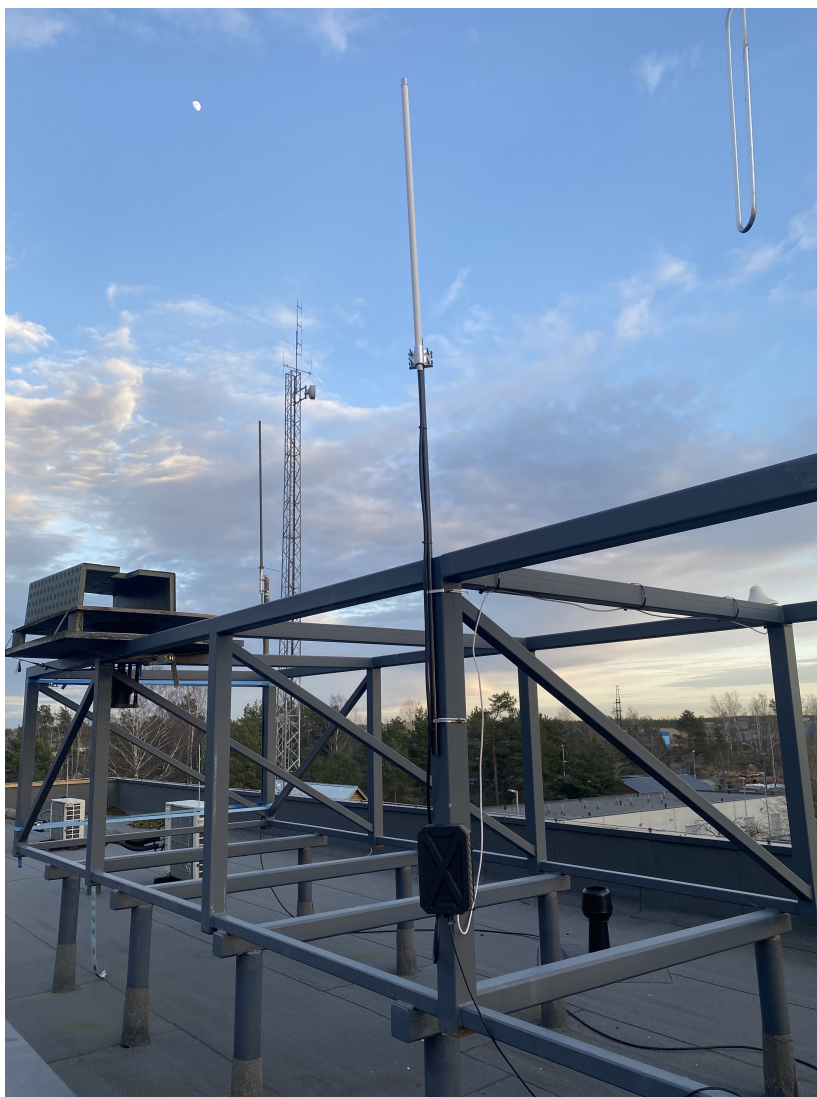
Droonide kaugidentimise (DRI) pakettide edastamiseks kasutatakse enamasti trükkplaadile integreeritud antenne, kuna need on kompaktsed, kerged ja odavad. Sellised antennid on lineaarse polarisatsiooniga ning kuna droonid on valdavalt horisontaalses asendis, on antennide kiirguspolaarsus vertikaalne. Selleks, et maksimeerida vastuvõtu efektiivsust, vähendada polaarsuskaotusi (ingl *polarization mismatch loss*) ja tagada maksimaalne võimsusülekanne, peab ka vastuvõtja antenn olema sama polaarsusega. Kaotused, mis tulenevad risti polaarsusest, võivad ulatuda kuni 20 dB-ni. (Cisco, 2007)

4.2 Antennide suunadiagramm

Antennide suunadiagramm (ingl *radiation pattern*) kirjeldab, kuidas antenn kiirgab või võtab vastu elektromagnetilist energiat ruumis. Muster võib olla kas omnisuunaline (ideaalne, ühtlane igas suunas) või suunatud, kus energia koondub kindlatesse suundadesse. Antennidel on kolmemõõtmeline suunadiagramm, mida tavaliselt esitatakse polaarkoordinaatides horisontaal- ja vertikaaltasandi lõigetes suunadiagrammi näol. Omnisuunalised antennid kiirgavad võrdselt igas suunas ühel tasandil, tehes neist üldotstarbeliselt sobiva valiku. Suunatud antennid, näiteks paneel- või Yagi-tüüpi, koondavad energia kitsamasse ruumiosasse, võimaldades suuremat võimendust ja paremat tuvastusraadiust eelistatud suunas. Optimaalse suunadiagrammiga antenn aitab vähendada soovimatuid häireid kõrvalsuundadest, parandades signaali ja müra suhet. (Cisco, 2007)

Kiire laius (ingl *beamwidth*) kirjeldab antenni suunadiagrammi pealehe laiust ruumis. Seda määratletakse tavaliselt kui nurka, mille sees signaalitugevus on kuni -3 dB võrreldes maksimaalse väärtusega. Kiire laius mõjutab otseselt Fresneli tsooni nähtavust ja seega ka tõenäosust, et levitee jääb takistustest vabaks. (Cisco, 2007)

4.3 Omniantenn AOA-2412

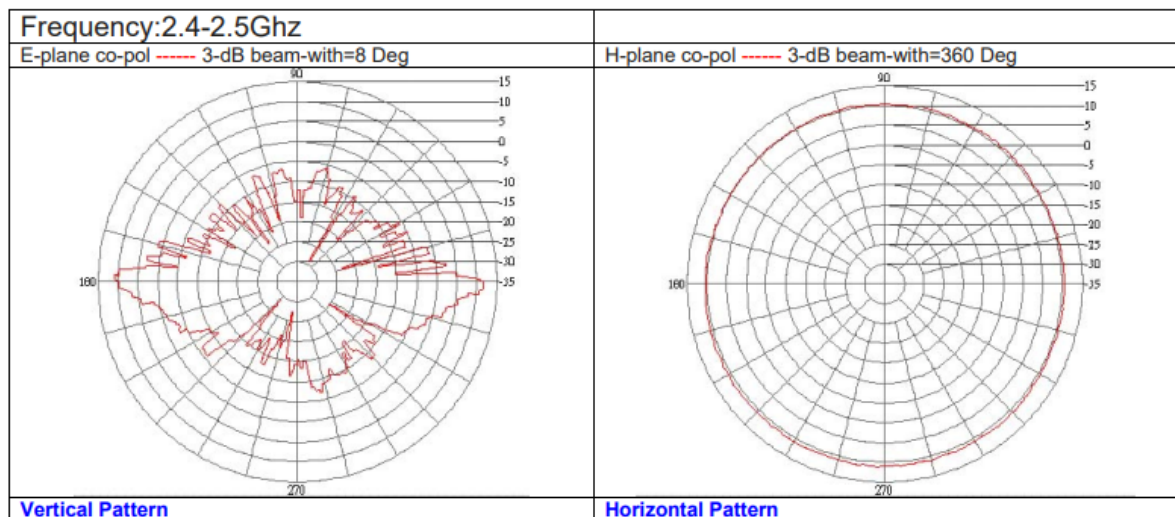


Joonis 4. Omniantenn AOA-2412 ja sensor DRID 2.0 Kaitseliidu Harju Maleva katusel

Töös käsitletava sensori esimestes iteratsioonides kasutati Alfa Network AOA-2412 tüüpi omniantenni, mille peamisteks eelisteks on omniantenni kohta kõrge võimendus ning sobivus 2,4 GHz sagedusala jaoks. Omniantenni tehnilised parameetrid on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Omniantenni AOA-2412 tehnilised parameetrid

Parameeter	Väärtus
Sagedusvahemik	2,4 - 2,5 GHz
Kiire laius	H: 360° / V: 8°
Polarisatsioon	Vertikaalne
Võimendus	12 dBi



Joonis 5. Omniantenni AOA-2412 suunadiagramm (Alfa Network, 2025)

Tegemist on pika antenniga, mille horisontaalne suunadiagramm on täisringne, kuid vertikaalse kiire laius on vaid 8°. Kitsas vertikaalkiirgus võimaldab vähendada mitmekiirelise levi ja interferentsi mõju. Samas, kuna tegu on omnisuunalise antenniga, ei paku see paigutuse osas olenevalt maastiku eripäradest suurt paindlikkust.

Välitestide käigus Humala harjutusväljal osutus maksimaalseks tuvastusraadiuseks ligikaudu 4,8 km, kasutades Atherose kiibistikuga adapterit C. Saavutatud tuvastusraadiusest lähtuvalt on ühe sensori katvusala ligikaudu 72 km², arvestades 360° horisontaalset levikut. Kokkuvõttes osutus AOA-2412 edukaks esimeseks valikuks, pakkudes head kompromissi katvuse, võimenduse ja sobivuse vahel antud rakenduse tingimustes.

4.4 Sektorantenn VH-Line Sektor Duo 14/120



Joonis 6. Sektorantenn Sektor Duo 14/120

Seireulatuse ja signaalikvaliteedi edasiseks suurendamiseks suunati tähelepanu sektorantenni-de hindamisele. Testimisse valiti Poola tootja CyberBajt antenn VH-Line Sektor Duo 14/120, millel on 2x2 MIMO (ingl *Multiple Input, Multiple Output*) arhitektuur — kaks sõltumatut antennielementi, millel on vastavalt horisontaalne ja vertikaalne polarisatsioon. Antenni tehnilised parameetrid on toodud tabelis 3.

Tabel 3. Sektorantenni Sektor Duo 14/120 tehnilised parameetrid

Parameeter	Väärtus
Sagedusvahemik	2,4 - 2,5 GHz
Kiire laius	H: 120° / V: 17°
Polarisatsioon	Vertikaalne + Horisontaalne
Võimendus	14 dBi

Sektorantenni horisontaalne ja vertikaalne polarisatsioon võimaldab kuulata signaale samaaegselt mõlemal polarisatsioonitasandil, mis suurendab süsteemi töökindlust raadiointerferentsi ja mitmekiirelisest levist tingitud moonutuste vastu. Kuigi DRI-paketti edastatakse vertikaalse polarisatsiooniga, võib juhtuda, et peegeldunud signaalid muutuvad osaliselt või täielikult ristpolariseerituks, mille korral horisontaalselt polariseeritud kanal suurendab üldist tuvastustõenäosust. (International Telecommunication Union, 2021)

Antenn töötab 2,4 GHz sagedusvahemikus ja 14 dBi võimendus võimaldab saavutada oluliselt kõrgema tundlikkuse eelistatud 120° horisontaalsuunalises sektoris. 17° vertikaalne kiire laius loob hea tasakaalu ulatuse ja kõrguskatvuse vahel. Sektorantenn pakub võrreldes omniantenniga paindlikumaid paigaldusvõimalusi. See on vajalik just asustatud aladel, et vähendada häiringuid kõrvalsuundadest ja tundlikkust taustmüra suhtes.

Antud lahenduse seni parim saavutatud tulemus on 17 km mõõdetuna 60 m kõrguselt tornilt. Asukoht vastab Friisi valemi eeldustele ning saadud tulemus ühtib valemi (2.5) arvutustulemusega. Testimisel Humala harjutusväljal tuvastati droone maksimaalselt kuni 6,4 km kauguselt ehk sensori tuvastusraadius kasvas 33,3%. Mõlemad tulemused on saavutatud kasutades adapterit D.

4.5 Sektorantenn AM-2G16-90

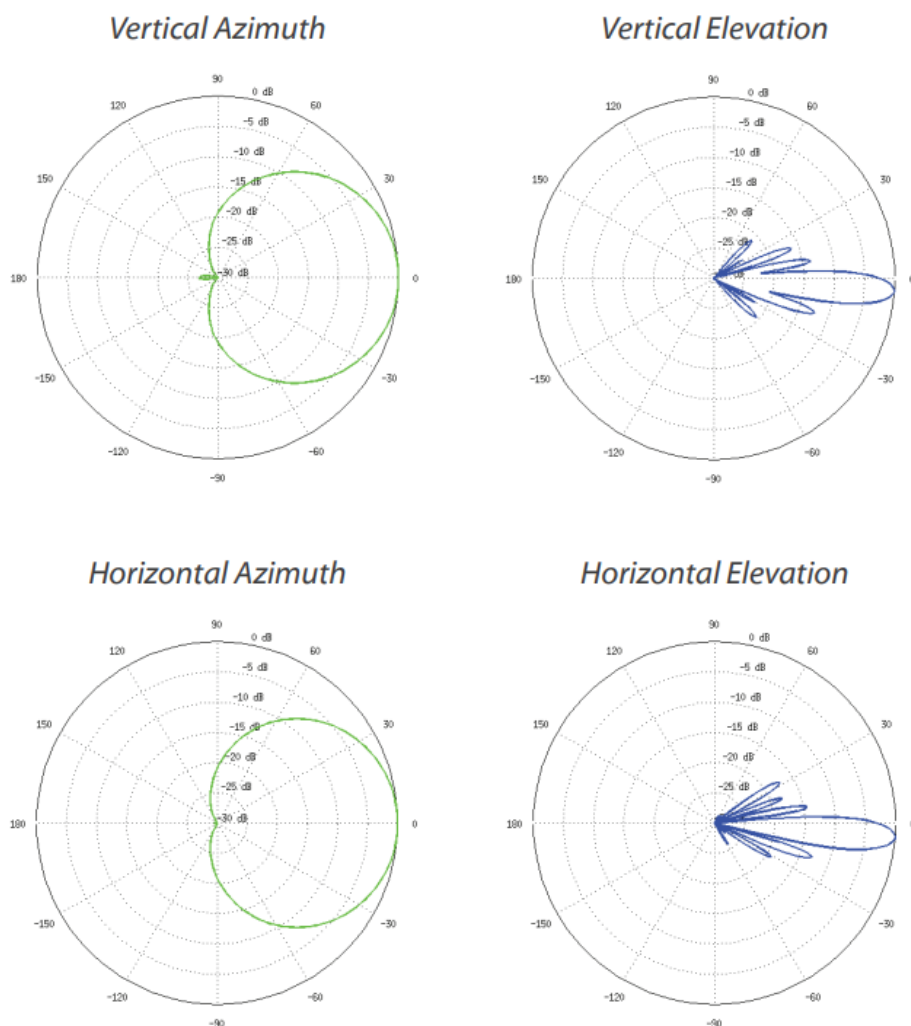


Joonis 7. Sektorantennid AM-2G16-90

Arvestades sensori riistvaralist võimekust kasutada kuni nelja Wi-Fi adapterit otsustati testida ka 90° horisontaalse sektoriga antenni. Valituks osutus Ubiquiti Networks antenn AirMax Sector AM-2G16-90, mis on taaskord 2x2 MIMO ning sobitatud 2,4 GHz sagedusvahemikule. Antenni tehnilised parameetrid on toodud tabelis 4.

Tabel 4. Sektorantenni AM-2G16-90 tehnilised parameetrid

Parameeter	Väärtus
Sagedusvahemik	2,3 - 2,7 GHz
Kiire laius	H: 90° / V: 9°
Polarisatsioon	Vertikaalne + Horisontaalne
Võimendus	16 - 17 dBi



Joonis 8. Sektorantenni AM-2G16-90 suunadiagrammid (Ubiquiti, 2018)

Võrreldes eelmise sektorantenniga on antennil AM-2G16-90 veelgi kitsam 9° vertikaalne kiire laius ning 2-3 dBi suurem võimendus. Samuti on antennil 4° elektriline allakalle, mida tuleb antenni paigaldamisel silmas pidada.

Testimisel Humala harjutusväljal, kasutades adapterit D, tuvastati droone kuni 7,8 km kauguselt, mis on kõrgeim tulemus seni testitud konfiguratsioonide seast. Antud tulemus vastab Friisi levivalemist tuletatavale logaritmilisele seosele antennivõimenduse ja tuvastusraadiuse vahel:

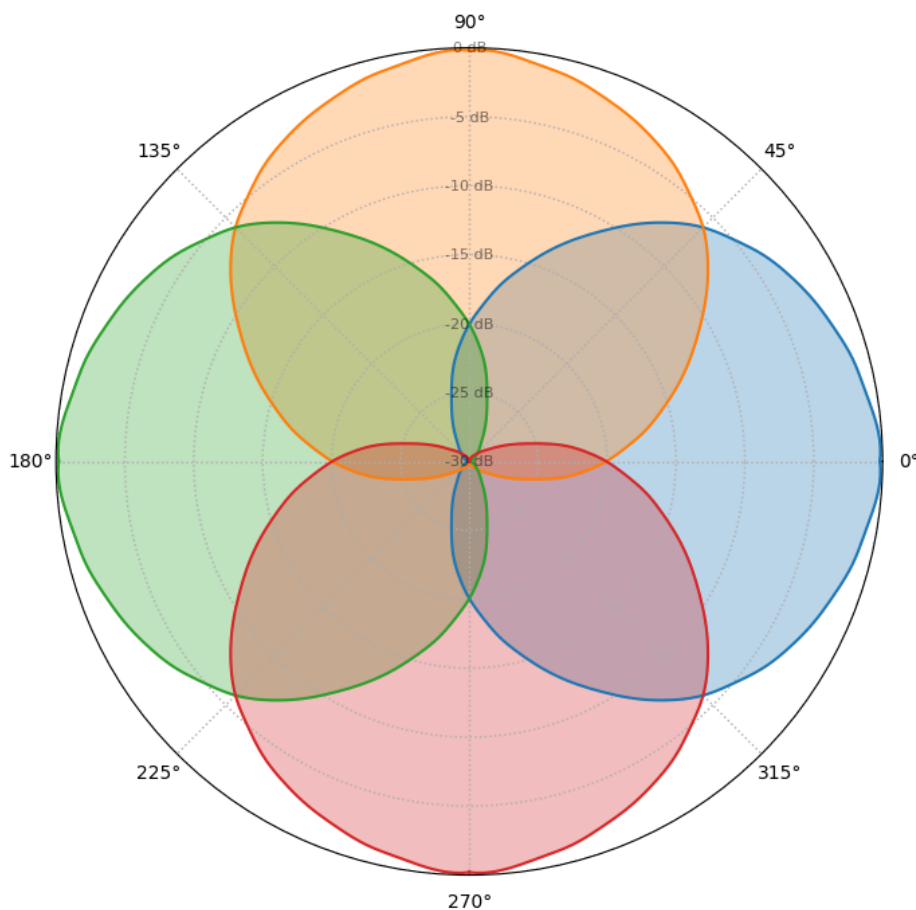
$$\frac{R_2}{R_1} = 10^{\frac{G_2 - G_1}{20}}, \quad (4.3)$$

kus:

- $G_1 = 14$ dBi — eelneva antenni (VH-Line Sektor Duo 14/120) võimendus;
- $G_2 = 16$ dBi — olemasoleva antenni (AM-2G16-90) võimendus;

- $R_1 = 6,4 \text{ km}$ — eelneva seadistuse maksimaalne tuvastusraadius.

Riistvaralist võimekust ja toote omahinda silmas pidades otsustati liikuda edasi nelja sektorantenniga, paigutades need 90° nurkade all ümber sensori telje moodustades täisringse katvuse. Seeläbi saavutatakse suunadiagramm nagu näidatud joonisel 9.



Joonis 9. Nelja AM-2G16-90 sektorantenniga suunadiagramm

Tootja määratletud 90° horisontaalne kiire laius kehtib tasemel -6 dB , mitte tüüpilisel -3 dB tasemel, mis tähendab, et reaalselt on tegemist pigem 60° sektorantenniga. Friisi levivalemist tulenevalt on võimendus ja tuvastusraadius logaritmilises suhtes, kuna $L_p \propto 20 \log_{10}(d)$, siis:

$$\Delta G = 20 \log_{10} \left(\frac{d_2}{d_1} \right), \quad (4.4)$$

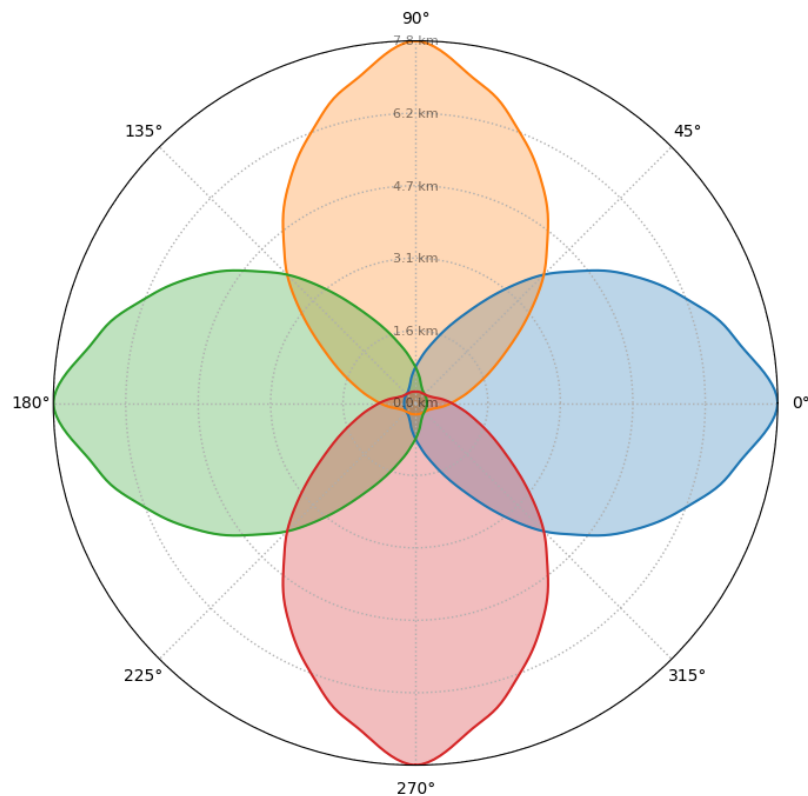
ning avaldades kauguse:

$$\frac{d_2}{d_1} = 10^{\frac{\Delta G}{20}}, \quad (4.5)$$

kus:

- ΔG – võimenduse muutus (dB);
- d_1 – algne kaugus;
- d_2 – uus kaugus.

Lähtudes valemist (4.5) ja kasutades nelja AM-2G16-90 sektorantenni, näeb nende katvusala välja nagu kujutatud joonisel 10. Kasutades ellipsi pindala valemit ning arvestades kattuvate alade lahutamist, saadi katvuse suuruseks ligikaudu 123 km². Tulenevalt antud antenni oodatust kitsamast sektorist tekivad üpriski suured pimedad nurgad iga 90° tagant, kus tuvastusraadius on maksimaalsest poole väiksem. Kuna käesoleva lõputöö peamine eesmärk on parandada süsteemi tundlikkust ning seeläbi tuvastusraadiust, mitte niivõrd kattetihedust, osutus sektorantenn AM-2G16-90 sobivaimaks valikuks, millega ka jätkati.

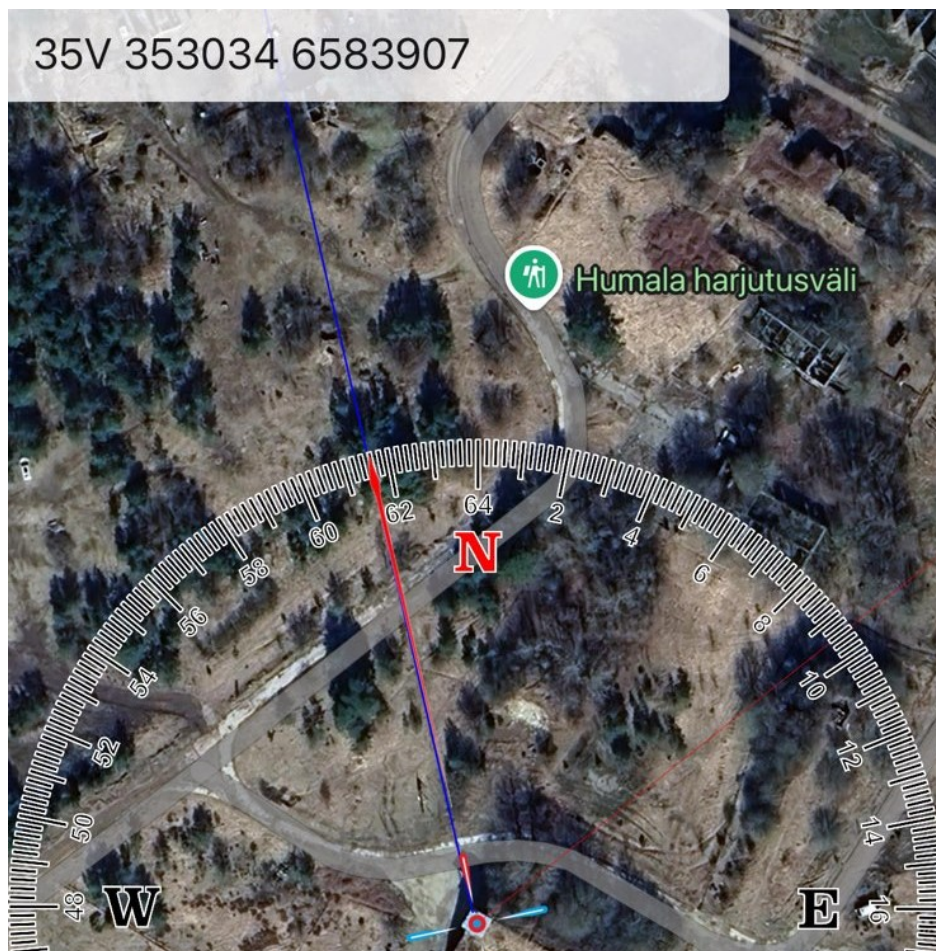


Joonis 10. Nelja AM-2G16-90 sektorantenniga katvusdiagramm

5. Prototüübi testimine

5.1 Humala harjutusväli

Kõik antennikatsed viidi läbi Tallinna lähistel asuval Humala harjutusväljal. Mõõtmiskoht paiknes koordinaatidel 59°22'05.5"N, 24°24'49.9"E, endise sõjaväeangaari katusel, mis asub ligikaudu 9 m ümbritsevast maapinnast kõrgemal ja umbes 45 m kõrgusel merepinnast.



Joonis 11. Humala harjutusvälja mõõtmiskoht

Katsed viidi läbi asimuudis 6151 mil ehk 346° suunas, kus maastik langeb ühtlaselt ning ei tõuse kõrgemale kui 35 m üle merepinna. Lähim märkimisväärne takistus on metsatukk, mis paikneb ligikaudu 200 m kaugusel mõõtmiskohast. Selle vahemaa juures on Fresneli tsooni maksimaalne raadius järgmine:

$$r = \sqrt{\frac{0,123 \cdot 100 \cdot 100}{200}} = \sqrt{6,15} = 2,5 \text{ m.} \quad (5.1)$$

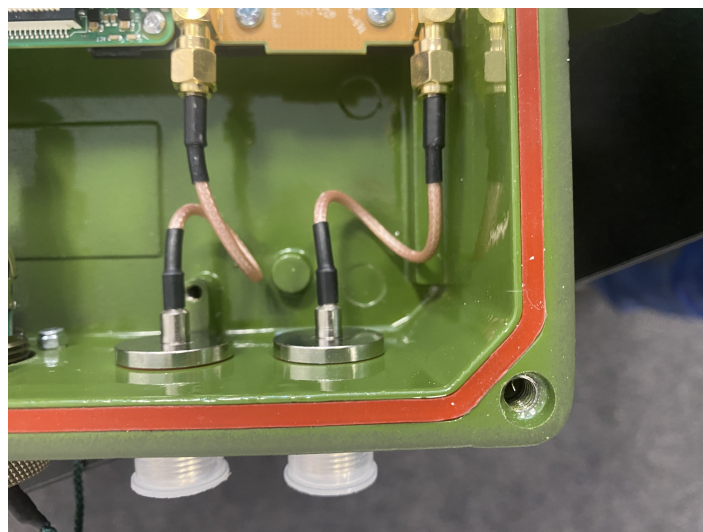
Hinnates, et metsatuka kõrgus on umbes 15 m, tuleb Fresneli tsooni puhtuse tagamiseks sektorantennid suunata ligikaudu 3° horisondist ülespoole. Lähimad potentsiaalsed elektromagnetilise taustmüra allikad on Viti ja Vääna-Jõesuu küla, mis asuvad katsesuunas ligikaudu 6 km kaugusel.

5.2 Antenniahelate kaod ülekande liinides

Varasem tundlikkuse hindamine on toimunud antennivõimenduse kaudu ning adapteri valik on tehtud vastavalt peatükis 3.2.4 toodud järeldustele. Siiski ei ole seni arvestatud sensorini viivates ülekandeliinides tekkivate kadudega.

Mõlema antenni väljundi külge on ühendatud 2 m pikkune HF400UF koaksiaalkaabel, millel on N-isased ühendused. Selle kaabli tootjapoolne sumbuvus sagedusel 2437 MHz on ligikaudu 22,7 dB / 100 m ehk kaabli sumbuvus 2 m ühenduse korral on 0,45 dB.

Koaksiaalkaabli ja sensori karbis asuva Wi-Fi adapteri vahel kasutatakse 0,5 m pikkust N-emanee – RP-SMA-isane *pigtail*-kaablit, mida on näha joonisel 12. See on valmistatud RG316 tüüpi koaksiaalkaablist, mille tüüpiline sumbuvus antud pikkusel on ligikaudu 0,69 dB. Lisaks tuleb arvestada tüüpiliste ühenduste kadudega, mis on ligikaudu 0,1 dB iga liidese kohta, ning Wi-Fi adapteri külge joodetud 90-kraadise SMA-ühenduse sumbuvusega, mis on hinnanguliselt 0,15 dB. (MetabeeAI, 2024)



Joonis 12. *Pigtail*-kaabel sensori korpuse ja Wi-Fi adapteri vahel

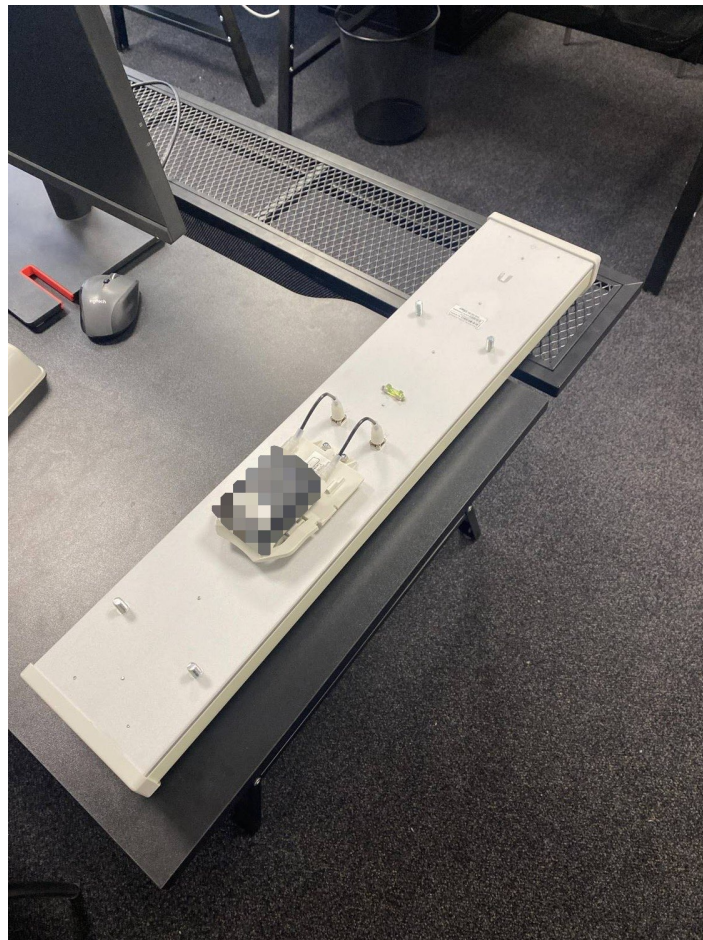
Seega on kogusumбуvus kummalgi polarisatsioonil ühe antenni kohta:

$$0,1 + 0,45 + 0,1 + 0,69 + 0,15 = 1,49 \text{ [dB]}. \quad (5.2)$$

Peatükis 4.4 käsitletud sektorantenni puhul vastab see ligikaudu 19% suuruse tuvastusraadiuse vähenemisele, lähtudes valemist (4.5).

5.2.1 Prototüübi mõõtetulemused

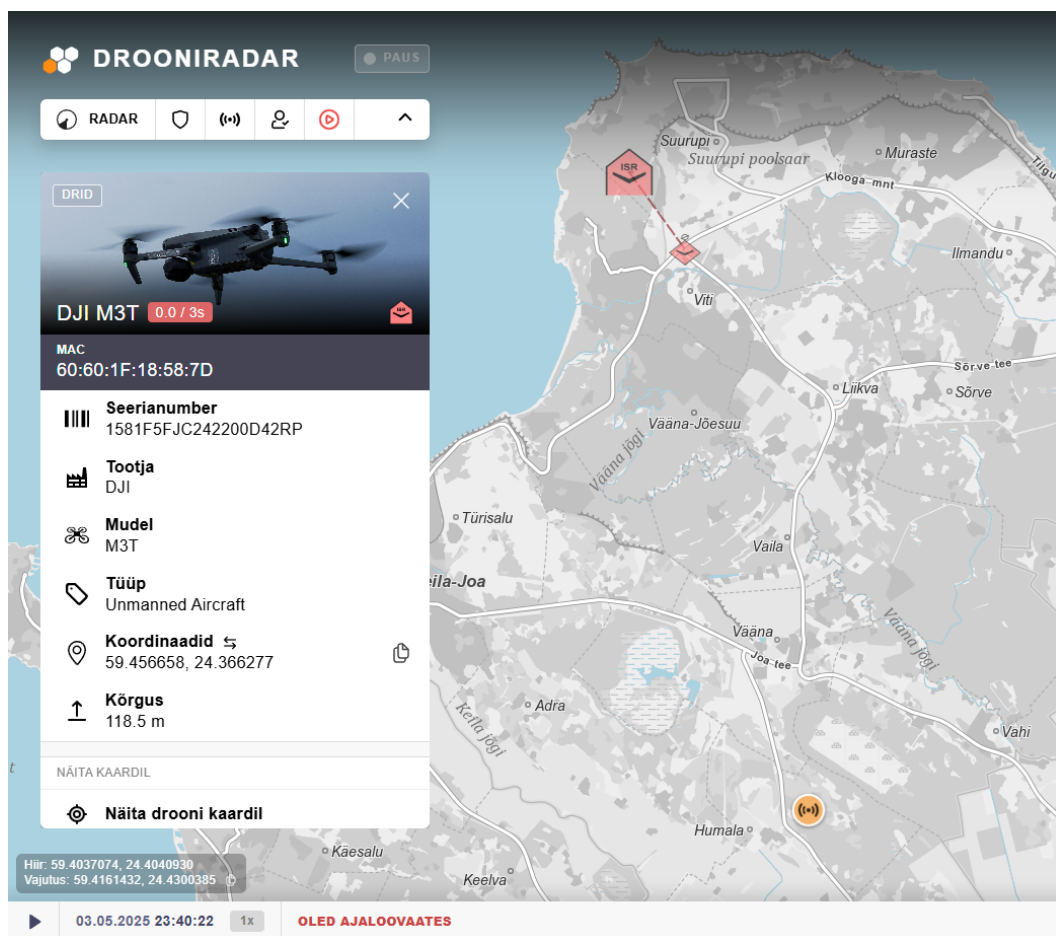
Järgmise sammuna püüti minimeerida vahemaad ning ühenduste arvu Wi-Fi adapteri ja antenni vahel. Antenni konstruktsioon ei võimalda Wi-Fi adapterit otse selle külge joota, mistõttu kasutati kahe RP-SMA-isase ühendusega LMR-200 koaksiaalkaablit. Tootja andmetel on selle lahenduse sumбуvus koos ühendustega 0,3 dB. Samuti otsustati säilitada Wi-Fi adapteri küljes olevad 90-kraadised SMA-ühendused, kuna halva jootmise korral võib sumбуvus hoopis suureneda. Lõpptulemus on kujutatud joonisel 13.



Joonis 13. Antenn ja Wi-Fi adapter ilma HF400UF koaksiaalkaablit

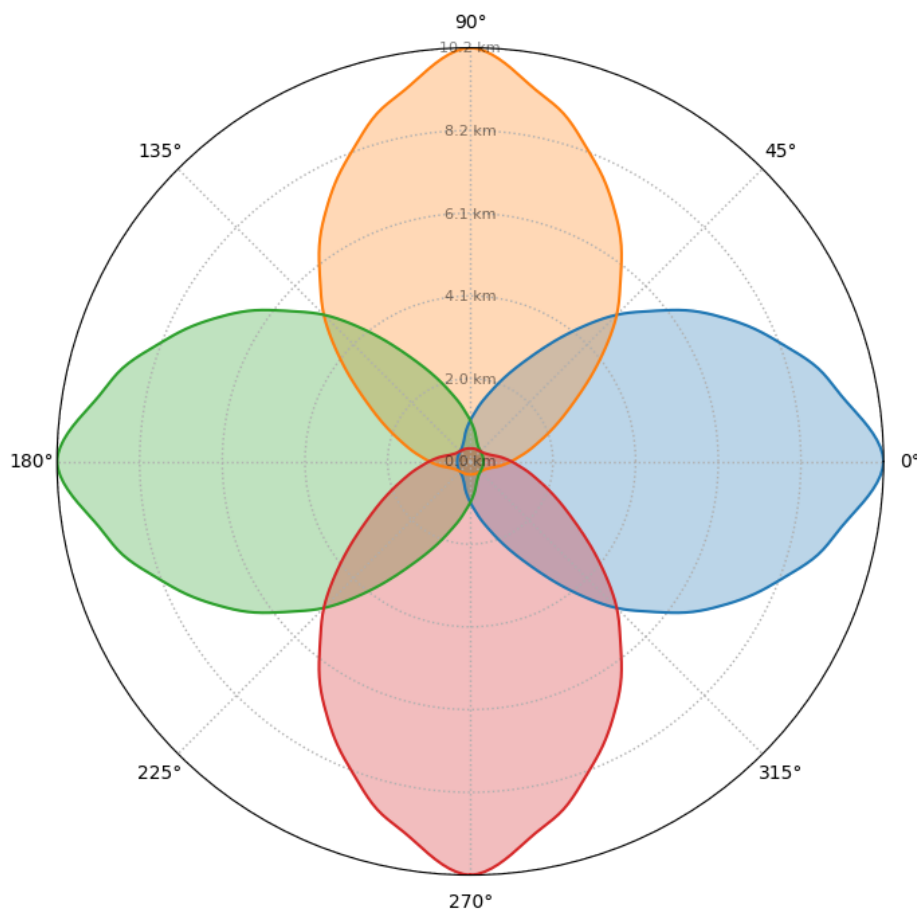
Katse jaoks seati üles kaks sensorit nagu on kujutatud joonisel 7. Kuna sektorantennil AM-2G16-90 on SMA-tüüpi väljundid, kasutati ühendamiseks mõlemas otsas varem mainitud *pigtail*-kaablit. Sellise lahenduse sumbuvus on arvutuslikult 2,28 dB. Teine sensor ühendati ülalkirjeldatud viisil. Prototüübi puhul oli kogusumbuvus seega 1,98 dB võrra väiksem, mistõttu valemi (4.5) alusel eeldati ligikaudu 25,6% paremat tuvastusraadiust ehk 9,8 km.

Testimisel Humala harjutusväljal osutus prototüübi maksimaalseks tuvastusraadiuseks 10,2 km, mis ületas esialgseid ootusi 4%. Parima tulemuse visuaalne väljavõte Drooniradari süsteemist on esitatud joonisel 14, kus oranž ring viitab sensori asukohale, punane romb piloodi asukohale ning suurem punane tingmärk drooni asukohale.



Joonis 14. Prototüübi kaugeim tuvastus Humala harjutusväljalt (Drooniradar, 2025)

Joonisel 15 on esitatud prototüübi katvusdiagramm, mille pindala on ligikaudu 210 km^2 . See tähendab, et Wi-Fi adapteri ning antenni vahel olevate kaablite pikkuse ja ühenduste arvu minimeerimisega saavutati 87 km^2 ehk 71% suurem katvusala.



Joonis 15. Prototüübi katvusdiagramm

6. Järeldused ning arutelu

Sissejuhatuses püstitatud lõputöö eesmärk, parandada Eesti kaitsetööstusettevõtte Hextech Solutions OÜ mehitamata õhusõidukite kaugidentimise (DRI) pakettide passiivsel kuulamisel põhineva sensorvõrgustiku Drooniradar seadmete tuvastusraadiust, on saavutatud. Lõpptulemusena valminud täiustatud prototüüp ületas esialgse lahenduse tuvastusraadiust 5,4 km võrra, mis vastab 112% suurusele kasvule. Sellele vastavalt suurenes ka sensori maksimaalne katvusala ligikaudu 138 km² võrra ehk 192%.

Töö käigus teostatud katsetega kinnitati Wi-Fi adapterite testimise vajadus ning leiti, et Wi-Fi adapterite kvaliteet varieerub ka sama mudeli lõikes, mistõttu on oluline kõiki adaptereid enne sensori komplekteerimist individuaalselt testida. Lisaks osutusid katsete käigus ootuspäraselt kõige efektiivsemaks sektorantennid, mis ületavad klassikalise omniantenni võimekust nii tuvastusraadiuse kui paigalduspaindlikkuse poolest. Sektorantennide suunatud suunadiagramm võimaldab kõrgemat võimendust valitud suunas, mis tagab parema signaalide vastuvõtu mürarikas või takistustega keskkonnas. Sellest tulenevalt võimaldab sektorantennide kasutuselevõtt täpsemalt planeerida sensorvõrgustiku implementeerimist, eriti tihedalt asustatud piirkondades, kus raadiosignaali levik on ebahomogeenne.

6.1 Soovitused edasiseks uurimis- ja arendustööks

Käesoleva töö praktiline väljund annab edasise arendustöö tarbeks tugeva aluse, ent samas on mitmeid teemasid, mida tasub lähemalt edasi uurida.

- **Adapterite testimine:** Adapterite testimise metoodikat saaks parandada. Üks võimalik lähenemine on testide läbiviimine kajavabas kambris, kus on välistatud igasugune raadiomüra. Sellisel juhul tuleks kasutada tarkvararaadiot (ingl *Software Defined Radio*) koos attenuaatoritega, mis võimaldavad signaali tugevust peenhäälestada ilma seadmete füüsilist asukohta muutmata. Praegused mõõtmised näitavad, et mitmete adapterite tootja poolt esitatud tehnilised parameetrid ei vasta antud kasutuskontekstis tegelikkusele. Seetõttu tuleks veel testida erinevaid adaptereid, et määrata nende tegelik tundlikkus. Samuti tuleks uuesti testida adapterit E, katsetades erinevaid draivereid.
- **Mõõtmiskoha tingimused:** Käesolevas lõputöös teostati kõik mõõtmised Humala harjutusväljal, kuna ka varasemad katsed ja andmed pärinevad just sellest mõõtmiskohast. Algselt valiti see asukoht tänu soodsatele maastikuoludele ja heale ligipääsetavuse-

le. Mõõtmiste suund määrati eelnevate edukate katsetulemuste põhjal, kuid samast mõõtmiskohast teistesse suundadesse tehtud katsetes on saavutatud oluliselt kehvemaid tulemusi, mõnel juhul on maksimaalne tuvastusraadius olnud vaid umbes 2 km. Seetõttu tuleks järgmise sammuna viia läbi raadiomüra tugevuse kaardistamine nii Humala harjutusväljal kui selle lähiümbruses. Raadiomüra tugevuse analüüs aitaks välja selgitada, mis põhjustab nii suurt signaalitugevuse langust ja millises ulatuses mõjutab raadiomüra sensori töökindlust.

- **Prototüübi arendamine:** Järgmise sammuna tuleks uurida, kas on võimalik Wi-Fi adapter osaliselt antenni külge joota või adapteri küljes olevad 90-kraadised SMA-ühendused eemaldada. Eeldusel, et adapteri antenni külge jootmine töötab ning ei pikenda tootmisprotsessi drastiliselt, võib sellega tundlikkuses säästa hinnanguliselt kuni 0,3 dB. Samuti on oluline viia läbi füüsilised mõõtmised kaablite sumbuuse täpselt määramiseks, kuna praegused hinnangud põhinevad üksnes tootjate poolt avalikustatud andmetel ning teoreetilistel arvutustel. Järgmisena tuleks disainida Wi-Fi adapterile veekindel korpus, mis kinnituks otse antenni korpuse külge ega segaks antenni tööd. Samuti on vaja kujundada ümber sensori korpus, et tagada veekindel ühendus antenni ja sensori korpuse vahel läbi USB-C kaabli. Tarkvaraliselt tuleks kontrollida Drooniradari koodi, et võimaldada vigaste või osaliselt kahjustatud Wi-Fi pakettide läbipääs filtrist. Näiteks MAC-aadress (ingl *Media Access Control address*) esineb iga paketi sees kahekordselt, mistõttu on vähemalt ühe paketi terviklikult vastuvõtmise korral võimalik filtreerida ka osaliselt kadunud andmeid sisaldavad paketid, kui nendes tuvastatakse õige MAC-aadress. See parandaks oluliselt sensori töökindlust iseäranis tuvastusraadiuse piirialal.

Tänuavaldused

Autor avaldab tänu alljärgnevatele isikutele:

- **Ivo Müürsepp** - lõputöö juhendaja;
- **Sten Nurmsalu** - Hextech Solutions OÜ tegevjuht, tänu kellele see projekt oli võimalik ning kes oli toeks ja abiks ka kõikide mõõtmiste läbiviimisel;
- **Rainis Randmaa** - Hextech Solutions OÜ tarkvaraarendusjuht, kes tagas testitavate adapterite ühilduvuse sensori tarkvaraga;
- **Juhan Oskar Hennoste** - adapterite testimiseks ja analüüsimiseks vajaliku tarkvara kaasautor.

Kasutatud kirjandus

- Airsight. (2022). How to activate Remote ID on Parrot drones.
- Alfa Network. (2025). AOA-2412 2.4 2.5GHz Omni Antenna 12dBi.
- Cisco. (2007). Antenna Patterns and Their Meaning .
- CRFS. (2025). 6 factors affecting minimum detectable RF signal and maximum detection range when detecting signals of interest.
- Drooniradar. (2025). Drooniradar.
- EASA. (2023). Remote identification will become mandatory for drones across Europe.
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2023). Aerospace series - Unmanned Aircraft Systems - Part 002: Direct Remote identification (EVS-EN 4709-002:2023).
- Enge, P., Akos, D., Do, J., Simoneau, J. B., Pearson, L. W., & Seetharam, V. (2004). Measurements of Man-Made Spectrum Noise Floor.
- FAA. (2025). Part 89-Remote Identification of Unmanned Aircraft.
- IEEE. (2016). Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (IEEE 802.11-2016).
- International Telecommunication Union. (2015). Unwanted emissions in the out-of-band domain.
- International Telecommunication Union. (2019). The concept of transmission loss for radio links.
- International Telecommunication Union. (2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
- International Telecommunication Union. (2024a). Radio noise.
- International Telecommunication Union. (2024b). Calculation of free-space attenuation.
- Kobie, N. (2025). Ehang Approved In China — But Air Taxis Remain Many Years From Takeoff.
- MetabeeAI. (2024). What is an SMA Connector? Everything You Need to Know.
- Reisberg, S., & Taklaja, A. (2005). Antennid ja RF elektroonika.
- Sarkar, S., Sarrafinazhad, A., & Ghoncheh, A. (2023). Introduction to LNA: Understanding the Fundamentals.
- Transpordiamet. (2025). Droonide lennutamise reeglid.
- Ubiquiti. (2018). AirMAX Sector Antennas Datasheet.
- Wireshark. (2025). About Wireshark.

Annotatsioon

Käesolev bakalaureusetöö keskendub mehitamata õhusõidukite kaugidentimise seadme prototüübi arendamisele ja katsetamisele. Töö eesmärk on parandada DRI (ingl *Direct Remote Identification*) pakettide passiivsel kuulamisel baseeruva seadme, mis võimaldab määrata õhusõiduki ja selle piloodi asukohta, tuvastusraadiust.

Lõputöö esimeses pooles antakse ülevaade *Direct Remote Identification* (DRI) süsteemist, selle edastamis- ja vastuvõtmisviisidest. Samuti käsitletakse teemakohaseid teoreetilisi aluseid, arvutatakse välja tuvastusraadiuse teoreetiline piir ning analüüsitakse peamisi tegureid, mis mõjutavad süsteemi toimivust reaalses keskkonnas. Järgmisena võrreldakse erinevaid turul saadaolevaid Wi-Fi (ingl *Wireless Fidelity*) adaptereid ja antenne ning katsete põhjal valitakse välja sobivaimad seadmed. Töö lõpuosas keskendutakse signaali sumbuvusele kaablites ja ühenduskohtades, hinnates nende mõju kogu süsteemi tundlikkusele.

Lõputöö tulemusel valmis täiustatud prototüüp, mis loob kindla aluse sensorvõrgustiku edasiseks arendamiseks. Valminud lahenduse tuvastusraadius kasvas võrreldes esialgse süsteemiga 112%. Vastavalt suurenes ka maksimaalne katvusala 192%. Lisaks tuuakse välja mitmeid edasiarenduse võimalusi, sealhulgas soovitusel Wi-Fi adapterite täiendavaks testimiseks ning sumbuvuse eksperimentaalseks mõõtmiseks. Samuti käsitletakse tarkvaralisi täiustusi, mis võimaldaksid parandada sensori töökindlust nõrga signaali korral, kasutades vigaste pakettide osalist analüüsi. Lõpetuseks rõhutatakse vajadust viia läbi põhjalik raadiomüra tugevuse kaardistamine testimiskeskkonnas, et selgitada välja, millises ulatuses mõjutab raadiomüra sensori töökindlust.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 42 leheküljel, kuus peatükki, 15 joonist, neli tabelit.

Abstract

Improving the Sensitivity of Sensors in the Drone Detection Sensor Network Drooniradar

This bachelor's thesis focuses on developing and testing a prototype for remote identification of unmanned aerial vehicles (UAVs). The primary objective is to improve the detection range of a device that passively listens for Direct Remote Identification (DRI) packets, enabling the positioning of both the UAV and its pilot without the need to connect to a network.

The first part of the thesis provides an overview of the DRI system, including its transmission and reception mechanisms. Theoretical foundations relevant to the topic are presented, the theoretical maximum detection range is calculated, and the main factors that influence system performance in real-world conditions are analyzed. Subsequently, various commercially available Wi-Fi (Wireless Fidelity) adapters and antennas are compared, and the most suitable hardware is selected based on experimental results. The final part of the thesis focuses on signal attenuation in cables and connectors, evaluating their impact on overall system sensitivity.

As a result, an improved prototype was developed, laying a solid foundation for future sensor network implementation. The detection range of the proposed solution increased by 112% compared to the initial system, with the maximum coverage area growing by 192%. The thesis also outlines several directions for further development, including recommendations for more precise testing of Wi-Fi adapters and experimental measurement of attenuation. Additionally, software improvements are discussed, such as the possibility of enhancing reliability by partially analyzing corrupted packets in weak-signal scenarios. Finally, the thesis emphasizes the importance of conducting a comprehensive radio noise strength survey in the test environment to better understand the extent to which radio frequency interference affects sensor reliability.

The thesis is written in Estonian and consists of 42 pages, six chapters, 15 figures, and four tables.

Lisad

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Mattias Johan Kangur

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Droonituvastuse sensorvõrgustiku Drooniradar sensorite tundlikkuse parandamine”, mille juhendaja on Ivo Mürsepp
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

23.05.2025

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

Lisa 2 – Testimistarkvara

Käesoleva lõputöö GitHub repositoorium: <https://github.com/M4theusK/L6putoo>