

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond  
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IE40LT

Kaarel Koppel 142954 IALB

**AUTOMAATSE PILDIEDASTUSSIGNAALI  
(APT) VASTUVÕTT KVADROFIILARSE  
HEELIKSANTENNIGA (QHA) NING  
PILDIKS KONVERTEERIMINE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Ivo Mürsepp  
dotsent

Tallinn 2017

## **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: Kaarel Koppel

22.05.2017

## Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärkideks on aru saada automaatse pildiedastussignaali (*Automatic Picture Transmission, APT*) formaadist ja edastusest, signaali vastuvõtuks sobiva antenni valmistamine ja töökorda saamine ning tarkvaralist raadiot (*Software Defined Radio, SDR*) ja valmistatud antenni kasutades satelliidipildi vastuvõtmine. Töö käigus uuritakse, kas kasutatud SDR on võimeline APT signaali vastu võtma, teostatakse valmis ehitatud antenni parameetrite mõõtmised, saamaks teada, kas antenn töötab soovitud sagedusel, et lõpuks töö põhieesmärk, satelliidipildi kättesaamine, saaks täidetud.

Selgus, et valmis ehitatud antenn töötas väga hästi, kuid soovitud madalamal sagedusel ja ehituse käigus tekkinud mõõteveast tingitud viga sai parandatud. Sellest võis järeldada, et kõik sellised mõõtmised, millest oleneb kvaliteet, tuleks mitu korda üle kontrollida. Samuti tuli töö käigus välja, et kasutatud SDR võimaldab küll signaali vastuvõttu, kuid mitte satelliidi terve nähtava ülelennu ulatuses ja sellest tulenevalt jäi satelliidipilt mõõtetmetelt väiksemaks. Järelikult, kui soovime vastuvõtuga parandada, siis tuleks kasutada madala müraga eelvõimendit (LNA).

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 28 leheküljel, 7 peatükki, 23 joonist.

## **Abstract**

### **Automatic Picture Transmission (APT) Reception with a Quadrifilar Helix Antenna (QHA) and Converting it to an Image**

The main goals of this bachelor's thesis are to understand the format and transmission of an automatic picture transmission (APT), to make a functioning antenna for APT reception and receiving a satellite picture by using a software defined radio (SDR) and a self-made antenna. The thesis focuses on understanding the working capabilities of a used SDR – whether it is capable of receiving APT signal or not. Furthermore, necessary antenna parameters are measured to find out if the antenna is tuned to the right frequency or not. The combined result of these individual researches will determine the outcome of this thesis – will the APT reception be successful or some corrections have to be made in order for it to be successful.

Antenna measuring showed that the antenna was working properly but at a lower frequency than expected. The defectiveness of the antenna was caused by a measurement error, which was corrected, and thus tuning it to the aimed frequency. This showed that it is essential to verify every taken measurement when dealing with that kind of precise work where precision ensures quality. What is more, it turned out that the used SDR is capable of receiving APT signal but not to a full extent of the satellite's pass, therefore, reducing the size of a received satellite image. This means that a low-noise amplifier (LNA) could be used to amplify the signal and extend the signal receiving window, and thus receiving a full size picture.

The thesis is in Estonian and contains 28 pages of text, 7 chapters, 23 figures.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

SDR	<i>Software Defined Radio</i> , tarkvaraline raadio
MCX	<i>Micro Coaxial</i> , mikro-koaksiaal
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> , Riiklik ookeani ja atmosfääri administratsioon
APT	<i>Automatic Picture Transmission</i> , automaatne pildiedastus
QHA	<i>Quadrifilar Helix Antenna</i> , kvadrofilaarne heeliksantenn
DCA	<i>Double Cross Antenna</i> , topelt-ristantenn
MIRP	<i>Manipuled Information Rate Processor</i> , manipuleeritud informatsiooni ülekandekiirusega protsessor
BNC	<i>Bayonet Neill-Concelman connector</i> , bajonettühendusega kõrgsageduslik pistikühendus
SWR	<i>Standing Wave Ratio</i> , seisulaine tegur
LNA	<i>Low-Noise Amplifier</i> , madala müraga eelvõimendi

## Sisukord

1 Sissejuhatus .....	8
2 Tarkvaraline raadio (SDR) .....	9
2.1 Tööpõhimõte.....	9
2.2 Töös kasutatav tarkvaraline raadio .....	9
3 Automaatne pildiedastus (APT) [4].....	11
3.1 APT modulatsioon ja formaat.....	11
4 APT signaali edastav satelliit .....	14
4.1 Satelliidi pardal olevad seadmed .....	15
4.1.1 Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A).....	15
4.1.2 Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B).....	16
4.1.3 Advanced Very High Resolution Radiometer/3 (AVHRR/3) [13] .....	16
4.1.4 High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/3).....	18
4.1.5 Space Environment Monitor (SEM-2) .....	18
4.1.6 Data Collection System (DCS/2).....	18
4.1.7 Search and Rescue Satellite (SARSAT) Instrument .....	18
4.1.8 Solar Backscatter Ultraviolet Spectral Radiometer (SBUV/2) .....	19
5 Lingi bilansi arvutamine.....	20
6 Antenn signaali vastuvõtuks.....	24
6.1 Ringpolarisatsioon .....	24
6.2 Antenni valmistamine (QHA) .....	26
6.3 Valmis antenni esmane test .....	29
7 Kokkuvõte .....	36
Kasutatud kirjandus .....	37
Lisa 1 – Antenni tugikinnitus-aukude šabloon.....	39

## Jooniste loetelu

Joonis 1. Töös kasutatud SDR-i plokk-skeem.....	9
Joonis 2. RTL-SDR RTL2832 R820T.....	10
Joonis 3. APT kaadri formaat [4]. ....	12
Joonis 4. APT formaadis pildi näide [5].....	13
Joonis 5. NOAA-15 orbiidid 02.04.2017 [9].....	15
Joonis 6. NOAA-15 AMSU-A andmete põhjal koostatud pinnatemperatuuri profiili näide [11].....	16
Joonis 7. NOAA-15 maksimaalse ja minimaalse signaali vastuvõtu kauguse illustratsioon. ....	20
Joonis 8. Lingi bilansi arvutuse illustratsioon. ....	21
Joonis 9. Ringpolarisatsiooni illustratsioon [19]. ....	24
Joonis 10. Paremakäeline ringpolarisatsioon [19]. ....	25
Joonis 11. Valmistatava antenni dimensioonid [21]. ....	26
Joonis 12. Antenn pealt vaates [21]. ....	27
Joonis 13. Enda valmistatud QHA antenn. ....	28
Joonis 14. APT signaali koskdiagrammi kuju [22]. ....	29
Joonis 15. Kõrgsageduslik antennianalüsaator [24]. ....	30
Joonis 16. Antenni esmase mõõtmise tulemus. ....	30
Joonis 17. Antenni mõõtmise tulemus peale paranduste läbiviimist. ....	31
Joonis 18. Esimene edukas vastuvõtt. ....	32
Joonis 19. SDRSharp ekraanitõmmis. ....	33
Joonis 20. Dekodeerimise tulemus nähtavas valguses. ....	33
Joonis 21. Dekodeerimise tulemus infrapuna diapasioonis. ....	34
Joonis 22. Võimendatud värvidega APT pilt. ....	34
Joonis 23. APT termograafiline pilt. ....	35

# 1 Sissejuhatus

Antud bakalaureusetöö keskendub automaatse pildiedastussignaali (APT) uurimisele ja vastuvõtule kvadrofilaarse heeliksantenni ning tarkvaralise raadio abil. APT signaali vastuvõtt toimub ülikõrgsagedusalas NOAA-15 ilmasatelliidilt 137,62 MHz juures.

Töö eesmärkideks on aru saada APT formaadist ja edastusest, vastuvõtuks sobiva antenni ehitamine ja töökorda saamine ning valmis ehitatud antenni ja tarkvaralist raadiot (SDR) kasutades satelliidipildi vastuvõtmine.

Töö algab SDR-i tutvustamisega, kus esitatakse üldine definitsioon, lihtsustatud tööpõhimõte ning töös kasutatud SDR-i kirjeldus. Järgmiseks on lahti seletatud APT olemus, modulatsioon ning formaat. Sellele järgneb informatsioon valitud satelliidi kohta, tema orbiit ning pardal olevate seadmete kirjeldus. Peale seda on välja toodud arvutused sidelingi bilansi kohta: teoreetiline maksimaalne vastuvõtukaugus ning SDR vastuvõtja tundlikkusest tingitud tegeliku vastuvõtukauguse arvutus. Järgmiseks tutvustatakse APT vastuvõtuks sobilikku antenni, selle omadusi ning ehitusprotsessi. Töö viimane osa koosneb valmis antenniga APT signaali vastuvõtust ja satelliidipildiks konverteerimisest.



## 2 Tarkvaraline raadio (SDR)

*Software Defined Radio* (SDR) ehk tarkvaraline raadio on kommunikatsioonisüsteem, kus komponendid, mis on klassikaliselt rakendatud riistvaraliselt (näiteks filtrid, võimendid, modulaatorid/demodulaatorid, detektorid jne), on hoopis realiseeritud tarkvaraliselt. Tarkvara konfigureerides või muutes muutub ka raadio jõudlus või kasutusala [1].

### 2.1 Tööpõhimõte

Kõige lihtsam seletus töös kasutatud SDR tööst oleks, et SDR omab R802T integraallülitust, mille abil selekteeritakse antennilt vastu võetud raadiosignaali ja teisendatakse vahesagedusele. RTL2832U kiibi abil konverteeritakse saadud analoogsignaali 8-bitiliseks digitaalsignaaliks (analoog-digitaalmuundur Joonis 1), mis edastatakse USB kaudu arvutisse. Vastav tarkvara, millega koos SDR-i kasutatakse, töötleb signaali ning genereerib soovitud väljundi [2].



Joonis 1. Töös kasutatud SDR-i plokk-skeem.

### 2.2 Töös kasutatav tarkvaraline raadio

Lõputöös kasutati RTL-SDR tarkvaralist raadiot (Joonis 2). Tegemist on odava tarkvaralise raadioga, mis on originaalis mõeldud digitelevisiooni vastuvõtuks, kuid seda on võimalik kasutada ka kui laiaribalist üldotstarbelist SDR-i.

Antud SDR suudab töötada tänu Rafael Micro R820T [3] tuunerile sagedusvahemikus 24-1766 MHz ja omab maksimaalset diskreetimissagedust 3,2 MS/s (3,2 miljonit

diskreeti sekundis). RTL2832U kiibis asuva analoog-digitaal muunduri resolutsioon on 8 bitti. Konkreetne SDR võimaldab ainult vastuvõttu, saatjana teda kasutada ei saa. Antenniga ühendamiseks on raadiol MCX (*Micro Coaxial* ehk mikro koaksiaal) pesa.



Joonis 2. RTL-SDR RTL2832 R820T.

### 3 Automaatne pildiedastus (APT) [4]

APT süsteem on analoog pildi-edastus süsteem, mis töötati välja 1960ndatel ilmasatelliitides kasutamiseks. Hetkel edastavad APT signaali kolm NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) satelliiti (NOAA-15, NOAA-16 ja NOAA-18).

#### 3.1 APT modulatsioon ja formaat

ATP andmeid saadetakse ridade kaupa (Joonis 3). Ühe rea pikkuseks on 2080 pikslit (ühtlasi ka pildi laius) ning ühe sekundi jooksul saadetakse kaks rida, mis teeb andmeedastuskiiruseks 4160 baudi (pikslit/sekundis). Üks piksel sisaldab endas kaheksat bitti, ehk ühe baidi, informatsiooni ja seega on edastuskiiruseks  $4160 \text{ B/s} \cdot 8 = 33,28 \text{ kbit/s}$ .

Satelliidi edastatud pilt koosneb kahest eri diapasioonis pildistatud pildist. Mõlemal pildil on kujutatud sama maa-ala, kuid esimene pilt (Joonis 4 vasakpoolne pilt – Kanal A) on jäädvustatud nähtavas valguses ja teine pilt (Joonis 4 parempoolne pilt – Kanal B) infrapuna diapasioonis.

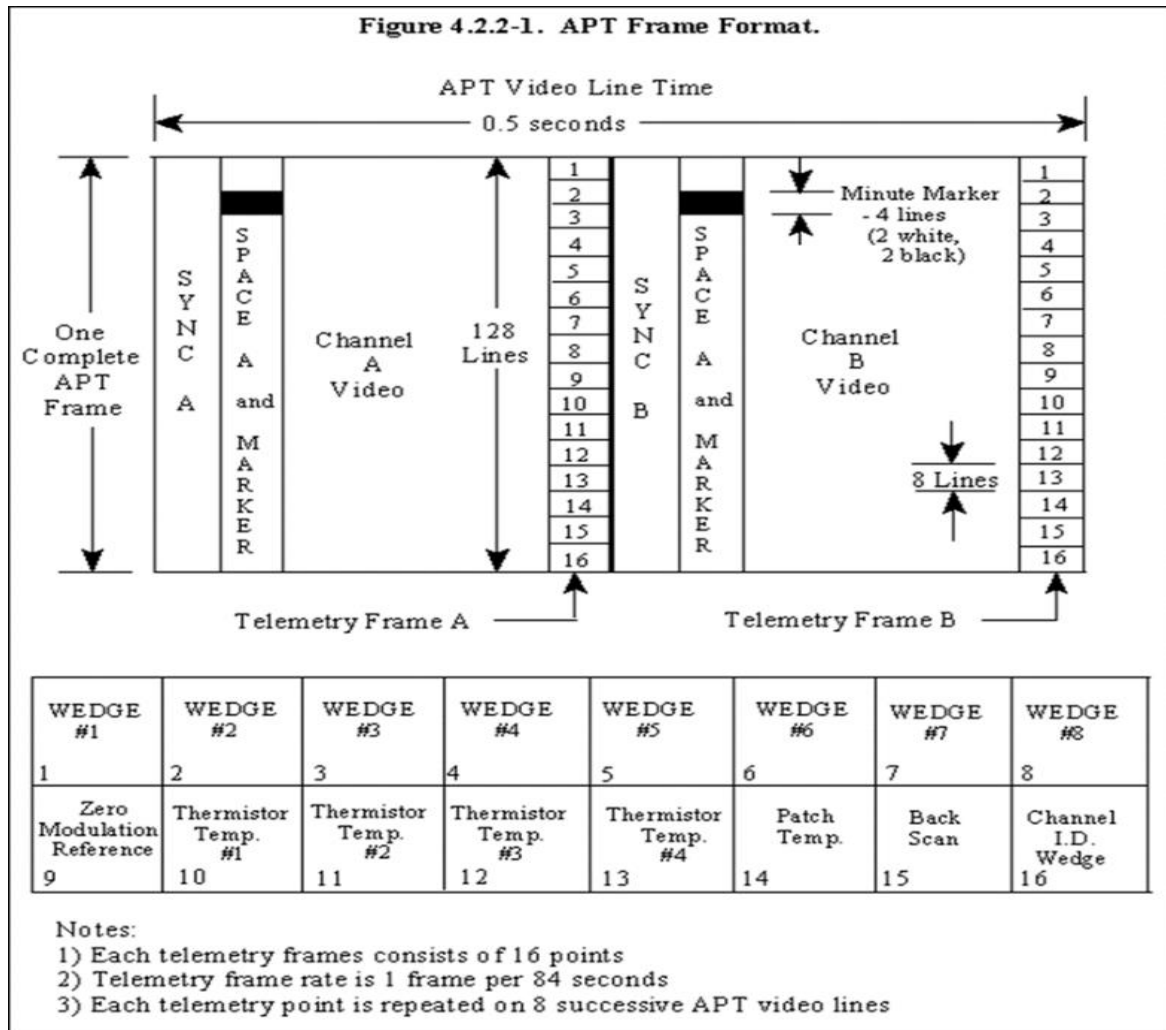
Ühe pildi laiuseks on 909 pikslit ja kaadri kõrgus on 128 rida. Kuna ühe pildi laius on 909 pikslit ja kogu rea (kahe pildi pikkuseks) on 2080 pikslit, siis  $2080 - 2 \cdot 909 = 262$  pikslit on jäetud telemeetria ja sünkroniseerimise jaoks. Ühe piksli küljepikkus on 4km, mis teeb kaadrile mahtuva pildistatava ala mõõtmeteks  $4 \cdot 909 = 3636$  korda  $128 \cdot 4 = 512$  ehk  $3636 \times 512$  km.

Iga rida algab 40 piksli pikkuse sünkrojadaga (esimene hall jada pildi vasakus ääres joonisel 4), mille periood on 5 pikslit.

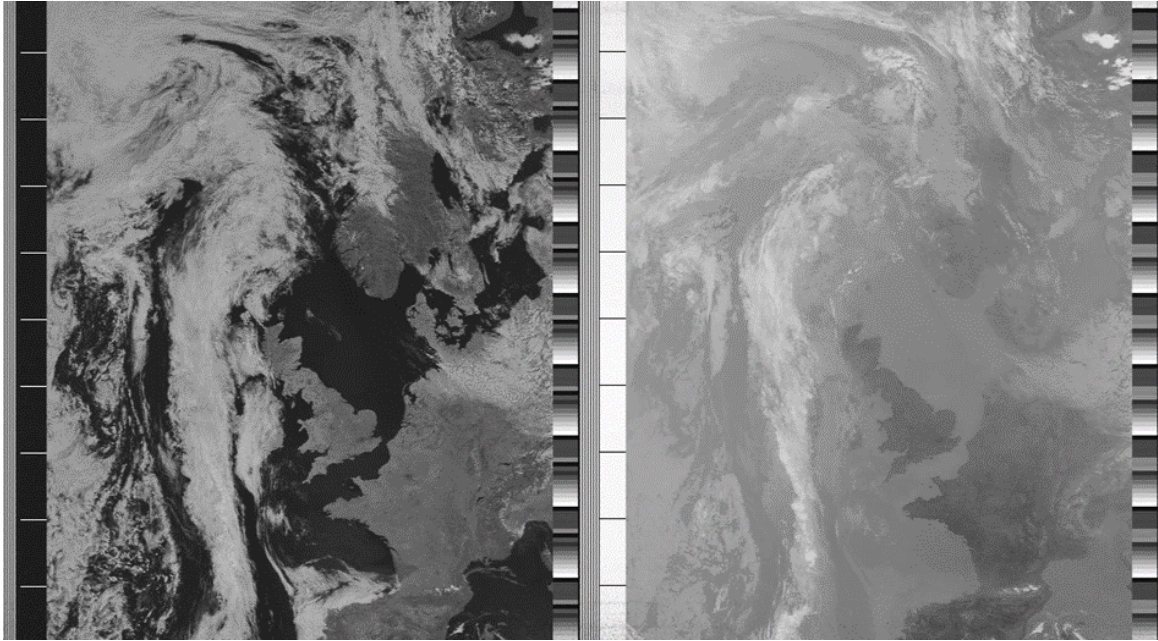
Järgnevad 48 pikslit on A kanalis mustad (0) ja B kanalis valged (256). Iga 60 sekundi (120 rea) tagant edastatakse minuti marker, mis koosneb vahelduvast kahest mustast ja kahest valgest reast, iga rea kõrgus on kaks pikslit, seega on minuti markeri kõrgus 8 rida

ja pildi jaoks jääb 120 rida. Kuna minuti markeri kõrgus on 8 rida, siis tegelikult jääb pildistatava ala mõõtmeteks  $3636 \text{ korda } 120 \cdot 4 = 480$  ehk  $3636 \times 480 \text{ km}$

Iga kanali rea lõpus on u 45 piksli pikkuselt kuusteist, kaheksa rea laiust telemeetriaplokki. Plokid 1-9 on vajalikud pildi kalibreerimiseks. Plokis 1 on signaali tugevus 1/8 maksimumist (8) ja see suurus kasvab kaheksandiku võrra kuni maksimumini (255) plokis 8 ning kukub plokis 9 nulli (0).



Joonis 3. APT kaadri formaat [4].



Joonis 4. APT formaadis pildi näide [5].

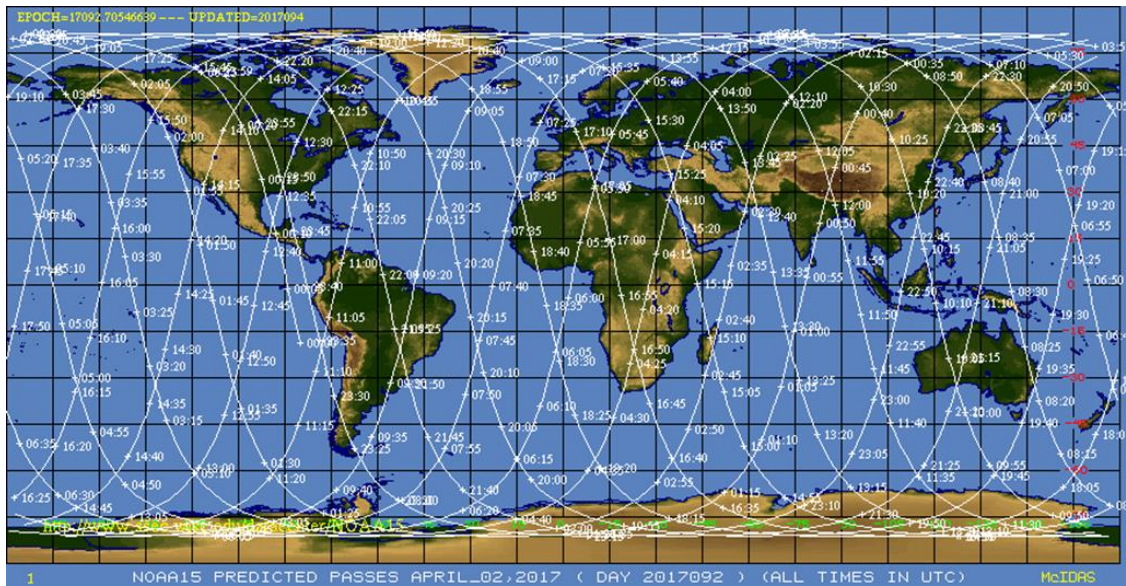
Nagu ülal mainitud edastatakse pikslite väärtust ühebaidiste arvudena (8-bitti), millele vastab 256 erinevat halltooni (0-must, 255-valge). Esmalt moduleeritakse 2400 Hz sagedusega abikandjat 256-positsiooniste amplituudmanipulatsiooni (256-ASK) kasutades ning seejärel teostatakse saadud signaaliga sagedusmodulatsioon kandesagedusel 137 MHz.

## 4 APT signaali edastav satelliit

Valituks osutus satelliit nimega NOAA-15. Kuna hetkel edastavad APT signaali 3 NOAA satelliiti, siis valituks osutus kohe esimene, mis silma jäi. NOAA-15 on üks NASA TIROS (*Television Infrared Observation Satellite*) seeria satelliite, mis lennutati orbiidile 13. mail 1998 ning mida opereerib NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Satelliit kogub orbiidil tiireldes andmeid (õhuniiskus, ookeanivee temperatuur, pilvede niiskusesisaldus ja pilvede liikumine ning palju muud), mille põhjal on võimalik ennustada ilma, orkaane ja muud. Tegemist on päikesesünkroonsel orbiidil, 807 km kõrgusel Maast, tiirleva satelliidiga, millel kulub orbiidi (vaata Joonis 5) läbimiseks 101 minutit [6].

Päikesesünkroonse orbiidi eripära seisneb selles, et selle kalle on veidi suurem kui  $90^\circ$ . See nähtus teeb ta retrograadseks ehk erinedes teistest satelliitidest, tiirleb satelliit päikesesünkroonsel orbiidil idast läände ning orbiit pöörleb läänest itta. Orbiidi kalde ja kõrguse omavahelise sobitamise korral on orbiidi pöörlemisperioodiks üks aasta. Tänu sellele säilib nurk orbitaaltasandi ja Päikese vahel ja satelliit „külatab“ päikesesünkroonsel orbiidil teatud kohti maapinnal siis, kui Päikese kõrgus (ja ka valgustustingimused) on samad. Selle tulemusena on võimalus pildistada optimaalsetes valgustustingimustes ja elimineerida ööpäevaste valgustuse ja temperatuuri muutuste mõju [7].

Riiklik ookeani ja atmosfääri administratsioon (NOAA) on Ameerika teadusagentuur, mis tegeleb näiteks ilmaennustusega, tormihoiatuste väljakuulutamise, kliima monitooringuga ja palju muuga. Organisatsiooni eesmärgiks on mõista ja ennustada muutusi kliimas, ilmas, ookeanites ja rannikualadel ning jagada kogutud teadmisi ja informatsiooni, et hoida ära katastroofe ja kaitsta ranniku ning mere ökosüsteeme [8].



Joonis 5. NOAA-15 orbiidid 02.04.2017 [9].

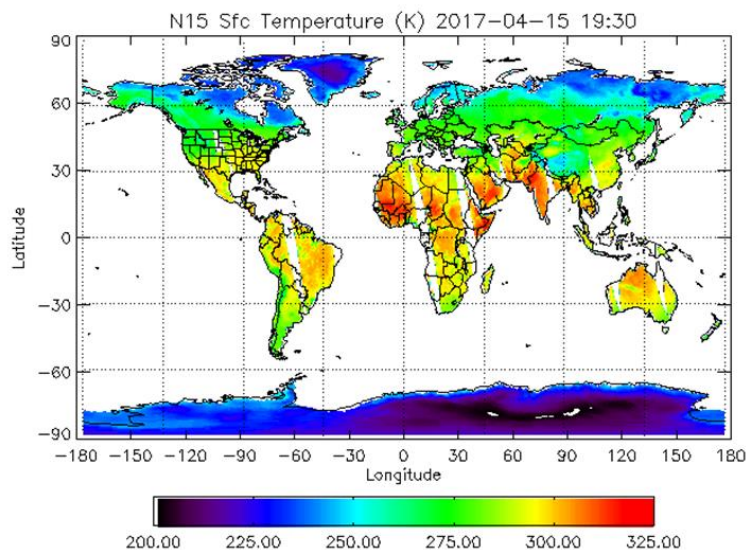
## 4.1 Satelliidi pardal olevad seadmed

NOAA-15 pardal on kaheksa instrumenti ning nende eesmärgiks on koguda erinevat sorti eelpool mainitud andmeid. Järgnevalt on lühidalt igast seadmest juttu.

### 4.1.1 Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A)

AMSU-A on 15-kanaliline mikrolainete radiomeeter, mis koosneb kahest eraldi moodulist AMSU-A1 ja AMSU-A2, ning mida kasutatakse globaalse atmosfääri temperatuuri profiili (Joonis 6) mõõtmiseks ja mis kogub informatsiooni atmosfääris igas olekus oleva vee kohta (välja arvatud väikesed jää osakesed, mida ei ole võimalik mikrolaine sagedustel nähta). Igas kanalis mõõdetakse radiokiirgust eri sagedustel (23-89 MHz) [10].





Joonis 6. NOAA-15 AMSU-A andmete põhjal koostatud pinnatemperatuuri profiili näide [11].

#### 4.1.2 Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B)

AMSU-B on viie kanaliga mikrolainete radiomeeter, mis töötab koostöös AMSU-A radiomeetriga, et mõõta radiokiirgust mitmetelt eri atmosfäärikihtidelt. Saadud andmete abil koostatakse globaalseid atmosfääri niiskusprofiile. Kõrgemad sagedused kanalites (89-183 GHz) võimaldavad paremini tungida läbi erinevate atmosfäärikihtide kuni maapinnani [12].

#### 4.1.3 Advanced Very High Resolution Radiometer/3 (AVHRR/3) [13]

AVHRR/3 on kuue kanaliga (kolm nähtava valguse kanalit ja kolm infrapuna kanalit) skaneeriv radiomeeter, kus väike vaateväli (1,3 x 1,3 milliradiaani) skaneeritakse üle kogu maa ühest horisondist teiseni, lapiku 360 kraadi keerleva skaneeriva peegli abil, mida pöörab väike sünkroonmootor. Sensorite analoogväljund digitaliseeritakse satelliidi pardal 10 bitisteks sõnadeks kiirusega 39,936 diskreeti sekundis. Iga diskreeti samm vastab skanneri 0,95 milliradiaanisele pöördenurgale. Ühe Maa skaneerimistsükli jooksul saadakse kanali kohta 2048 diskreeti. Radiomeetri kõik kuus kanalit on konfigureeritud nii, et iga kanal mõeldaks skaneerimise käigus energiat täpselt ühest ja samast kohast.



AVHRR/3 koosneb viiest moodulist:

Skaneerimismoodul, elektroonikamoodul, kiirgusallika jahutusmoodul, optiline alamsüsteem ning alusplaat.

Skaneerimismoodul hõlmab endas pöörlevat skaneerivat peeglit, juhtmootorit ning mootori kaitseümbrist. Mootoriks on 80-pooluseline hüsterees-sünkromootor, millel on kaks võimsusrežiimi ning mis töötab üldiselt suure võimsusega režiimis (~ 4,5 watti). Mootori töökiiruseks on 360 pööret minutis, et skaneering maast oleks pidev ja stabiilne.

Elektroonikamoodulisse on paigaldatud kogu elektroonika, mis on vajalik antud seadme tööks (kanalite eelvõimendid, toitelülitused jne).

Kiirgusallika jahutusmooduli eesmärgiks on hoida kiirgusallika ja infrapuna detektorite töötemperatuurid normi piires, et vältida nende kondenseerumist.

Optiline alamsüsteem koosneb kahest üksusest – teleskoobist ja optilisest releeüksusest. Viimane jagab teleskoobi väljundkiire kuueks diskreetseks spektraalribaks ja fokuseerib nad.

Kõik viis moodulit on tugevalt kinnitatud spetsiaalsele alusplaadile.

Moodulitelt ning sensoritelt saadud andmete töötlus toimub satelliidi pardal. Andmete töötlusega tegeleb MIRP (*Manipulated Information Rate Processor*). MIRP töötleb saadud andmed, vastavalt andmete tüübile, neljaks väljundiks, millest üks on töös vastu võetud APT signaal:

Automaatse pildiedastuse (APT) puhul tegeleb MIRP:

- a) Pildiresolutsiooni vähendamisega, kasutades selleks AHVRR andmete iga kolmandat rida.
- b) Parandab läätse geomeetriast ning Maa kumerusest tingitud moonutusi.
- c) Digitaalsete andmete töötlemisega analoogandmeteks ning valmistatakse ette kõrgsageduslikuks edastuseks.

#### **4.1.4 High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/3)**

HIRS/3 on instrument disainitud mõõtma vaadeldava ala kiirgust 20 erinevas spektraalribas selleks, et arvutada Maa pinnast kuni 40 km kõrgusele vertikaalset temperatuuriprofiili [14].

#### **4.1.5 Space Environment Monitor (SEM-2)**

SEM-2 on mitmekanaliline laetud osakeste spektromeeter, mis tajub satelliidi kõrgusel olevate laetud osakeste liikumist ning tänu sellele jälgib satelliiti ümbritseva keskkonna muutusi.

Päikeselt Maa suunas liiguvad osakesed „päikese tuulena,“ mis koosneb laetud osakeste voogudest ning mis liiguvad sadu kilomeetreid sekundis. Selline laetud osakeste (elektronide, prootonite ja alfaosakeste) kiire liikumine ja kokku pörkamine võib tekitada suuri energiapuhanguid magnetosfääri, ionosfääri ning atmosfääri kõrgemates kihtides. Sellised energiapuhangud tekitavad muutusi magnetosfääris ja ionosfääris, mis võivad viia ohtudeni nagu suurenenud radiatsioonioht kõrgel lendavatele lennukitele, häired raadionavigatsioonis, raadiolainete neeldumine, häired raadiosides jne. Antud seade suudab selliseid muutusi tuvastada [15].

#### **4.1.6 Data Collection System (DCS/2)**

DCS/2 keskkonnaseire süsteem, mis kogub andmeid maa peal ning ookeanitel olevatelt platvorm-jaamadelt (väikesed maapealsed jaamad, poid, õhupallid). Jaamadelt vastu võetud andmed sisaldavad informatsiooni näiteks temperatuuri, õhurõhu, hoovuste ja muu kohta [16].

#### **4.1.7 Search and Rescue Satellite (SARSAT) Instrument**

Üldlennuliikluse õhusõidukid on kohustatud pardal kandma avariimajakaid, mis aktiveeruvad õnnetuse korral ning edastavad sireeni taolist appikutsesignaali sagedustel

121,5 ja 243 MHz. Teatud suuremad laevad on samuti kohustatud avariimajakaid pardal omama. SARSAT on instrument selliste appikutsesignaalide vastuvõtmiseks [17].

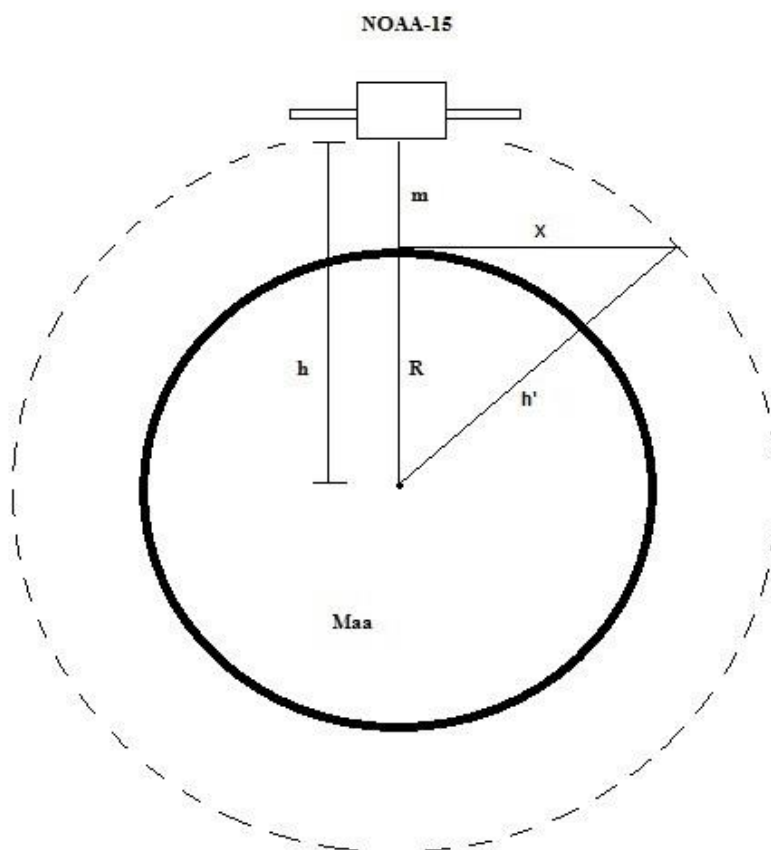
#### **4.1.8 Solar Backscatter Ultraviolet Spectral Radiometer (SBUV/2)**

SUBV on instrument mõõtmaks päikeseenergia kiirgustihedust ja Maa kiirgust nähtavas ultraviolettspektris. Kogutud andmetest saab tuletada järgmised atmosfääri omadused:

1. Globaalse ja vertikaalse stratosfääri kihi jaotus.
2. Stratosfääri struktuuri ja dünaamika.
3. Fotokeemilised protsessid ja aineosakeste mõju osoonikihile.
4. Pikaajaline päikeseaktiivsus ultraviolettspektris [18].

## 5 Lingi bilansi arvutamine

Kuna on teada Maa raadius ja satelliidi kaugus Maast, siis on võimalik välja arvutada satelliidi maksimaalne teoreetiline kaugus ( $x$ ), mil on veel võimalik signaali vastu võtta (Joonis 7) ning ühtlasi ka, kui kaugel satelliit asub signaali vastuvõtuks vaatevälja ilmuks.



Joonis 7. NOAA-15 maksimaalse ja minimaalse signaali vastuvõtu kauguse illustratsioon.

Paneme kirja mõõtmed, mis seni teada on:

$$R = \text{Maa raadius} = 6371 \text{ km,}$$

$$m = \text{satelliidi kaugus Maast} = 807 \text{ km,}$$

ning tähistame:

$x$  = satelliidi maksimaalne nähtav kaugus.

Kuna meil on teada Maa raadius ja satelliidi kõrgus Maast, siis saame leida satelliidi kauguse Maa keskpunktist ( $h$ )

$$h = h' = m + R = 6371 \text{ km} + 807 \text{ km} = 7178 \text{ km} \quad (1)$$

ning teades, et  $h = h'$  tekib  $x$  leidmiseks täisnurkne kolmnurk külgedega  $x$  ja  $R$  ning hüpotenuusiga  $h'$  (Joonis 7).

Pythagorase teoreemi

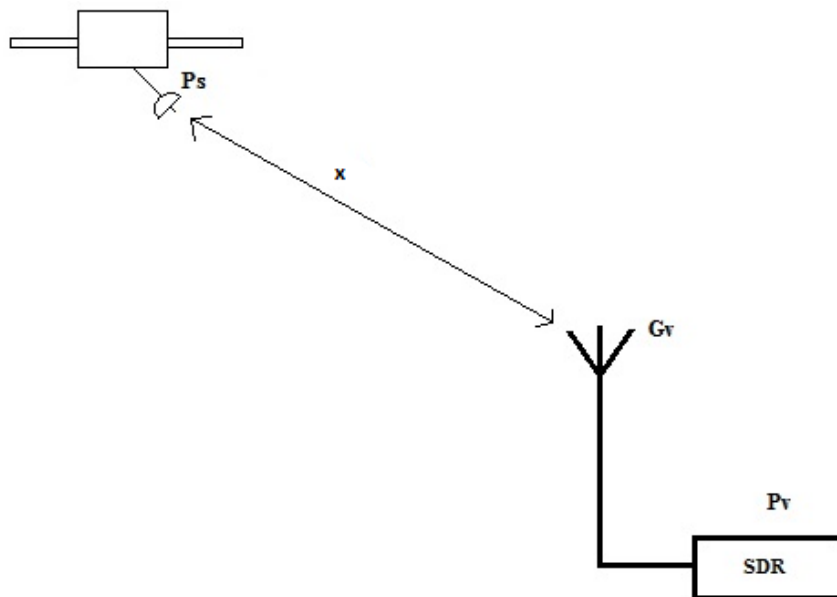
$$a^2 + b^2 = c^2 \rightarrow a = \sqrt{c^2 - b^2} \quad (2)$$

järgi:

$$x = \sqrt{h'^2 - R^2} = \sqrt{7178^2 - 6371^2} = \sim 3306 \text{ km}$$

Järelikult on satelliidi teoreetiline maksimaalne kaugus  $\sim 3306$  km, mis tähendab, et sel hetkel on juba võimalik nõrka signaali tuvastada.

Järgmiseks oleks vaja teada, kas töös kasutatav tarkvaraline raadio on võimeline eelnevalt leitud kaugustel signaali vastu võtma (illustatsioon Joonis 8).



Joonis 8. Lingi bilansi arvutuse illustatsioon.

$P_s =$  saatevõimsus,

$$EIRP = P_s \cdot G_s = 5 \text{ W},$$

$P_v =$  vastuvõetava signaali võimsus,

$$G_v = \text{vastuvõtuantenni võimendus} = 3,16,$$

$x =$  satelliidi kaugus vastuvõtjast,

$$\lambda = \text{lainepikkus} = c / f,$$

$$f = \text{sagedus} = 137,62 \text{ MHz},$$

$$c = \text{valguse kiirus} = \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s},$$

$$P_{vmin} = \text{vastuvõtja tundlikkus} = -97,5 \text{ dBm [3]}.$$

Kõigepealt leiame signaali lainepikkuse:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{137,62 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 2,18 \text{ m} \quad (3)$$

Vastuvõetava signaali võimsus avaldub valemiga:

$$P_v = \frac{EIRP \cdot G_v \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot x)^2} \quad (4)$$

Vastavalt valemile (4) leiame vastuvõetava signaali võimsuse kui  $x = 807 \text{ km}$ :

$$P_{v1} = \frac{(5 \text{ W} \cdot 3,16 \cdot 2,18^2 \text{ m})}{(4 \cdot \pi \cdot 807 \cdot 10^3 \text{ m})^2} = 7,3 \cdot 10^{-13} \text{ W} = -91,4 \text{ dBm},$$

ning  $x = 3306 \text{ km}$  kaugusel:

$$P_{v2} = \frac{5 \text{ W} \cdot 3,16 \cdot 2,18^2 \text{ m}}{(4 \cdot \pi \cdot 3,306 \cdot 10^3 \text{ m})^2} = -104 \text{ dBm}$$

Järelikult töös kasutatav tarkvaraline raadio ei ole võimeline signaali vastu võtma kui satelliit just horisondi (3306 km) tagant paistma hakkab. Jõudes natukene lähemale on võimalik signaali vastu võtta.

Kuna me teame vastuvõtja tundlikust (-97,5 dBm), saame selle valemisse (4) asendades ning satelliidi kauguse  $x$  avaldades arvutada satelliidi kauguse, mil on vastuvõtt võimalik.

Esmalt teisendame  $-97,5 \text{ dBm} = 1,78 \cdot 10^{-13} \text{ W}$  ning seejärel avaldame valemist (4) satelliidi kauguse  $x$ :

$$x = \frac{\sqrt{\frac{EIRP \cdot G_v \cdot \lambda^2}{P_v}}}{4 \cdot \pi} \quad (5)$$

Asendades valemisse (5) teadaolevad väärtused, saame:

$$x = \frac{\sqrt{\frac{5 \text{ W} \cdot 3,16 \cdot 2,18^2}{1,78 \cdot 10^{-13} \text{ W}}}}{4 \cdot \pi} = 1635254,7 \text{ m} = 1635,3 \text{ km},$$

seega saame signaali vastu võtma hakata siis, kui satelliit on vastuvõtjast 1635,3 km kaugusel.

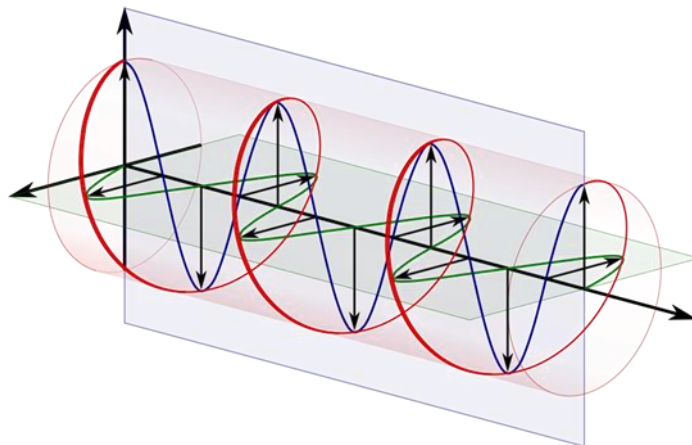
## 6 Antenn signaali vastuvõtuks

Satelliidilt APT signaali vastu võtuks tuleb kasutada madala võimendusega paremakäelise ringpolarisatsiooniga 137 MHz antenni (*Right Hand Circular Polarization Antenna*). Enamlevinud seda tüüpi antennid on kas ristatud dipool (*Turnstile*), kvadrofilaarne heeliksantenn (*Quadrifilar Helix Antenna* QHA) või topelt-ristantenn (*Double Cross Antenna* DCA).

Antud töös sai kasutatud kvadrofilaarset heeliksantenni, mis valmistati ise.

### 6.1 Ringpolarisatsioon

Elektromagneetilise laine ringpolariseering on polarisatsiooni olek, kus igas punktis on leviva laine elektrivälja konstantse suurusega, kuid selle suund pöörleb ajas stabiilse kiirusega risttasapinnaliselt laine levimise suunaga (Joonis 9).

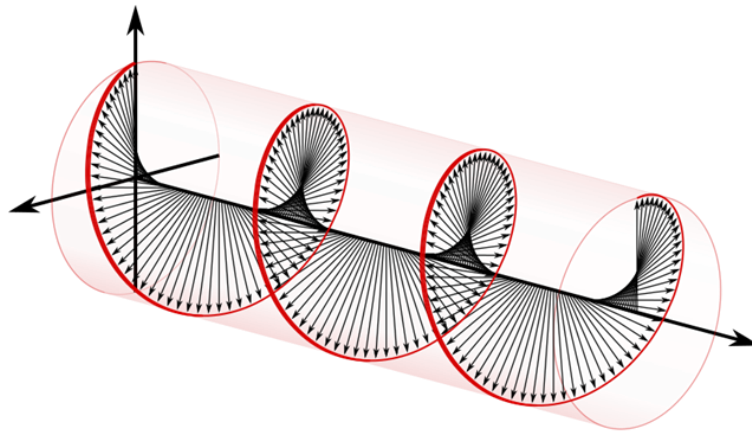


Joonis 9. Ringpolarisatsiooni illustratsioon [19].

Ringpolariseeritud laine saab olla ühes kahest võimalikust olekust: paremakäelises ringpolarisatsioonis või vasakukäelises ringpolarisatsioonis. Paremakäelise ringpolarisatsiooni korral pöörleb elektrivälja vektor parema käe suunas jälgides laine



leviku suunda (Joonis 10). Vasakukäelise ringpolarisatsiooni korral sama moodi, kuid vasaku käe suunas [19].



Joonis 10. Paremakäeline ringpolarisatsioon [19].

Ringpolarisatsiooni tekkeks peavad olema tagatud järgmised kriteeriumid:

1. Elektromagnetväljal peab olema kaks ortogonaalset komponenti.
2. Ortogonaalsed komponendid peavad olema võrdse suurusega.
3. Komponendid peavad olema  $90^\circ$  faasinihkega.

Komponentide omavahelist suhet iseloomustab aksiaalsuhe:

$$AR = \frac{\text{peatelje amplituud}}{\text{kõrvalteltje amplituud}} \quad (6)$$

Ringpolariseeritud välja ideaalne aksiaalsuhe on 0 dB [20].

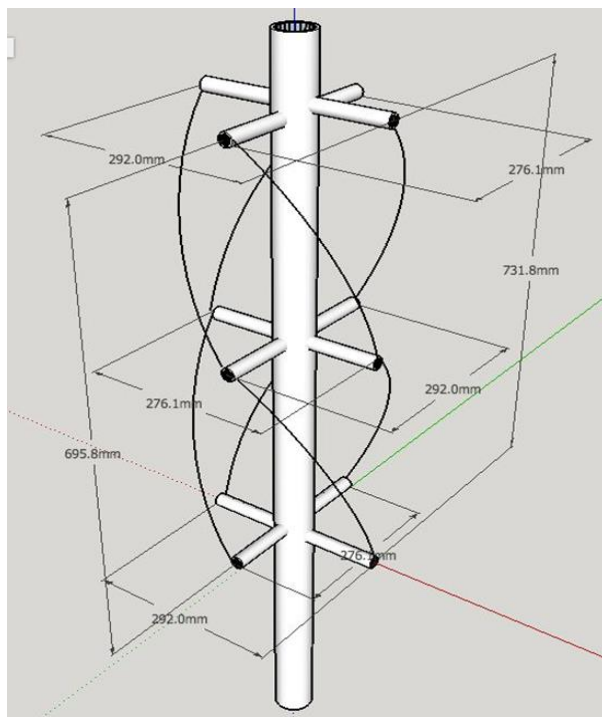
## 6.2 Antenni valmistamine (QHA)

Antenni valmistamiseks kasutati kasutaja „kkingsbury“ avalikku juhendit veebilehelt [www.instructables.com](http://www.instructables.com) [21].

### Vaja minevad materjalid:

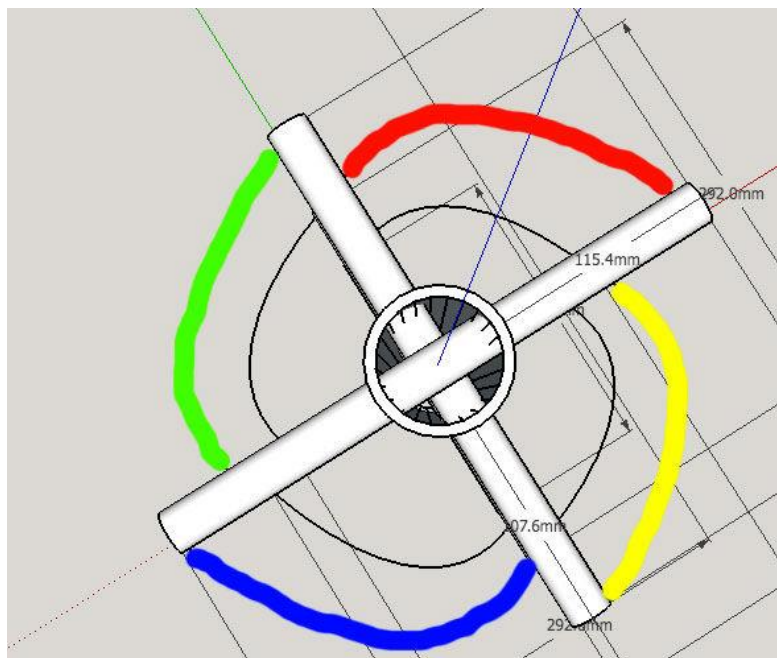
1. Põhitoruks 2 tollise (~ 5.08 cm) läbimõõduga ja umbes 4 jalga (~ 121.92 cm) pikk PVC toru.
2. Tugipostideks 1/2 tollise (~ 1.27 cm) läbimõõduga ja umbes 6 jalga (~ 182,88 cm) pikk PVC toru.
3. 2mm paksune ja umbes 15 jalga (~ 5 m) pikkune vasktraat.
4. Kuum liim.
5. Umbes 2 m pikkune koaksiaalkaabel sobiva konektoriga (BNC).
6. Üleminek MCX – BNC.

Mõõtmed, mille järgi sai antenn valmistatud, on kujutatud Joonis 11.



Joonis 11. Valmistatava antenni dimensioonid [21].

Kõige esimese sammuna sai välja prinditud šabloon (Lisa 1) põhitorule tugiposti aukude märkimiseks. Šabloon oli vajalik selleks, et augud tuleksid üksteisega täpselt risti. Augud sai akutrelliga puuritud ning viiliga sobivaks suuruseks viilida. Järgmiseks tuli tugipostid lõigata vajalikeks pikkusteks – 3 x 292 mm ja 3 x 276,1 mm. Tugipostid kinnitati põhitoru külge kasutades kuuma liimi püstolit. Kahe ülemise ja kahe alumise tugiposti keskohta sai lõigatud avaused, mille kaudu vedada vasktraat antenni alumisest osast antenni ülemisse ossa vastavalt Joonis 11 tekitades „spiraali“. Pealt vaates peaks näha olema, kuidas traat jookseb ülevalt alla kella osutile vastupidises suunas (Joonis 12). Punane juhe Joonis 12 tähistab koaksiaalkaablit.



Joonis 12. Antenn pealt vaates [21].

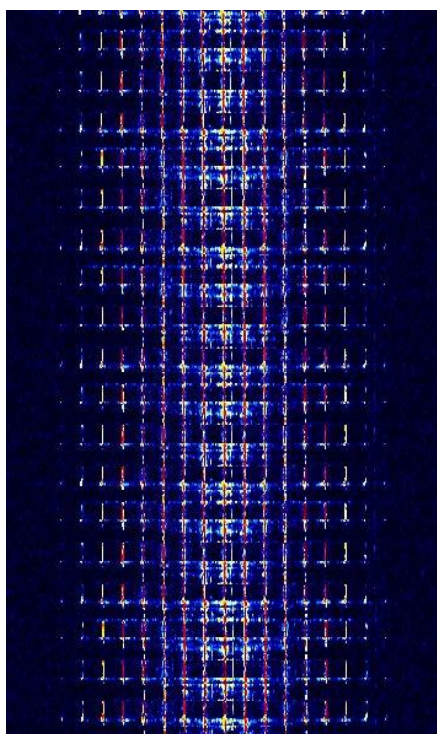
Antenni ülemises osas tuli sinisega märgitud traat joota kokku kollasega ning need omakorda koaksiaalkaabli sisemise traadi külge. Rohelisega tähistatud traat tuli aga koaksiaalkaabli välimise vasest varjestuse külge joota. Antenni alumises otsas pidi kollase, sinise ja punase traadi jootma koaksiaalkaabli välimise vasest varjestuse külge. Selleks sai tehtud koaksiaalkaablistse ettevaatlikult sisselõige ning vasest varjestuse külge joodetud lühike juhe, mille teine ots ühendati kokku kollase, sinise ja punase traadiga. Peale seda oligi antenn (Joonis 13) valmis ja võis hakata katsetama.



Joonis 13. Enda valmistatud QHA antenn.

### 6.3 Valmis antenni esmane test

Antenni esimeseks testimiseks Akadeemia tee 5 ühiselamu katusel sai küsitud luba TTÜ Campuse kontorist. Luba anti ja sama päeva õhtul sai satelliidi ülelennu ajal katusele ronitud. Vastuvõtuks kasutati GNURadios valmistatud vastuvõtu ja dekodeerimise plokkiskeemi. NOAA-15 APT sagedusele (137,62 MHz) häälestades ei suudetud soovitud signaali tuvastada. Spektripildis oli vaid müra ja koskdiagramm ei näidanud otsitavat (Joonis 14) signaali ning tuli hakata viga otsima.



Joonis 14. APT signaali koskdiagrammi kuju [22].

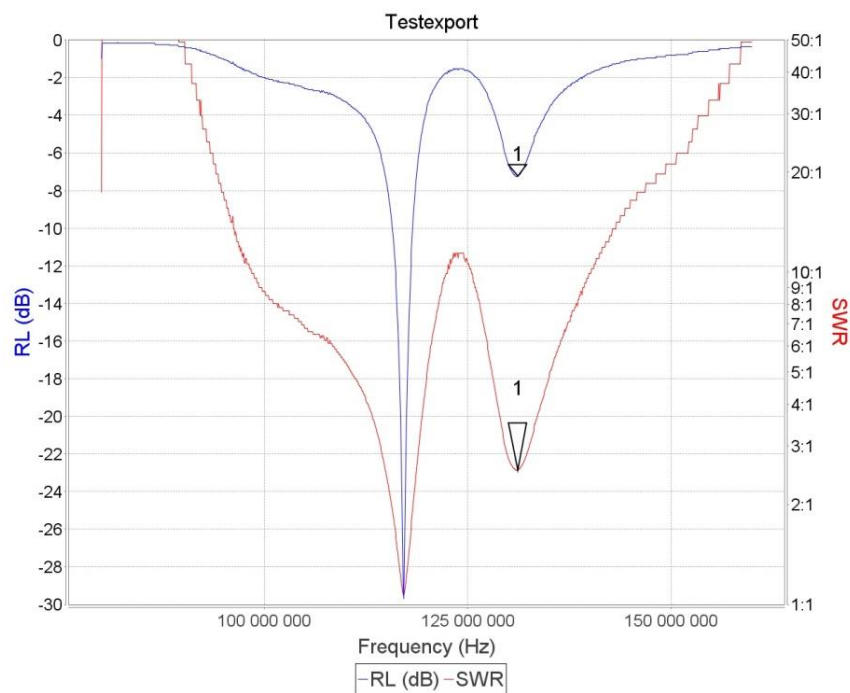
Antenn sai ühendatud miniVNA (Joonis 15) kõrgsagedusliku antennianalüsaatori külge ning antenni parameetreid mõõtes selgus, et antenn küll tegelikult töötab, kuid soovitud madalamatel sagedustel. Kõige paremini oleks antenn töötanud sagedusel ~ 118 MHz ja ka sagedusel 131 MHz, kuid mitte nii hästi kui 118 MHz puhul. 118 MHz juures omas antenn seisulaine tegurit 1,6. Seisulaine tegur (*Standing Wave Ratio* SWR) näitab kui hästi on antenn teatud sagedusel sobitatud koormusega ning arvutatakse valemiga:

$$SWR = \frac{1 + \sqrt{P_r/P_f}}{1 - \sqrt{P_r/P_f}}, \quad (7)$$

kus  $P_r$  on peegeldunud võimsus ja  $P_f$  lõpuni jõudnud võimsus. Kui seisulaine tegur on 1, siis tähendab see, et kogu vastuvõetud võimsus jõuab ka koormuseni [23]. Joonis 16 illustreerib, et 119 MHz juures kujunes SWR natuke üle ühe ja 131 MHz juures üle kahe.



Joonis 15. Kõrgsageduslik antennialüsaator [24].

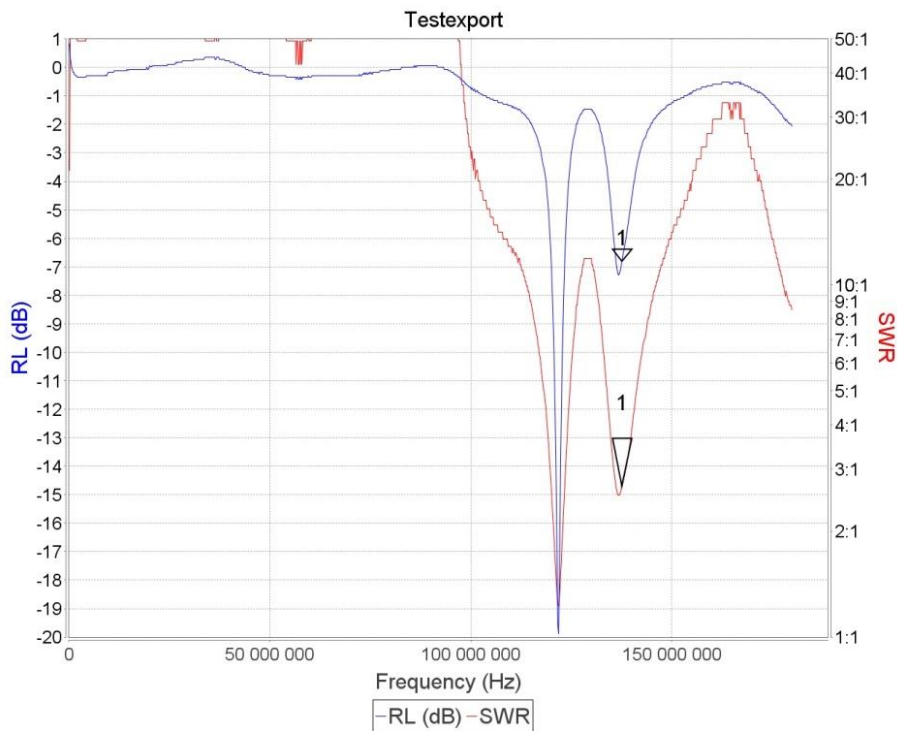


Joonis 16. Antenni esmase mõõtmise tulemus.

Ehitamise juhendit uurides ja antenni dimensioone uuesti üle mõõtes selgus, et antenn on alumisest otsast liiga pikk, mille tagajärjel olid ka vasktraadid liiga pikad. Antenni põhitoru sai nii kaua lühemaks lõigatud ning alumine jootekoht tugipostidele lähemale toodud kuni antennialüsaator näitas soovitud sagedusel töövalmidust.



Teine mõõtetulemus (Joonis 17) näitas 124 MHz juures väga head SWR-i (1,2). Sagedusel 137 MHz oli SWR 2,49. Antud tulemus ei ole küll väga hea, kuid antenn töötab nüüd soovitud sagedusel ning on võimeline signaali vastu võtma.



Joonis 17. Antenni mõõtmise tulemus peale paranduste läbiviimist.

Kuna antenn oli õigele sagedusele häälestatud, siis võis asuda APT signaali vastu võtma. Selleks sai vaadatud lähim satelliidi ülelennu aeg ning tehtud vajaminevad ettevalmistused. Vastuvõtuks sai kasutatud järgmisi vabavaralisi programme:

1. SDRSharp – lihtne digitaalse signaalitöötamise programm tarkvaralise raadio jaoks.
2. Orbitron – tarkvara reaajas satelliidi jälgimiseks
3. MyDDE – lisarakendus Orbitronile, mis vahetab automaatselt reaajas doppleri nihkest tingitud sageduse muutust.
4. Virtual Audio Cabel – tarkvara, mille kaudu SDRSharp-i väljund otse Wxtoimg programmi edastada.

5. Wxtoimg – dekodeerimistarkvara, mis on võimeline dekodeerima APT signaale reaajas. Lisaks võimaldab dekodeeritud piltidele värvide lisamist, värvide võimendust ja palju muud.

Vastuvõtuks sai ronitud kodus garaaži katusele (Joonis 18), antenn SDR-i külge ühendatud ning SDR arvuti ja SDRSharp-iga ühendatud. Satelliit pidi [www.n2yo.com](http://www.n2yo.com) (reaajas satelliitide asukohti jälgiv veebisait) andmetel vastuvõtjale nähtavaks ilmuma 3324 km kauguselt, mis klappib ka peatükis 5 arvutatud kaugusega. 3324 km kaugusel olevat satelliiti ei suutnud töös kasutatud SDR tuvastada, mis oli samuti peatükis 5 välja toodud. Kui satelliit oli jõudnud Ukraina kohale, siis hakkas SDRSharp näitama soovitud signaali. Joonis 19 on näha Joonis 14 näiteks toodud APT signaali koskdiagrammi kuju.

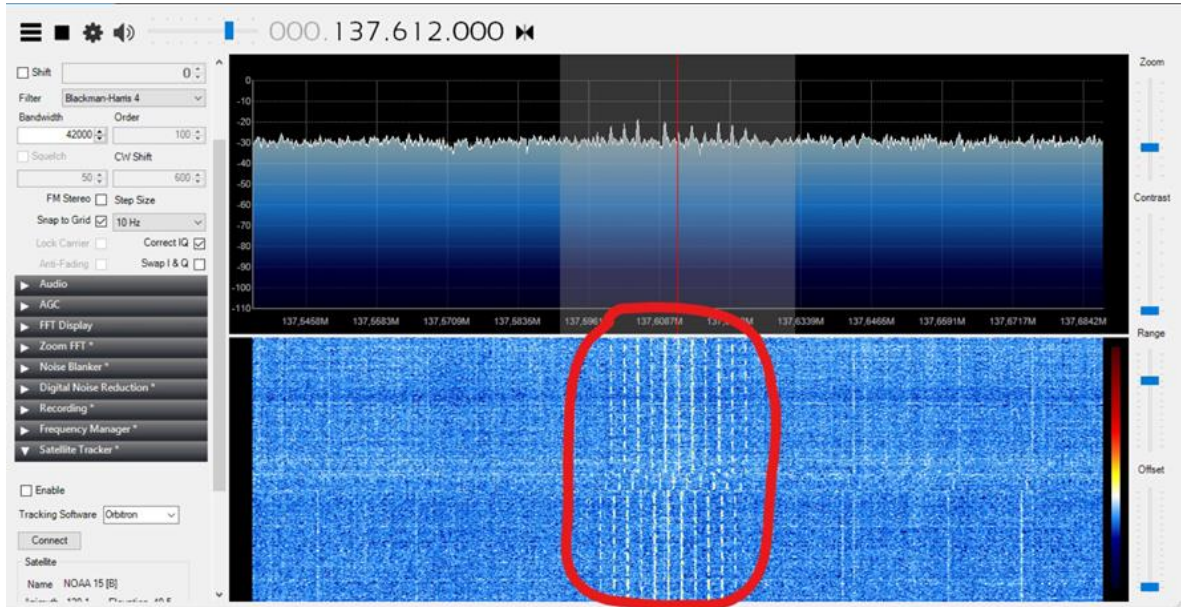


Joonis 18. Esimene edukas vastuvõtt.

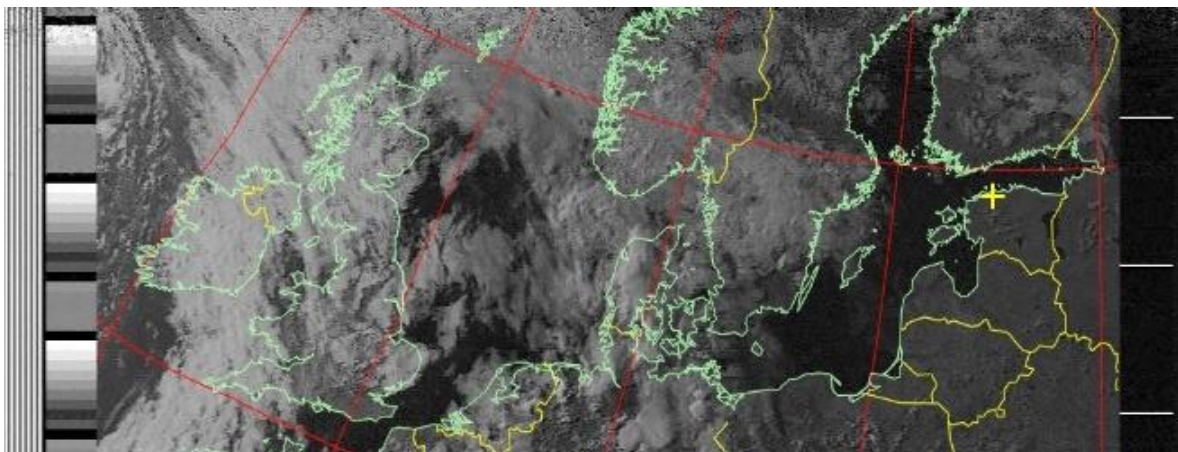
Peagi hakkas rida-rea haaval Wxtoimg programmi ilmuma dekodeeritud pilt (Joonis 20 ja Joonis 21). Kogu vastuvõtt kestis kokku 4 minutit ja 57 sekundit. Vähene vastuvõtuaeg oli tingitud vastuvõtja tundlikkusest, mis ei lubanud kohe satelliidi vaatevälja ilmumise korral andmeid vastu võtma hakata. Peatükis 5 tehtud arvutuste kohaselt oli vastuvõtt



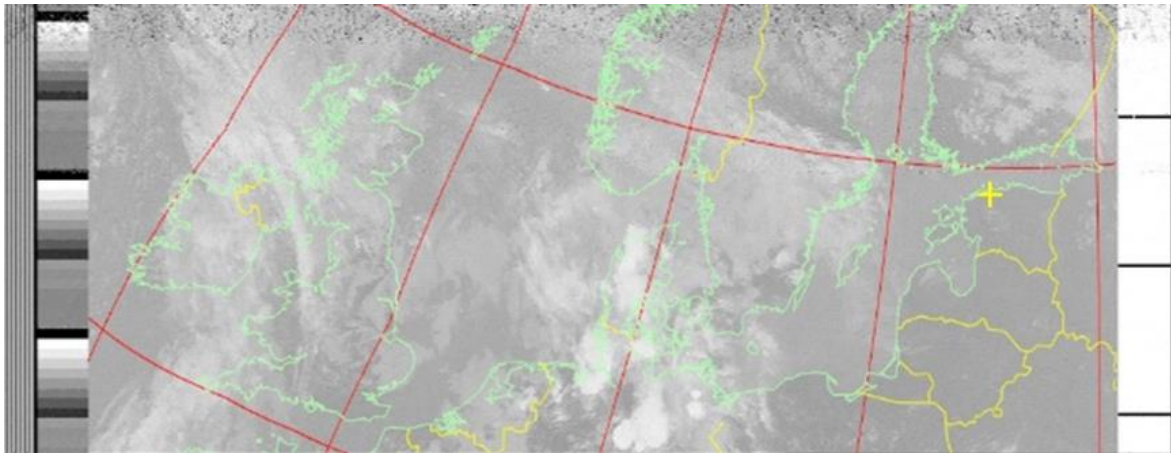
võimalik ~ 1635 km kauguselt, mis on igati reaalne tulemus, arvestades seda, et SDR tuvastas signaali kui satelliit jõudis Ukraina kohale.



Joonis 19. SDRSharp ekraanitõmmis.



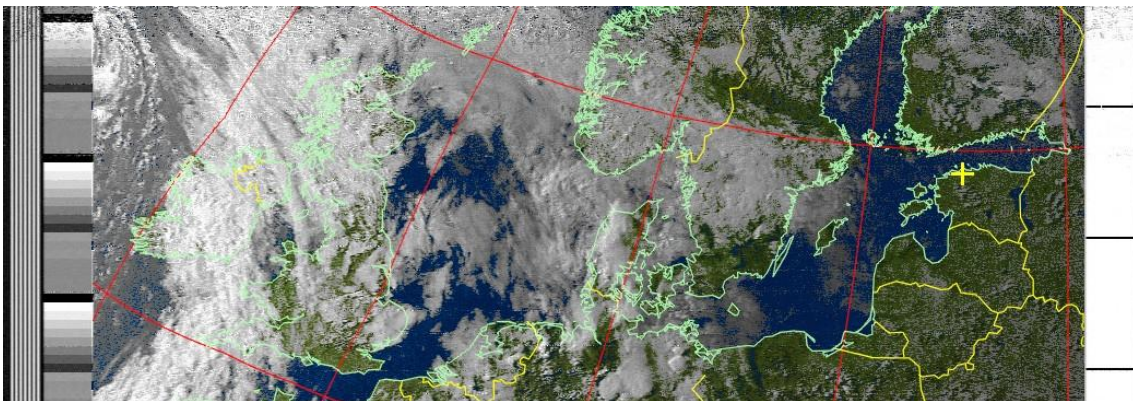
Joonis 20. Dekodeerimise tulemus nähtavas valguses.



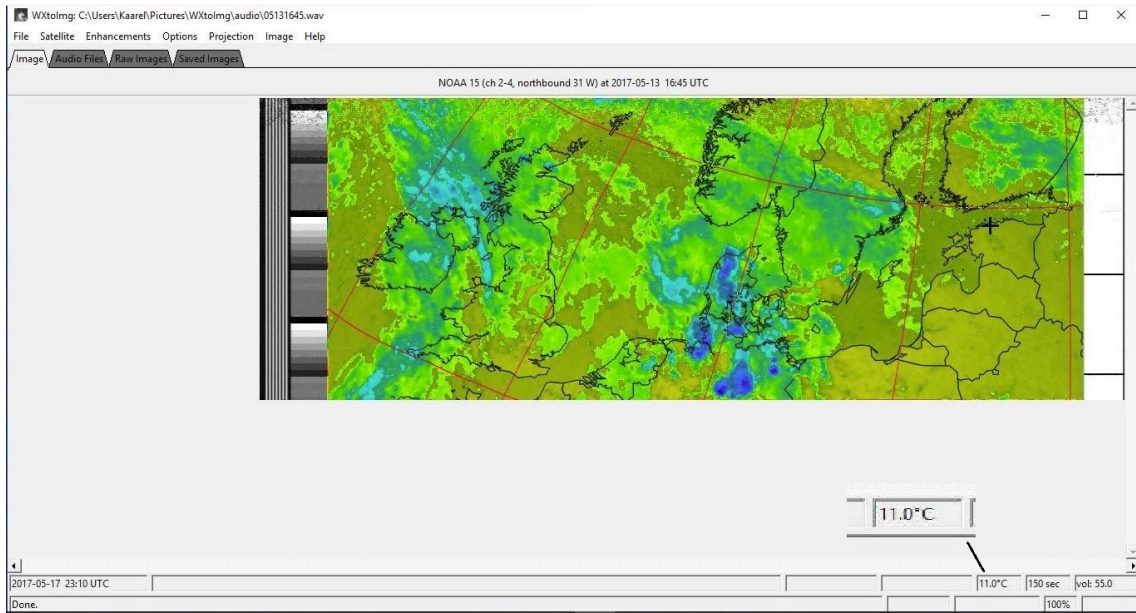
Joonis 21. Dekodeerimise tulemus infrapuna diapasioonis.

Dekodeeritud pildilt on näha peatükis 3.1 kirjeldatud sünkrojada, minutimarkerid ja telemetriaplokid. Kuna vastuvõtt jäi vastuvõtja tundlikkuse tõttu niivõrd lühikeseks, siis on ka pildi mõõtmed peatükis 3.1 kirjeldatust väiksemad.

Kasutatud sai ka WXtoimg tarkvara pakutavat värvivõimenduse võimalust, mille tulemust on näha Joonis 22. Veel võimaldas kasutatud programm teha kätte saadud pildist termograafilise pildi (Joonis 23). Pildi peal kursoriga liikudes võis programmist välja lugeda temperatuurinäidud. Vastuvõtu hetkel oli Tallinnas programmi andmetel  $11^{\circ}$ .



Joonis 22. Võimendatud värvidega APT pilt.



Joonis 23. APT termograafiline pilt.

## 7 Kokkuvõte

Töö põhieesmärgiks oli isevalmistatud kvadrofilaarse heeliksantenni ja tarkvaralise raadio (SDR) abil automaatse pildiedastussignaali (APT) vastuvõtt ning satelliidipildiks konverteerimine.

Vastuvõtuks vajaminev antenn sai valmis ehitatud ning peale paranduste tegemist ka soovitud sagedusalas töökorda. Antenn ei olnud kindlasti ideaalne, mis võis tuleneda ehituse käigus sisse tulnud mõõtevigadest. Antenni dimensioone rohkem korrigeerides oleks ta parameetrid paremad olnud. Sellest võib järeldada, et seda sorti täppistööd tehes, kus mõõtetäpsusest sõltub kvaliteet, tuleks kindlasti rohkem aega ja kannatust varuda, et soovitud tulemus oleks võimalikult täpne.

Vastu võetud satelliidipilt jäi mõõtmete poolest väiksemaks kui töö teoreetilises osas kirjeldatu, sest vastuvõtuaeg ei olnud piisav, et täismõõtmetes pilti kätte saada. See oli tingitud SDR-i madalast tundlikkusest, mis vähendas vastuvõtu aega pea poole võrra. See probleem oleks lahendatav kasutades madala müraga eelvõimendit (LNA), et vastuvõetud signaali võimendada.



## Kasutatud kirjandus

- [1] Software Defined Radio, SDR, Tutorial [WWW] <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/sdr/software-defined-radios-tutorial.php> (17.03.2017)
- [2] THE ELECTRIC LIGHT COMPANY, Radio reinvented: how SDR Works [WWW] <https://eclecticlight.co/2015/08/27/radio-reinvented-how-sdr-works/> (16.05.2017)
- [3] R820T High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner Datasheet [WWW] [http://rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T\\_datasheet-Non\\_R-20111130\\_unlocked.pdf](http://rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf) (17.03.2017)
- [4] Automatic Picture Transmission [WWW] [https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_picture\\_transmission](https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_picture_transmission) (19.03.2017)
- [5] APT Weather Satellite Reception. A Guide for Beginners [WWW] <http://www.geoweb.org.uk/apt.php> (19.03.2017)
- [6] NOAA-15 [WWW] <https://en.wikipedia.org/wiki/NOAA-15> (19.03.2017)
- [7] Eesti Kosmosebüroo, Kosmoseaparaatide orbiidid [WWW] <https://www.eas.ee/kosmos/et/kosmosest/uldulevaade/kosmoseaparaatide-orbiidid> (16.05.2017)
- [8] National Oceanic and Atmospheric Administration. About our agency [WWW] <http://www.noaa.gov/about-our-agency> (04.04.2017)
- [9] Space Science and Engineering Center (SSEC), NOAA15 Orbit Tracks GLOBAL [WWW] [https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/NOAA15/GLOBAL2017\\_04\\_02\\_092.gif](https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/NOAA15/GLOBAL2017_04_02_092.gif) (04.04.2017)
- [10] NOAA KLM User's Guide. Section 3.3 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-3.htm> (04.04.2017)
- [11] Office of satellite and product operations , NOAA-15 Products [WWW] [http://www.ospo.noaa.gov/data/mspps/images/amsua\\_ts\\_asc.gif](http://www.ospo.noaa.gov/data/mspps/images/amsua_ts_asc.gif) (17.04.2017)
- [12] NOAA KLM User's Guide. Section 3.4 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-4.htm> (04.04.2017)
- [13] NOAA KLM User's Guide, Section 3.1 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-1.htm> (23.04.2017)
- [14] NOAA KLM User's Guide. Section 3.2.1 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec32-1.htm> (21.04.2017)
- [15] NOAA KLM User's Guide. Section 3.5 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-5.htm> (21.04.2017)

- [16] NOAA KLM User's Guide. Section 3.6.1 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec36-1.htm> (22.04.2017)
- [17] NOAA KLM User's Guide Section 3.7 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-7.htm> (22.04.2017)
- [18] NOAA KLM User's Guide. Section 3.8 [WWW] <https://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/html/c3/sec3-8.htm> (23.04.2017)
- [19] Circular polarization [WWW] [http://www.wikiwand.com/en/Circular\\_polarization](http://www.wikiwand.com/en/Circular_polarization) (14.05.2017)
- [20] Polarization - EM Waves and Antennas, Polarization of Plane Waves [WWW] <http://www.antenna-theory.com/basics/polarization.php> (17.05.2017)
- [21] NOAA Satellite Signals With a PVC QFH Antenna and Laptop [WWW] <http://www.instructables.com/id/NOAA-Satellite-Signals-with-a-PVC-QFH-Antenna-and-/?ALLSTEPS> (19.03.2017)
- [22] Automatic Picture Transmission (APT) [WWW] [http://www.sigidwiki.com/wiki/Automatic\\_Picture\\_Transmission\\_\(APT\)](http://www.sigidwiki.com/wiki/Automatic_Picture_Transmission_(APT)) (13.05.2017)
- [23] Standing Wave Ratio [WWW] [https://en.wikipedia.org/wiki/Standing\\_wave\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave_ratio) (13.05.2017)
- [24] miniVNA - HF & VHF Antenna Analyzer [WWW] <http://www.w4rt.com/Misc/miniVNA.htm> (13.05.2017)

# Lisa 1 – Antenni tugikinnitus-aukude šabloon

