

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IEE70LT

Rain Ellermaa IVEM 144020

KLASSIRUUMI ROBOTPARVE RAADIOSIDE MOODUL

Magistritöö

Juhendaja: Alar Kuusik

Tehnikateaduste
doktor

Vanemteadur

Tallinn 2016

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: Rain Ellermaa

31.05.2016

Annotatsioon

TTÜ Robotiklubis kasutatakse robotika koolituste läbiviimisel püsivat raadiosidelahendust. Algaja koodikirjutaja jaoks on olemasolevate raadiomoodulite kasutamine üle jõu käiv ja selle õpetamine jääb ajapuuduse tõttu kursuste skoobist välja.

Käesoleva töö eesmärgiks oli luua lihtsasti kasutatav ja töökindel raadiomoodul, mis lihtsustaks robotite tarkvara silumist ning kiirendaks ja kergendaks õppetegevust. Robotite vaheline võrk peab olema ka piisavalt paindlik, et sellel oleks võimalik sobitada erinevatesse keskkondadesse.

Loodud raadiomoodul võimaldab luua robotparve minimaalselt kahe roboti vahel. Lihtsustamaks põhikontrolleri programmeerimist, toimub kogu võrguliikluse haldus raadiomooduli poolt.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 43 leheküljel, 6 peatükki, 22 joonist, 10 tabelit.

Abstract

Radio communication module for a classroom robot swarm

TTÜ Robotiklubi uses a persistent radio communication link between the robots and computers to aid programming during robot development and during courses. For a beginner using a complex radio system is very difficult. Teaching students and pupils to use such modules is usually out of the scope of the robotics course.

The object of this thesis is to develop a radio module that is easy to use for those who have little to none experience in programming and is reliable enough for all tasks. Such a module would allow simpler debugging of robot's firmware and algorithms without thinking about the complexity of a radio network and gives more flexibility during practical sessions of the course by giving the lecturer better access to the communication link between the student's robot and their computer. Network communication between robots must be flexible enough to allow simple joining and leaving from the network and extending the network area using stationary or moving router modules. Minimal amount of modules on the network is 2, meaning that no coordinator is required on the network.

It is also important that the module would fit as a replacement for current modules. This would allow a backwards compatibility with both new and old robot modules. To make using of the modules as simple as possible, all of the networking overhead is handled by the radio modules microcontroller itself and only data and simple one-time configuration is needed from the robot's main microcontroller for communication.

Added feature is also the capability to do an over-the-air update of the robot's microcontroller using an on board FLASH memory. Extra memory module allows the program to be safely transmitted and verified before any actual programming is done. It also allows the robot to continue with previous task and program during the slow radio transfer of the updated firmware.

The thesis is in Estonian and contains 43 pages of text, 6 chapters, 22 figures, 10 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> – universaalne asünkroonne vastuvõtja/saatja
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – universaalne jadaliides
Bps	<i>Bits per second</i> – bitti sekundis
LQI	<i>Link Quality Indicator</i> – ühenduse kvaliteedi indikaator
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> – vastuvõetud signaali tugevuse indikaator
AT	<i>Attention</i> – käsk, mida kasutatakse modemite seadistamiseks
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> – välisseadme jadaliides
SWD liides	<i>Serial Wire Debug</i> – Jadaliides silumiseks
JTAG liides	<i>Joint Test Action Group</i>

Sisukord

1 Sissejuhatus	11
1.1 Ülesande püstitus	11
2 Olemasolevate lahenduste analüüs	14
3 Arendus.....	17
3.1 Raadiomooduli valik.....	17
3.2 Skeemi elementide valik.....	18
3.2.1 Raadiomooduli ühendus antenniga.....	18
3.2.2 USB ühendus arvutiga	19
3.2.3 Väline mälukomponent	20
3.2.4 Kasutajaliides ja muud ühendused	21
3.3 Antenni valik	23
3.4 50-oomise impedantsiga raja arvutus	25
3.5 Antenni häälestus.....	27
4 Prototüübi testimine.....	31
4.1 Atmel Lightweigh Mesh.....	31
4.1.1 Atmel Lightweigh Mesh pakett	31
4.2 Raadiomoodulite sidekvaliteedi testimine.....	32
4.2.1 Suunakarakteristika hindamine	34

4.2.2 Sidekauguse hindamine	37
4.2.3 Andmeside töökindlus	38
4.2.4 Raadiomooduli töö hinnang	40
5 Kokkuvõte	41
6 Kasutatud kirjandus	42
Lisa 1 – Raadiomoodul robotil	45
Lisa 2 – Raadiomooduli skeem	46
Lisa 3 – Raadiomooduli trükkplaadi kihtide joonised.....	47
Lisa 4 – Trükkplaadi 3D visualisatsioon	48

Jooniste loetelu

Sele 1 Robotite kohtvõrk	12
Sele 2 XBee pesa mehaanilised mõõtmised. [3]	14
Sele 3 Raadiomooduli ühendus antenniga.....	19
Sele 4 USB ühenduse skeem.	20
Sele 5 Välise mälu skeem.....	21
Sele 6 Valgusdiodide skeem.....	22
Sele 7 Raadiomooduli ühenduse skeem.	23
Sele 8 Programmaatori pistiku skeem.	23
Sele 9 Tagurpidi F tüüpi looklev antenn [11].....	24
Sele 10 Antenni horisontaalne kiirgustsoon. [11]	25
Sele 11 koplanaarne ülekandeliin signaalimaaga. [12]	26
Sele 11 Võrguanalüsaatori ühendus trükkplaadile.	27
Sele 12 Kalibratsiooni abiseade.....	27
Sele 13 Signaali peegelduse mõõtmine enne häälestust.....	28
Sele 14 Signaali peegelduse mõõtmine pärast häälestust.....	29
Sele 15 Impedantsi mõõtmistulemus enne häälestust (vasakul) ja pärast häälestust (paremal).....	29
Sele 16 Smith programmi kuvatõmmis.	30
Sele 18 Testsüsteemi plaan.....	33

Sele 19 Raadiomoodul PisiXBee 5 alusplatvormil.....	34
Sele 20 Raadiomooduli suund.	35
Sele 21 Antenni suunakarakteristika.	36
Sele 22 RSSI väärtuse sõltuvus kaugusest.	38

Tabelite loetelu

Tabel 1 XBee pesa peamised viigud. [3].....	15
Tabel 2. Turul olevate raadiomoodulite võrdlus.	15
Tabel 3 Enamlevinud sagedused.	17
Tabel 4 Raadiomoodulite võrdlus.....	18
Tabel 5 Antennide plussid ja miinused.	24
Tabel 6 Lightweight Mesh pakett.....	32
Tabel 7 Raadiomoodulite suunakarakteristika mõõtmistulemused.	36
Tabel 8 Sidekauguse hindamise mõõtetulemused.	37
Tabel 9 Andmeside kao mõõtmiste testitulemused laual	39
Tabel 10 Andmeside kao mõõtmiste testitulemused väljakul	39

1 Sissejuhatus

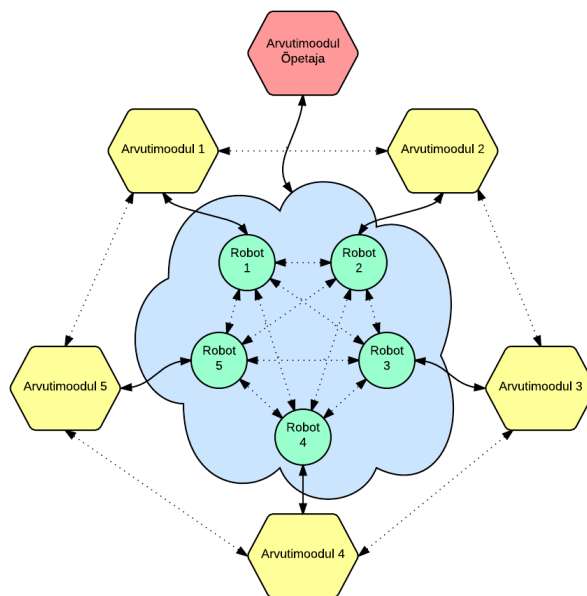
TTÜ Robotiklubis kasutatakse robotite arendamisel tarkvara ja algoritmide silumiseks püsivat sideühendust arvuti ja roboti vahel. Juhtmetega sideühendus ruumis ringi liikuva roboti küljes häirib tihti roboti tööd ja segab ülesannete täitmist. Lisaks on tegemist ka kasutajale ebamugava lahendusega. Seetõttu eelistatakse võimalusel kasutada juhtmevabasid sideühendusi. Kui andmete maht on suurem, kui vaid mõni üksik bait, eelistatakse kasutada valmiskujul raadiomoduleid. Raadiomooduli kasutamine võimaldab tavaliselt kahepoolset sidet, mis tähendab, et andmeid on võimalik saata juhtarvutist robotisse ning robotist arvutisse. Samuti ei sõltu andmete edastamine roboti asendist ega asukohast ruumis, mis on oluline piirang näiteks optilise side puhul, mida samuti kasutatakse väiksemate robotite käivitamiseks ja seiskamiseks distantsilt. Hetkel TTÜ Robotiklubis kasutusel olevatel raadiosidelahendustel on mitmeid puudusi, mida käesolevas töös analüüsitakse. Lahenduseks töötatakse välja antud rakendusse sobiv sidemoodul.

1.1 Ülesande püstitus

Hetkel on TTÜ Robotiklubis kasutatavad raadiomoodulid järgmised: 2,4 GHz sagedusel töötav XBee [1] ning 868 MHz sagedusel töötav XRF [2]. Mõlemad moodulid on kasutusel roboti ja arvuti vahelise UART liidese pikendusena. Moodulite paarid on seadistatud töötama kahekaupa, mis võimaldab robotil suhelda vaid ühe kindlaks määratud eelseadistatud arvutimooduliga. Seda on võimalik teha paarikaupa erinevatel kanalitel töötades või ühel kanalil, ent kindla ettemääratud aadressiga suheldes. Võimalik oleks seadistada ka kõik moodulid töötama korraga ühel kanalil, kuid see tähendaks, et lisaks robotite omavahelisele suhtlusele, lähevad ka kõik muud sõnumid kõikidele võrgus olevatele seadmetele. Ebavajaliku suhtluse liiklus roboti tarkvaras tähendab olulist lisamahtu andmetöötluses. Kumbki hetkel kasutatavatest raadiomoodulitest ei toeta ka sidepakettide edasi suunamist (*packet forwarding*) teistele sidemoodulitele, mis võimaldaks süsteemi leviala suurendada või parandada raadiohäirete piirkonnas sidekvaliteeti.

Kuigi arenduses olevate keerulisemate robotite puhul tuleb kõne alla võrguprotokolli haldamine ka roboti enda poolt, siis TTÜ Robotiklubis teostatavatel koolitustel ei ole kompleksete võrguseadistuste juhtimine otse roboti rakendustarkvarast mõeldav. Nimelt kirjutatakse koolitustel roboti navigeerimistarkvara tavaliselt tudengite või õpilaste poolt, kellel puudub varasem programmeerimise kogemus. Seega oleks nende poolt tarkvara silumiseks kõige parem kasutada võimalikult lihtsat raadiomoodulit, mille puhul kogu võrguhaldus tehakse ära raadiomoodulis. Samuti peaks see vajama vaid minimaalset, algajale jõukohast seadistamist. Lisaks lihtsusele on klassiruumi õpperobotite puhul oluline ka paindlikkus ja võimalus luua erineva suurusega koostöövõrke. Näiteks annaks see võimaluse luua robotitevahelise koostöövõrgu, mis võimaldaks mitmel robotil koostöös lahendada ühist ülesannet. Kui aga tahta realiseerida robotitevahelist võrguliiklust tähttopoloogias, näiteks tsentraalse arvuti vahendusel, tähendaks see keerukat andmete filtreerimist, mis omakorda tähendaks üleliigset andmetöötlust ning lisatarkvara kirjutamist. Lisaks robotitevahelisele üksühele sideühendusele on vajadus seadistada ka lokaalseid pilvi, mis lubaks näiteks juhendaja raadiomooduliga jälgida kindla roboti ja arvuti vahelist suhtlust. See võimaldaks anda juhendajal kindlaid juhiseid kindlale õpilasele.

Sobilikku, vajadustele vastavat sidevõrgu võrgutopoloogiat kirjeldav skeem klassiruumi robotparve võrgust on toodud joonisel Sele 1.



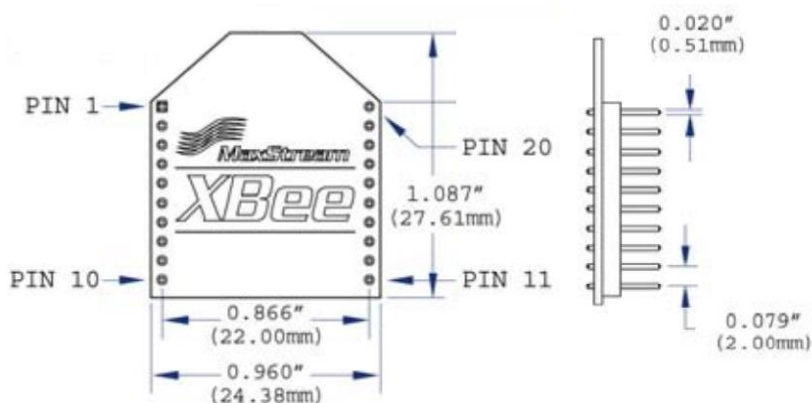
Sele 1 Robotite kohtvõrk

Lisaks roboti tarkvara ja käitumisalgoritmide silumisele, kasutatakse raadiomoduleid ka robotite programmeerimiseks üle õhu (*over-the-air*). Programmeerimine üle raadiomoduleite eeldab robotil lisamälu olemasolu, kuhu programm salvestada enne juhtmikrokontrollerisse salvestamist vältimaks andmesidekadudest tekkivaid vigu binaarkoodis. Väiksemate programmide puhul on võimalik mikrokontrolleri programmimällu mahutada kaks koopiat programmist ja sel viisil alati omada vähemalt ühte veavaba tarkvaraversiooni, kuid mahukamate programmide puhul on selleks vaja lisamälu. Selleks, et lihtsustada robotplatvormi ehitust, on mõistlik alla laetavat tarkvara, kuni täielikult kohale jõudmiseni ning vigade suhtes üle kontrollimiseni, hoida raadiomoodulis ja alles seejärel üle kanda roboti juhtmikrokontrollerisse. See tähendab, et robot saab aeglase raadioside ajal jätkata oma tööd vana tarkvaraga ning programmi vahetamine, näiteks üle UART liidese, on kiire ja ohutu.

Käesoleva töö eesmärgiks on luua raadioside lahendus klassiruumi robotparvedes kasutamiseks, mis rahuldab kirjeldatud funktsionaalseid nõudeid.

2 Olemasolevate lahenduste analüüs

Erinevad raadioside lahendused on läinud aastatega odavamaks ning seetõttu on tekkinud turule suhteliselt palju konkureerivaid riistvaralahendusi. Üks esimesi laialt levinud tooteid oli firma MaxStream poolt toodetud XBee moodul, mis ilma eelneva seadistusega võimaldas juhtmega UART liidese panna tööle üle raadiolingi. See lahendus võimaldas väga kiiresti ja lihtsalt olemasolevatesse projektidesse lisada juhtmevaba kommunikatsiooni võimekuse. Kuna moodul kogus laialdast populaarsust nii hobialektronika kui prototüüptoodete hulgas, sai XBee pistiku konfiguratsioonist (kaks 10-viigulist piikriba 2mm sammuga) mitteametlik standard ka paljudele teiste tootjate uutele lühimaa raadioside toodetele. See võimaldas ühe prototüüpseadme või -tootega proovida erinevaid raadiolahendusi erinevate tootjate vahel. Kirjeldatud pistikühenduse mehaanilised mõõtmed on toodud joonisel Sele 2.



Sele 2 XBee pesa mehaanilised mõõtmed. [3]

Lisaks mehaanilistele mõõtmetele on muutunud standardiks ka peamiste signaalide paigutus antud pesas. Olulised viigud on toodud ka tabelis Tabel 1. Ülejäänud viigud võivad erineda olenevalt tootjast, kuid üritatakse silmas pidada sisendite ja väljundite asukohti, et vältida kahe väljundi kokku sattumist moodulite vahetusel.

Tabel 1 XBee pesa peamised viigud. [3]

Viigu number	Nimi	Kirjeldus
1	VCC	+3,3 V toitepinge
2	DOUT	UART andmesiini väljund
3	DIN	UART andmesiini sisend
10	GND	toitemaa

Tabelis Tabel 2 on välja toodud mõned enamlevinud raadiomoodulid ja nende olulised parameetrid. Peamiselt kasutatakse kõrgemaid sagedusi, kuna see võimaldab kasutada lühemaid antenne ning suuremat andmeedastuskiirust.

Tabel 2. Turul olevate raadiomoodulite võrdlus.

	XBee [1]	XRF [2]	Bluetooth Bee v2.0 [4]	WiFi Bee v2.0 [5]
Tootja	Digi International	Ciseco	Seeed Studio	Seeed Studio
Sagedus	2.4 GHz	868 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Protokoll	802.15.4	802.15.4	802.15.1	802.11 b/g
Suhtlusliides	UART	UART	UART	UART
Saatevõimsus	1 mW	10 mW	+4 dBm	+12 dBm
Vastuvõtja tundlikkus	-92 dBm	-100 dBm	-80 dBm	-83 dBm
Andmeedastuskiirus	250 Kbps	250 Kbps	3 Mbps	54 Mbps
Võrgutopoloogiad	Moodulist moodulisse, Moodulist moodulitesse	Moodulist moodulitesse	Moodulist moodulisse (isand – ori)	IP võrk
Hind (hinnanguline)	17 €	14 €	21 €	35 €

XBee ja XRF moodulite eelisteks on nende lihtsus. Antud moodulitega on võimalik raadiolink tööle panna ilma eelneva seadistusega, kuna kõik moodulid on algselt seadistatud samale kanalile. See tähendab, et põhimõtteliselt on neid mooduleid võimalik kasutada kahe seadme vahel juhtme asendajana. Moodulite ümberseadistamine toimub andmesiinil AT käskude abil, mille kasutamine on tavaliselt tehtud lihtsamaks spetsiaalse tootja poolt pakutava programmiga. Bluetoothi ja WiFi moodulite peamiseks eeliseks on võimalus kasutada vaid ühte spetsiaalset moodulit (roboti poolel) ning arvuti poolt juba tavaliselt sisse ehitatud võimekust. Kuna tegemist on keeruliste võrguprotokollidega, siis

nende kasutamine ei ole nii lihtne võrreldes eelnevate moodulitega. Enne kui aplikatsiooni jaoks vajalikke andmeid vahetama saab hakata, on vaja luua sideühendus kindlate moodulite vahel. See tähendab, et mikrokontrolleris olev kood peab olema võimeline tegelema ka võrguhaldusega, mis algaja koodikirjutaja jaoks käib tihti üle jõu ning mida on kasutaja eest teekidesse peita keeruline (ebavajalik lisainformatsioon on algajale kasutajale tihti segadust tekitav).

Teine oluline kriteerium on üle õhu programmeerimise võimekus. Mitte ükski hetkel turul müüdavatest raadiomoodulitest ei oma välist lisamälu, kuhu mahutada kasutatava seadme programmi koopiat. Samuti ei piisa selleks moodulite kontrolleritele sisse ehitatud mälust, seega tuleks programmeerimise osa lahendada samuti moodulit kasutava süsteemi poolt. See on üle jõu käiv algajale kasutajale, kuna eeldab suurte andmemahtude vastuvõtmist, salvestamist ja kontrollimist. Eriti oluline on see osa just korrektselt teostada, kuna raadioside puhul on alati oht, et mingid paketid lähevad kaduma.

Selleks, et lihtsustada mikrokontrolleriga raadioside loomist, programmeerimist ja programmi silumist, sai loodud kompaktne moodul, mis vastaks kõikidele vajalikele kriteeriumitele. Raadiomooduli kasutamine on algajale programmeerijale läbipaistev, st kasutamist saab alustada eelneva seadistuseta ning mooduli abil saab lihtsate tööriistadega programmeerida arenduses olevat mikrokontrollerit. Kuna moodul sobib väga hästi ka mikrokontrollerite ja robotika koolituste läbiviimiseks, siis on arvestatud ka võimalusega andmesidet pealt kuulata ja juhendada vastavalt vajadusele.

3 Arendus

Esimese ülesandena tuli valida sobilik kommunikatsiooniprotokoll ning kasutatav sagedus. Euroopas mittespetsiifiliste lähitoimeseadmete jaoks lubatud sagedused on toodud Eesti Raadiosagedusplaanis [6], millest peamised on välja toodud tabelis Tabel 3.

Tabel 3 Enamlevinud sagedused.

Sagedusvahemik	Maksimaalne lubatud saatevõimsus
433,050 – 434,790 MHz	10 mW
863,000 – 870,000 MHz	25 mW
2400 – 2483,5 MHz	10 mW

Kuna olulisteks parameetriteks on nii kompaktsus kui andmeedastuse kiirus väga lühikese maa peal, siis valisin kasutatavaks sagedusvahemikuks 2400 – 2483,5 MHz. Selleks, et vähendada arenduseks kuluvat aega, on skeem tehtud toetama kahte töörežiimi. Esimesel juhul on moodul ühendatud arvutiga läbi USB ühenduse, mille kaudu käib andmevahetus ja mooduli toitmine. Teisel juhul on moodul ühendatud kahe 2mm sammuga piikriba kaudu roboti või mõne muu mikrokontrolleriga ning läbi selle käib ka mooduli toitmine. Antud režiimil on paigaldatud moodulile ka väline mälulement, mis lihtsustab üle raadiolingi roboti kontrolleri programmeerimist. Kasutades suuremalt jaolt sama skeemi on kaks erinevat mooduli töörežiimi võimalik saavutada kõigest erinevate komponentide lisamisega. See vähendab tootmise aega ning ka hinda, kuna tellida on vaja vaid üht tüüpi trükkplaati.

3.1 Raadiomooduli valik

Pärast sageduse valikut tuli valida sobiv raadiot sisaldav kontrolleri. Esimese asjana tuli valida, kas kasutada raadiomoodulit ja mikrokontrollerit eraldiseisvate elementidena või koos ühe kiibina. Kuna soovitud trükkplaadi mõõtmed limiteerivad ka komponentide mõõtmeid, sai ruumi kokkuhoiu mõttes valitud lahendus, kus mikrokontrolleri sisse on ehitatud raadiomoodul. Turul on mitu tootjat, kes vastavat lahendust pakuvad. Nende omavaheline võrdlus peamiste kriteeriumite poolest on toodud tabelis Tabel 4.

Tabel 4 Raadiomoodulite võrdlus.

Tootja	Atmel [7]	Texas Instruments [8]	Texas Instruments [9]	Silicon labs [10]
Toode	ATSAMR21E17	CC2630	CC2650	EM358x
Mikrokontroller	ARM Cortex-M0+	ARM Cortex-M3	ARM Cortex-M3	ARM Cortex-M3
Raadiomooduli saatevõimsus	Kuni +4dBm	Kuni +5dBm	Kuni +5dBm	Kuni +3dBm
Raadiomooduli vastuvõtja tundlikkus	-99dBm	-100 dBm	-100 dBm	-100 dBm
Maksimaalne andmeedastuskiirus	2 Mbps	250 kbps	1 Mbps	250 kbps
USB võimekus	Full-speed	-	-	Full-speed
Tüki hind (Digikey)	6,08 €	6,79 €	7,69 €	9,41 €

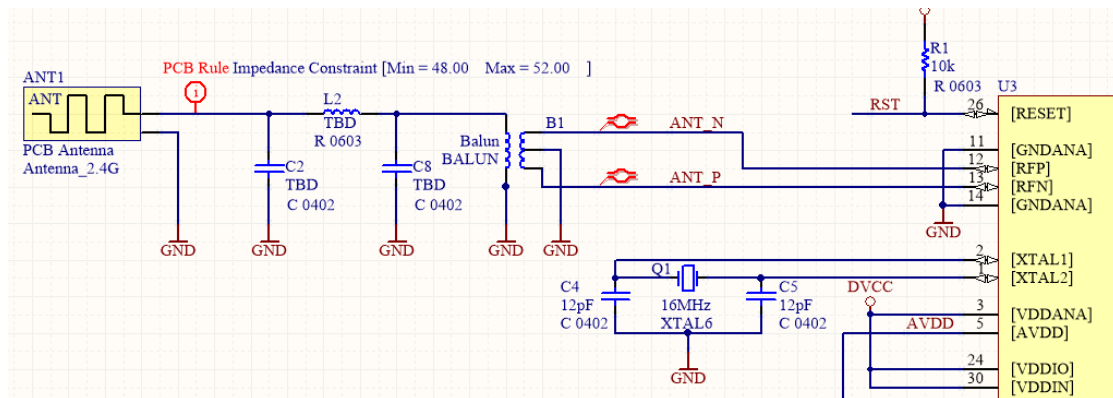
Nagu tabelist selgub, on erinevate tootjate raadiomoodulid antud omaduste poolest sarnased. Atmeli radio eeliseks kujuneb väga vähene väliste komponentide vajadus, hea vastuvõtja tundlikkus, andmevahetuse kiirus, sisse ehitatud USB võimekusega kontroller ning hind. Prototüüpimisel eelistan Atmeli toodangut ka kontrolleri varasema tundmise ning arendusvahendite olemasolu tõttu. Seetõttu sai antud lõputöö raames valitud kontrolleriks ATSAMR21E17.

3.2 Skeemi elementide valik

3.2.1 Raadiomooduli ühendus antenniga

Kõigepealt projekteerisin vastavalt raadiomooduli andmelehe soovitudele ühenduse raadiomooduli ning trükkplaadi antenni vahel. Väliste komponentide arv on väike, kuna suurem osa raadiosagedustega tegelevast skeemist on juba ATSAMR21E17 mikrokontrollerisse sisse ehitatud. Esimese asjana on vaja mikrokontrollerist tulev diferentsiaalsignaali muundada antennile sobilikuks. Selle jaoks kasutan spetsiaalselt selleks mõeldud trafot 2450BM15A0015E (skeemil B1). Trafo eesmärgiks on muuta balansseerimata 50-oomise impedantsiga signaal balansseeritud signaalipaariks. Seetõttu nimetatakse seda ka BALUNiks (tuleneb ingliskeelsetest sõnadest *balanced* ja

unbalanced). Lisaks trafole on 50-oomisele signaalile lisatud ka antenni häälestuseks Pi-kujuline häälestusahel. See võimaldab hiljem prototüübil antenni täpselt seadistada vastavalt mahtuvuslikku või induktiivset komponenti suurendades. Esialgasel skeemil on need komponendid trükkplaadile paigutatamata, kuna väärtused on algselt teadmata. Raadiomooduli ja antenni vaheline skeemilahendus on toodud skeemiväljavõttel Sele 3.

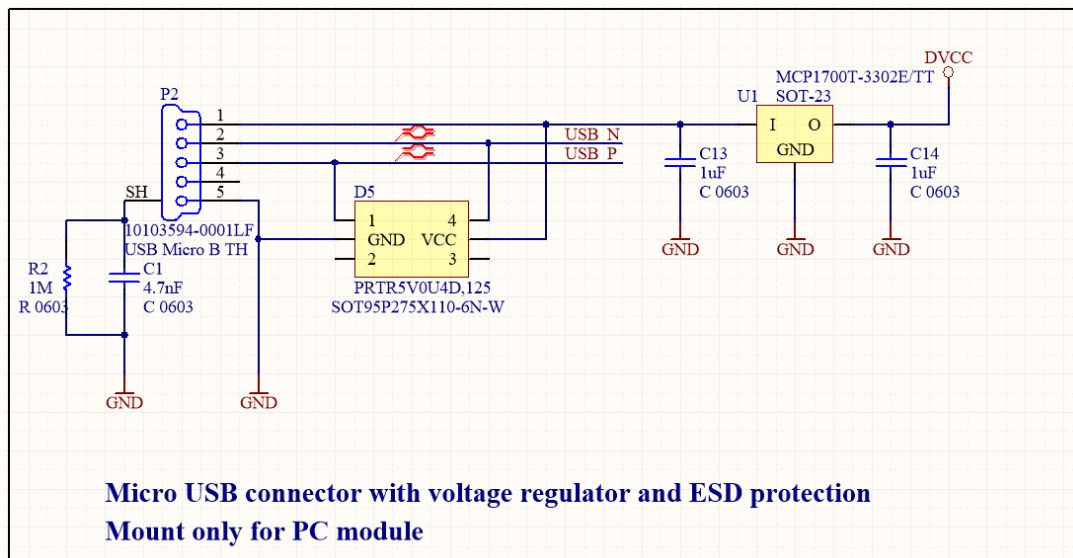


Sele 3 Raadiomooduli ühendus antenniga.

3.2.2 USB ühendus arvutiga

Järgmisena sai projekteeritud mikrokontrolleri ühendus arvutiga läbi USB liidese. Skeemi väljavõte on näha alloleval pildil Sele 4. Kuna USB pesa on korpusest väljas ning kasutaja poolt väga tihedalt kasutuses, siis skeemi kaitseks on lisatud ka staatilise elektri vastane kaitseahel. Seetõttu kasutasin andmeliinidel spetsiaalselt selleks ette nähtud diodide ahelat PRTR5V0U4D,125 (skeemil D5). Diodahela ülesandeks on juhtida ülepinge kuni 8 kV eemale kriitilistest skeemiosadest. Vähendamaks elektromagnetilist müra on USB kaabli varjestus ning pistiku korpus ühendatud skeemi null-potentsiaaliga läbi takisti ning kondensaatori. USB signaalrajad on ühendatud mikrokontrolleriga diferentsiaalpaarina.

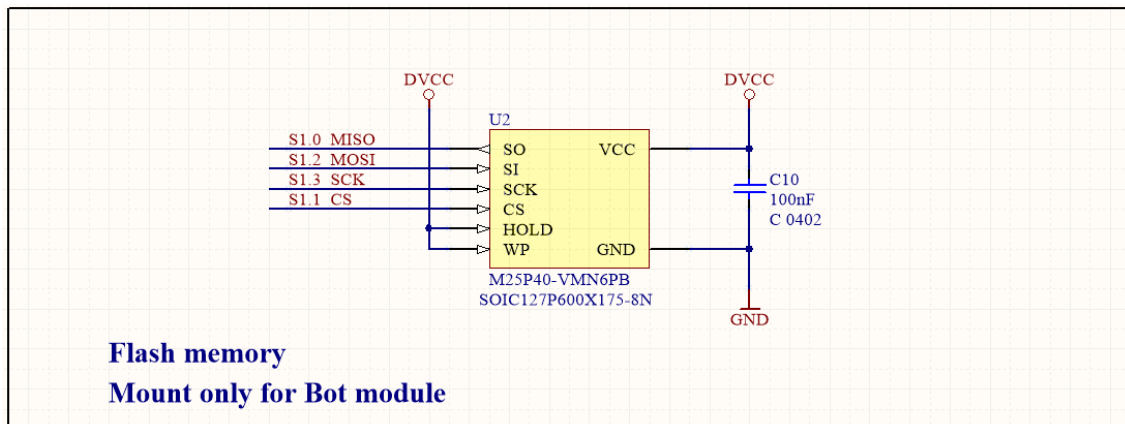
Lisaks andmesidele toimub läbi USBi ka raadiomooduli toitmine, mille jaoks on skeemil lineaarne pingemuundur MCP1700T-3302E/TT (skeemil U1), mis muundab 4,5 – 5,5 V alalispinge mikrokontrollerile vajalikuks 3,3 voldiks. Antud pingeregulaator sai valitud selle suuruse ning väga väikese väljundmüra tõttu, mis raadiomoodulite puhul on eriti oluline.



Sele 4 USB ühenduse skeem.

3.2.3 Väline mälu komponent

Selleks, et raadiomooduli abil lihtsustada üle õhu programmeerimist, on skeemis ka mälu element. Mälu elemendi maht on valitud selliselt, et see mahutaks TTÜ Robotiklubis enamlevinud mikrokontrollerite programmimälu. Kõige suuremad mikrokontrollerid, mida TTÜ Robotiklubis kasutatakse, on kuni 0.5 MB. Selle järgi sai 0.5 MB valitud ka välise mälu elemendi mahuks. Sellise mahu juures on kõige sobivamaks mälu tüübiks FLASH mälu. Selleks, et lihtsustada mälu kirjutamist, valin NOR tüüpi FLASH mälu, mis võimaldab kirjutamist baithaaval ning kustutamist lehekülje kaupa. Üks sobilikest variantidest on M25P40-VMN6PB (skeemil U2). Andmesideühendus mälu ja mikrokontrolleri vahel on SPI liides. Kuna signaale HOLD ja WP ei kasutata, on need ühendatud vaikeasendis kõrge nivooaga. Lisaks on mälu toitejalgade vahele ühendatud ka kondensaator vähendamaks toitemüra. Ühendusskeem on välja toodud alloleval pildil Sele 5.



Sele 5 Välise mälu skeem.

3.2.4 Kasutajaliides ja muud ühendused

Selleks, et kasutajale anda tagasisidet raadiomooduli tööst, on skeemi lisatud ka 4 valgusdiodi (skeemis D1 – D4). Nende kaudu antakse kasutajale teada raadioühenduse andmete liikumisest: Rx valgusdiod D3 vilgub, kui raadiomoodul võtab andmeid vastu; Tx valgusdiod D2 vilgub, kui raadiomoodul saadab andmeid välja; lisaks näitab OTAU valgusdiod D1 programmeerimise režiimis olemist ning Link valgusdiod D4 näitab andmesideühenduse toimimist arvutimooduli ning robotimooduli vahel. Valgusdiodide skeemiosa väljavõte on toodud Sele 6. Kuna valgusdiodide juhtimine käib kindla vooluga, siis tuleb valgusdiodide voolu piirata. Selleks kasutan takistit, mida läbiv vooluhulk on võrdne valgusdiodi läbiva vooluhulgaga. Takisti väärtuse leian valemiga (1)(1).

$$R = \frac{V_s - V_f}{I_f} \quad (1)$$

kus: R – otsitav jadatakistus

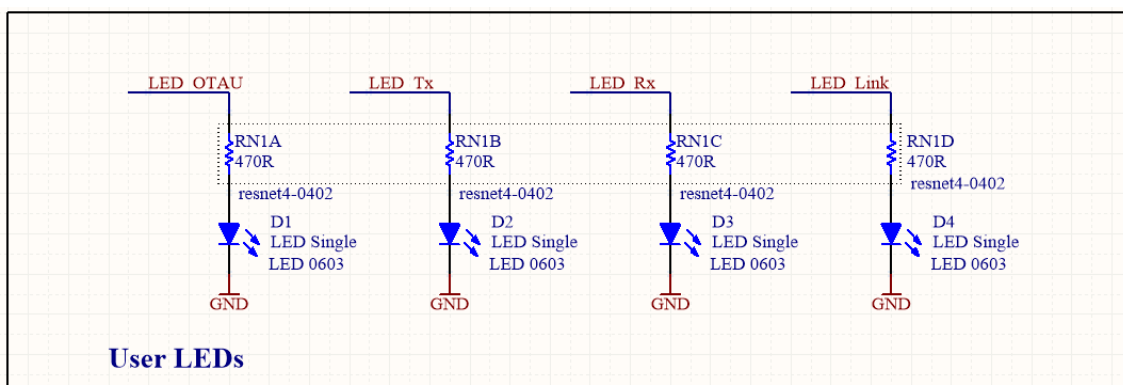
V_s – sisendpinge

V_f – valgusdiodi pingelang

I_f – ahelat läbiv vool

Kasutatav sisendpinge on 3,3 V, mis on mikrokontrolleri väljundist tulev pingeline ning mis on sama toitepingega. Soovitud ahelat läbiv vool on 3 mA, mis on piisav indikaatorleedi põlema panekuks. Valgusdiodi pingelang 3 mA juures valitud diodil KPT-1608SGC on 1,95 V. Seega, kasutades valemit (1), saame vajalikuks takistuseks 450 Oomi. Skeemi jaoks valime lähima standardmõõdus takisti, milleks on 470 Oomi. Et hoida trükkplaadil

komponentide arv minimaalsena, kasutan takistimaatriksit, mis sisaldab endas nelja 470-oomist elementi YC124-JR-07470.



Sele 6 Valgusdiodide skeem.

Kuna raadiomoodul peab olema ühendatav ka olemasolevatesse skeemidesse, siis kasutan selleks XBee raadiomooduliga sarnast pistikühendust, mis on skeemis kirjeldatud ühe elemendina. Skeemi väljavõte on nähtav joonisel Sele 7. Skeemil on välja toodud ka pingejagur vastuvõtja viigul, mis kaitseb mikrokontrolleri sisendit ülepinge eest juhul, kui moodul on ühendatud 5V toitepingel töötava skeemiga. Pingejaguri takistite väärtused on leitud valemist (2).

$$V_o = \frac{R_b}{R_t + R_b} * V_i \quad (2)$$

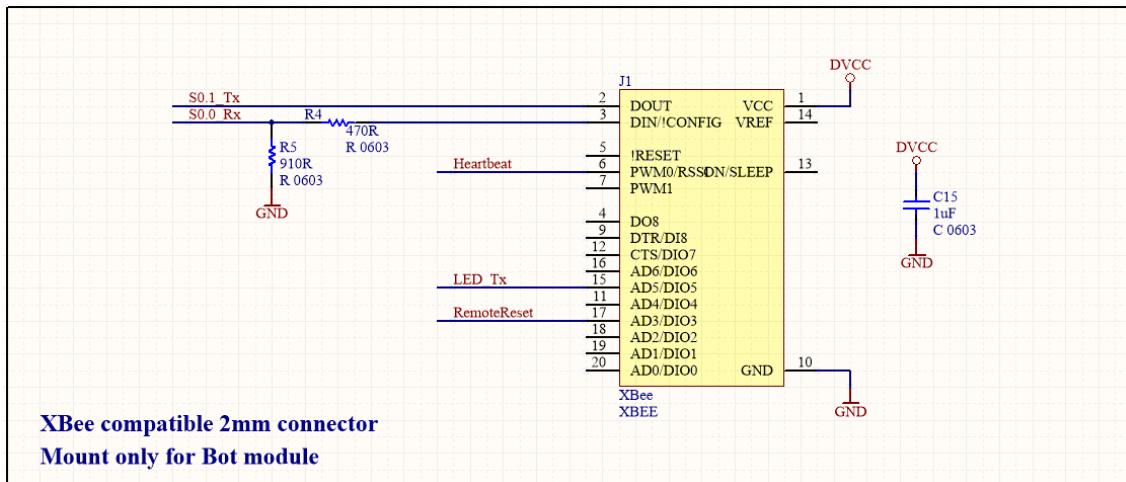
kus: V_o – Väljundpinge

R_b – alumine takisti

R_t – ülemine takisti

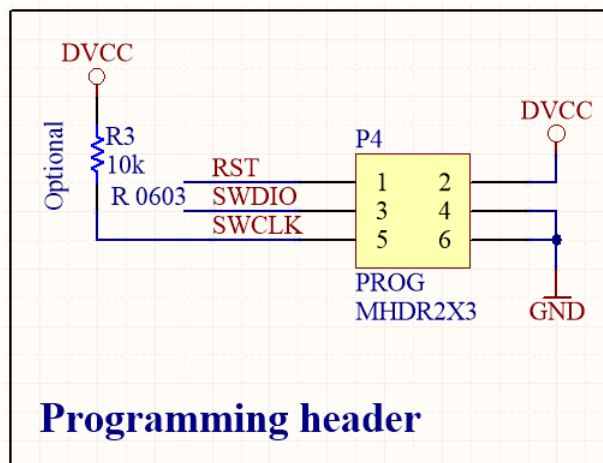
V_i – sisendpinge

Valemist saame arvutada takistite omavahelise suhte sisendpinge 5,0 V ning väljundpinge 3,3 V puhul, milleks on 0,66. Ülemiseks takistiksi sobiks seejuures 470 Oomi ning alumiseks takistiksi on sobilik 910 Oomi. Juhul kui sisendpinge on 3,3 V, on väljundpingeks 2,18 V, mis on piisav, et skeemis kasutatavale mikrokontrolleerile näida kõrge nivoona. Toitepinge 3,3 V juures on skeemis kasutatava mikrokontrolleeri jaoks kõrge nivoo vähemalt $0,55 * 3,3 = 1,815$ V.



Sele 7 Raadiomooduli ühenduse skeem.

Raadiomooduli mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutatakse SWD liidest, mis on sisuliselt lihtsustatud JTAG liides. Selleks on skeemis programmeatori ühendamiseks pistik P4. Programmeatori ühenduse skeem on toodud joonisel Sele 8.



Sele 8 Programmeatori pistiku skeem.

3.3 Antenni valik

Roboti puhul on oluline kompaktsus. See on oluline ka raadiomooduli disainis, mida seade kasutama hakkab. See oli peamine kriteerium ka antenni valikul. Peamised antennivariantide plussid ja miinused on välja toodud tabelis Tabel 5.

Tabel 5 Antennide plussid ja miinused.

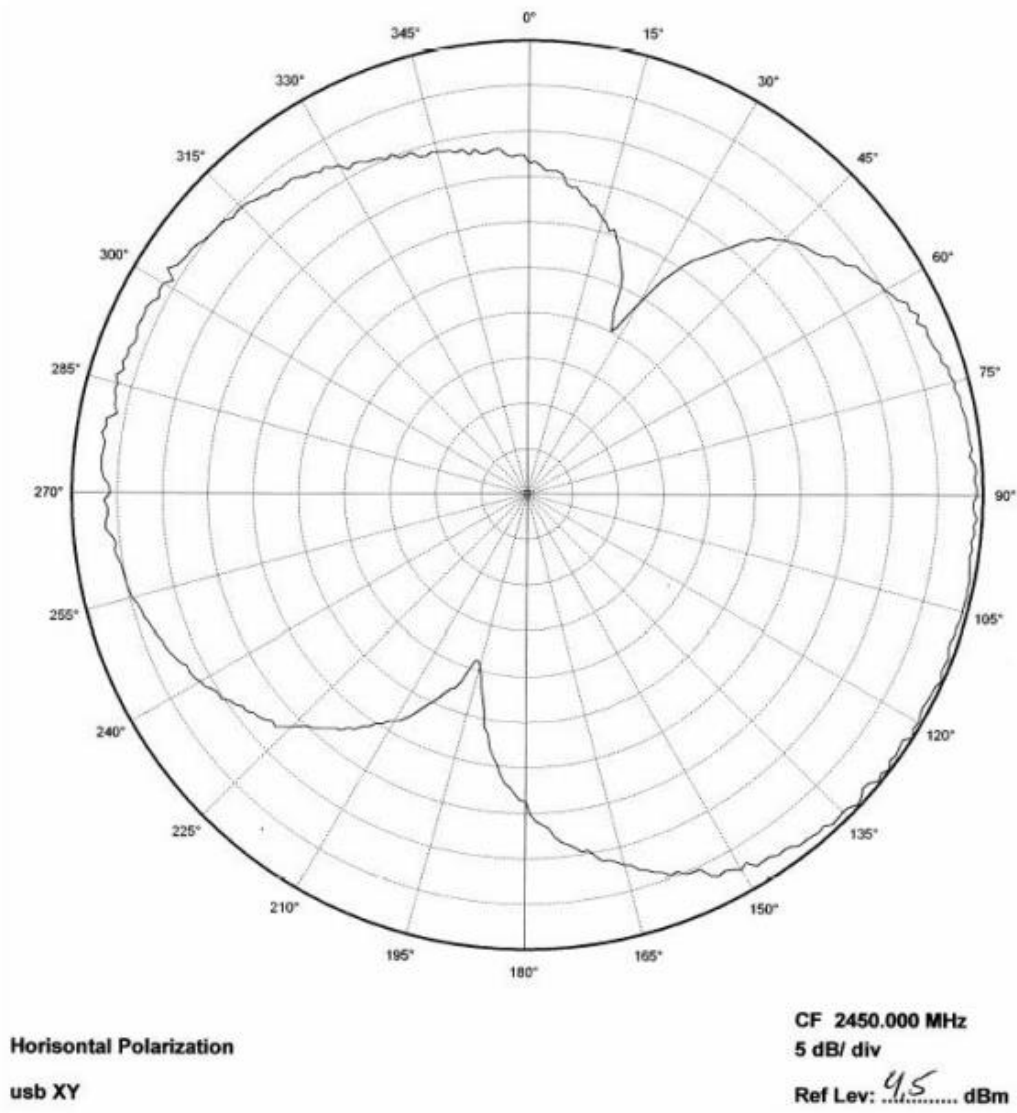
Antenni tüüp	Plussid	Miinused
Väline antenn (Juhe, pulk)	<ul style="list-style-type: none"> • Suhteliselt hea tundlikkus • Võtab trükkplaadil vähe ruumi 	<ul style="list-style-type: none"> • Suhteliselt suur • Kallis
Trükkplaadi „kiip“ antenn	<ul style="list-style-type: none"> • Võtab trükkplaadil vähe ruumi 	<ul style="list-style-type: none"> • Keskmiselt kallis • Keskmise tundlikkus
Trükkplaadile joonistatud antenn	<ul style="list-style-type: none"> • Tasuta • Võimalik häälestada väga tundlikuks 	<ul style="list-style-type: none"> • Võtab trükkplaadil palju ruumi

Eelnevaid kriteeriume arvesse võttes, sai valitud trükkplaadile joonistatud antenn. Disaini lihtsustamiseks osutus valituks Texas Instrumentsi poolt välja pakutud tagurpidi F tüüpi looklev antenn [11]. Antenni kuju on toodud Sele 9.



Sele 9 Tagurpidi F tüüpi looklev antenn [11]

Antud tüüpi antenni eeliseks on suhteliselt väike pindala (15,2 x 2,7 mm) ning antenni kiirgustsoon, mis on piisavalt isotroopne. Antenni horisontaalne kiirgustsoon XY-teljel on toodud antenni andmelehel, mille väljavõte on toodud Sele 10.



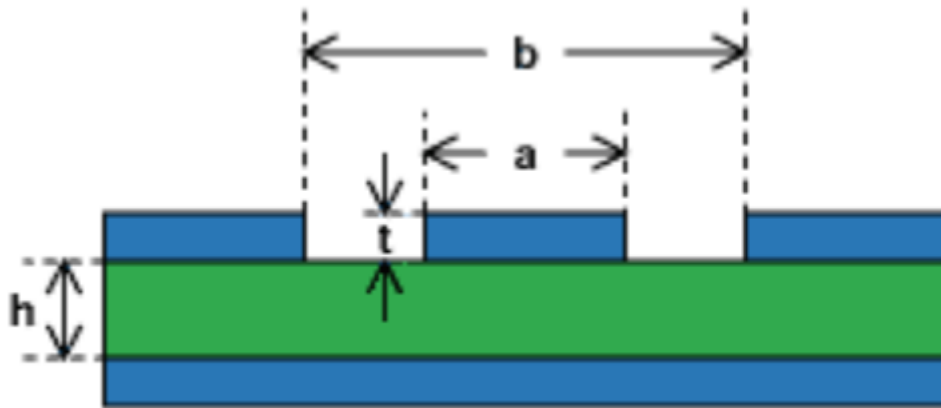
Sele 10 Antenni horisontaalne kiirgustsoon. [11]

3.4 50-oomise impedantsiga raja arvutus

Kogu raadiomoodulist saadetava energia ülekandmiseks antenni kaudu eetrisse on vaja antenni ja raadiomooduli vahele kindla impedantsiga ülekandeliini. Trükkplaadile joonistatud antenni puhul on ülekandeliiniks trükkplaadile joonistatud rada, kuid väliste antennide puhul on tavaliselt ülekandeliiniks koaksiaalkaabel. Ülekandeliinidel on vastavalt kasutusotstarbele määratud kindlaks impedantsi suurus. Atmeli raadiomooduli ning trükkplaadi antenni puhul peab ülekandeliini impedantsiks olema 50 oomi.

Raadiomooduli trükkplaat on disainitud kahe vase kihiga, kuna tegemist on kõige odavamah lahendusega. See tähendab, et kahe vase kihi vaheline kaugus on 1.0 mm.

Vasekihtide vahelise kauguse suurus määrab ära selle, et 50-oomise impedantsiga raja saamiseks on vaja koplanaarset ülekandeliini koos maapinnaga.



Sele 11 koplanaarne ülekandeliin signaalimaaga. [12]

Koplanaarse ülekandeliini eripäraks, võrreldes muude ülekandeliinidega, on signaalimaa lähedus nii kõrval, samas vasekihis kui ka alumises vasekihis.

Selleks, et välja arvutada sobiv 50-oomise impedantsiga raja laius ning signaaliraja ning samal kihil asetseva signaalimaa vaheline kaugus, tuleb kasutada valemit (3) [13].

Alumise signaalimaa efektiivsuse tagamiseks peab $h \gg b$.

$$Z_0 = \frac{120\pi}{2.0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{1.0}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k1)}{K(k1')}} \quad k = a/b$$

$$k' = \sqrt{1.0 - k^2}$$

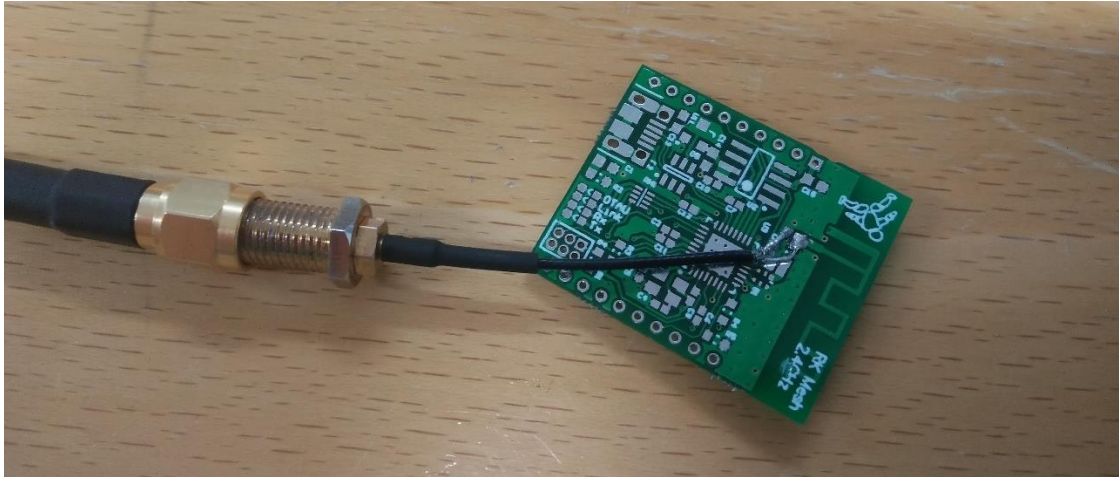
$$k1' = \sqrt{1.0 - k1^2} \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1.0 + \epsilon_r \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k1)}{K(k1')}}{1.0 + \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k1)}{K(k1')}} \quad k1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{4.0h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{4.0h}\right)}$$

Sobivate mõõtude leidmise lihtsustamiseks kasutasin selleks sobivat kalkulaatorit [14]. Kasutades antud tööriista, leidsin sobivaks raja laiuseks 0,8 mm ja rajavaheks 0,15 mm. Arvutamisel võtsin arvesse trükkplaaditootja Brandneri poolt kasutatavate materjalide omadusi [15], kus dielektriline konstant on 4,4 ning trükkplaadi kahe vase vaheline kaugus on 0,8 mm.

3.5 Antenni häälestus

Trükkplaadile joonistatud antenni on alati vaja häälestada. Selleks ühendasin trükkplaadi antenniosa läbi 50-oomise koaksiaalkaabli võrguanalüsaatoriga Rhode ja Schwarz ZVL6. Ühendus on toodud pildil Sele 12.



Sele 12 Võrguanalüsaatori ühendus trükkplaadile.

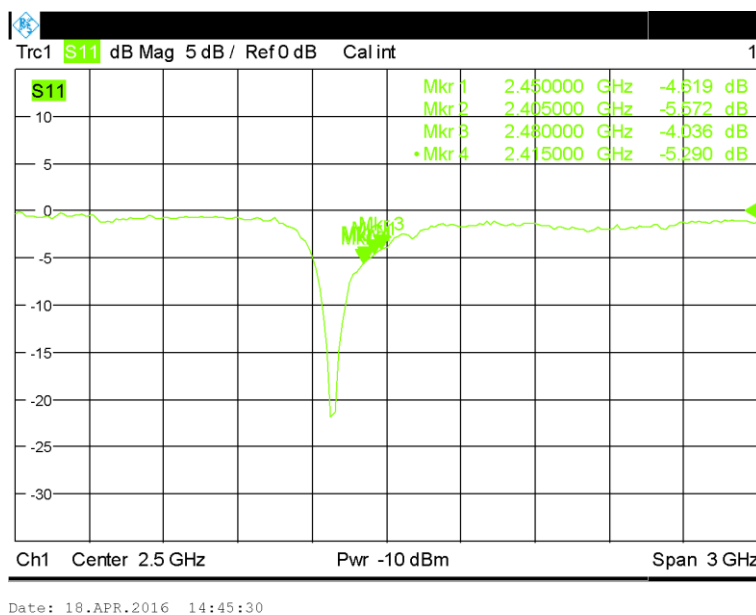
Kaabli keskmine juht on ühendatud antenni signaaliotsale ning kaabli varje on ühendatud trükkplaadi maaplaaniga. Kaabel on suunatud antennist eemale, et vähendada kaabli mõju mõõtetulemustele. Kõik mõõtmised on sooritatud ilma komponentideta trükkplaadiga tühjal puitlaual.

Enne mõõtmist kalibreeriti võrguanalüsaator vastavalt juhendile, kasutades spetsiaalset kalibratsiooni seadet, mille pilt on toodud pildil Sele 13. Kalibratsioon on oluline, et mõõtetulemused oleksid huvi pakkuvast mõõtepiirkonnas võimalikult täpsed.



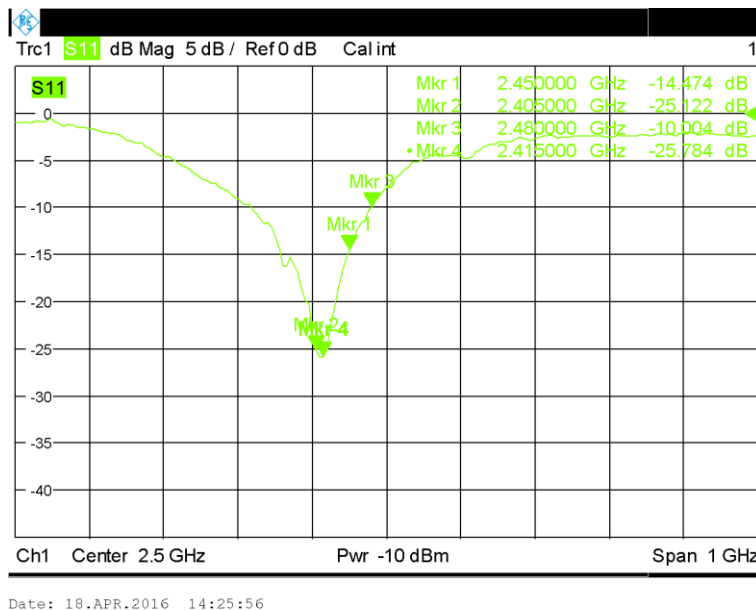
Sele 13 Kalibratsiooni abiseade

Esimese mõõtmisena kontrollisin ahela signaali tagasipeegeldust. Mõõtetulemus on näha väljavõttel Sele 14. Mõõtetulemuste lugemise lihtsustamiseks on kasutatud markereid kindlatel sagedustel. Sagedused on valitud vastavalt raadiomooduli töösagedusalale. Marker 1 on mõõtepiirkonna keskel sagedusel 2,45 GHz; marker 2 on sagedusala alguses, sagedusel 2,405 GHz; marker 3 on sagedusala lõpus, sagedusel 2,48 GHz ning marker 4 on teise kanali sagedusel 2,415 GHz. Nagu mõõtetulemustest on näha, on antenn seadistatud liiga madalal sagedusel.



Sele 14 Signaali peegelduse mõõtmine enne häälestust.

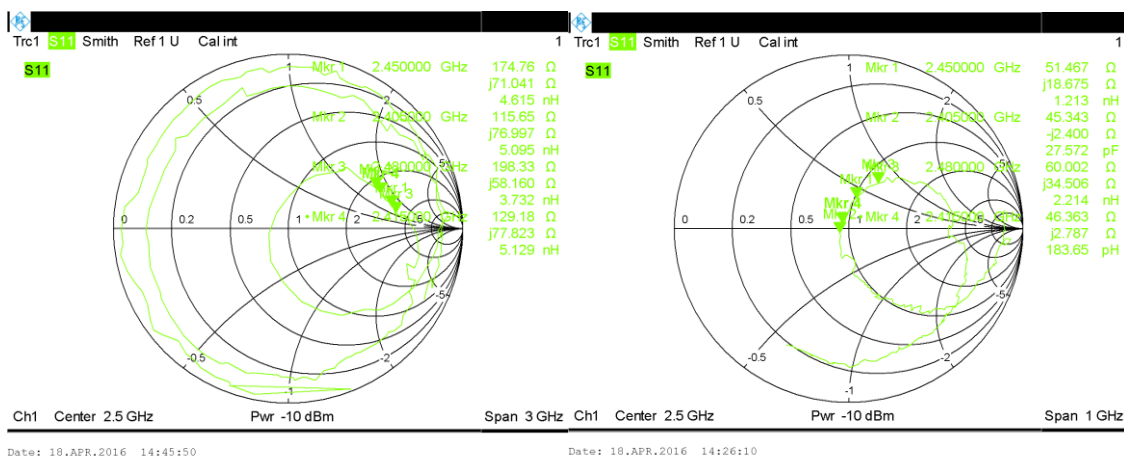
Selleks, et antenni töösagedust liigutada, on kõige lihtsam trükkplaadile joonistatud antenni puhul muuta antenni pikkust. Selleks kasutasin skalpelli ja lõikasin antenni otsa lühemaks, sooritades iga lõike järel kordusmõõtmise, kuni tulemusega võis rahule jääda. Pärast lõikamisi sooritasin uue mõõtmise, mille tulemus on näha programmi väljavõttel Sele 15.



Sele 15 Signaali peegelduse mõõtmine pärast häälestust.

Nagu mõõtetulemustest on näha, on antenn hääles sagedusvahemiku madalamas otsas, st esimestel kanalitel. See tulemus on hea, kuna seadme paigaldamisel plastikust korpusesse muudetakse sellega ka antenni resonantssagedust madalamaks. Antenni pikkus lüheneb häälestuse tulemusel 1,15 mm. Lõikes tuleb sooritada kõikidel trükkplaatidel.

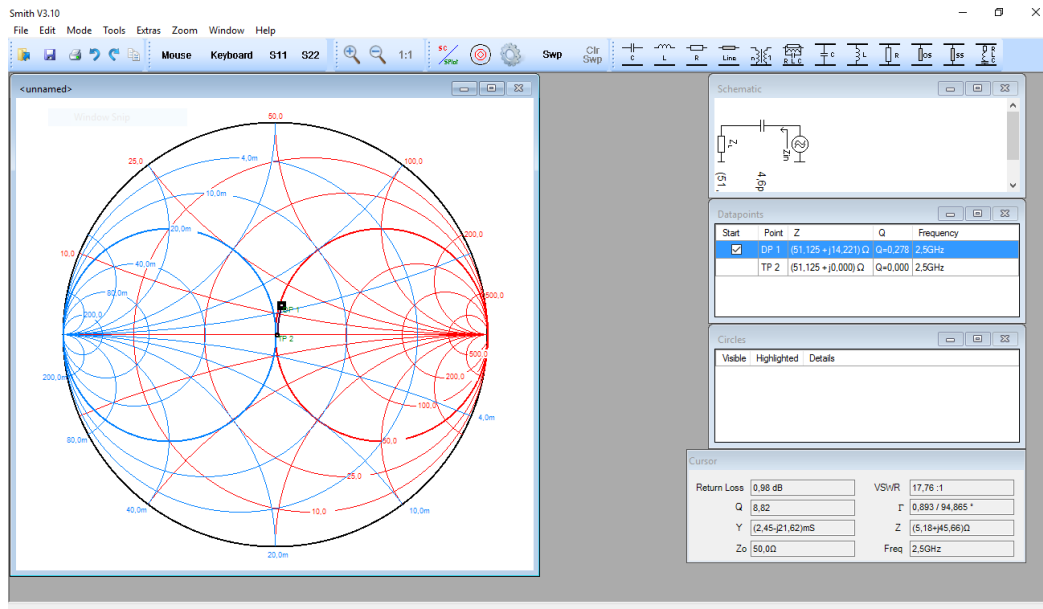
Järgmiseks mõõtsin antenni impedantsi. Mõõtetulemus enne häälestust on toodud programmiväljavõttel Sele 16. Antenni impedantsi kirjeldab Smithi diagramm.



Sele 16 Impedantsi mõõtmistulemus enne häälestust (vasakul) ja pärast häälestust (paremal).

Antenni impedantsi häälestust tegin pärast antenni pikkuse muutmist. Pärast pikkuste muudatusi mõõtsin impedantsi uuesti, mõõtetulemused on nähtavad väljavõttel Sele 16. Mõõtetulemustest selgub, et ahel on liiga induktiivne, mistõttu on vaja suurendada ahela

jadamahtuvust. Selle jaoks sai antenni ahelasse projekteeritud π -häälestusahel, kuhu saame joota vajaliku jadakondensaatori. Vajamineva kondensaatori väärtuse leidmiseks kasutan programmi Smith [16], mis lihtsustab vajalike komponentide leidmist. Sobivaks kondensaatori väärtuseks on 4,6 pF. Programmi väljavõtte koos kondensaatori arvutusega on toodud kuvatõmmisel Sele 17.



Sele 17 Smith programmi kuvatõmmis.

4 Prototüübi testimine

Valminud prototüüpmodulite testimiseks on vaja eelnevalt kirjutada tarkvaralahendus, mis seadistaks raadiomooduli ning mikrokontrolleri ning võimaldaks luua lihtsa raadioandmeside kahe mooduli vahel. Selleks, et raadiomoodulite tööd kõige paremini hinnata, sai testimisel kasutatud sama andmesideprotokolli, mida hakkavad moodulid kasutama lõpplahenduses. Kuna kogu andmesideprotokolli ei ole otstarbekas ise looma hakata, valisin testimiseks Atmeli patenteeritud protokolli Lightweight Mesh [17].

4.1 Atmel Lightweigh Mesh

Atmel Lightweigh Meshi[18] näol on tegemist ZigBee [19] standardile sarnase andmesideprotokolliga, mis võimaldab luua kuni 65535 seadmega automaatselt seadistuva võrgu. Peamisteks eelisteks muude protokolliteekidega võrreldes on täielik avatus, koordinaatori puudumine võrgutopoloogiast, väike mälu kasutus (8KB Flash mälu ja 4 KB RAM mälu). Lähtekoodi avatus võimaldab protokolli seadistada täpselt selliseks, mis on antud olukorras vajalik. Koordinaatori puudumine tähendab, et võrgu loomiseks ei ole vaja kesket seadet, seega on mooduleid võimalik kasutada nii eraldiseisvana kahe mooduli vahelise side puhul kui ka suures võrgus, ilma et peaks vahepeal seadistusi muutma. See on eriti oluline, kuna raadioside ühendust ei tarvitse vaja minna alati vaid ühes kohas, ning keskseadme seadistamine igasse uude punkti poleks otstarbekas ning vajaks lisamoodulit, mis lokaalset võrku haldaks. Kuna ainult andmesidega tegelev teegiosa võtab mikrokontrolleris suhteliselt vähe ruumi, siis võimaldab see lisada moodulile rohkem lisafunktsionaalsust, suurendades sellega kasutusvõimalusi.

4.1.1 Atmel Lightweigh Mesh pakett

Selleks, et moodulite vahelist andmeside hallata, on sõnumid koondatud pakettidesse. Pakettandmeside võimaldab seadmetel suunata informatsiooni täpselt sinna, kuhu see mõeldud on, ilma et kõik moodulid paketi sisu dekodeerima peaksid, nagu see on vajalik juhul, kui kõik sõnumid kõikidele vastuvõtjatele saadetakse. Lightweight Mesh paketi kirjeldus on toodud tabelis Tabel 6.

Tabel 6 Lightweight Mesh pakett.

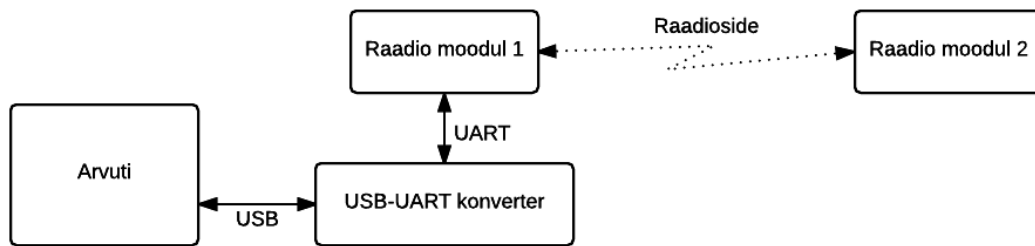
16	8	16	16	16	8	8	16	16	4	4	0/16	Variable	0/32	16
Frame Control	Sequence number	PAN ID	Destination Address	Source Address	Frame Control	Sequence number	Source Address	Destination Address	Source Endpoint	Destination Endpoint	Multicast Header	Variable	MIC	CRC
MAC Header					Network Header							Payload	MIC	CRC

Nagu ka ülalolevast tabelist näha võib, on andmeside jaotatud erinevateks kihtideks. Kõige madalama tasemega on MAC kiht, mis kasutab IEEE 805.15.4 andmepaketi loogikat. Järgmiseks on võrgu kiht, mis kirjeldab ära andmete algallika ja sihtkoha ning lisaks ka andmete omadused (nt kas andmepakett on krüpteeritud) ning teatud pakettide puhul ka mitme vastuvõtva poole omadused (*multicast*). Paketi päisele, mida kirjeldavad sinine ja roheline värv, järgneb kollane andmete osa. Paketi lõpetab valikuline paketi terviklikkuse kontroll (MIC) ning kohustuslik kontrollsumma (CRC).

Ülal kirjeldatud andmepakett võimaldab luua vajaliku kohtvõrgu lahenduse, nagu on kirjeldatud joonisel Sele 1. Robotite omavaheline suhtlus toimub mitmele osapoolle saadetavate sõnumitena, suhtlus arvuti ning roboti vahel käib läbi punktist-punkti suhtluse ning arvutite vahel on laiendatud võrk, mis võimaldab robotitel suhelda õige arvutiga ka läbi teiste masinate, kasutades teisi mooduleid ruuteritena.

4.2 Raadiomoodulite sidekvaliteedi testimine

Moodulite testimiseks lõin kahele moodulile sobiva tarkvaralahenduse. Esimene moodul on ühendatud arvutiga läbi USB – UART andmeside konverteeriija, mis tekitab arvuti ja raadiomooduli vahele virtuaalse jadaliidese ühenduse. Teine moodul saab toite läbi USB liidese, kuid andmesideühendus käib muu maailmaga vaid läbi raadiomooduli. Arvutiga ühenduseks kasutasin lisamoodulit selle lihtsuse tõttu, kuna USB ühenduse implementeerimine mikrokontrolleril ei olnud selle testi jaoks oluline ning on väga töömahukas. Testimisel kasutatud ühenduste skeem on toodud joonisel **Error! Reference source not found.**



Sele 18 Testsüsteemi plaan.

Raadio moodul 1 ülesandeks on kogu UART liidese kaudu tulev andmepakett saata raadiopaketi teisele moodulile. Arvutist tulnud andmetele lisatakse Atmel Lightweight Mesh poolt vajalik informatsioon, milleks on sihtpunkti aadress, sihtpunkti ning algpunkti tarkvaraline aadress, krüpteeringu ning vastuvõtmise kinnituse vajadus ning andmepaketi suurus. Raadio moodul 2, mis on testi hetkel toite eesmärgil pandud alusplatvormile PisiXBee 5 [19] (pildil Sele 19) võtab paketi vastu ning saadab täpselt sama sisuga paketi muutmata kujul tagasi esimesele moodulile. Esimene raadiomoodul saadab vastuvõetud raadiopaketi üle UART liidese arvutisse. Lisaks andmetele, edastatakse ka andmete sihtkoha ja lähtekoha riistvaraline ja tarkvaraline aadress ning seaded ning IEEE 802.15.4 standardis kirjeldatud LQI ja RSSI väärtused. LQI näitab vastuvõetud paketi kvaliteeti ning arvutatakse vastuvõetud paketi vigade suhtest (PER – *packet error rate*). LQI on täisarv vahemikus 0 – 255, kus 255 näitab kõige paremat tulemust ja 0 tähendab, et ükski pakett ei ole tervikuna kohale jõudnud.



Sele 19 Raadiomoodul PisiXBee 5 alusplatvormil

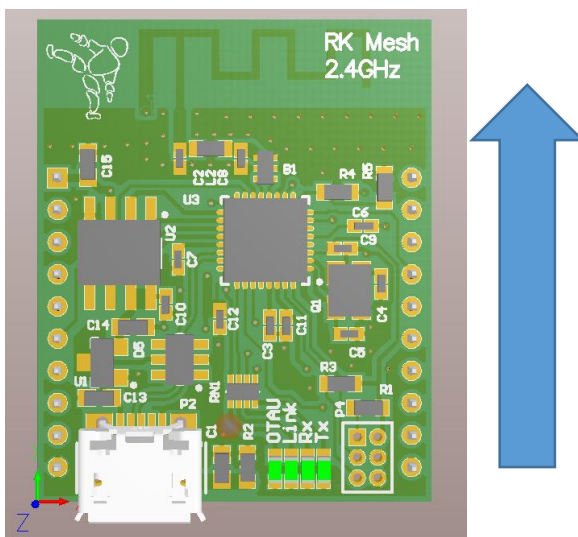
RSSI näitab vastuvõetud signaali tugevust. RSSI väärtus muutub vahemikus -94 ... -10 dBm sammuga 3 dBm. Mida suurem on RSSI väärtus, seda tugevam on vastuvõetud signaal. RSSI väärtuse mõõtmisel ei kontrollita signaali sisu, seega kui korraga suhtleb mitu raadiomoodulit, siis võib RSSI mõõtmistulemus anda väärtuse vale mooduli või andmepaketi kohta. Seetõttu ei saa olla keerulistes andmesidevõrkudes antud väärtuse usaldusvääruses kindel, vaid pigem on tegemist indikatiivse näitajaga.

Raadiomoodulite sidekvaliteedi testimisel kasutasin RSSI väärtust, kuna samal ajahetkel oli läheduses töötamas vaid mõõtmisel kasutatavad 2 raadiomoodulit ning kõrvalisi pakette mõõttekeskkonnas ei liikunud.

4.2.1 Suunakarakteristika hindamine

Suunakarakteristika mõõtmiseks kasutasin ühte statsionaarset moodulit, mis on andmesideks ühendatud arvutiga (Raadio moodul 1) ning üht mobiilset moodulit, mis on ühendatud robotika õppeplatvormile PisiXBee 5. Mõõtmise hetkel oli Raadio moodul 1

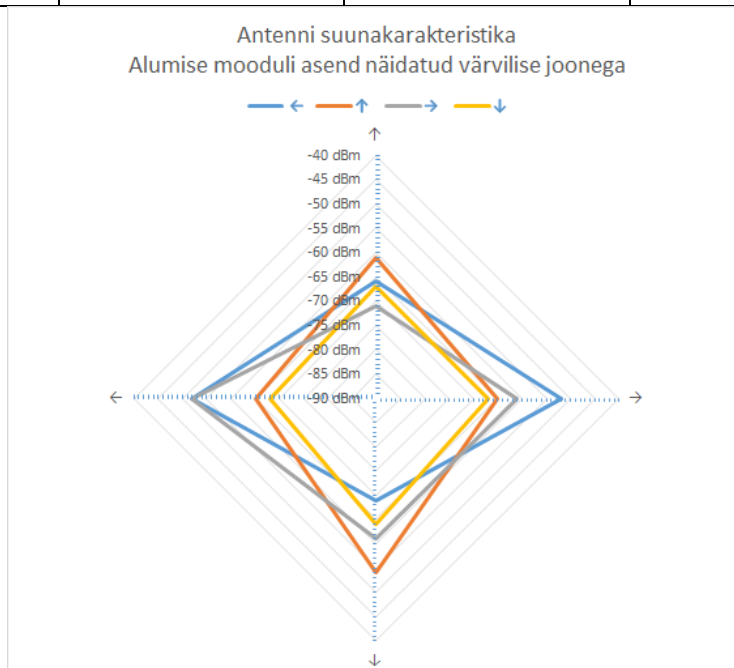
kirjutuslaual, maast 740 mm kõrgusel ning Raadio moodul 2 pörandal, moodulist pealtvaates 2 m kaugusel. Mõõtmistulemused on toodud tabelis **Error! Reference source not found..** Tabelis toodud nooled näitavad raadiomooduli suunda pealtvaates (vt ka **Error! Reference source not found.**).



Sele 20 Raadiomooduli suund.

Tabel 7 Raadiomoodulite suunakarakteristika mõõtmistulemused.

Mõõtmine	Raadio mooduli 2 asend pealtvaates	Raadio mooduli 1 asend pealtvaates	Mõõtetulemus RSSI
1	←	←	-52
2	↑	←	-65
3	→	←	-52
4	↓	←	-80
5	←	↑	-66
6	↑	↑	-61
7	→	↑	-71
8	↓	↑	-67
9	←	→	-52
10	↑	→	-65
11	→	→	-61
12	↓	→	-67
13	←	↓	-69
14	↑	↓	-54
15	→	↓	-61
16	↓	↓	-64



Sele 21 Antenni suunakarakteristika.

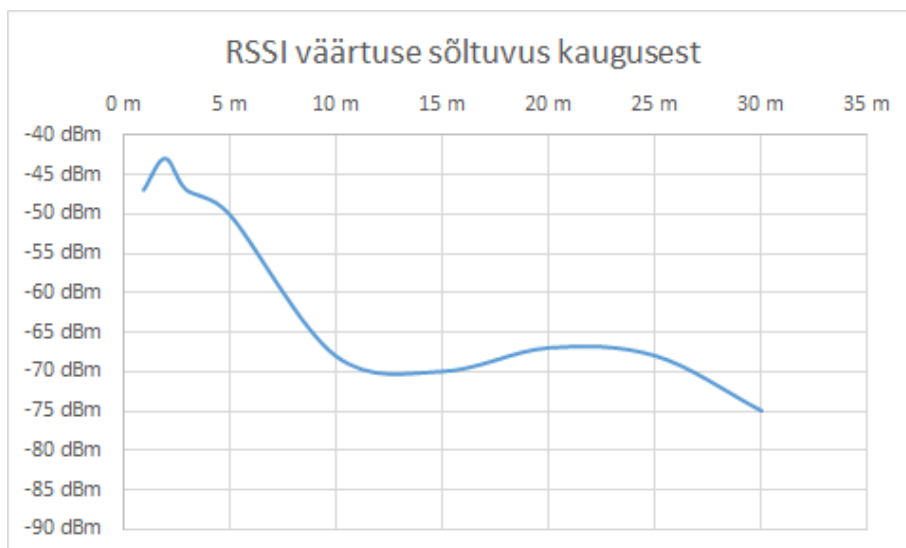
Antenni suunakarakteristika mõõtmisest selgub, et antenn on suhteliselt isotroopne ning suudab vastu võtta igast suunast peaaegu sama hästi. Võib näha vastuvõtmise tugevuse erinevust vertikaal- ja horisontaaltelje vahel maksimaalselt 20 dBm. Mõõdetud variatsioon jääb normi piiresse ning ei tohiks oluliselt mõjutada andmeside kiirust ega kvaliteeti. Mõõtmise käigus võis täheldada ka vastuvõtmise tugevuse muutumist sõltuvana lähedal asetsevatest objektidest kuni 15 dBm. Mõõtmise ajal hoiti ümbritsevat keskkonda samasugusena kogu mõõteprotsessi ajal. Sellest võib järeldada, et roboti liikudes muutub vastuvõetava signaali tugevus pidevalt ja arvestada tuleks kõige halvemate tingimustega.

4.2.2 Sidekauguse hindamine

Selleks, et hinnata kahe mooduli vahelise side maksimaalset kaugust, kasutasin sarnast ülesehitust eelmises punktis tooduga. Mõlemad moodulid asetsesid toolidel, maast horisontaalselt 0,5 m kõrgusel, suunatud antennidega vastamisi. Mõõtmine toimus sirges tühjas koridoris. Hindamiseks kasutasin taas RSSI väärtust. Mõõtetulemused on toodud tabelis **Error! Reference source not found.** ja kokkuvõtval graafikul **Error! Reference source not found.**

Tabel 8 Sidekauguse hindamise mõõtetulemused.

Mõõtmine	Kaugus	Mõõtetulemus RSSI
1	1 m	-47 dBm
2	2 m	-43 dBm
3	3 m	-47 dBm
4	5 m	-50 dBm
5	10 m	-68 dBm
6	15 m	-70 dBm
7	20 m	-67 dBm
8	25 m	-68 dBm
9	30 m	-75 dBm



Sele 22 RSSI väärtuse sõltuvus kaugusest.

Raadiomoodulitevahelise sidekauguse mõõtmistest selgub, et sidekaugus otsenähtavuse korral ületab vajaminevat kaugust mitmekordselt. Signaali tugevus üle -70 dBm on ka piisav, et andmeside kiirus hoida stabiilselt üle 250 kbps, mis on mõistlik roboti algoritmide silumisel ja programmeerimisel.

4.2.3 Andmeside töökindlus

Andmeside töökindluse hindamiseks saatsin läbi raadiomoodulite kindla sisu ja pikkusega andmepakette. Esmalt saadetakse pakett esimesse raadiomoodulisse üle UART liidese, seejärel saadetakse see teise raadio moodulisse, kasutades Atmel Lightweight Mesh andmepaketti. Teine raadio moodul saadab paketi muutmata kujul tagasi ning see jõuab läbi esimese mooduli UART liidese tagasi arvuti terminali. Kui kõik andmed olid välja saadetud ja vastu võetud, võrdlesin saadetud andmepaketti vastuvõetavaga ning arvutasin paketi kao.

$$PER = \frac{\text{veaga baitide arv}}{\text{vastuvõetud baitide arv}} \quad (4)$$

Esmastel testidel avaldus kohati väga suur andmekadu ning hooti oli PER (*Packet Error Rate*) alla 0.5, mis tähendab, et üle poolte pakettidest läksid kaduma. Põhjust välja selgitades leidsin, et viga on UART pakettide parsimises, kuna kasutatud testkood ei ole optimeeritud kiirusele. Vähendades UART liidese boodikiirust 38400 pealt 9600 peale ei olnud UART sõnumite parsimise kiirus enam määravaks faktoriks ning PER tõusis 1.0 peale.

Testimisel oli üks raadiomoodulitest ühendatud arvutiga, teine asus roboti küljes, 5m kaugusel. Testimise tulemused esimesel meetodil on toodud tabelis Tabel 9.

Tabel 9 Andmeside kao mõõtmiste testitulemused laual

Baitide arv paketis	Saadetud pakettide arv	Paus kahe paketi vahel	PER
100	50	25	0,0
100	50	20	0,0
100	50	15	0,0
100	100	1	0,0
100	500	0	0,0

Testi tulemuste järgi võib öelda, et andmeside lühikesel maal ja aeglasel kiirusel on väga töökindel ja usaldusväärne.

Et testida andmeside ühendust ka suurematel kiirustel, kirjutasin testi ümber ning andmed, mida saadeti, olid ette kirjutatud esimesse raadiomoodulisse, selleks et UART andmeside kiirus ei mängiks rolli. Testil saadetakse 50 baidist andmepaketti teisele moodulile 251 korda ning kontrollitakse kõikide pakettide õigsust ning kaotsi läinud pakettide arvu. Testimiseks viisin roboti testväljakule, mis asub teises ruumis. Seeläbi halvenes sideühendus piisavalt, et tekiks andmekadu, mida oleks võimalik hinnata. Kahe mooduli vahele jäi distants 25 m, mis hõlmas avatud uksega betoonist siseseina ja klaasseina. Testi tulemused on toodud tabelis Tabel 10.

Tabel 10 Andmeside kao mõõtmiste testitulemused väljakul

Testi number	Baitide arv paketis	Saadetud pakettide arv	PER
1	50	251	0,000
2	50	251	0,004
3	50	251	0,008
4	50	251	0,012
5	50	251	0,052
6	50	251	0,219
7	50	251	0,004

4.2.4 Raadiomooduli töö hinnang

Võttes arvesse erinevate mõõtmiste tulemusi, võib öelda, et loodud raadiomoodul rahuldab kõiki roboti jaoks olulisi andmeside vajadusi. Paketi kadu roboti liikumisel ruumis on tavaliselt alla 1%. Pakettide kadu on piisavalt väike, et oleks võimalik kasutada ebaõnnestunud pakettide automaatset uuesti saatmist. Kuna on võimalik kasutada ka läbi teiste moodulite suunatud sidet, on võimalik tagada veel suurema ala katmine püsiva sideühendusega saavutades katkematu side ka mitmes ruumis korraga. Oluline on, et side ei sõltuks väga palju roboti suunast teise mooduli suhtes ning see tingimus on antud lahendusega samuti täidetud. See võimaldab robotil suhelda nii arvutiga kui teiste robotitega samaväärselt hästi.

5 Kokkuvõte

Magistritöö eesmärgiks on luua TTÜ Robotiklubi robotitele sobilik universaalne raadioliides, mida oleks võimalik kasutada nii arendusrobotitel kui ka koolituste läbiviimiseks.

Turul on olemas mitmed raadiomoodulid, mida on varasemalt ka TTÜ Robotiklubis kasutatud, kuid terviklikku ja paindlikku lahendust ei ole antud moodulitega võimalik luua. Seetõttu tekkis praktiline vajadus TTÜ Robotiklubi kriteeriumitele vastava raadiomooduli projekteerimiseks.

Uue mooduli loomisel lähtuti sellest, et see sobiks ka olemasolevatesse süsteemidesse. Loodava lahenduse paindlikkust silmas pidades sai valitud Atmeli poolt toodetav 2,45 GHz sagedusel töötav raadiosüsteem, mis on integreeritud ATSAMD21 ARM M0+ mikrokontrolleriga. Valitud lahendus on pakitud ühte korpusesse, mis võimaldab väga kompaktsel lõpplahendusel, mis väikeste robotite puhul on üks olulisemaid kriteeriume. Lihtsuse ja hinna tõttu on antenniks kasutatud Texas Instrumenti poolt disainitud tagurpidi F tüüpi looklevat trükkplaadi antenni.

Raadiosidele lisaks on moodulil ka põhimikrokontrolleri programmimälu uuendamiseks väline FLASH mälulement, mis tagab kiire ja ohutu tarkvara uuenduse lahenduse üle õhu. Programm laetakse kõigepealt üle suhteliselt aeglase ja kõikuva kvaliteediga raadioühenduse raadiomoodulisse, kus kontrollitakse kogu programmi terviklikkust. Programmi laadimisel raadiomoodulisse saab põhikontroller jätkata segamatult tööd ja robot täita ülesannet vastavalt vanale koodile. Pärast kinnitust laetakse tarkvara üle kiire ja kvaliteetse UART ühenduse raadiomoodulist põhikontrollerisse.

Magistritöö raames töötati välja ja realiseeriti kärgvõrgu lühimaa raadiosidelahendus, mis rahuldab TTÜ Robotiklubi vajadusi parverobotite programmeerimise õpetamisel klassiruumis. Lahendust on katsetatud reaalses tööolukorras: 2 roboti peal, sidekiiruseks saavutati 250 kbps paketikao 1% ja otsenähtavuskauguse 10 m korral.

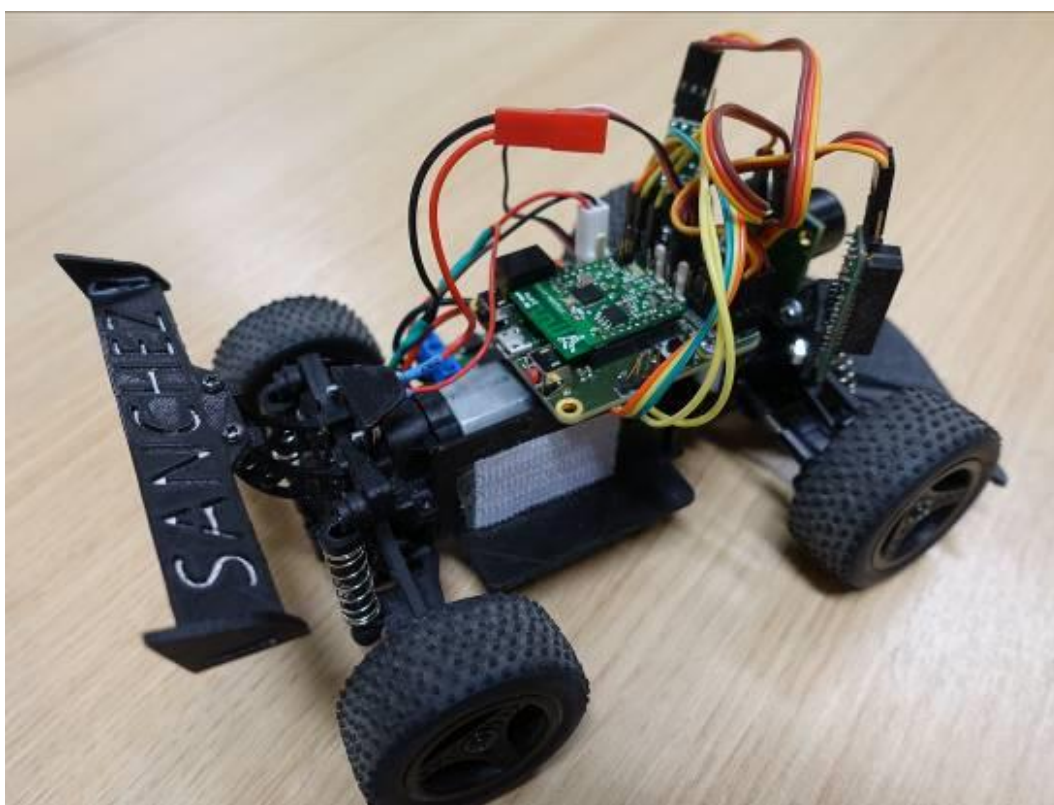
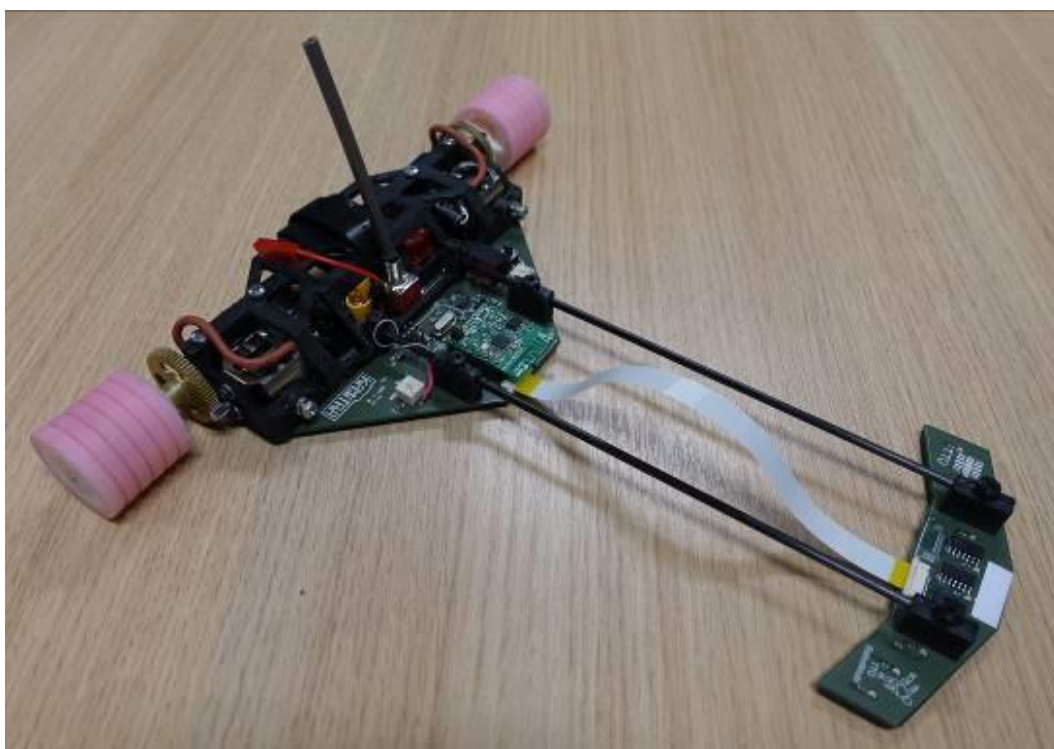
6 Kasutatud kirjandus

- [1] „XBee toote spetsifikatsioon,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/modules/xbee-series1-module#specifications>. [Kasutatud 2016].
- [2] „XRF raadiomooduli spetsifikatsioon,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wirelessthings.net/xrf-wireless-rf-radio-uart-serial-data-module-xbee-shaped>. [Kasutatud 2016].
- [3] „XBee andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://ftp1.digi.com/support/documentation/manual_xb_oem-rf-modules_802.15.4_v1.xAx.pdf. [Kasutatud 2016].
- [4] „Bluetooth Bee toote spetsifikatsioon,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.seeedstudio.com/wiki/Bluetooth_Bee_v2.0.
- [5] „WiFi Bee v2.0 toote spetsifikatsioon,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.seeedstudio.com/wiki/Wifi_Bee.
- [6] „Eesti Raadiosagedusplaan,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/13241627>. [Kasutatud 2016].
- [7] „ATSAMR21 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42223-SAM-R21_Datasheet.pdf. [Kasutatud 2016].
- [8] „CC2630 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2630.pdf>. [Kasutatud 2016].

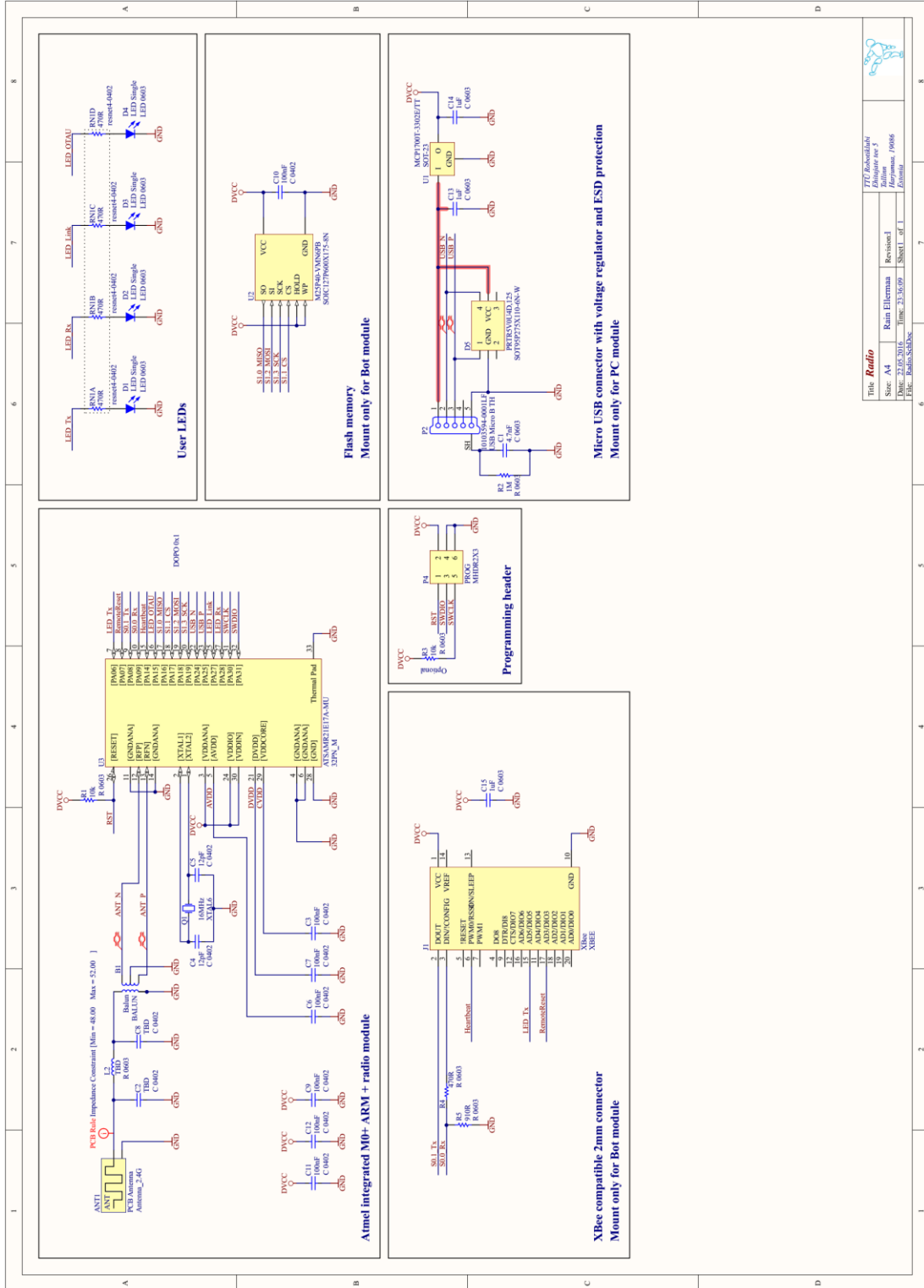
- [9] „CC2650 andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2650.pdf>. [Kasutatud 2016].
- [10] „EM358x andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/EM358x.pdf>. [Kasutatud 2016].
- [11] „Small Size 2.4 GHz PCB antenna,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/swra117d/swra117d.pdf>. [Kasutatud 2016].
- [12] B. C. Wadell, „APPLICATION NOTE 2093,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN2093.pdf>.
- [13] B. C. Wadell, Transmission Line Design Handbook, Artech House, 1991.
- [14] „Impedantsi kalkulaator,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://chemandy.com/calculators/coplanar-waveguide-with-ground-calculator.htm>.
- [15] „Brandneris kasutuselolevate materjalide konstandid,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.brandner.ee/webfiles/pdfs/DielectricConstants_R-1755V_R-1650V.pdf.
- [16] „Programm Smith v3.10,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.fritz.dellsperger.net/smith.html>. [Kasutatud 2016].
- [17] „Atmel Lightweight Mesh,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.atmel.com/tools/lightweight_mesh.aspx.
- [18] „AVR2130: Lightweight Mesh Developer Guide,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42028-Lightweight-Mesh-Developer-Guide_Application-Note_AVR2130.pdf.
- [19] „ZigBee liidu koduleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.zigbee.org/>.

[20] „PisiXBee 5 tooteleht,“ [Võrgumaterjal]. Available:
www.robotiklubi.ee/projektid/PisiXBee5. [Kasutatud 2016].

Lisa 1 – Raadiomoodul robotil

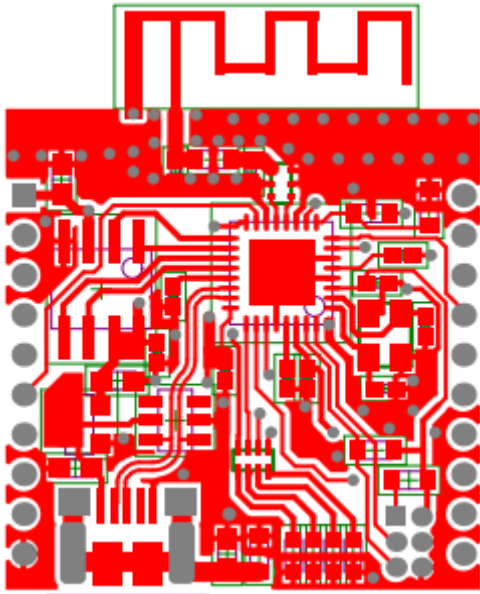


Lisa 2 – Radiomooduli skeem

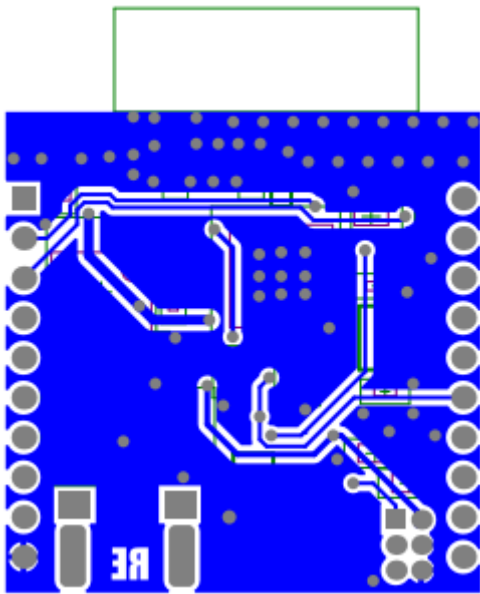


Title	Radio	Author	Rain Elerman	Revision	
Size	A4	Date	23.05.2016	Time	23:55:09
Doc	Radio	Sheet	of	1	

Lisa 3 – Raadiomooduli trükkplaadi kihtide joonised

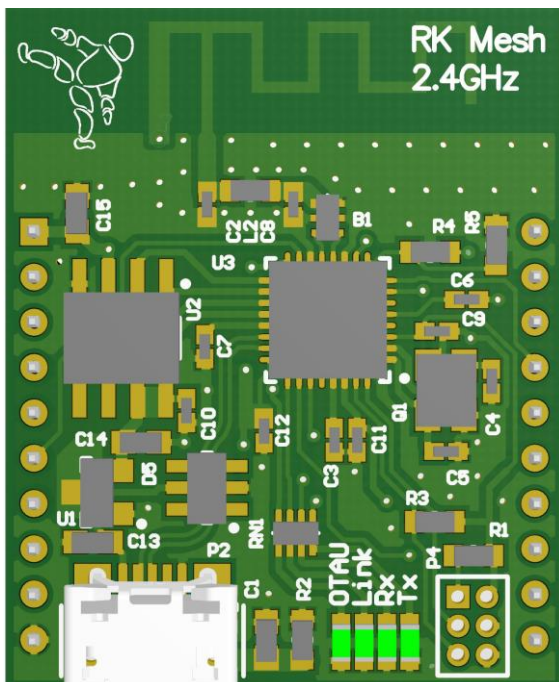


Ülemine kiht

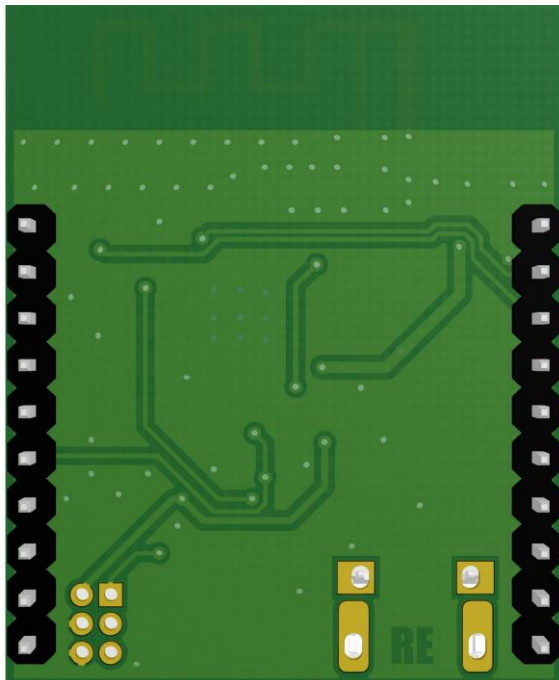


Alumine kiht

Lisa 4 – Trükkplaadi 3D visualisatsioon



Pealtvaade



Altpaade