

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Ergo Haavasalu 213415IACB

PQ9 standardile vastav pikosatelliidi raadiosidemoodul

bakalaureusetöö

Juhendaja: Ivo Mürsepp
PhD

Tallinn 2024

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: Ergo Haavasalu

11.05.2024

Annotatsioon

Töö eesmärgiks oli 435 MHz sagedusalas töötava pikosatelliidi raadiosidemooduli valmistamine. Loodi kaks prototüüpi – mõlemad sisaldasid kogu satelliidis kasutamiseks vajalikku riistvara. Testimiseks lisati moodulitele *USB* tugi, mikrokontrollerile kirjutati arvutiga suhtlemiseks minimalistlik tarkvara.

Kasutatud võimsusvõimenditest osutus paremaks GRF5504 – seda nii mõõdetud kasuteguri, maksimaalse väljundvõimsuse, lineaarsuse, toitepinge lubatud vahemiku kui ka hinna poolest.

Suudeti täita kõik seatud põhieesmärgid: mõlemad prototüübid vastasid PQ9 standardile, sisaldasid muuhulgas võimsusvõimendit ja antennilülitit, teise prototüübi maksimaalne väljundvõimsus ületas nõutud väärtuse 27 dBm, suundhargmikuga saatevõimsuse mõõtja töötas oodatust paremini.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 54 leheküljel, 6 peatükki, 33 joonist, 3 tabelit.

Abstract

Radio communications module of a picosatellite based on the PQ9 standard

The objective was to construct a working prototype of a radio communications module for a picosatellite, based on the PocketQube standard. The prototype had to work in the 435 MHz amateur space radio frequency band, and have a maximum output power of at least 27 dBm.

In total, two versions were produced, both of which included all the necessary hardware for operating in an actual satellite. For testing purposes, a USB interface was added, and a simple test program was written for the microcontroller.

The main focus was put on increasing the output power of the Si4468 transceiver. For this purpose, two different power amplifiers were used – HMC453QS16GE by Analog Devices, and GRF5504 by Guerrilla RF. It turned out the latter was a better choice – it had a higher measured power-added efficiency, higher maximum output power, a wider accepted supply voltage range, a better linearity, and a significantly lower price point.

All of the set criteria were met: both prototypes were PQ9 (PocketQube 9) compliant, contained a power amplifier and an antenna switch, the transmission power measurement circuit worked better than expected,

and in case of the second prototype, a maximum output power of 27,4 dBm was achieved.

The thesis is in Estonian and contains 54 pages of text, 6 chapters, 33 figures, 3 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

<i>ADM</i>	Analoog-digitaalmuundur
<i>ESD</i>	<i>Electrostatic discharge</i> – sädelahendus
<i>GNU</i>	<i>GNU's Not Unix</i> – vabavaraline operatsioonisüsteem
<i>GPIO</i>	<i>General-purpose input/output</i> – üldotstarbeline sisend/väljund
<i>HAL</i>	<i>Hardware abstraction layer</i> – riistvara abstraktsioonitase
<i>I²C</i>	<i>Inter-integrated circuit</i> – jadaliidese standard
<i>LDO</i>	<i>Low dropout regulator</i> – madala päripingega lineaarne pingestabilisaator
<i>LNA</i>	<i>Low Noise Amplifier</i> – madala müratasemega võimendi
<i>MCU</i>	<i>Microcontroller unit</i> – mikrokontroller
<i>MISO</i>	<i>Master in slave out</i>
<i>MOSI</i>	<i>Master out slave in</i>
<i>OIP3</i>	<i>Output third-order intercept point</i> – väljundi kolmandat järku intermodulatsioonimoonutuste lõikepunkt.
<i>PAE</i>	<i>Power-added efficiency</i> – võimendi kasutegur, mille määramisel võetakse arvesse ka sisendsignaali võimsus
<i>PCB</i>	<i>Printed circuit board</i> – trükkplaat
<i>P1dB</i>	1 dB kompressioonipunkt
<i>QFN</i>	<i>Quad-flat no-leads</i> – pindmontaažkomponendi korpuse tüüp
<i>SMD</i>	<i>Surface-mount device</i> – pindmontaažkomponent
<i>SPI</i>	<i>Serial peripheral interface</i> – jadaliidese standard
<i>SWD</i>	<i>Serial Wire Debug</i>

<i>TCXO</i>	<i>Temperature compensated crystal oscillator –</i> temperatuurikompensatsiooniga kvartsosillaator
<i>TTY</i>	<i>Teletypewriter –</i> teletaip
<i>TTÜ</i>	Tallinna Tehnikaülikool
<i>TVS</i>	<i>Transient voltage suppression –</i> ülepingekaitse
<i>UART</i>	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter –</i> universaalne jadaliidese protokoll
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus –</i> universaalne jadasiin

Sisukord

1 Sissejuhatus.....	13
2 Lühülevaade PocketQube standardidest.....	15
2.1 PocketQube mehaaniline standard.....	16
2.2 PQ60 standard.....	17
2.3 PQ9 standard.....	19
3 Makettide disain.....	21
3.1 Prototüüpide üldskeemid, komponendid ja tööpõhimõte.....	21
3.2 Toide.....	25
3.3 Alamsüsteemi põhikontroller.....	26
3.3.1 STM32L412K8U6.....	27
3.3.2 <i>USB</i> liides.....	27
3.3.3 <i>UART</i> liides ja <i>UART</i> RS-485 sild.....	28
3.3.4 <i>SPI</i> liides.....	29
3.4 Transiiver.....	29
3.4.1 Si4468 integraalskeem.....	29
3.4.2 Antennilüliti.....	30
3.4.3 Balanseerimis- ja sobitusahelad.....	31
3.5 Raadiosageduslik võimsusvõimendi.....	34
3.5.1 Muudetava võimendusega võimendid.....	35
3.5.2 Fikseeritud võimendusega võimendid.....	35
3.5.3 Esimene valitud lahendus.....	38
3.5.4 Teine valitud lahendus.....	41
3.6 Antenni väljundvõimsuse ja sobituse mõõtmine.....	42

3.6.1 Suundhargmik.....	42
3.6.2 Pingevõimendid ja alaldid.....	43
4 Simulatsioonid.....	45
5 Makettide koostamine.....	47
6 Tarkvara.....	49
6.1 Si4468 algseadistamine ja testimine.....	49
6.2 Mooduliga suhtlemine üle USB liidese.....	51
6.3 Ülevaade tarkvara käskudest ning toimimisest.....	52
7 Mõõtmised.....	54
7.1 HMC453 võimsusvõimendi.....	55
7.2 GRF5504 võimsusvõimendi.....	57
7.3 Võimsusvõimendite võrdlus.....	60
7.4 TPS61092 pinget tõstev muundur.....	62
7.5 Madalpääsfiltrid.....	63
7.6 Suundhargmik ja saatevõimsuse mõõtja.....	64
7.7 Antennilüliti.....	66
7.8 Saateahela kaod.....	67
8 Kokkuvõte.....	69
Kasutatud kirjandus.....	71
Lisa 1– Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	75
Lisa 2 – Trükkplaatide kihtide graafika.....	77
8.1 Raadiosidemoodul V1.1.....	77
8.2 Raadiosidemoodul V2.0.....	78
Lisa 3 – Komponentide nimekiri (BOM).....	82
Lisa 4 – Skeemid.....	86

Jooniste loetelu

Joonis 1: Ühikulise PocketQube formaadis satelliidi gabariit. Allikas: [9]..	17
Joonis 2: PQ60 standardile vastava trükkplaadi joonis. Allikas: [10].....	19
Joonis 3: PQ9 standardile vastava trükkplaadi joonis. Allikas: [11].....	20
Joonis 4: Raadiosidemooduli prototüübi V1.1 plokk-skeem.....	23
Joonis 5: Filtri LFCG-42+ amplituud-sageduskarakteristikud [13] [14]	25
Joonis 6: Mikrokontrolleri portide algseadistamine rakendusega STM32CubeIDE.....	28
Joonis 7: Transiiveri sobitusahela komponentide väärtuste määramine W. Kelsey interaktiivse Smithi diagrammi rakenduse abil [26]	33
Joonis 8: Transiiveri väljundi sobitus- ja eelpingestusahel.....	34
Joonis 9: Transiiveri sisendi balanseerimis- ja sobitusahel.....	35
Joonis 10: Võimsusvõimendi HMC453QS16GE testimise põhimõtteskeem.	41
Joonis 11: JLCPCB JLC04161H-7628 trükkplaadi kihid koos vastava 50 Ω mikroribaliini laiuse ning 90 Ω diferentsiaalpaari mõõtmega.....	42
Joonis 12: Võimsusvõimendi GRF5504 testimise põhimõtteskeem.....	42
Joonis 13: Suundhargmiku signaalide alaldamise ja võimendamise põhimõtteskeem.....	45
Joonis 14: HMC453QS16GE simulatsiooni põhimõtteskeem AWR Design keskkonnas.....	46
Joonis 15: HMC453QS16GE hajuparameetrite simulatsioonitulemused....	47
Joonis 16: HMC453QS16GE μ-stabiilsustegurite simulatsioonitulemused..	47
Joonis 17: Raadiosidemooduli V1.1 valmis prototüüp.....	48

Joonis 18: Raadiosidemooduli V2.0 valmis prototüüp.....	49
Joonis 19: Näide mooduli käsurealt juhtimisest rakendusega Tio.....	52
Joonis 20: Võimsusvõimendi hajuparameetrite moodulite võrdlus simulatsioonitulemustega.....	57
Joonis 21: HMC453QS16GE väljundspekter 10 dBm 435 MHz sisendsignaali korral.....	58
Joonis 22: Sobitatud GRF5504 võimsusvõimendi hajuparameetrite moodulid.....	59
Joonis 23: GRF5504 väljundspekter 10 dBm 435 MHz sisendsignaali korral.	59
Joonis 24: GRF5504 väljundsignaali põhikomponendi võimsuse sõltuvus sisendvõimsusest.....	60
Joonis 25: GRF5504 väljundvõimsuse sõltuvus sagedusest (0 dBm sisendvõimsusel).....	60
Joonis 26: Võimsusvõimendite HMC453QS16GE ja GRF5504 väljundspektrite võrdlus.....	62
Joonis 27: Sisselülitamise hetkest alates koormatud muunduri väljundpinge graafik.....	63
Joonis 28: Peale käivitamist koormatud muunduri väljundpinge graafik.	64
Joonis 29: Mooduli V1.1 trükkplaadil mõõdetud LFCG-42+ madalpääsfiltri hajuparameetrid.....	65
Joonis 30: LFCG-42+ madalpääsfiltri ja suundhargmiku summaarsed hajuparameetrid.....	66
Joonis 31: Võimsuse mõõtja ADM väljundkoodi väärtuse sõltuvus saatevõimsusest.....	66
Joonis 32: Antennilüliti sisestuskadu.....	67
Joonis 33: Antennilüliti isolatsioon.....	68

Tabelite loetelu

Tabel 1: Raadiosageduslike võimsusvõimendite parameetrite võrdlus.....36

Tabel 2: Võimendite *PAE* arvutamiseks vajalikud mõõtetulemused.....60

Tabel 3: Saateahela komponentide kaod väikse signaali režiimis.....68

1 Sissejuhatus

Siiani pole Tallinna Tehnikaülikooli tudengisatelliitides suudetud edukalt orbiidil toimima saada saateahela võimsusvõimendit. TTÜ tudengisatelliitide Koit ja Hämarik raadiosidemoodulites esinenud rikete tõttu tuli kasutusele võtta varuraadiod. Viimaste madalam saatevõimsus raskendas aga oluliselt satelliitidega side pidamist [1].

Antud lõputöö algseks eesmärgiks oli PocketQube formaadis satelliidi jaoks võimsusvõimendi prototüübi väljatöötamine. Disainile seati järgnevad nõuded:

- Töösagedus asub 435 MHz amatöör-kosmoseside diapasoons,
- saavutatav väljundvõimsus on vähemalt 27 dBm,
- skeem mahub PocketQube standardile vastavate mõõtmetega trükkplaadile,
- lahendus sisaldab antennilülitit ja selle juhtimise loogikat,
- täiendavalt on lisatud antenni väljundvõimsuse ja sobituse mõõtmise skeem.

Autor otsustas ülesannet mõnevõrra laiendada ning koostada täiemahulise PocketQube 9 standardi baasil raadiosidemooduli.

Lõputöö on jaotatud kuueks põhipeatükiks:

1. Lühiülevaade PocketQube standardidest – esitatakse kiire ülevaade vastavat tüüpi pikosatelliitide mehaanilistest ja elektrilistest nõuetest ning standardidest,
2. Makettide disain – käsitletakse kasutatud komponente, esitatakse arvutused ja disainivalikud koos põhjendustega,
3. Simulatsioonid – esitatakse HMC453 võimsusvõimendi simulatsioonide tulemused ning järeldused,
4. Makettide koostamine – antakse ülevaade trükkplaatide jootmise ja esmase testimise käigus tekkinud olulisematest tähelepanekutest,
5. Tarkvara – esitatakse programmeerimise käigus tekkinud olulisemad tähelepanekud ning antakse ülevaade loodava tarkvara toimimisest,
6. Mõõtmised – esitatakse mõõtmistulemused ning nende analüüs.

2 Lühiülevaade PocketQube standardidest

Satelliitide kosmosetranspordi hinnad on muutunud üha odavamaks – tänu sellele on väikesatelliitide hulgas kasvanud ka tudengisatelliitide osakaal. SpaceX, Euroopa Kosmoseagentuur jt pakuvad väikesatelliitide orbiidile toimetamise nn jagatud teenust (*rideshare*), mille raames kliendid (peamiselt erinevad nn maaklerettevõtted) saavad broneerida ka ainult osa kanderaketist [2] [3] . Ettevõtted nagu Alba Orbital ja Fossa Systems ostavad *rideshare* programmi raames osa kanderaketist enda toodetud väikesatelliitide hoiu- ja väljastussüsteemi jaoks, seejärel müüvad süsteemi vabad kohad klientidele maha. Fossa Systemsi „Pocketpod 8p Deployer” puhul on ühe taskukuubiku (1p PocketQube) orbiidile toimetamise hind kõigest 18000 eurot, Alba Orbitali puhul algavad hinnad 25000 eurost [4] [5] .

Väikesatelliite liigitatakse massi alusel järgnevasse kategooriatesse:

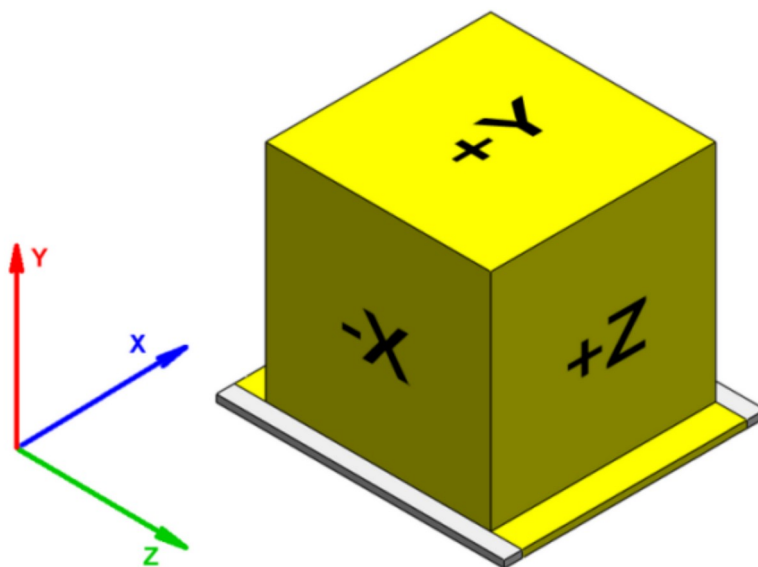
- Minisatelliidid (100 – 500 kg),
- Mikrosatelliidid (10 – 100 kg),
- Nanosatelliidid (1 – 10 kg),
- Pikosatelliidid (100 – 1000 g),
- Femtosatelliidid (10 – 100 g),
- Atosatelliidid (1 – 10 g),

- Zeptosatelliidid (0,1 – 1 g) [6] .

Eestis on senini valmistatud kuupsatelliidi (CubeSat) formaadis nanosatelliite: Koit (TTU101), Hämarik (TTU100), ESTCube-1 ja ESTCube-2. TTÜ tudengisatelliidi projekti raames plaaniti ka taskukuubiku (1p PocketQube) formaadis (st 5x5x5 cm gabariidiga) pikosatelliidi ehitamist – kahjuks projekt reorganiseeriti [7] . Eesti ülikoolide vahelise koostööna on aga valmimas 3p PocketQube formaadis Strateegiliste Uuenduste Testimise Satelliit ehk SUTS [8] .

2.1 PocketQube mehaaniline standard

Delfti Tehnikaülikooli, Alba Orbitali ja GAUSS Srl'i väljatöötatud mehaaniline standard määrab PocketQube tüüpi pikosatelliidi ühe ühiku mõõtmeteks ca 50x50x50 mm ja massiks kuni 250 g [9] .



Joonis 1: Ühikulise PocketQube formaadis satelliidi gabariit. Allikas: [9]

Satelliidi üheks küljeks on 58x64x1,6 mm mõõtmetega plaat, mille abil seade hoiusüsteemi külge fikseeritakse – orbiidile jõudes käitub see nn kelguna ja aitab satelliidil süsteemist stabiilselt välja libiseda [9].

Päikesepaneelide jt väljaulatuvate komponentide jaoks on vaikumisi eraldatud satelliiti ümbritsev 7 mm paksune ala – kokkuleppel kosmosetranspordiettevõttega on seda võimalik kuni 10 millimeetrini kasvatada [9].

PocketQube massikese ei tohi paikneda satelliidi geomeetrisest keskpunktist rohkem kui 1 cm kaugusel [9].

Standardi esimene väljaanne esitab elektrilistest nõuetest vaid selle, et iga PocketQube peab omama vähemalt kahte turvalülitit (*kill switch*) [9].

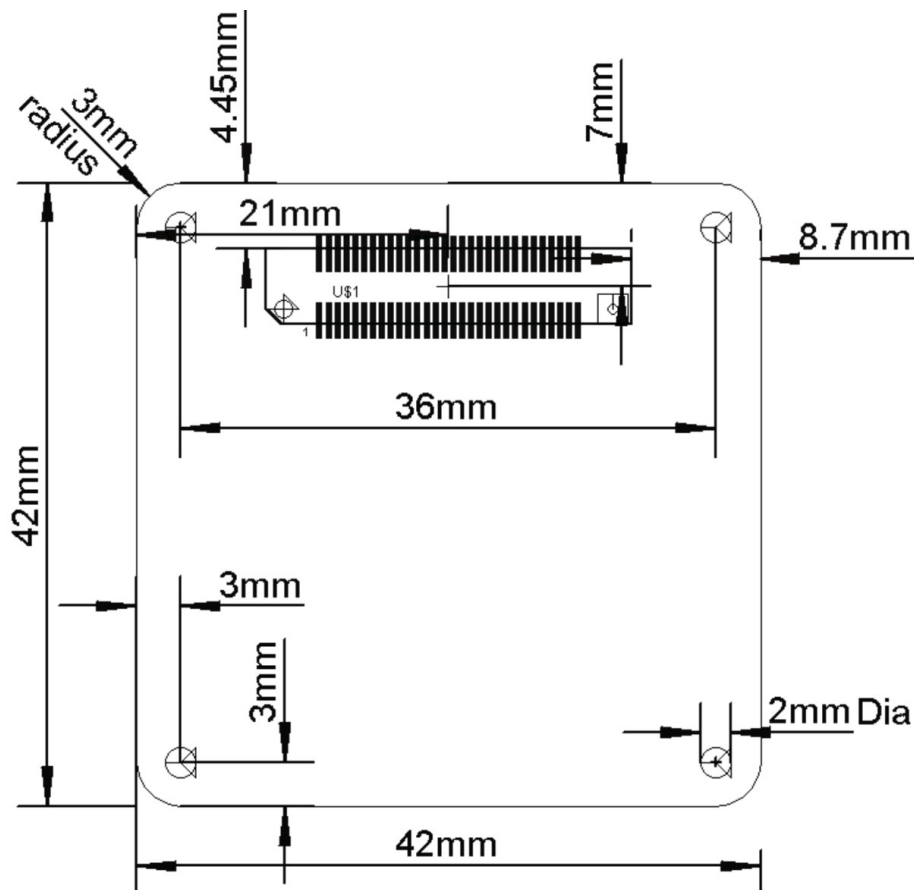
2.2 PQ60 standard

Standard määrab satelliidi iga mooduli maksimaalseks pikkuseks ja laiuseks 42 mm ning kasutab moodulite vaheliste elektriliste ühenduste loomiseks 60-klemmiseid Hirose FX8C seeria pistikuid (vt Joonis 2). Siini kõik signaalid on jagatud satelliidi kõigi moodulite vahel. Moodulite vaheliseks suhtluseks on kasutusel nii *SPI (serial peripheral interface)* kui ka *I²C (inter-integrated circuit)* liides, samuti 12 universaalset sisendit/väljundit. Standardi põhjal kasutavad kõik toitesiini ühendused pistiku nelja klemmi, vastavad lülitid kahte, ja andmesiinid ühte klemmi [10].

PQ60 standardil on kaks versiooni – „PQ60 Standard” ja „PQ60 Compatible”. Neist esimese korral peab loodav satelliidi moodul vastama kõigile standardis kehtestatud nõuetele. Et pakkuda rohkem

valikuvabadust, võivad teise, „PQ60 Compatible”, standardi korral n-ö põhistandardist erineda järgnevad parameetrid:

- vähemalt plaadi üks pool kasutab „PQ60 Standard” tüüpi moodulitega ühilduvat pistikut,
- *GPIO (general purpose input/output)* ühenduste asukoht ja otstarve võib varieeruda – seejuures peavad ülejäänud ühendused muutmata jääma,
- turvalülite tööpinge võib standardist erineda [10].



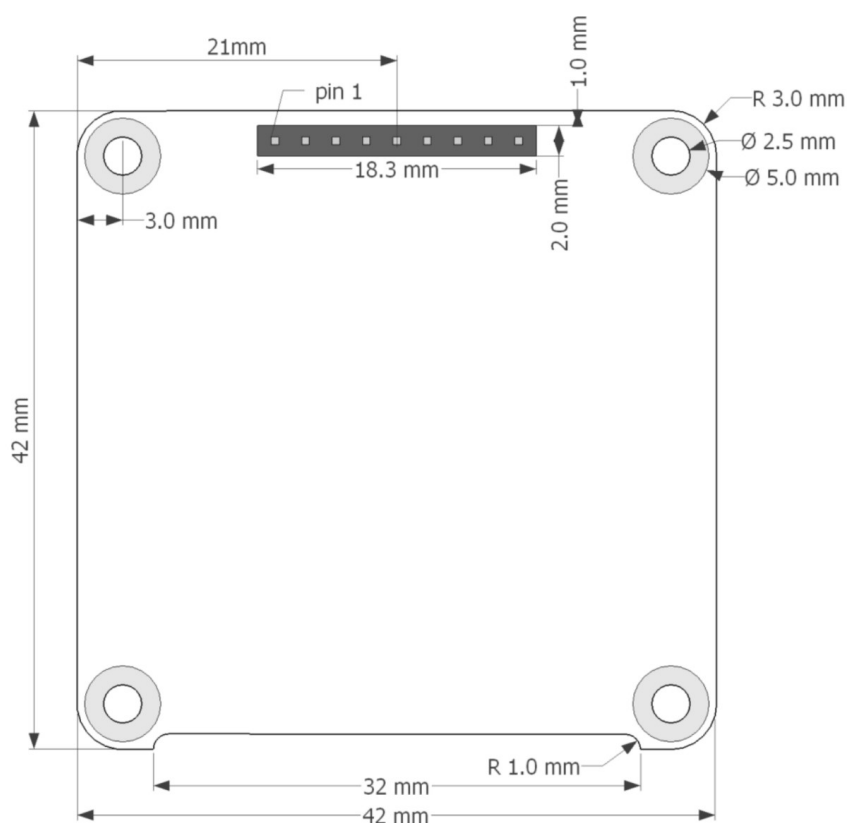
Joonis 2: PQ60 standardile vastava trükkplaadi joonis. Allikas: [10]

2.3 PQ9 standard

Tegu on Delfti Tehnikaülikooli poolt 2017. aastal välja töötatud PocketQube formaadis satelliitide standardiga, mis on PQ60 standardi n-ö minimalistlikumaks alternatiiviks. FX8C seeria pistikute asemel on kasutusel Samtec SQT-1xx-xx-LS seeria pistikud (SQT-109-03-LS või SQT-109-02-LS) – võrreldes PQ60 standardile vastava pesaga on seega viikude arv tunduvalt väiksem (9 ühendust vs 60) [11].

Trükkplaadi gabariit on üldjoontes sama mis PQ60 korral (vt Joonis 3).

Moodulite vaheline suhtlus toimub ühe RS-485 liidese vahendusel.



Joonis 3: PQ9 standardile vastava trükkplaadi joonis. Allikas: [11]

Erinevalt PQ60 standardist on PQ9 standardi korral moodulite toitesiooni pinged reguleerimata (ühendused otse akude külge) ning iga moodul vastutab toitepinge muundamise eest ise [11].

Siini esimeseks klemmiks on *reset* ühendus, mille kõrgele nivoole viimisel lähtestatakse satelliidi kõik moodulid.

PQ9 standard võimaldab moodulite ühendamiseks kasutada erineva kõrgusega pistikuid, ja seda mitmes järjestuses – neist enamuse korral ei tohiks mooduli trükkplaadi esiküljel kasutatud komponentide paksus olla suurem kui 4 mm [11] .

Et vältida maanduskontuuride tekkimist, tuleb standardi põhjal trükkplaadi kinnitusavad mooduli maandusega vaid vähemalt 1 k Ω takistite vahendusel ühendada [11] .

3 Makettide disain

Käesolevas peatükis käsitletakse loodud raadiosidemooduli prototüüpide plokk-skeeme ja põhilisemaid kasutatud komponente. Esitatakse teostatud arvutused ja põhjendatakse disainivalikuid.

3.1 Prototüüpide üldskeemid, komponendid ja tööpõhimõte

Otsustati disainida raadioside alamsüsteemi prototüüp, mis oleks ühtaegu nii kergesti testitav kui ka võimalikult lähedane satelliidis kasutatavale moodulile. Prototüübile kehtestati järgnevad üldised nõuded:

- loodav makett vastab PQ9 standardile,
- omab arvutiga ühendamiseks *USB* liidest,
- antenni pordiks on valitud tüüpiline SMA ühendus,
- kasutatud on firma JLCPCB tüüpilist 4-kihilist trükkplaati JLC04161H-7628.

Valituks osutus PQ9 standard, sest see jätab trükkplaadile PQ60 standardiga võrreldes rohkem kasutatavat pinda. *USB* tugi lisati, et prototüüpi oleks kerge juhtida ning analüüsida *GNU/Linux* käsurealt rakendustega nagu Minicom.

Antennipordi ühenduseks valiti SMA pesa, sest sobivaid terminaatoreid, atenuaatoreid, koaksiaalkaableid ja vastavaid üleminekuid oli ülikooli laborites juba olemas.

Saaterežiimis genereerib transiiver 435 MHz sagedusega testsignaali. Viimane läbib esmalt LC jadavõnkeringi, mis käitub ribapääsfiltrina ja aitab tõkestada signaali harmoonilisi komponente.

Kuna transiiveri enda maksimaalne saavutatav väljundvõimsus on kuni 20 dBm, suurendatakse signaali võimsust võimsusvõimendiga. Kasutatud komponent HMC453QS16GE vajab tööks mooduli põhitoitest kõrgemat pinget – seepärast lisati mooduli V1.1 skeemi pinget tõstev muundur, mis võimaldab muuhulgas võimendit energia säästmiseks välja lülitada. Mooduli teises (V2.0) versioonis kasutatud võimendi GRF5504 toitepinge muundurit ei vaja.

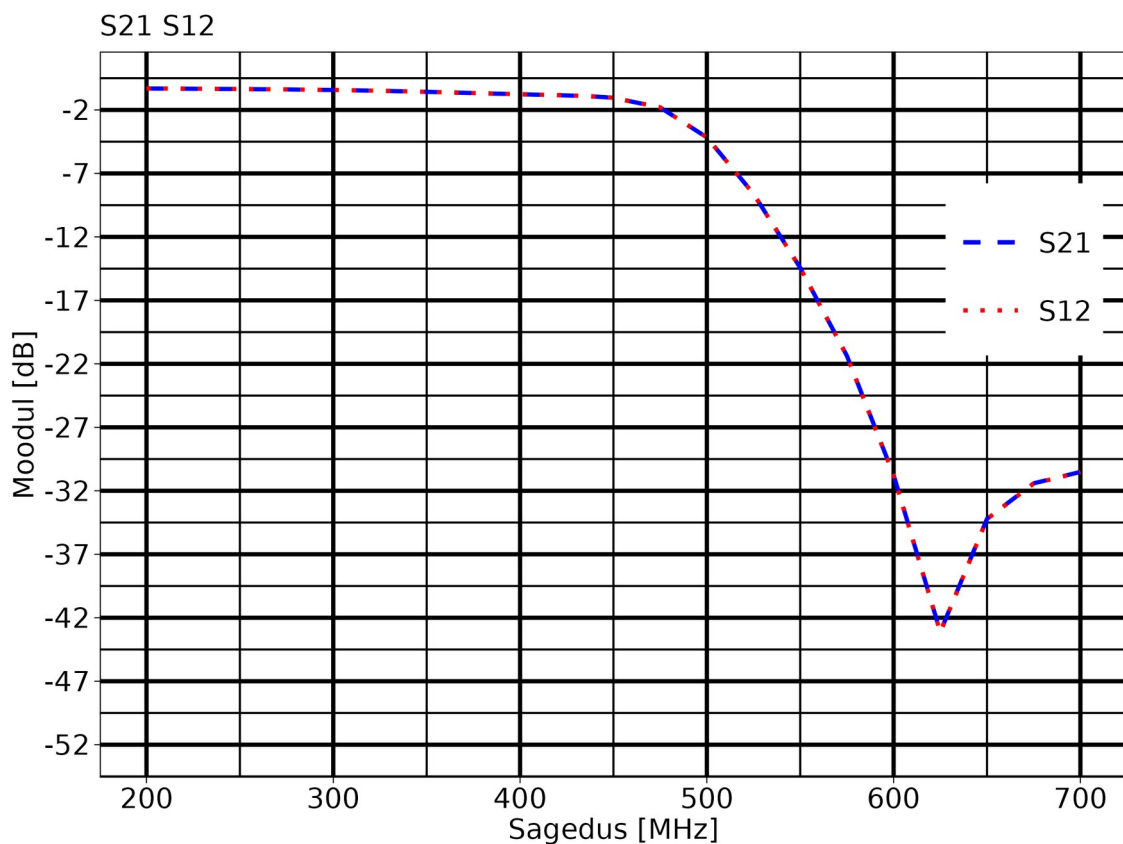
Võimendatud väljundsignaal läbib madalpääsfiltri, mis surub maha nii eelnevalt kõrvaldamata jäänud kui ka võimendi enda mittelineaarsusest tulenevad harmoonilised komponendid.

Järgnevalt läbib signaal antennilüliti. Lüliti on antud juhul vajalik, sest saate- ja vastuvõtuahel jagavad sama antenni ning kasutusel on võimendid, mille maksimaalne väljundvõimsus on tunduvalt suurem transiiveri enda maksimaalsest saatevõimsusest – Si4468 dokumentatsiooni [12] põhjal saab lülitist loobuda vaid siis, kui saateahela signaali võimsus jääb alla 20 dBm; nii HMC453QS16GE kui ka GRF5504 korral on see aga üle 30 dBm.

Järgnevalt läbib signaal taaskord madalpääsfiltri – antud juhul on tegu sama tüüpi filtriga mis võimsusvõimendi väljundiski. Täiendava filtri eesmärk on kõrvaldada antennilüliti mittelineaarsusest tekkivad harmoonilised komponendid.

Vahetult enne antennipordi läbib signaal suundhargmiku. Viimase sidestatud ja isoleeritud portidesse levinud signaalid alaldatakse ja võimendatakse ning nende pinget mõõdetakse mikrokontrolleri ADMiga (analoog-digitaalmuunduriga) – sel meetodil antakse hinnang süsteemi saatevõimsusele ja antennipordi sobitusele.

Vastuvõtjurežiimis läbib antenniga kinnipüütud signaal esmalt suundhargmiku.



Joonis 5: Filtri LFCG-42+ amplituud-sageduskarakteristikud [13] [14].

Järgnevalt läbib signaal filtri (sama mis saateahela lõpus). Tootjapoolsest hajuparameetrite failist selgub (vt. Joonis 5), et kasutatud komponent kui kaksport on pööratav – seega LFCG-42+ toimib ka signaali vastuvõtul madalpääsfiltrina.

Signaal suunatakse antennilülitiga transiiveri sisendi sobitus- ja balanseerimisahelasse. Viimane muudab antenni ühepoolse (*single-ended*)

signaali transiiveri *LNA (low noise amplifier)* jaoks diferentsiaalseks, tagades seejuures kõigi portide sobituse.

Transiiver salvestab vastuvõetud andmed nihkeregistrisse, kontrollib nende terviklikkust *CRC (Cyclic redundancy check)* abil ning teavitab mikrokontrollerit andmete valmisolekust. Viimane loeb seejärel vastuvõetud andmepaketi üle *SPI* transiiverist välja ning edastab andmed üle *USB* arvutile.

Et võimaldada prototüübi hilisemat ühildamist satelliidi teiste moodulitega lisati raadiosidemoodulile ka PQ9 standardile vastav pesa ja *UART RS-485* sild.

Mooduli teise versiooni V2.0 tööpõhimõte on eelnevaga samaväärne. Peamiseks erinevusteks V1.1 ja V2.0 vahel on võimsusvõimendi – HMC453 asemel on kasutusel GRF5504. Samuti puudub teisel prototüübil pinget tõstev muundur. Raadiosidemooduli V2.0 plokk-skeem on esitatud lisades (vt. Lisa 4 – Skeemid).

3.2 Toide

Transiiveri ja mikrokontrolleri tööpingeks sobib 3,3 volti [15] [16] . Võimsusvõimendi HMC453 tööpinge 5,0 V jääb aga juba PQ9 standardi diapsoonist välja [11] . Seetõttu otsustati raadioside alamsüsteemi põhitoite pingeks määrata 3,3 V ning võimendi tööpinge eraldi muunduriga saavutada.

Ühendus toite jaoks veeti nii *USB* kui ka PQ9 pordi kaudu, pinge stabiliseerimiseks lisati nn *ultra low drop* lineaarregulaator (*LDO*). Viimase valikul veenduti, et selle lubatav väljundvõimsus kataks

hinnanguliselt kogu mooduli tarvet ning et regulaatori pingelang oleks seejuures madal. Valituks osutus firma STMicroelectronics komponent LD39200, maksimaalse väljundvoolu tugevusega 2 A ja seejuures tüüpilise pingelanguga 130 mV [17].

LDO andmelehes puudus info regulaatori väljundimpedantsi kohta väljalülitatud režiimis. Et soovi korral oleks võimalik programmeerimiseks toidet ka *SWD* (*serial wire debug*) pordi kaudu anda, lisati *LDO* väljundisse kindluse mõttes lahtilülitus ning *SWD* pesast ühendus otse trükkplaadi 3,3 V vasekihti. Mooduli V1.1 testimise käigus selgus, et lahtilülitus polnud vajalik – teisest versioonist see eemaldati.

Võimsusvõimendi HMC453 toite jaoks valiti firma Texas Instruments toodetud kõrge kasuteguriga (< 96 %) pinget tõstev muundur TPS61092 [18]. Mõõtmiste käigus avastatud probleemide tõttu see mooduli teisest prototüübist eemaldati – nii saavutati kogu mooduli ulatuses ühtne tööpinge 3,3 V.

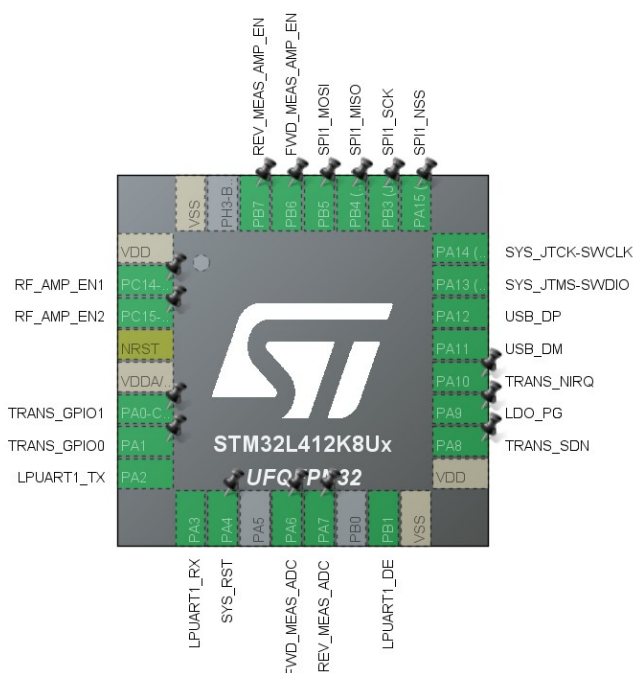
3.3 Alamsüsteemi põhikontroller

Satelliidi raadioside alamsüsteemi põhikontrolleriks otsustati valida ST Microelectronicsi toodetud mikrokontroller, sest ST pakutav rakendus STM32CubeIDE muudab antud kontrollerite algsättestamise kiireks ning mugavaks; samuti tagab *HAL* (*hardware abstraction layer*) loodava koodi lihtsa porditavuse teistele ST mikrokontrolleritele. Samast seeriast mikrokontrollerit kasutati ka satelliidi ESTCube-2 *PCOM* (*primary communications*) moodulis [19].

3.3.1 STM32L412K8U6

Kuna pikosatelliitide toite alamsüsteemi väljundvõimsus on väga piiratud, valiti kontrolleri STM32 Ultra-Low-Power seeriast (STM32L4).

Täpsema valiku teostamisel lähtuti järgnevatest nõuetest: kontrolleri on kõrge resolutsiooniga ADM (≥ 12 bitti), *USB 2.0* või *USB Type-C* tugi (arvutiga ühildamiseks), *SPI* tugi (Si4468 transiiveriga ühildamiseks), *UART* tugi (PQ9 RS-485 liidese jaoks).



Joonis 6: Mikrokontrolleri portide algseadistamine rakendusega STM32CubeIDE.

Selgus, et ST toodab samast seeriast mikrokontrolleriga kiipi STM32WL55, mis sisaldab endas ka satelliidi jaoks sobiva sagedusvahemikuga transiiverit. Võimalik, et seda saab kasutada antud töö edasiarenduse käigus.

3.3.2 USB liides

USB liides lisati vaid prototüüpide testimiseks ning on moodulitest kergesti eemaldatav.

STM32L412K8 mikrokontrolleri andmelehe põhjal on *USB D+* liini *pull-up* takisti ning liinide terminaatorid juba draiverisse sisse ehitatud – täiendavatest välistest komponentidest tuli lisada veel vaid *ESD* (*electrostatic discharge*) kaitse ning *LDO*.

ESD kaitseks valiti spetsiaalselt *USB 2.0* jaoks disainitud komponent *USBLC6-2SC6* [20].

Trükkplaadile loodava 90Ω impedantsiga diferentsiaalpaari liinide mõõtmete leidmiseks kasutati plaatide tootja *JLCPCB* kalkulaatorit [21]. Liinide vahekauguse ca $0,2 \text{ mm}$ korral saadi nende laiusiks $0,286 \text{ mm}$.

3.3.3 *UART* liides ja *UART RS-485* sild

Valitud mikrokontroller sisaldas ühte *Low Power UART (universal asynchronous receiver/transmitter)* liidest. Vastavalt *PQ9* standardile pidid satelliidi moodulid kasutama 500 kbitt/s edastuskiirusega *RS-485* liidest [11]. Seega tuli kontrolleri *UART* liides ühendada välise *RS-485* draiveriga. Valiti firma *Texas Instruments* komponent *SN65HVD78DRBR* – tegu on $3,3 \text{ V}$ toitepinge pealt töötava pooldupleks draiveriga, mis toetab maksimaalset edastuskiirust 50 Mbitt/s [22].

Draiveri väljundile lisati andmelehe soovitusel täiendavaks *ESD* kaitseks *SM712 TVS (transient voltage suppression)* diodide massiiv koos kahe 10Ω voolupiiramise takistiga [23].

PQ9 standard ei määranud kindlaks kasutatud *RS-485* diferentsiaalpaari impedantsi ja vajadust terminaatori kasutamise järele, sest satelliidi moodulite vaheline suhtlus toimub suhteliselt madalal sagedusel ($< 1 \text{ MHz}$) – siiski soovitati müra vähendamiseks lisada kogu satelliidi diferentsiaalpaari vahele üks vähemalt 60Ω takistusega terminaator [11].

Raadiosidemooduli prototüüpide trükkplaatidele lisati seega koht terminaatori jaoks; diferentsiaalpaar joonestati sarnaselt *USB*-le 90 oomise lainetakistusega.

3.3.4 SPI liides

Si4468 transiiveri algseadistamiseks ja hilisemaks sätete muutmiseks on vajalik, et kasutatud mikrokontrolleril oleks *SPI (serial peripheral interface)* tugi. Liides võimaldab ühtlasi kasutada transiiveri saate- ja vastuvõtturežiimi nihkeregistreid [15].

Kuigi transiiveri dokumentatsioonis see ei kajastu, tuleb juhendaja varasema kogemuse põhjal Si4468 *SPI MISO (master in slave out)* klemmile lisada väline *pull-down* takisti – vastasel korral liides ei toimi. Juhendaja soovitusel kasutati 2,2 k Ω väärtusega komponenti.

3.4 Transiiver

Mooduli raadiosagedusliku osa tuumaks on põhikontrolleriga üle *SPI* liidestatud transiiver, mis vastutab vahetult andmete raadio teel saatmise ja vastuvõtu eest. Valiti firma Silicon Labs komponent Si4468 [15], sest lähedast transiiverit kasutati nii eelnevates TTÜ (Tallinna Tehnikaülikooli) tudengisatelliitides kui ka ESTCube-2 satelliidis [19].

3.4.1 Si4468 integraalskeem

Si4468 puhul on tegu energiasäästliku *VHF (very high frequency)* ja *UHF (ultra high frequency)* sagedusribas (täpsemalt 142-1050 MHz) töötava transiiveriga, mille maksimaalne väljundvõimsus on 20 dBm. Komponent sisaldab endas mikrokontrollerit ja on välise *MCU*ga liidestatav nii *SPI* kui ka *GPIO*de vahendusel (viimaseid kasutatakse nt transiiveriga reaajas

andmete saatmiseks/lugemiseks). Transiiver toetab kahe- ja neljapositsioonilist sagedusmanipulatsiooni (nii tavalist kui ka Gaussi), samuti binaarset amplituudmanipulatsiooni, ja vajab tööks välist ~30 MHz võnkesagedusega kvartskristalli või TCXOd (*temperature compensated crystal oscillator*) [15].

Transiiveril on eraldi port välise mikrokontrolleri katkestuste jaoks. Komponenti on võimalik spetsiaalse sisendi vahendusel välja lülitada – siis tarbib Si4468 voolu vaid suurusjärgus ~30 nA; samas kõigi registreeritud väärtused lähtestatakse. Saadaval on ka veidi suurema voolutarbega (~40 nA) puhkeolek, mille korral transiiveri registreeritud sisu säilib [15].

Lähtuvalt eelnevatest TTÜ tudengisatelliitidest valiti transiiveri modulatsiooni tüübiks harilik kaheastmeline sagedusmanipulatsioon (2-*FSK* ehk *frequency shift keying*), mis võimaldab antud juhul maksimaalset edastuskiirust 500 kbitt/s. Satelliidi jaoks eraldatud sagedusriba laius on 24 kHz, kasutatav edastuskiirus on 9,6 kbitt/s ja sagedusdeviatsioon on $\Delta f = 4,8 \text{ kHz}$ – seega paiknevad sümbolitele „1” ja „0” vastavad sagedused teineteisest kõigest 9,6 kHz kaugusel. Viimasest järeldubki, et satelliit kasutab väga kitsast sagedusriba ja valitud L-kujulised sobitusahelad peaks selles ulatuses hästi töötama [15] [24].

3.4.2 Antennilüliti

Transiiveri dokumentatsioonist selgub, et sobitusahelad on ilma võimendita realiseeritavad ka n-ö passiivsel kujul – seega ilma antennilülitita (nn *direct tie match*). Välise võimendi kasutamise tõttu tuli siiski ka lüliti kasutada [12].

Antennilüliti pidi vastama järgnevatele nõuetele: suletud olekus võimalikult madala sisestuskaoga (< 0,5 dB), avatud olekus võimalikult

kõrge isolatsiooniga, piisava võimsustaluvusega (HMC453 puhul seega üle 32 dBm), PCB ülekandeliinide jaoks optimaalse korpusega.

Valituks osutus firma Skyworks lüliti AS179-92LF, mis on kompaktses SC-70-6 korpuses [25].

3.4.3 Balanseerimis- ja sobitusahelad

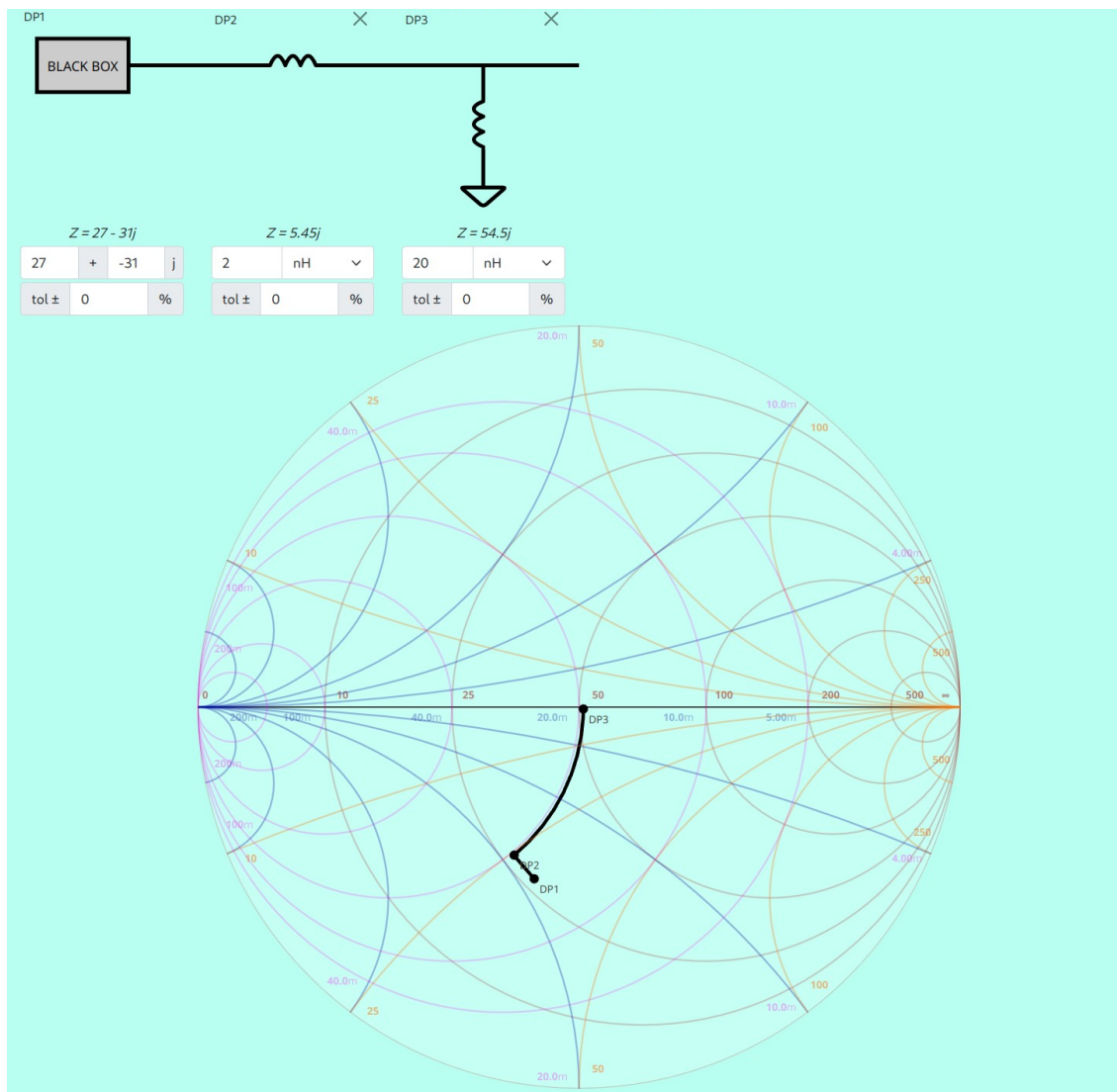
Selleks et transiiveri väljundastme võimsusülekanne oleks maksimaalne, tuleb see järgneva ahela kui koormusega sobitada. Sobituseks vajalik impedants avaldub tootja andmelehe põhjal valemiga

$$Z_K = \left(\frac{0,2815}{\omega_0 C_s} \right) \cdot e^{j \cdot 49,0524^\circ}$$

kus C_s on võimendi väljundi ekvivalentne paralleelmahtuvus (suurusjärgus 2,5 pF) ja ω_0 on transiiveri soovitud töösagedusele vastav ringsagedus [12]. Sagedusel 435 MHz on nõutavaks koormuse impedantsiks seega

$$Z_K = \left(\frac{0,2815}{2\pi \cdot 4,35 \cdot 10^8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-12}} \right) \cdot e^{j \cdot 49,0524^\circ} \approx [27 + j31] \Omega.$$

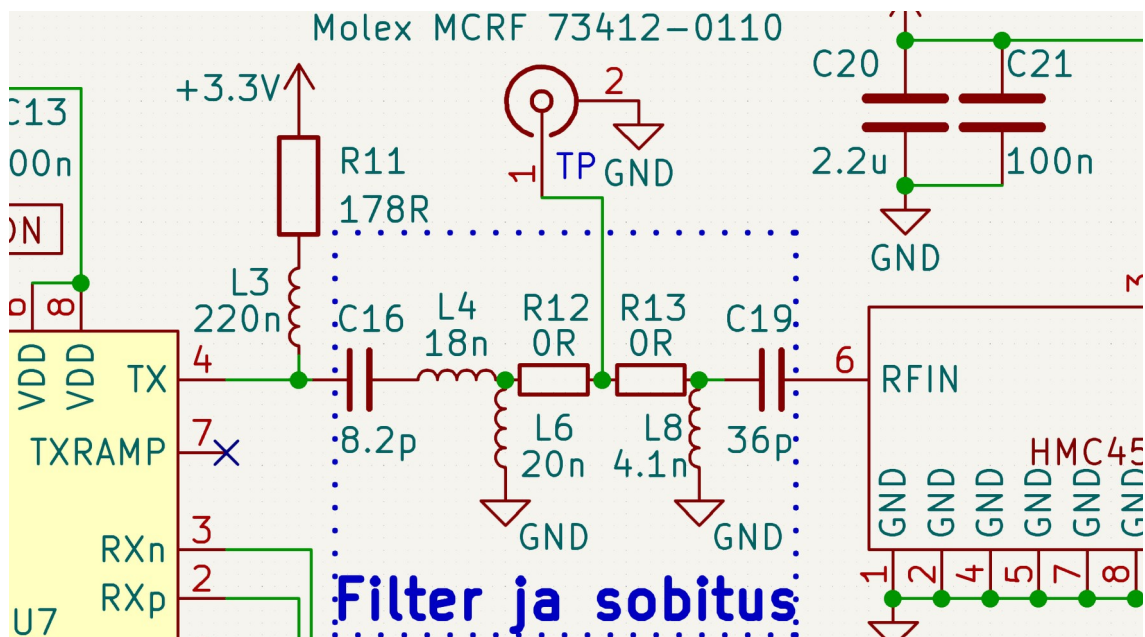
Transiiveri väljundimpedants, mis edasiste ahelatega sobitada tuleb, on järelikult $Z_{out} \approx [27 - j31] \Omega$. Sobituseks valiti induktiivpoolidega L-kujuline ahel. Vajalike induktiivsuste väärtused leiti interaktiivse Smithi diagrammi abil (vt Joonis 7) [26].



Joonis 7: Transiiveri sobitusahela komponentide väärtuste määramine W. Kelsey interaktiivse Smithi diagrammi rakenduse abil [26].

Vastavalt transiiveri dokumentatsioonile [12] lisati selle väljundisse, vahetult enne sobitusahelat, jadavõnkering, mille resonantsagedus jäi soovitud töösageduse 435 MHz lähiumbrusse. Viimane käitub ribafiltrina ning aitab transiiveri väljundsignaalis maha suruda soovimatuid harmoonilisi komponente [12]. Filtri kondensaatori väärtuseks valiti andmelehe näites kasutatud 8,2 pF, vajalik induktiivsus arvutati valemiga

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \approx 16 \text{ nH.}$$



Joonis 8: Transiiveri väljundi sobitus- ja eelpingestusahel.

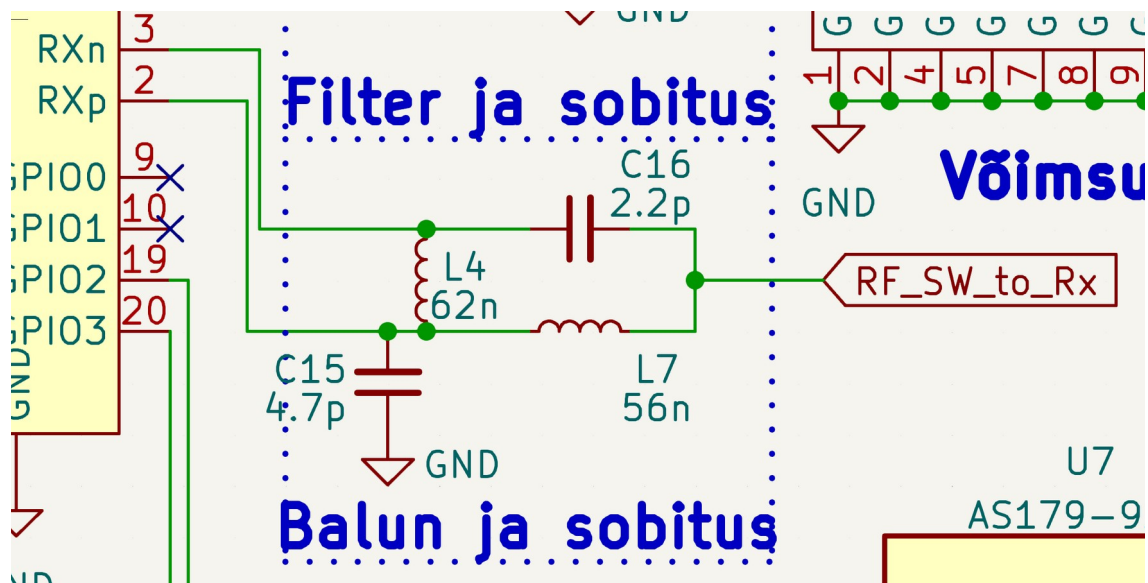
Viimane induktiivpool paiknes jadamisi sobitusahela 2 nH induktiivpooliga – väärtused liideti ning asendati ühe 18 nH komponendiga (Joonis 8 L4).

Transiiveri väljundisse lisati ka RL eelpingestusahel (Joonis 8 R11, L3) – ahela takistil tekkiv pingelang piirab transiiveri maksimaalse väljundvõimsuse soovitud väärtusele [12]. Võimsusvõimendi HMC453 andmelehe põhjal (vt [27], joonis „Power Compression @ 400 MHz”) on sisendvõimsuse 10 dBm korral võimendus üle 20 dB ning maksimaalne väljundvõimsus üle 30 dBm – seega otsustati piirata transiiveri maksimaalne saatevõimsus väärtusele ca 10 dBm. Selleks vajaliku takisti väärtus arvutati Si4468 andmelehe põhjal valemiga

$$R_{DC} = \frac{U_{DD} - \sqrt{\frac{P_{out}}{\pi \omega_0 C_s}}}{\sqrt{\pi \omega_0 C_s P_{out}}} \approx 178,6 \Omega$$

kus U_{DD} on transiiveri toitepinge, C_s on väljundi ekvivalentne paralleelmahtuvus, ω_0 on töösagedusele vastav ringsagedus ja P_{out} on soovitud väljundvõimsus [15].

Transiiveri sisendi balanseerimis- ja sobitusahela komponentide väärtused saadi tootja andmelehe vastavast tabelist, siinkohal ise arvutusi ei teostatud [12]. Ahela põhimõtteskeem on esitatud joonisel 9.



Joonis 9: Transiiveri sisendi balanseerimis- ja sobitusahel.

Eelneval joonisel esitatud skeem toimib ühtaegu nii sobitusahela kui ka balunina – 50 oomise lainetakistusega antenn (täpsemalt sellele eelnev filter) sobitatakse transiiveriga, vastuvõetud signaal juhitakse LNA sisenditesse „RXp” ja „RXn” ning seejuures tekitatakse nende vahele faasinihe 180° [12].

3.5 Raadiosageduslik võimsusvõimendi

Si4468 transiiveri maksimaalne väljundvõimsus jääb suurusjärku 100 mW (20 dBm). Satelliidi saatevõimsuse suurendamiseks lisati raadiosidemooduli prototüüpide skeemidesse võimsusvõimendi.

Võimenduskeemide valiku osas seadsid piirangu PQ9 standardile vastava trükkplaadi efektiivne pindala (kõigest ~15 cm²) ja antud tüüpi satelliidi toitemooduli piiratud väljundvõimsus – tarvis oli kompaktselt ning energiaefektiivset skeemi. Seetõttu otsustati tutvuda erinevate integraalsete võimenditega, mis vajasisid minimaalset arvu täiendavaid väliseid komponente.

3.5.1 Muudetava võimendusega võimendid

Reguleeritava võimendusega võimendi võimaldanuks raadiosidemooduli saatevõimsust vastavalt vajadusele transiiverist laiemas ulatuses muuta – ka pärast satelliidi orbiidile viimist. Kõigist leitud *VGA* (*variable gain amplifier*) ja *PGA* (*programmable gain amplifier*) tüüpi võimenditest, mis töötasid satelliidi jaoks sobivas sagedusribas, küündis vaid MACOMi MAAM-010399 maksimaalne väljundvõimsus nõutava väärtuseni 27 dBm – siiski oli tegu diferentsiaalse võimendiga, mis oleks vajanud balanseerimisahelate kasutamist, suurendanud seeläbi saateahela kadusid ning muutnud skeemi keerukamaks.

Teiste võimendite (sh Renesasi toodetud IDTF0480 [28] või Analog Devicesi toodetud HMC742ALP5E [29]) P1dB jäi suurusjärku vaid 22 dBm.

3.5.2 Fikseeritud võimendusega võimendid

Tutvuti erinevate integraalskeemi kujul võimenditega. Otsingu aluseks olid põhiliselt järgnevad parameetrid: kõrge 1 dB kompressioonipunkt (vähemalt 27 dBm), toitepinge võimalusel 3,3 V ja mitte üle 5 V, töösagedusvahemikku jääb 435 MHz, võimendus töösagedusel üle 10 dB.

Leitud võimendite võrdluseks koostati Tabel 1.

Tabel 1: Raadiosageduslike võimsusvõimendite parameetrite võrdlus.

Võimendi	ADL5324 [30]	GRF5504 [31]	GRF5112 [32]	MMZ09332BT1 [33]	MMG3006NT1 [34]	TQP7M910 6 [35]	HMC453QS16 GE [27]
Tootja	Analog Devices	Guerrilla RF	Guerrilla RF	NXP Semiconductors	NXP Semiconductors	Qorvo	Analog Devices
Tehnoloogia	?	InGaP HBT	GaAs pHEMT	InGaP HBT	InGaP HBT	InGaP/GaAs HBT	InGaP/GaAs HBT
Töösageduse vahemik [MHz]	400 – 4000	300 – 550	30 – 2700	130 – 1000	400 – 2400	50 – 1500	400 – 2200
P1dB [dBm]	a) 24,2 (3,3 V toide) b) 28,0 (5,0 V toide)	34,3	≤ 32	≤ 33	≤ 33	≤ 33	32
OIP3 [dBm]	a) 30,1 b) 40,1	?	≤ 40	≤ 43	≤ 49	≤ 50	47
PAE [%]	?	61	?	a) 53,7 (3,6 V toide) b) 45,5 (5,0 V toide)	?	?	45
Võimendus [dB]	a) 17,2 b) 18,4	41	17	a) 26,3 b) 37,2	14	20	21,5
Mürategur [dB]	a) 5,6 b) 6,8	4,2	1,7	?	6,6	4,8	7
Toitepinge [V]	3,3 – 5,0	2,7 – 5,5	1,8 – 5,25	3,0 – 5,0	5,0	5,0	5,0

Toitevool [mA]	a) 62 b) 133	125 (5,0 V toide)	293	108 (5,0 V toide)	850	455	725
Sisemised sobitusahelad	puuduvad	Sisend ja väljund sobitatud (50 Ω)	Sisend ja väljund sobitatud (50 Ω)	puuduvad	Sisend sobitatud (50 Ω)	puuduvad	puuduvad
Lineaarsus	?	?	kõrge	kõrge	kõrge	kõrge	?
Korpus	SOT-89	QFN-16 (3x3 mm)	QFN-16 (3x3 mm)	QFN-12 (3x3 mm)	QFN-16 (4x4 mm)	QFN-24 (4x4 mm)	QSOP16G
Hind seisuga 23.03.2024 [€/tk]	9,29 (DigiKey)	5,84 (Mouser)	5,54 (Mouser)	7,71 (Mouser)	8,90 (Mouser)	18,46 (Mouser)	20,15 (Mouser)

3.5.3 Esimene valitud lahendus

Mooduli esimese versiooni jaoks osutus valituks firma Analog Devices toodetud 1,6 W võimendi HMC453QS16G järgnevate parameetritega:

- toitepinge 5 V,
- P1dB +32 dBm,
- töösageduse diapason 400 MHz – 2,2 GHz,
- võimendus töösagedusel ~21,5 dB.

Antud komponent valiti eelkõige seetõttu, et lähedast võimendit (HMC452) kasutati TTÜ tudengisatelliitides Koit ja Hämarik; ka juhendaja ise oli antud võimendit varem kasutanud.

Komponente GRF5504 ja GRF5112 algul ei valitud, sest autor sai nende olemasolust teadlikuks alles siis kui prototüübi esimese versiooni trükkplaat juba koostatud oli. Võimendit GRF5504 kasutati moodulis V2.0.

HMC453QS16GE jäi oma maksimaalse väljundvõimsuse ja võimenduse poolest esikolmikusse. Lisaks oli QSOP16G korpus kergemini joodetav kui teiste võimendite *QFN (Quad-flat no-lead)* tüüpi korpus.

Võimsusvõimendi eraldiseisvaks testimiseks tuli esmalt disainida selle sisend- ja väljundpordile sobitusahelad.

Kuna hajuparameetrid kehtivad väikese signaali režiimis, pole võimsusvõimendite korral nendega sobitusahelate arvutamine harilikult teostatav – arvutuste jaoks lisatakse sageli vastava komponendi

andmelehte suure signaali režiimis impedantsid [[36] , lk 169]. Valitud võimendi puhul oli täpsematest parameetritest saadaval ainult „s2p” fail – seetõttu eeldati, et võimendi oli suure linearsusega ning hajuparameetritega arvutades oli võimalik piisavalt täpset sobitust saavutada. Järgnevate arvutuste teostamisel juhinduti materjalidest [[36] , lk 141-145] ja [[37] , lk 571-575].

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0,8839 \angle 169,1^\circ) & (0,01332 \angle 39,71^\circ) \\ (3,2509 \angle 81,93^\circ) & (0,9055 \angle 178,1^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Hajuparameetrite maatriksi (1) determinant avaldub kujul

$$D_s = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21} \approx 0,83126 \angle -14,93^\circ.$$

Võimendi sisendi ja väljundi üheaegse sobituse (*conjugate match*) saavutamiseks nõutavad allika ja koormuse peegeldustegurid avalduvad valemitega

$$\Gamma_s = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \approx 0,91528 \angle 178,9^\circ,$$

$$\Gamma_L = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \approx 0,93364 \angle 172,8^\circ,$$

kus vahesuurused B_1 , B_2 , C_1 ja C_2 on vastavalt:

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |D_s|^2 \approx 0,270356,$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |D_s|^2 \approx 0,347658,$$

$$C_1 = S_{11} - D_s S_{22}^* \approx 0,13465 \angle -178,9^\circ,$$

$$C_2 = S_{22} - D_s S_{11}^* \approx 0,17342 \angle -172,8^\circ.$$

Peegeldusteguritest järelduvad sobituseks nõutavad allika ja koormuse impedantsid valemitega

$$Z_s = Z_0 \frac{1 + \Gamma_s}{1 - \Gamma_s},$$

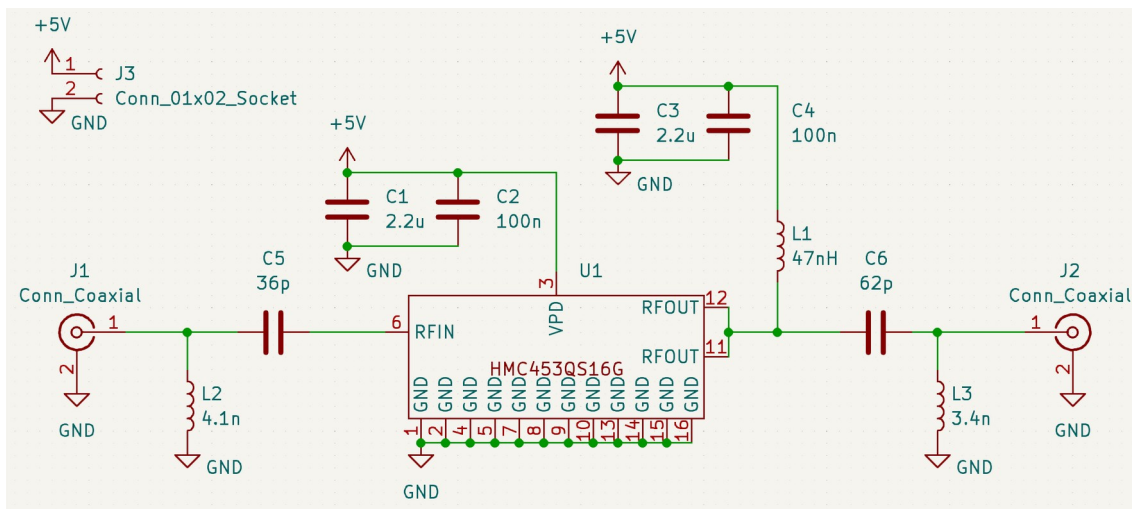
$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L},$$

kus Z_0 on karakteristiklik impedants (50Ω), Z_s ja Z_L on allika ja koormuse impedantsid ning Γ_s ja Γ_L on vastavalt allika ja koormuse peegeldustegurid.

Tulemuseks saadi väärtused $Z_s \approx [2,212 + j0,479] \Omega$ ja $Z_L \approx [1,723 + j3,142] \Omega$.

Kuna raadiosidemoodul töötab kitsas sagedusribas, piisab sobituseks L-kujulistest ahelatest. Viimased disainiti interaktiivse Smithi diagrammi abil [26]. Diagrammi abil määrati kindlaks, et toodetavate nominaalväärtusega komponentidest tagasid parima teoreetilise sobituse sisendi puhul $C_1 \approx 36 \text{ pF}$ ja $L_1 \approx 4,1 \text{ nH}$, väljundi korral $C_2 \approx 62 \text{ pF}$ ja $L_2 \approx 3,4 \text{ nH}$.

Tulemuste kontrollimiseks koostati AWR Design Environment tarkvaraga simulatsioon, mis kinnitas arvutuste õigsust (vt Simulatsioonid).



Joonis 10: Võimsusvõimendi HMC453QS16GE testimise põhimõtteskeem.

Raadiosidemoodulid koostati tarkvaraga KiCad 4-kihilisele firma JLCPCB trükkplaadile JLC04161H-7628. Kuigi antud plaadi korral oli 50Ω lainetakistusega mikroribaliin 0402 SMD korpuses komponentide jooteplatsidest ligi poole kitsam, lisandunuks teistsuguse plaadi (nt

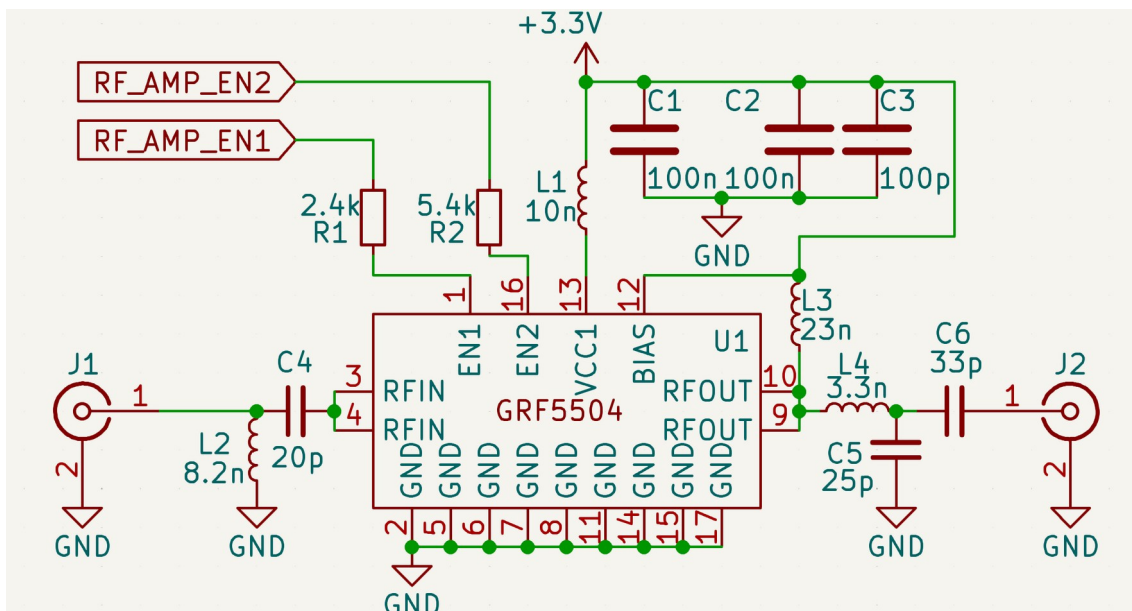
JLC04161H-7628A) valimisel suur täiendav kulu (nn *stackup fee*). Eeldati, et odavamaga plaadiga õnnestub piisav sobitus saavutada.

Impedance (Ω)	Type	Signal Layer	Top Ref	Bottom Ref	Trace Width	Trace Spacing	Impedance trace to copper
50	Single Ended (Non coplanar)	L1	/	L2	0.3493	/	/
90	Differential Pair (Non coplanar)	L1	/	L2	0.2860	0.2032	/
Layer	Material	Thickness (mil)		Thickness (mm)			
L1	Outer Copper Weight1oz	1.38		0.0350			
Prepreg	7628, RC 49%, 8.6 mil	8.28		0.2104			
L2	Inner Copper Weight	0.60		0.0152			
Core	1.1mm H/HOZ with copper	41.93		1.0650			
L3	Inner Copper Weight	0.60		0.0152			
Prepreg	7628, RC 49%, 8.6 mil	8.28		0.2104			
L4	Outer Copper Weight1oz	1.38		0.0350			

Joonis 11: JLCPCB JLC04161H-7628 trükkplaadi kihid koos vastava 50 Ω mikroribaliini laius ning 90 Ω diferentsiaalpaari mõõtmega.

3.5.4 Teine valitud lahendus

Raadiosidemooduli teise versiooni koostamisel asendati võimsusvõimendi HMC453QS16GE teise komponendiga – seekord osutus valituks Guerrilla RF toodetud GRF5504, mis paistis eelkõige silma järgnevate parameetrite poolest: lai toitepinge vahemik (2,7 – 5,5 V), P1dB 34,3 dBm, võimendus töösagedusel kuni 41 dB, lubatud PAE (*power-added efficiency*) kuni 61%.



Joonis 12: Võimsusvõimendi GRF5504 testimise põhimõtteskeem.

Antud võimendi puhul saadi vajalike täiendavate komponentide väärtused tootja andmelehtedest [38] , [39] – hajuparameetrite baasil arvutusi siinkohal ei teostatud.

3.6 Antenni väljundvõimsuse ja sobituse mõõtmine

Veendumaks, et satelliidi saateahel töötab nõuetekohaselt (sh et väljaspool maajaama leviala oleks saaterežiim kindlasti välja lülitatud) otsustati luua suundhargmikuga saatevõimsuse ja antenni sobituse mõõtmise skeem. Viimane võimaldab ilma saate- ja vastuvõtuahelatele suurt mõju avaldamata mõõta antenni saatevõimsust ning hinnata vastavate portide sobitust.

3.6.1 Suundhargmik

Mikroribaliinide baasil suundhargmiku mõõtmed oleks sagedusel 435 MHz ületanud trükkplaadi gabariidi – seega tuli kasutada spetsiaalset *SMD* komponenti. Valituks osutus firma Mini-Circuits toodetud komponent BDCN-20-13+, mõõtmetega kõigest 1,60 x 3,20 mm.

Töösagedusel 435 MHz jääb valitud suundhargmiku eeldatav sidestustegur suurusjärku $C = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_3}\right) \approx 24 \text{ dB}$ [40] .

Juhul kui hargmiku sisendvõimsuseks on 27 dBm (ca 500 mW), jõuab sidestatud porti signaal võimsusega $P_3 = P_1 - C \text{ [dB]} \approx 3 \text{ dBm}$ (ca 2 mW).

Kui sobitada antud port 50 oomise takistiga, saab arvutada sellel tekkiva pingelangu valemiga

$$P_3 = \frac{U_3^2}{Z_0} \approx 0,002 \text{ W} \Rightarrow U_3 \approx \sqrt{50 \Omega \cdot 0,002 \text{ W}} \approx 0,32 \text{ V}$$

kus P_3 on signaali võimsus sidestatud pordis, U_3 on terminaatori pingeline efektiivväärtus ja Z_0 on terminaatori impedants.

Vastav alaldatud pingeline läheneks amplituudväärtusele ning jääks seega suurusjärku $U_{3DC} \approx \sqrt{2} \cdot 0,32 \text{ V} \approx 0,4 \text{ V}$, tegelikkuses sellest veel diodi päripingelangu võrra madalamale.

Järeldub, et mikrokontrolleri ADM diapasooni efektiivseks kasutamiseks antenni väljundvõimsuse 27 dBm korral tuleks pinget *MCU* analoogsisendi jaoks ligikaudu 10 korda võimendada.

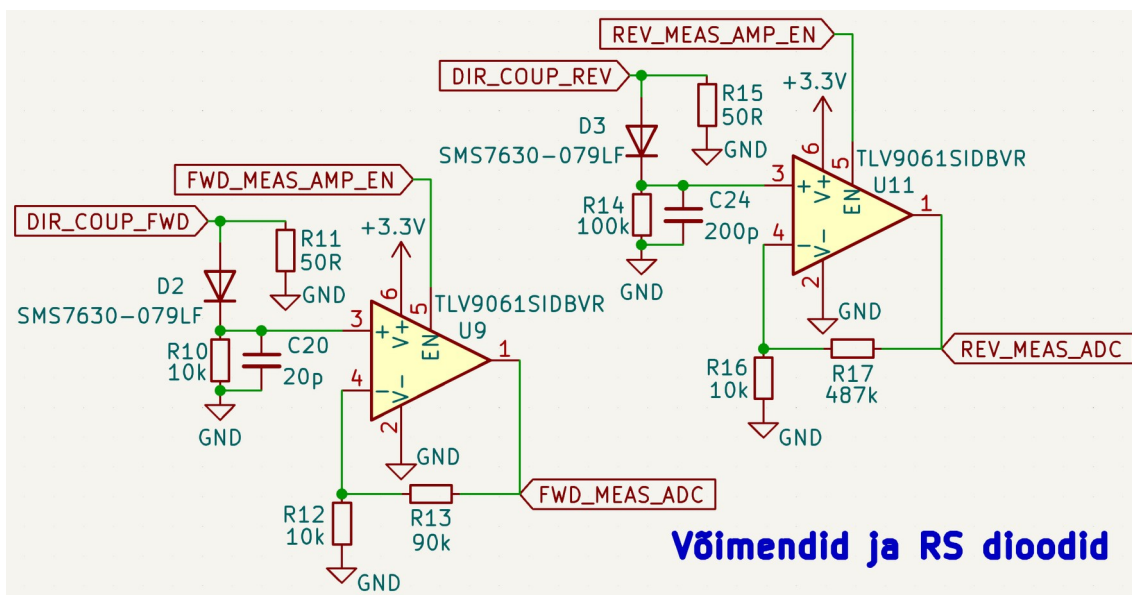
3.6.2 Pingevõimendid ja alaldid

Suundhargmiku sidestatud ja isoleeritud portide mõõtmiseks mikrokontrolleri ADM-ga tuleb vastavad signaalid esmalt alaldada ja võimendada. Hargmiku mainitud portide väljundpinged jäävad eelnevas alapeatükis esitatud hinnangute põhjal $\lesssim 0,5 \text{ V}$ suurusjärku – seetõttu pole suure ca 0,7 V päripingelanguga raadiosageduslikud PIN-diodid kasutatavad. Alternatiivina valiti firma Skyworks toodetud raadiosageduslik Schottky diod SMS7630-079LF [41] – viimane leidis eelnevalt kasutust ka TTÜ tudengisatelliitides Koit ja Hämarik. Diodid jäid silma järgnevate parameetrite poolest: eriti madal päripingelang ($< 120 \text{ mV}$; $100 \mu\text{A}$ pärioolu puhul), väike korpus (SOD-523).

Alaldatud pingeline võimendamiseks kasutati Texas Instrumentsi toodetud operatsioonivõimendeid TLV9061SIDBVR [42], mis valiti eelkõige järgnevate parameetrite põhjal: madal sisendi nihkeviga ($\pm 0,3 \text{ mV}$), madal sisendivoolu tugevus ($\sim 0,5 \text{ pA}$), saadaval väikses SOT-23-5 korpuses.

Viimastest koostati harilikud mitteinverteerivas režiimis pingevõimendid. Skeemi loomisel sobitati esmalt suundhargmiku vastavad pordid 50 oomise koormusega. Terminaatoriga paralleelselt ühendati diodist ja RC paralleelahelast koosnev jadaahel. Sidestatud pordi poolse RC ahela takisti väärtuseks valiti tüüpiline 10 k Ω ; kondensaatori väärtus valiti selline, et RC ahela ajakonstant jääks ligikaudu 100 korda suuremaks alaldatava raadiosagedusliku signaali perioodist.

Kuna hargmiku isoleeritud porti leviva signaali pinge on hästi sobitatud antenni korral väga madal, on kaheldav kas vastav signaal on valitud diodiga alaldatav. Katsetamiseks muudeti teise RC ahela ajakonstant 100 korda suuremaks ja võimendi võimendus 5 korda suuremaks. Vastav skeem on esitatud joonisel Joonis 13.

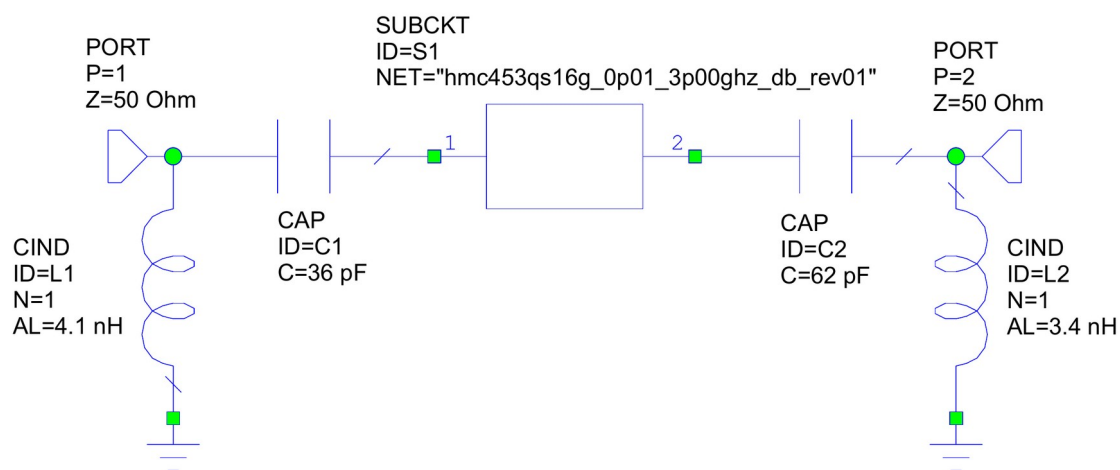


Joonis 13: Suundhargmiku signaalide alaldamise ja võimendamise põhimõtteskeem.

ADM diapasooni paindlikumaks kasutamiseks kaaluti alternatiivina ka programmeeritava võimendusega võimendite valimist, kuid sobivat, väikses korpuses ja süsteemi põhikontrolleriga kergesti liidestatavat, komponenti ei leitud.

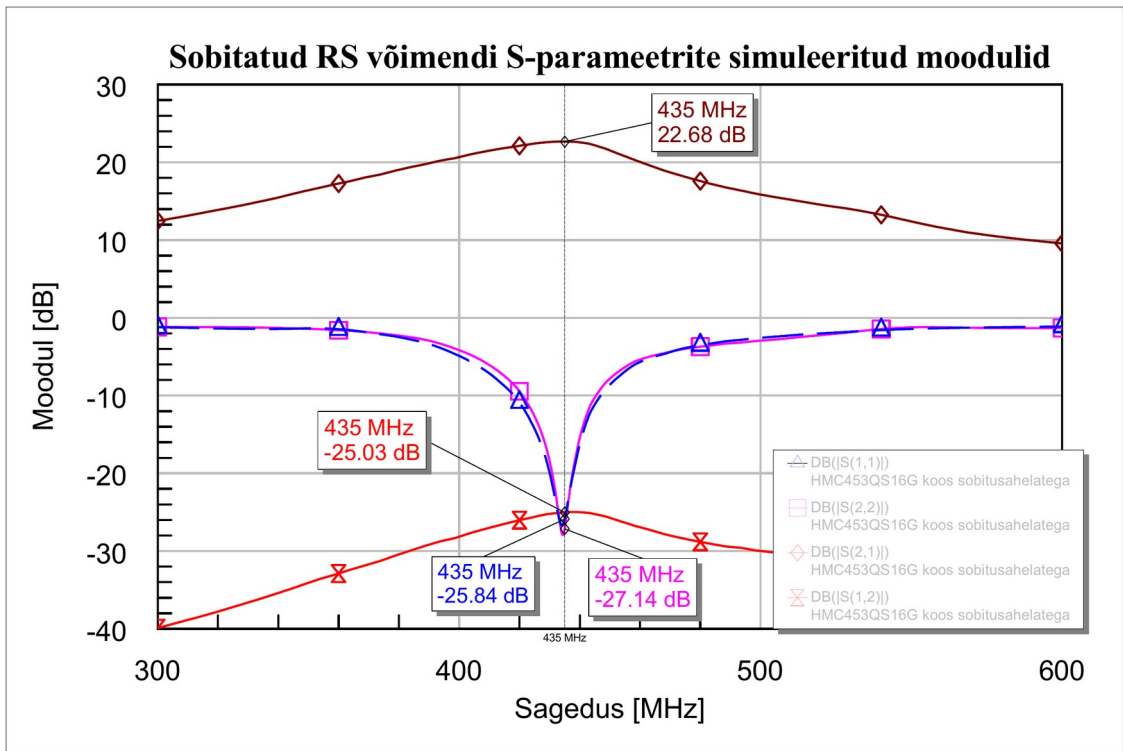
4 Simulatsioonid

Võimsusvõimendi HMC453QS16GE simuleerimiseks kasutati tarkvara AWR Design Environment. Võimendi hajuparameetrite faili põhjal loodi vastava komponendi mudel, millele lisati ideaalsete kondensaatorite ja induktiivpoolide baasil sobitusahelad.



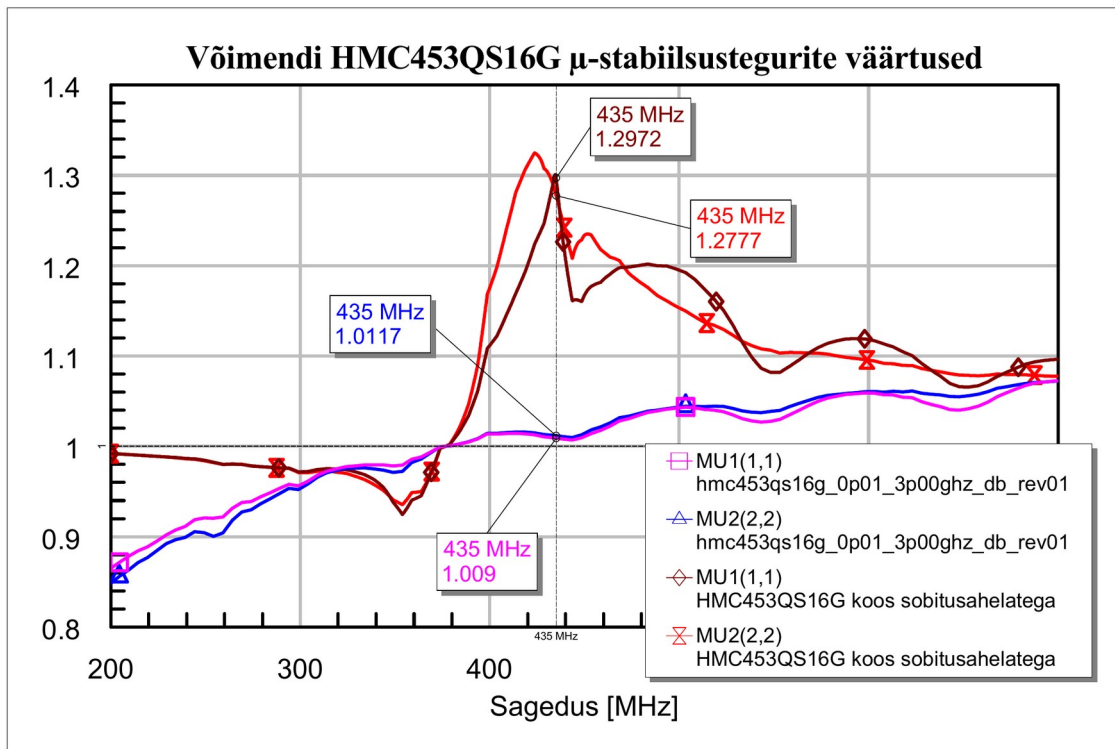
Joonis 14: HMC453QS16GE simulatsiooni põhimõtteskeem AWR Design keskkonnas.

Disainitud sobitusahelate ning võimendi stabiilsuse testimiseks simuleeriti süsteemi hajuparameetrite moodulite ja μ -stabiilsustegurite sõltuvust sagedusest – ideaalis pidanuks sisendi ja väljundi peegeldustegurid saavutama miinimumi töösagedusel 435 MHz ning võimendi võimendus seejuures ületama 20 dB. Tingimusteta stabiilse võimendi korral jääb μ -stabiilsustegurite väärtus ühest suuremaks. Simulatsiooni tulemused on esitatud joonistel 15 ja 16. Selgub, et sobitusahelate hajuparameetrite baasil arvutused ja valitud komponentide väärtused olid õiged.



Joonis 15: HMC453QS16GE hajuparameetrite simulatsioonitulemused.

Eeldusel et HMC453QS16GE parameetrid töörežiimis oluliselt ei muutu, on see võimsusvõimendi sageduse 435 MHz ümbruses tingimusteta stabiilne.



Joonis 16: HMC453QS16GE μ -stabiilsustegurite simulatsioonitulemused.

5 Makettide koostamine

Makettide trükkplaadid telliti tootjalt JLCPCB ja komponendid edasimüüjalt Mouser Electronics.

Järgnevalt on esitatud fotod valminud prototüüpidest.



Joonis 17: Raadiosidemooduli V1.1 valmis prototüüp.

Komponentide jootmiseks kasutati madala sulamistemperatuuriga pliivaba jootepastat, kuumaõhu jootejaama ja eelkuumutusplaati. Liigse joodise eemaldamiseks kasutati jootekolbi ja joodisesukka.

Hiljem selgus, et kasutatud joodis polnud Molex 73412 pesade jootmiseks hea valik – vastava mikrokoaksiaalse pistiku eemaldamisel murdus

jooteühendus mitmel korral lahti. Ühenduste tugevdamiseks kasutati täiendavalt tüüpilist Sn60/Pb40 joodist.



Joonis 18: Raadiosidemooduli V2.0 valmis prototüüp.

Veel selgus, et suundhargmikuga võimsuse mõõtmise skeemi alaldusdiodid joodeti trükkplaadile tagurpidi – kasutatud komponendi puhul oli tootja triibuga markeeritud mitte katoodi, vaid hoopiski anoodi; tasub mainimist, et tootja samast seeriast ning sama korpusega diodi SMS7621-079LF puhul on markeeritud katood [41].

6 Tarkvara

Raadiosidemooduli komponentide juhtimiseks (nt võimsusvõimendi sisse/välja lülitamiseks, transiiveri konfigureerimiseks) kirjutati mikrokontrolleri poolele tarkvara, mis võimaldab *USB* vahendusel arvutiga ühendatud moodulit arvuti käsurealt juhtida.

Koostada jõuti vaid tarkvara algeline prototüüp, mis on piisav mooduli raadiosagedusliku tsooni komponentide testimiseks ja mõõtmiste jaoks, kuid mitte mooduliga raadio teel suhtlemiseks.

Programmikoodi versioonihalduseks kasutati tarkvara Git, koodi hoiustamiseks loodi GitHub keskkonda repositoorium:

URL: <https://github.com/LightOSproblems/LOPUTOO>

6.1 Si4468 algseadistamine ja testimine

Andmevahetus transiiveri ja *MCU* vahel toimub üle *SPI* liidese. Si4468 *SPI* toetab maksimaalset edastuskiirust 10 Mbitt/s, andmeid loetakse tõusvast taktifrondist [15].

Mikrokontrolleri *SPI* jaoks kasutatud *GPIO*d seadistati maksimaalse edastuskiiruse peale (Maximum output speed: „Very High”) – autori eelmise, pikosatelliidi hoorataste mooduli, projekti puhul tekkis üle *SPI* liidestatud mootoridraiverite juhtimisel probleeme, kui liinide draivimise võimsus sellest madalamaks seati.

Transiiverile üle *SPI* saadetavate andmepakettide esimene bait kujutab endast käsku, ülejäänud baidid täiendavaid parameetreid. Iga bait saadetakse alates kõrgeimat järku bitist; kui parameeter on jaotunud mitme baidi peale, siis saadetakse selle kõrgeimat järku bait esimesena [43].

Transiiveri korrektseks käivitamiseks teostatakse esmalt *POR* (*power on reset*) – selleks viiakse Si4468 „SDN” klemmi pinge vähemalt 10 mikrosekundiks kõrgele nivoole ning seejärel uuesti madalale; *POR* ei tohiks kesta kauem kui 6 ms [15]. Pärast edukat *POR*i saadetakse transiiverile ükshaaval kõik seadistamise käsud. Viimaste genereerimiseks kasutati tootjapoolse tarkvarapaketi Wireless Development Suite hulka kuuluvat rakendust Radio Configuration Application, mis võimaldas sätteid C-keelse päisefailina eksportida.

Peale iga käsu ja vastavate parameetrite saatmist kontrollitakse muutuja *CTS* (*clear to send*) väärtust. Selleks saadetakse transiiverile käsk *READ_CMD_BUFF*, millele transiiver vastab *CTS* väärtusega. Kui see väärtus on kuueteistkümnendarv FF, on transiiver valmis uut käsku vastu võtma või eelneva käsu tulemusi tagastama – andmete väljalugemiseks peab *SPI* siini „NSEL” signaal jääma peale *CTS* väärtuse kontrollimist madalasse olekusse ning transiiverile tuleb anda edastatavate bittide arvule vastav arv takte [15].

Mooduli saaterežiimi testimiseks seati transiiver moduleerimata testsignaali genereerimise režiimi – harilikku 2-FSK sätte asemel valiti selleks *CW* (*carrier wave*), mis tootjapoolses rakenduses valikuna ei sisaldunud ning tuli päisefailis käsitsi määrata. Transiiveri väljundvõimsus seati maksimaalsele tasemele (vastav väärtus 7F).

6.2 Mooduliga suhtlemine üle USB liidese

Et võimaldada terminali vahendusel raadiosidemoodulite juhtimist, otsustati mikrokontrolleri poolele luua minimalistlik tarkvara.

Tarkvara pandi toimima nii *TTY (teletypewriter) raw* kui ka *cooked* režiimis, st sõltumata sellest, kas kasutatav terminalirakendus omas arvutis lokaalset puhvrit ning saatis kasutaja sisendi alles peale tagastusklahvi (*carriage return*) vajutamist, või edastas igal klahvivajutusel vastava sümboli koheselt.

```
[12:41:18.514] Connected
PQ9 COM module V1.1 by 213415IACB
Copyright (c): Ergo Haavasalu 2024, TalTech
Enter a command ("l" for a list of available commands):

LIST OF COMMANDS:
  c - Enable ANSI terminal color codes
  i - Return the system info and settings
  p - Toggle the RF power amplifier 5 V supply
  r - Put the device into receive mode
  R - Reset the device
  t - Put the device into transmit mode

Enter a command:
ANSI COLORS ACTIVATED!
Enter a command:
WARNING! When the amplifier is turned on, the current
consumption increases way above 500 mA. Make sure your USB port
can handle this load. To proceed, repeat the command.
Enter a command:
# RF AMPLIFIER SUPPLY ON!
Enter a command:
Reset the device? (y/n):
RESTARTING!

[12:41:57.952] Disconnected
[12:41:58.954] Connected
```

Joonis 19: Näide mooduli käsurealt juhtimisest rakendusega Tio.

Loodud koodi testiti terminalirakendustega Minicom, Picocom ja Tio – joonisel 19 on esitatud näide programmi tööst rakenduse Tio vahendusel. Nn *cooked* režiimi testimiseks loodi rakendusega Rlwrap terminali kohalik puhver – selle tagajärjel kaotasid aga eelnevalt mainitud rakendused vältimatult osa oma funktsionaalsusest (klahvikombinatsioonidega menüüde avamise jms).

6.3 Ülevaade tarkvara käskudest ning toimimisest

Järgnevalt on esitatud raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi tarkvara viimase versiooni käsud koos selgitustega:

- „l” – väljastab nimekirja saadaval olevatest käskudest,
- „m” – lülitab ajutiselt sisse saatevõimsuse mõõteskeemi võimendid, teostab mõlema võimendi väljundpinge määramiseks analoog-digitaalmuunduse ja väljastab vastavad tulemused ekraanile,
- „c” – lülitab sisse teksti värvilkoodide režiimi,
- „R” – taaskäivitab mooduli; kasutajalt küsitakse selleks esmalt kinnitust,
- „r” – paneb transiiveri vastuvõturrežiimi,
- „t” – lülitab sisse võimsusvõimendi ning paneb transiiveri saaterežiimi (testimise raames moduleerimata signaali genereerima); transiiver on sätestatud antennilüliti juhtima,
- „p” – lülitab eraldiseisvalt sisse võimsusvõimendi; esmakordsel kasutamisel hoiatatakse kasutajat suurenevast voolutarbest.

Terminalirakendusega ühenduse loomisel tühjendab mooduli tarkvara terminali, kuvab seal nn tervitussõnumit ja jääb kasutaja sisendit ootama. Sisend loetakse lõpetatuks peale tagastusklahvi vajutamist. Vigase käsu korral palutakse sisendit korrata.

Kui kasutaja sisendiks on mittenegatiivne täisarv ning moodul on saaterežiimis, käsitletakse sisendit transiiveri saatevõimsuse muutmise käsuna – Si4468 vastava registri sisu muudetakse sisestatud väärtusega, mis on eelnevalt tõkestatud vahemikku [0 ; 127].

Terminaliakna tühjendab käsitsi klahvikombinatsioon „Ctrl + l”.

7 Mõõtmised

Raadiosidemooduli prototüüpide komponentide hajuparameetrite ja signaalspektrite mõõtmiseks kasutati Rohde & Schwarz FSH-4 siduanalüsaatorit ning SMC100A signaaligeneraatorit. Täiendavalt kasutati Hantek DSO2D15 ostsilloskoopi, Uni-Trend UT61E multimeetrit, labori toiteplokki, SMA ühendustega koaksiaalkaableid, SMA ja Molex 73412 seeria ühendustega mikrokoaksiaalseid üleminekuid, 20 dB atenuaatorit ja takistuslikku hargmikut.

Enne mõõtmisi kalibreeriti siduanalüsaator ZV-Z135 etaloniga – analüsaatori sagedusvahemik seati 3,6 GHz peale, kalibratsiooni meetodiks valiti „*Full two-port high accuracy*”. Hajuparameetrite mõõtmistel kasutati testsignaali võimsusega -10 dBm.

Et vältida võimendite kahjustamist, lähtuti mõlema võimsusvõimendi testimisel Guerrilla RF raadiosageduslike võimendite sisse- ja väljalülitamise protokollist:

- Veenduda, et enne toitepinge sisse lülitamist on mõõdetav seade õigesti ühendatud (sh sisend ja väljund õigesti sobitatud),
- lülitada sisse võimendi põhitoide,
- lülitada sisse võimendi „*enable*” sisendite toide, seda põhitoitega samal hetkel või hiljem,
- viimaks lülitada sisse võimendi raadiosageduslik sisendsignaali.

- Võimendi välja lülitamiseks eemaldada vastavad signaalid nende rakendamise vastupidises järjekorras [44].

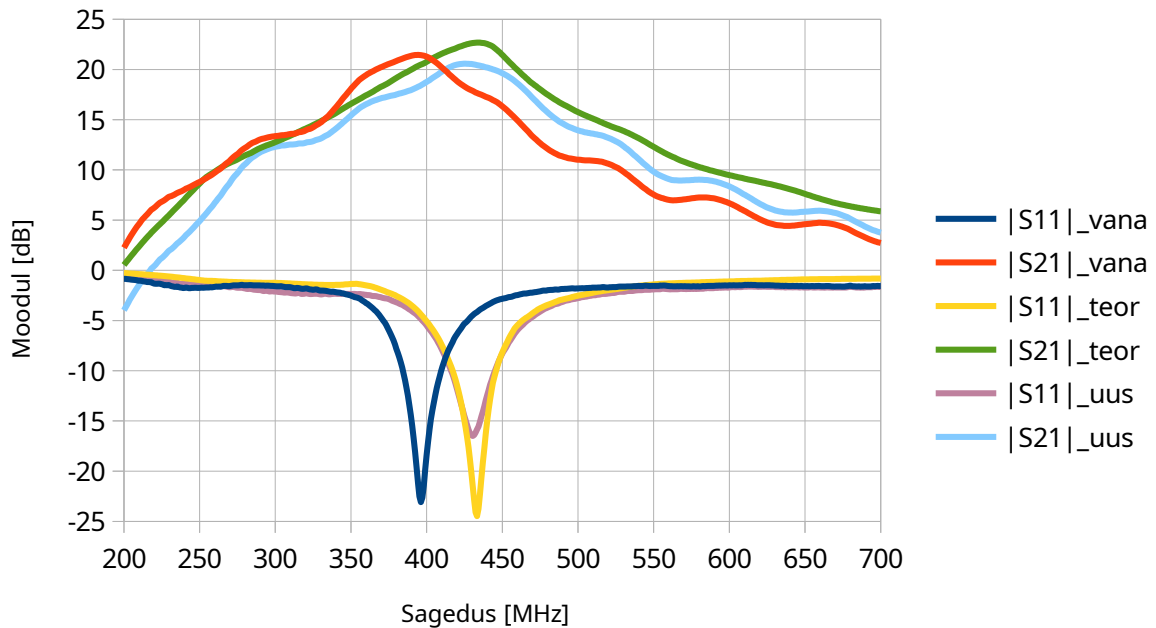
7.1 HMC453 võimsusvõimendi

HMC453QS16GE mõõtmiseks monteeriti raadiosidemooduli V1.1 trükkplaat esialgu vaid osaliselt – plaadile joodeti üksnes võimsusvõimendi koos vastavate sobitus- ja eelpingestusahelatega. Pinget tõstva muunduri asemel kasutati labori toiteplokki.

Mõõtetulemustest selgub, et hajuparameetrite põhjal arvutatud ning AWR simulatsioonitarkvaraga kontrollitud ahelad tagavad sobituse oodatust ca 10% madalamal sagedusel (vt Joonis 20).

Simulatsioonide muutmise käigus veenduti, et sobituse parendamiseks tuli ahelate komponentide väärtusi vähendada. Otsustati varieerida sisendi ja väljundi kondensaatorite mahtuvust – mõõtmise ajal käepärast olnud komponentidest tagasid parima sobituse sisendi sobitusahelas 27 pF (36 pF asemel), väljundis 42 pF (62 pF asemel).

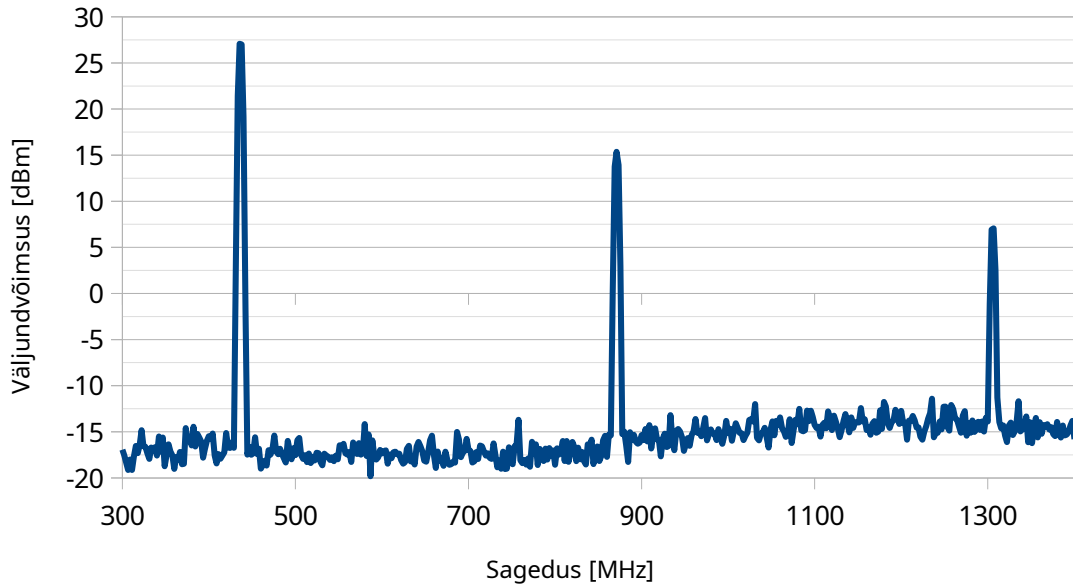
Selgub, et ka peale sobitusahelates tehtud muudatusi ületab võimendi võimendus töösageduse ümbruses väärtuse 20 dB – seda küll väikse signaali režiimis. Eeldades et tegu on üsnagi lineaarse võimendiga, peaks ca 10 dBm võimsusega ja 435 MHz sagedusega sisendsignaali korral jääma HMC453 väljundvõimsus suurusjärku 30 dBm.



Joonis 20: Võimsusvõimendi hajuparameetrite moodulite võrdlus simulatsioonitulemustega.

Võimendi mõõtmiseks suure signaali režiimis ühendati komponendi sisend signaaligeneraatoriga. Generaator seati harmoonilise signaali režiimi, võimsuseks määrati 10 dBm ja sageduseks 435 MHz. FSH-4 seati spektrianalüsaatori režiimi ja ühendati 20 dB atenuaatori vahendusel võimendi väljundiga.

Tulemustest (vt Joonis 21) selgub, et võimendi väljundvõimsus jäi sagedusel 435 MHz oodatud ca 30 dBm-le tunduvalt alla, suurusjärku kõigest 27 dBm. Raadiosidemooduli teiste komponentide kadusid arvestades oleks süsteemi saatevõimsus seega kõigest ca 23 dBm (vt Saateahela kaod).



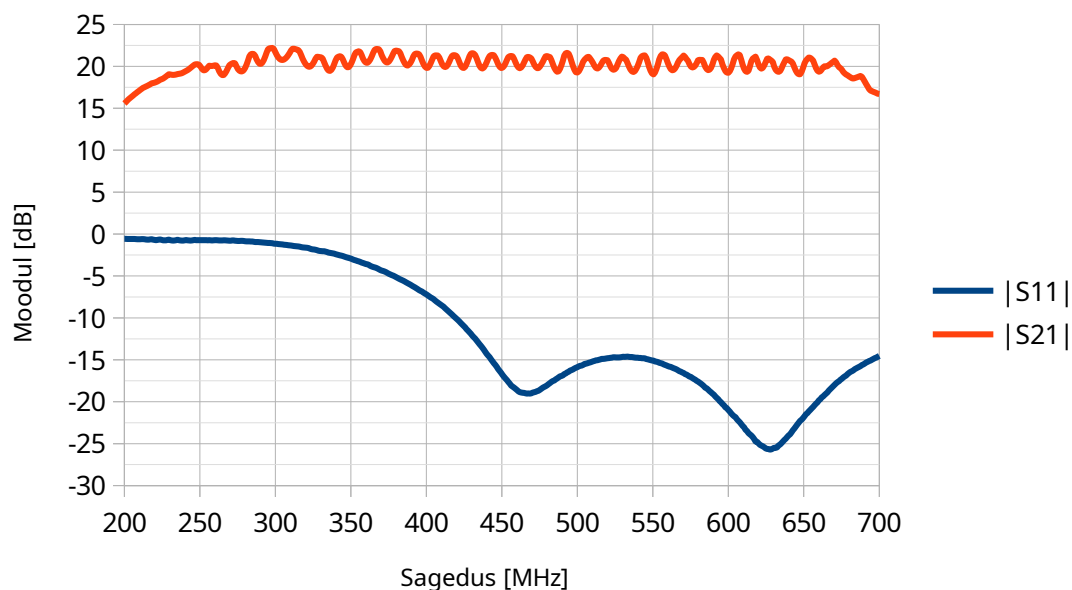
Joonis 21: HMC453QS16GE väljundspekter 10 dBm 435 MHz sisendsignaali korral.

Mõõdetud signaalspektrist (Joonis 21) järeldub, et vastupidiselt ootustele pole HMC453 puhul kaugeltki tegu lineaarse võimendiga – teine harmooniline komponent on põhisagedusele vastavast komponendist vaid ca 12 dB (ca 16 korda) väiksem, kolmas harmooniline ca 20 dB ehk 100 korda väiksem.

Kuna komponendi HMC453QS16GE parameetrid ei vastanud ootustele, otsustati veel proovida Guerrilla RF-i GRF5504 võimsusvõimendit. Selleks disainiti uus trükkplaat – moodul V2.0.

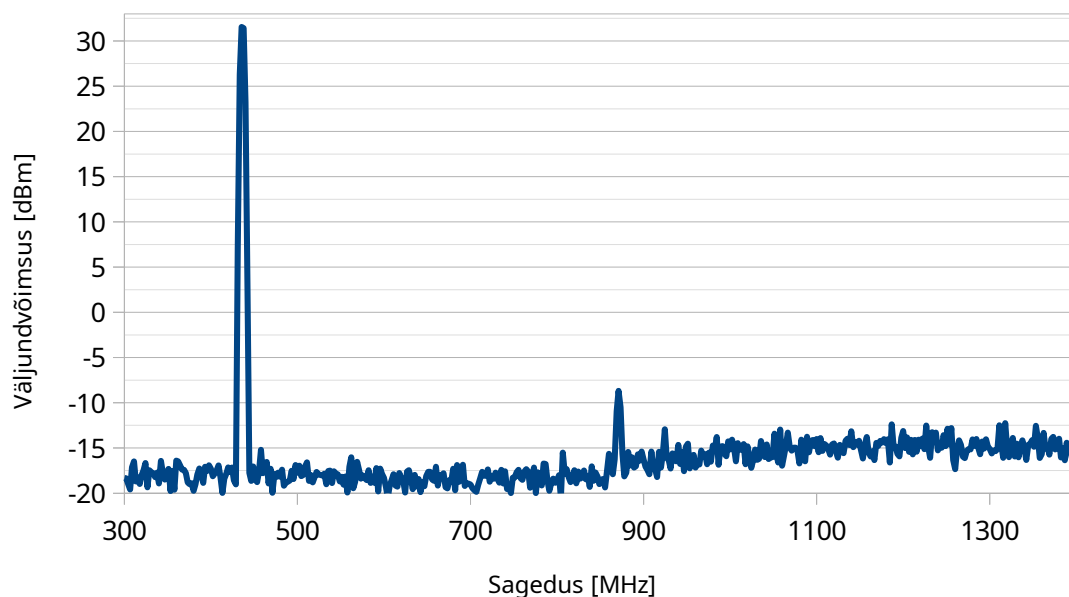
7.2 GRF5504 võimsusvõimendi

Hajuparameetrite mõõtmisel saavutas GRF5504 võimendus ca 20 dB juures platoo – andmelehe esmase väljaande põhjal (kus on esitatud ka madalamatele toitepingetele vastavad graafikud) oleks see pidanud väikse signaali režiimis küündima koguni 38 detsibellini [45].



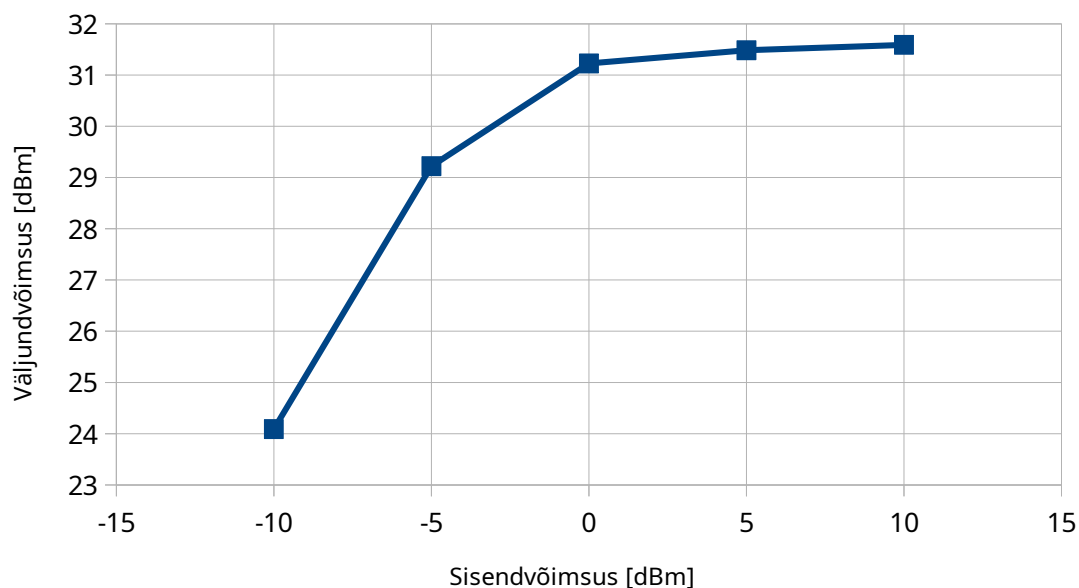
Joonis 22: Sobitatud GRF5504 võimsusvõimendi hajuparameetrite moodulid.

Suure signaali režiimis näib GRF5504 võimsusvõimendi võrreldes HMC453QS16GE-ga väga hästi töötavat (vt Võimsusvõimendite võrdlus).

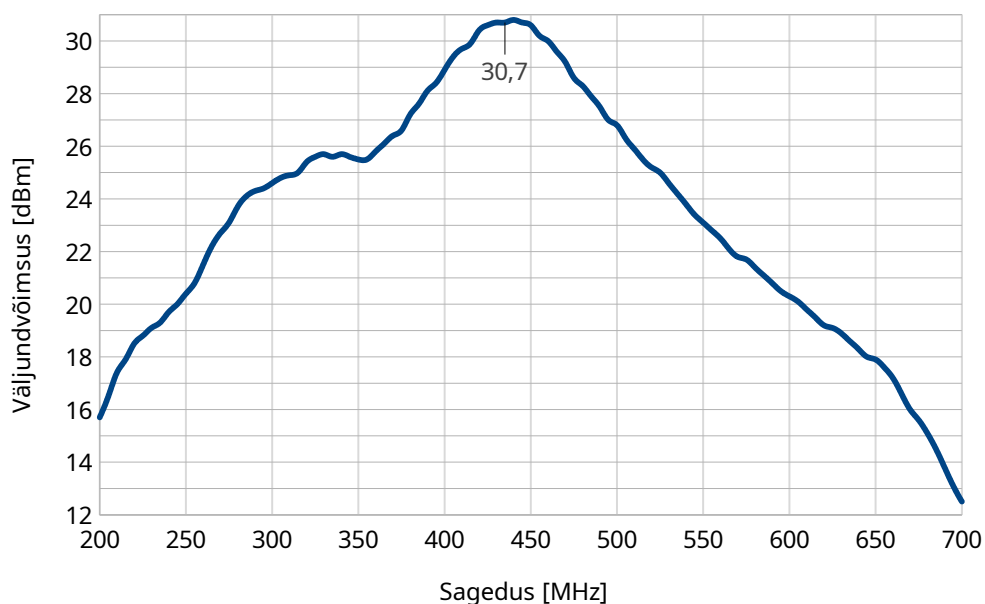


Joonis 23: GRF5504 väljundspekter 10 dBm 435 MHz sisendsignaali korral.

Juba võimsusega 0 dBm sisendsignaali korral ületas väljundvõimsus väärtuse 30 dBm – erinevalt HMC453-st seega GRF5504 võimendus suure signaali režiimis kasvab, väikse signaali režiimi väärtuselt ca 20 dB väärtuseni ca 30 dB.



Joonis 24: GRF5504 väljundsignaali põhikomponendi võimsuse sõltuvus sisendvõimsusest. Jooniselt 24 selgub, et GRF5504 väljundvõimsus läheneb sisendvõimsuse kasvamisel väärtusele ca 31,5 dBm – see ühtib andmelehe esmases väljaandes esitatuga [45].



Joonis 25: GRF5504 väljundvõimsuse sõltuvus sagedusest (0 dBm sisendvõimsusel).

7.3 Võimsusvõimendite võrdlus

Mõõdeti mõlema võimsusvõimendi voolutarve ning väljundvõimsus nelja erineva võimsusega sisendsignaali juures. Tulemuste põhjal arvutati võimendite *PAE* (*power-added efficiency*). Viimane avaldub valemiga

$$PAE = \frac{P_{RFout} - P_{RFin}}{P_{DC}} \cdot 100\%$$

kus P_{RFout} on võimendi väljundvõimsus, P_{RFin} on võimendi sisendvõimsus ja P_{DC} võimendi toitevõimsus – kõik lineaarsetes ühikutes [[37] , lk 597].

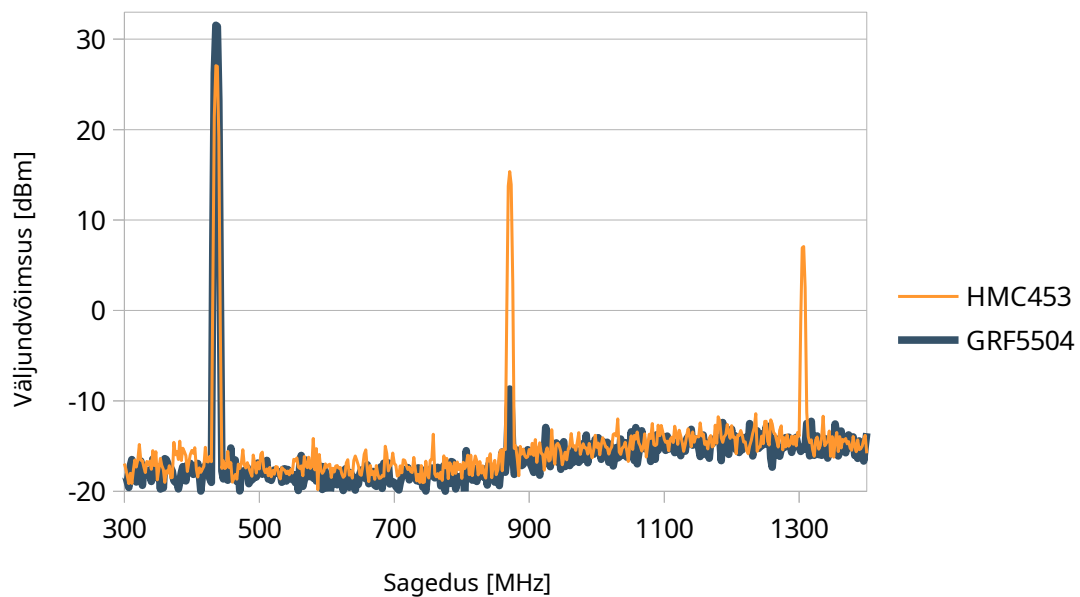
Tabel 2: Võimendite *PAE* arvutamiseks vajalikud mõõtetulemused.

Võimendi:	HMC453QS16GE				GRF5504			
Toitepinge [V]	5,0				3,3			
Voolutarve passiivses olekus [mA]	630				60			
Sisendsignaali võimsus [dBm]	0	5	10	15	0	5	10	15
Väljundsignaali võimsus [dBm]	18,4	23,4	26,6	27	30,2	30,3	30,3	30,1
Toitevool [mA]	610	640	630	645	720	765	790	785
Toitevõimsus [W]	3,05	3,20	3,15	3,23	2,38	2,52	2,61	2,59
<i>PAE</i> [%]	2,0	6,75	14,2	14,5	44,1	42,3	40,6	38,1

Raadiosidemooduli prototüüpide V1.1 ja V2.0 mõõtmisel selgus, et erinevalt komponendist HMC453 soojenes võimsusvõimendi GRF5504 märgatavalt vaid sisendsignaali olemasolul – HMC453 seevastu kuumenes märkimisväärselt ka passiivses olekus. Töö edasiarendajal tuleb võimendi jaoks leida lahendus jahutuse näol – vahest on võimalik satelliidi ühte külge radiaatorina kasutada ning mooduli disaini vastavalt kohandada.

On selge, et komponent HMC453 ei toiminud ootuspäraselt – võimendi kasutegur ja maksimaalne saavutatud väljundvõimsus olid andmelehes esitatud väärtustest tunduvalt madalamad. Ka GRF5504 puhul olid mainitud väärtused oodatust madalamad, kuid tuleb arvestada et võimendit kasutati optimaalsest madalamal tööpingel (5,0 V asemel 3,3 V).

Järgnevalt võrreldi võimendite väljundspektreid 10 dBm võimsusega ja 435 MHz sagedusega harmoonilise sisendsignaali korral. Joonisel 26 esitatud spektritest selgub, et võrreldes komponendiga HMC453QS16GE on võimendi GRF5504 ka suure signaali režiimis hea linearsusega – teine harmooniline komponent on põhikomponendist pea 40 dB väiksem, kolmanda harmoonilise komponendi võimsus jääb aga mürataseme suurusjärku.

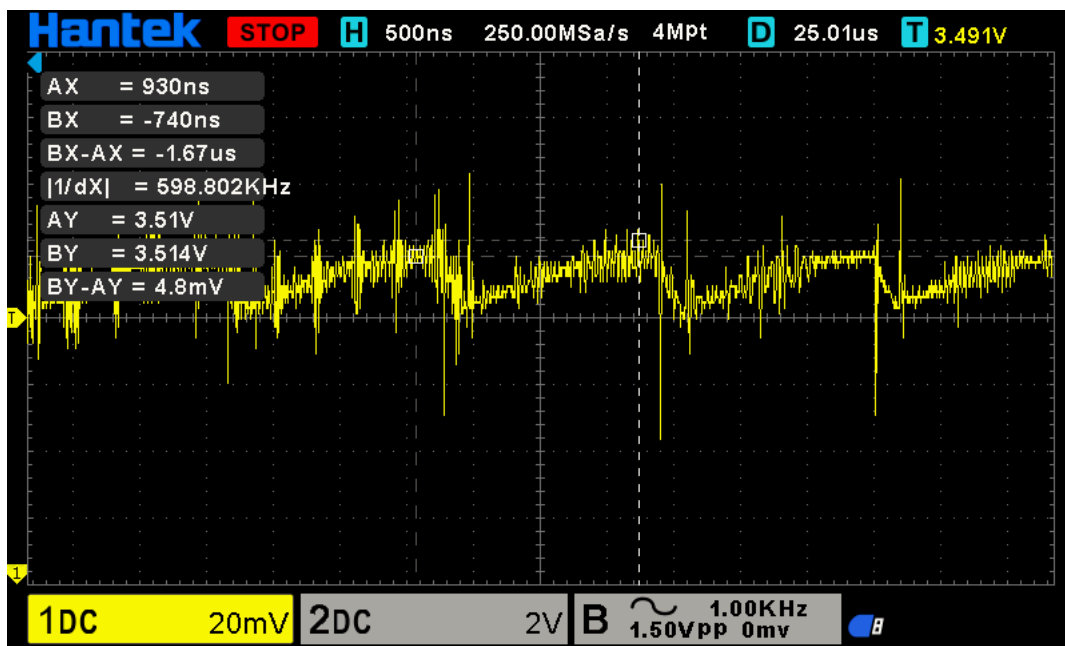


Joonis 26: Võimsusvõimendite HMC453QS16GE ja GRF5504 väljundspektrite võrdlus. Arvestades, et võimendil GRF5504 on komponendist HMC453 laiem tööpingevahemik, suurem maksimaalne väljundvõimsus, suurem maksimaalne võimendus, kõrgem kasutegur, parem linearsus ja

taskukohasem hind, võib lugeda komponendi GRF5504 igati paremaks valikuks.

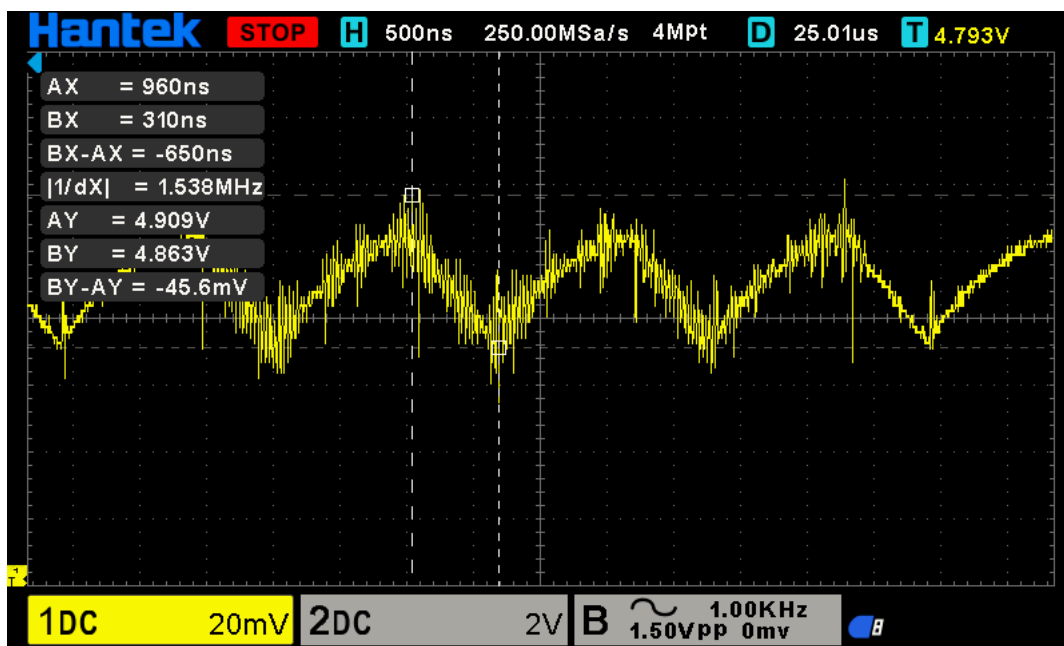
7.4 TPS61092 pinget tõstev muundur

Võimsusvõimendi HMC453 toitepinget tõstva muunduri valimisel jäi andmelehes märkamata üks oluline parameeter – koormuse minimaalne lubatud takistus käivitusrežiimis; sisendpinge 3,3 V puhul jäi see suurusjärku 10Ω [18]. Prototüübi V1.0 mõõtmisel selgus, et kui muunduri väljundisse oli selle sisse lülitamise hetkel võimsusvõimendi ühendatud, jäi muunduri väljundpinge oodatust madalamale tasemele pidama – 5,0 voldi asemel ca 3,5 voldile (vt Joonis 27).



Joonis 27: Sisselülitamise hetkest alates koormatud muunduri väljundpinge graafik.

Kui aga ühendada võimendi muunduri külge alles pärast viimase käivitamist, siis jäi väljundpinge normi piiresse (vt Joonis 28).



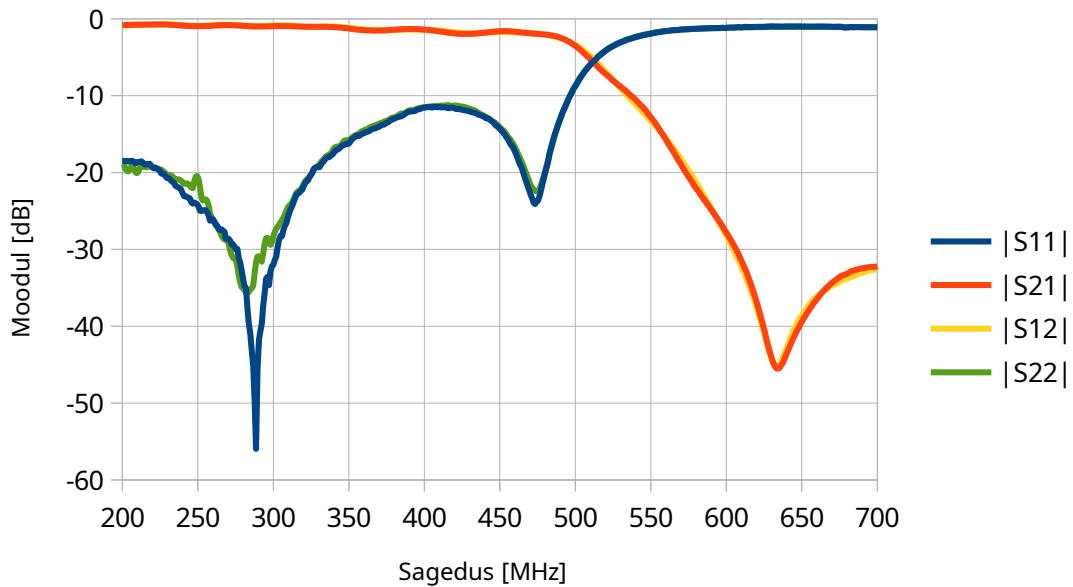
Joonis 28: Peale käivitamist koormatud muunduri väljundpinge graafik.

Võimendi kui koormuse jaoks täiendava lüliti lisamine ei tundunud otstarbekas. Arvestades ka HMC453 puudujääke otsustati seega disainida uus prototüüp, seda siis uue GRF5504 võimendiga mis pinget tõstvat muundurit ei vajanud.

7.5 Madalpääsfiltrid

LFCG-42+ integraalne madalpääsfilter valiti lootuses, et selle sisestuskadu on väiksem ekvivalentse SMD kondensaatoritest ja induktiivpoolidest koostatud filtri omast.

Sagedusel 435 MHz mõõdeti filtri sisestuskao väärtuseks ca 1,9 dB. Andmelehe põhjal oleks tüüpiline sisestuskadu jääma 0,9 dB ümbrusse ning mitte ületama 1,6 dB – seega kaod olid oodatust suuremad [14] .

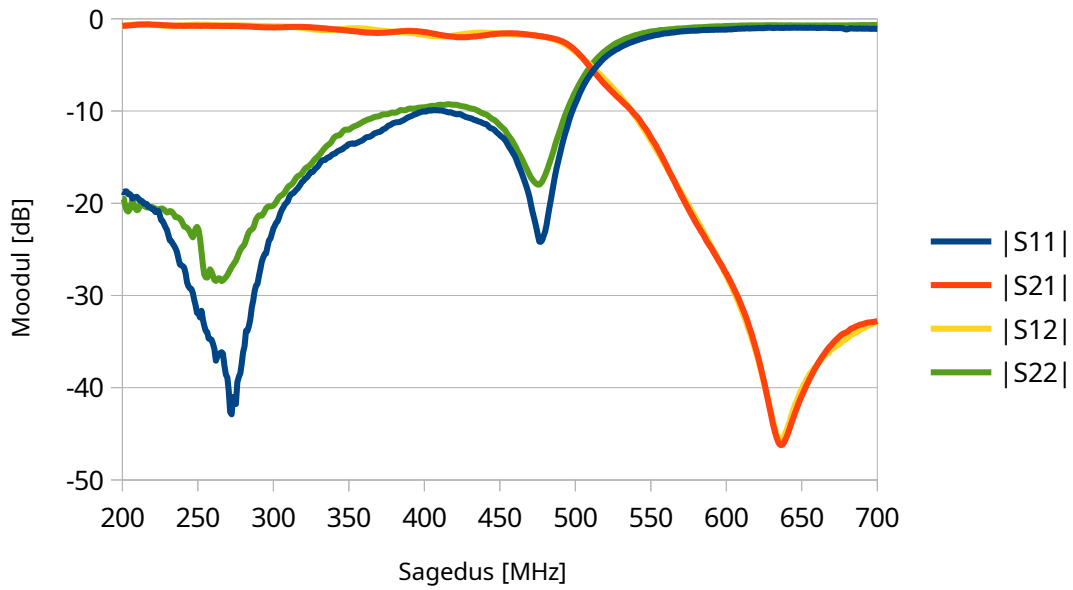


Joonis 29: Mooduli V1.1 trükkplaadil mõõdetud LFCG-42+ madalpääsfiltri hajuparameetrid.

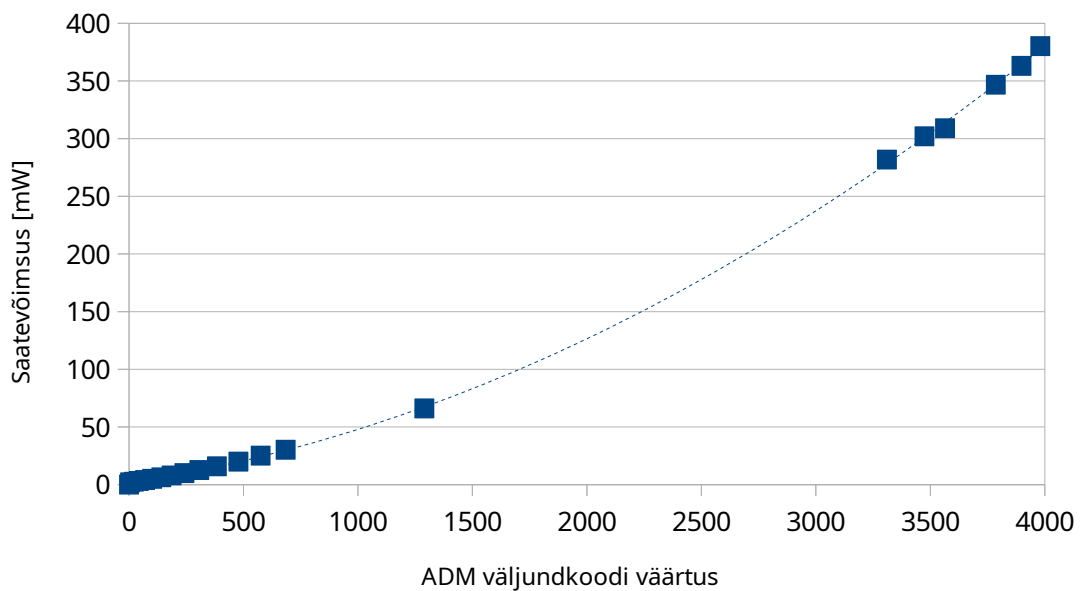
7.6 Suundhargmik ja saatevõimsuse mõõtja

Prototüübi trükkplaat disainiti nii, et mõõta sai vaid suundhargmiku ja madalpääsfiltri jada-ahelat – eeldati, et toodetud filtrid erinesid teineteisest piisavalt vähe, et suundhargmiku sisestuskao määramiseks võis jada-ahela summaarsest ülekande moodulist maha lahutada filtri ülekande oma. Selgus aga, et sagedusel 435 MHz oli antud jada-ahela sisestuskadu eelnevalt mõõdetud filtri omast väiksem.

27 dBm saatevõimsuse juures ning terminaatoriga sobitatud antennipordi korral mõõdeti suundhargmiku sidestatud pordi alaldatud pingeväärtuseks keskmiselt 0,43 V. Sobitus ei olnud ideaalne, sest isoleeritud pordi poolse alaldi pingekeskmine väärtus oli ca 0,10 V. Mõlemad pinged olid oodatust suuremad – vastavad mitteinverteerivas lülituses operatsioonvõimendid aeti küllastusse, mistõttu tuleb töö edasiarenduse käigus tagasiside takistite väärtusi muuta.



Joonis 30: LFCG-42+ madalpääsfiltri ja suundhargmiku summaarsed hajuparameetrid. Saatevõimsuse mõõtja kalibreerimiseks määrati vastava analoog-digitaalmuunduri väljundväärtused erineva võimsusega suundhargmikku läbivate signaalide juures.



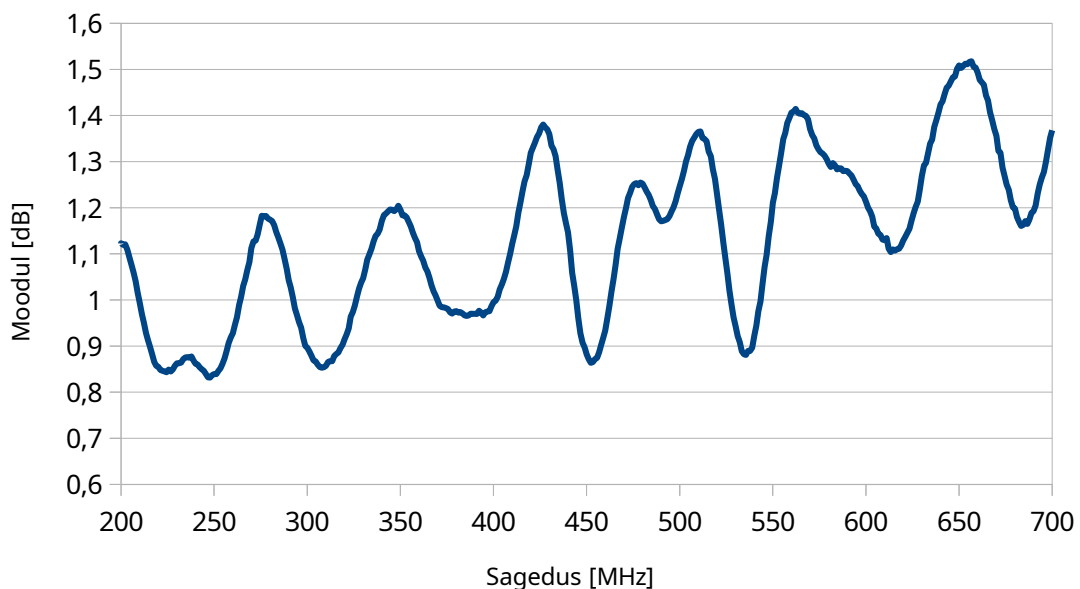
Joonis 31: Võimsuse mõõtja ADM väljundkoodi väärtuse sõltuvus saatevõimsusest.

Madalama võimsusega signaalide genereerimiseks kasutati SMC100A signaaligeneraatorit. Suurema võimsusega signaalid saadi mooduli V2.0 saateahela komponentidega.

Rakendusega LibreOffice Calc lisati mõõtetulemustele lähendkõver. Selleks sobis ligikaudu teist järku polünoom $f(x)=1,616 \cdot 10^{-5} \cdot x^2+0,0301 \cdot x+1,686$, kus f on saatevõimsus ning x vastava analoog-digitaalmuunduri väljundkoodi väärtus. Polünoom kehtib ainult mõõdetud testplaadi V2.0 puhul – mõõteskeemi võimendite võimenduse muutmise järel (või ka lihtsalt vastavate komponentide parameetrite hajuvuse tõttu) tuleb see igal prototüübil uuesti määrata.

7.7 Antennilüliti

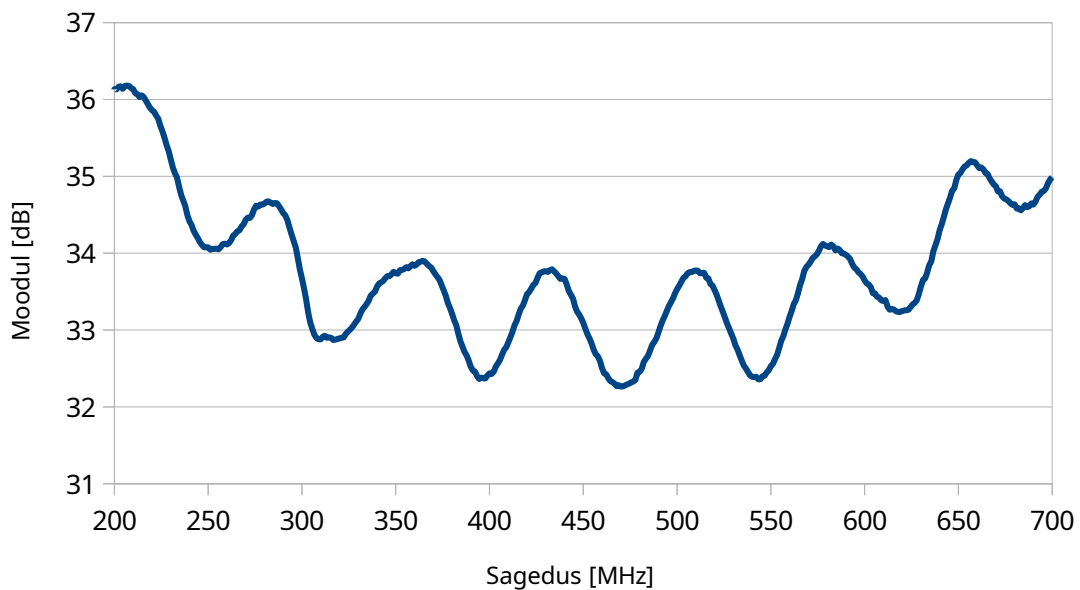
Mõõdeti antennilüliti saateahela poolse haru sisestuskadu ja isolatsiooni.



Joonis 32: Antennilüliti sisestuskadu.

Sisestuskadu ja isolatsioon näivad oodatust suuremad – andmelehes esitatud tüüpilised väärtused on vastavalt 0,3 dB ja 25 dB [25]. Sageduse

435 MHz ümbruses mõõdetud väärtused on vastavalt 1,27 dB ja 33,75 dB. Ka hiljem mõõdetud mikrokoaksiaalsete kaablite ja vastavate ühenduste kadusid (kokku ca 0,75 dB) arvestades jääb antud komponendi sisestuskadu väikse signaali režiimis lubatud maksimaalsest väärtusest (0,4 dB) ca 0,1 dB suuremaks [25] .



Joonis 33: Antennilüliti isolatsioon

7.8 Saateahela kaod

Järgnevas tabelis on esitatud võimsusvõimendi ja antenni pordi vahele jäävate komponentide mõõdetud sisestuskadude võrdlus teoreetiliste väärtustega. Komponente mõõdeti trükkplaadile joodetud mikrokoaksiaalsete testportide ja üleminekute vahendusel – viimaste kadudeks hinnati töösagedusel ca 0,75 dB.

Tabel 3: Saateahela komponentide kaod väikse signaali režiimis.

Komponent	Eeldatav tüüpiline kadu [dB]	Maksimaalne lubatud kadu [dB]	Mõõdetud kadu [dB]
LFCG-42+ [14] (esimene madalpääsfilter)	0,9	1,6	1,91 – 0,75
AS179-92LF [25] (antennilüliti)	0,3	0,4	1,27 – 0,75
LFCG-42+ (teine madalpääsfilter)	0,9	1,6	1,89 – 0,75
BDCN-20-13+ [40] (suundhargmik)	0,15	0,25	
	Kokku: 2,25	Kokku: 3,85	Kokku: 2,82

Võimsusvõimendi maksimaalne väljundvõimsus oli ca 30,7 dBm. Antenni pordist mõõtmisel jäi see vahemikku 27 dbm kuni 27,4 dBm. Järeldub, et suure signaali režiimis saadud kaod jäävad suurusjärku $\lesssim 3,7$ dB – seega lubatud piiridesse.

8 Kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli valmistada PocketQube standardile vastav, 435 MHz amatöör-kosmoseside diapsoonis töötav, vähemalt 27 dBm väljundvõimsusega pikosatelliidi raadiosidemoodul. Loodav makett pidi sisaldama võimsusvõimendit ja antennilülitit, omama suundhargmikuga saatevõimsuse mõõtjat ning mahtuma tüüpilisele 42 x 42 mm gabariidiga PocketQube tüüpi trükkplaadile.

Töö põhifookus seati mooduli saatevõimsuse suurendamisele. Esimese prototüübi korral kasutati HMC453QS16GE võimsusvõimendit, mille vajalik toitepinge prooviti saavutada TPS61092 pinget tõstva muunduriga. Nimetatud komponendid ei toimunud ootuspäraselt – võimendi väljundvõimsus oli lubatust tunduvalt väiksem ning harmoonilised moonutused oodatust suuremad; võimendiga koormatuna jäi muunduri väljundpinge lubatust madalamale tasemele pidama. Mainitud puuduste kõrvaldamiseks loodi veel teine prototüüp, GRF5504 võimendiga – viimane ei vajanud tööks pingemuundurit ja toimis ootuspäraselt hästi.

Kõik seatud tingimused täideti edukalt. Loodud teine prototüüp V2.0 vastas PQ9 standardile, omas kogu nõutud riistvara (sh toimivat saatevõimsuse ja antennipordi sobituse mõõteskeemi), ning saavutas antennipordis maksimaalse väljundvõimsuse 27,4 dBm.

Järgnevalt esitab autor mõningad soovitusel töö võimalikele edasiarendajatele:

- Usutavasti piisab ka ühe madalpääsfiltri kasutamisest – peaks sobima ka (samast seeriast) kõrgema lõikesagedusega filter, mille sisestuskadu on sagedusel 435 MHz madalam.
- Tasub tutvuda STM32WL55 mikrokontroller-transiiveriga – vahest saab STM32L412 ja Si4468 ühe komponendiga asendada.
- Võimendi GRF5504 tundub satelliidis kasutamiseks sobilik. Siiski tasub veel tutvuda alternatiivsete lahendustega. Kindlasti tuleb tegeleda ka mainitud jahutuse küsimusega.
- Võimalusel katsetada erinevate trükkplaadi tüüpidega, seda nii dielektriku materjali kui ka plaadi ehituse (*stack-up*) osas.
- Tutvuda komponentide dokumentatsiooniga põhjalikult – niimõnigi oluline parameeter ei pruugi andmelehtede tabelites kajastuda ning on vaid kõigi tootja esitatud materjalide hoolikal lugemisel leitav.

Kasutatud kirjandus

- [1] TTÜ tudengisatelliitide koduleht. URL: <https://satelliit.taltech.ee/#/> [viimati kasutatud 11.05.2024]
- [2] SpaceX. Smallsat rideshare program. URL: <https://www.spacex.com/rideshare/> [viimati kasutatud 15.04.2024]
- [3] ESA. Rideshare multiple launch service. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/04/Rideshare_multiple_launch_service2 [viimati kasutatud 15.04.2024]
- [4] Alba Orbital. Launch. URL: <https://www.albaorbital.com/launch> [viimati kasutatud 15.04.2024]
- [5] Fossa Systems. Satellite launch services. URL: <https://fossa.systems/launch-brokerage-service/> [viimati kasutatud 15.04.2024]
- [6] Nanosats database. What is a CubeSat & other picosatellites. URL: <https://www.nanosats.eu/cubesat> [viimati kasutatud 14.04.2024]
- [7] TalTech. Projekt – Tudengisatelliidi arendus ja lennutamine (reorganiseeritud/lõpetatud). URL: <https://smart.taltech.ee/projekt/tudengisatelliidi-arendus-ja-lennutamine/> [viimati kasutatud 14.04.2024]
- [8] Eesti Tudengisatelliidi Sihtasutus. URL: <https://tudengisatelliit.ee/> [viimati kasutatud 15.04.2024]
- [9] Alba Orbital et al, The PocketQube standard Issue 1. URL: <https://www.albaorbital.com/pocketqube-standard> [viimati kasutatud 16.04.2024]
- [10] Eric Becnel et al, *PQ60 Standard Document*. URL: https://nanopdf.com/download/pq-60-standard-document-version-release-date-11_pdf [viimati kasutatud 16.04.2024]
- [11] J. Bouwmeester, *PQ9 and CS14 Electrical and Mechanical Subsystem Interface Standard for PocketQubes and CubeSats*, doi: 10.34894/6MVBCZ
- [12] Silicon Labs transiiveri Si4468 sobitamise juhised. URL: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/AN648.pdf> [viimati kasutatud 18.02.2024]

- [13] Gquipment hajuparameetrite failide parser ja graafikute koostaja. URL: <https://gquipment.shinyapps.io/S-Parameter-plotting-tool/> [viimati kasutatud 17.03.2024]
- [14] Mini-Circuits, LFCG-42+ madalpääsfiltri dokumentatsioon. URL: <https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=LFCG-42%2B> [viimati kasutatud 16.04.2024]
- [15] Silicon Labs transiiveri Si4468 dokumentatsioon. URL: <https://www.silabs.com/wireless/proprietary/ezradiopro-sub-ghz-ics/device.si4468?tab=techdocs> [viimati kasutatud 18.02.2024]
- [16] STMicroelectronics mikrokontrolleri STM32L412K8 dokumentatsioon. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l412k8.html> [viimati kasutatud 17.02.2024]
- [17] STMicroelectronics lineaarregulaatori LD39200 dokumentatsioon. URL: <https://www.st.com/en/power-management/ld39200.html> [viimati kasutatud 18.02.2024]
- [18] Texas Instruments pinget tõstva muunduri TPS61092 dokumentatsioon. URL: <https://www.ti.com/product/TPS61092> [viimati kasutatud 18.02.2024]
- [19] Janis Dalbins et al, "Interplanetary Student Nanospacecraft: Development of the LEO Demonstrator ESTCube-2". DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10060503>
- [20] STMicroelectronics ESD kaitse USBLC6-2SC6 dokumenatsioon. URL: <https://www.st.com/en/protections-and-emi-filters/usblc6-2.html> [viimati kasutatud 18.02.2024]
- [21] JLCPCB, *JLCPCB Impedance Calculator*, URL: <https://jlcpcb.com/pcb-impedance-calculator> [viimati kasutatud 25.02.2024]
- [22] Texas Instruments RS-485 draiveri SN65HVD78DRBR dokumentatsioon. URL: <https://www.ti.com/product/SN65HVD78/part-details/SN65HVD78DRBR> [viimati kasutatud 08.02.2024]
- [23] Littelfuse TVS diodide massiivi dokumentatsioon. URL: <https://www.littelfuse.com/products/tvs-diode-arrays/general-purpose-esd-protection/sm712.aspx> [viimati kasutatud 08.02.2024]
- [24] RF Wireless World, *2FSK Vs 4FSK | Difference Between 2FSK Modulation And 4FSK Modulation*, URL: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/2FSK-modulation-vs-4FSK-modulation.html> [viimati kasutatud 03.03.2024]

- [25] Skyworks raadiosagedusliku lüliti AS179-92LF dokumentatsioon. URL: <https://www.skyworksinc.com/en/Products/Switches/AS179-92LF> [viimati kasutatud 25.02.2024]
- [26] W. Kelsey, *Online Smith Chart Tool*, URL: https://www.will-kelsey.com/smith_chart/ [viimati kasutatud 08.02.2024]
- [27] Analog Devices võimsusvõimendi HMC453QS16G dokumentatsioon. URL: <https://www.analog.com/en/products/hmc453qs16g.html> [viimati kasutatud 16.02.2024]
- [28] Renesas võimsusvõimendi IDTF0480 andmeleht. URL: <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/f0480-datasheet> [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [29] Analog Devices võimsusvõimendi HMC742ALP5E andmeleht. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc742a.pdf> [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [30] Analog Devices võimsusvõimendi ADL5324 andmeleht. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5324.pdf> [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [31] Guerrilla RF võimsusvõimendi GRF5504 andmeleht. URL: https://www.guerrilla-rf.com/products/DataSheet?sku=5504&file_name=GRF5504DS.pdf [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [32] Guerrilla RF võimsusvõimendi GRF5112 andmeleht. URL: https://www.guerrilla-rf.com/products/DataSheet?sku=5112&file_name=GRF5112DS.pdf [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [33] NXP Semiconductor võimsusvõimendi MMZ09332BT1 andmeleht. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMZ09332B.pdf> [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [34] NXP Semiconductor võimsusvõimendi MMG3006NT1 andmeleht. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMG3006NT1.pdf> [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [35] Qorvo võimsusvõimendi TQP7M9106 andmeleht. URL: <https://www.qorvo.com/products/d/da005671> [viimati kasutatud 24.03.2024]
- [36] C. Bowick, *RF Circuit Design – Second Edition*
- [37] D. M. Pozar, *Microwave electronics 4th edition*
- [38] Guerrilla RF GRF5504 võimsusvõimendi seadistamine 3,3 V toitepinge korral. URL: <https://www.guerrilla-rf.com/products/CustomTunes?>

- sku=5504&file_name=GRF5504%203_3V%20400-402%20MHz.pdf [viimati kasutatud 30.04.2024]
- [39] Guerrilla RF GRF5504 võimsusvõimendi seadistamine küllastusrežiimis töötamiseks. URL: https://www.guerrilla-rf.com/products/CustomTunes?sku=5504&file_name=GRF5504%20430-435%20MHz%20Optimized%20for%20Psat%204-15-21.pdf [viimati kasutatud 30.04.2024]
- [40] Mini-Circuits suundhargmiku andmeleht. URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/BDCN-20-13+.pdf> [viimati kasutatud 17.02.2024]
- [41] Skyworks raadiosagedusliku diodi SMS7630-079LF dokumentatsioon. URL: <https://www.skyworksinc.com/en/Products/Diodes/SMS7630-Series> [viimati kasutatud 30.04.2024]
- [42] Texas Instruments operatsioonvõimendi TLV9061SIDBVR dokumentatsioon URL: <https://www.ti.com/product/TLV9061/part-details/TLV9061SIDBVR> [viimati kasutatud 30.04.2024]
- [43] Silicon Labs Si4468 transiiveri API dokumentatsioon. URL: https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/EZRadioPRO_R EVC2_API.zip [viimati kasutatud 31.03.2024]
- [44] Guerrilla RF, *Proper Procedures for Powering Up and Powering Down an RF Amplifier*. URL: <https://www.guerrilla-rf.com/support/application/notes/amp-power-up-down-procedures> [viimati kasutatud 22.04.2024]
- [45] Guerrilla RF võimsusvõimendi GRF5504 andmelehe esmane väljaanne URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/777/GRF5504DS-1891813.pdf> [viimati kasutatud 22.04.2024]

Lisa 1– Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Ergo Haavasalu

1 Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „PQ9 standardile vastav pikosatelliidi raadiosidemoodul” mille juhendaja on Ivo Mürsepp

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2 Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

1 Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

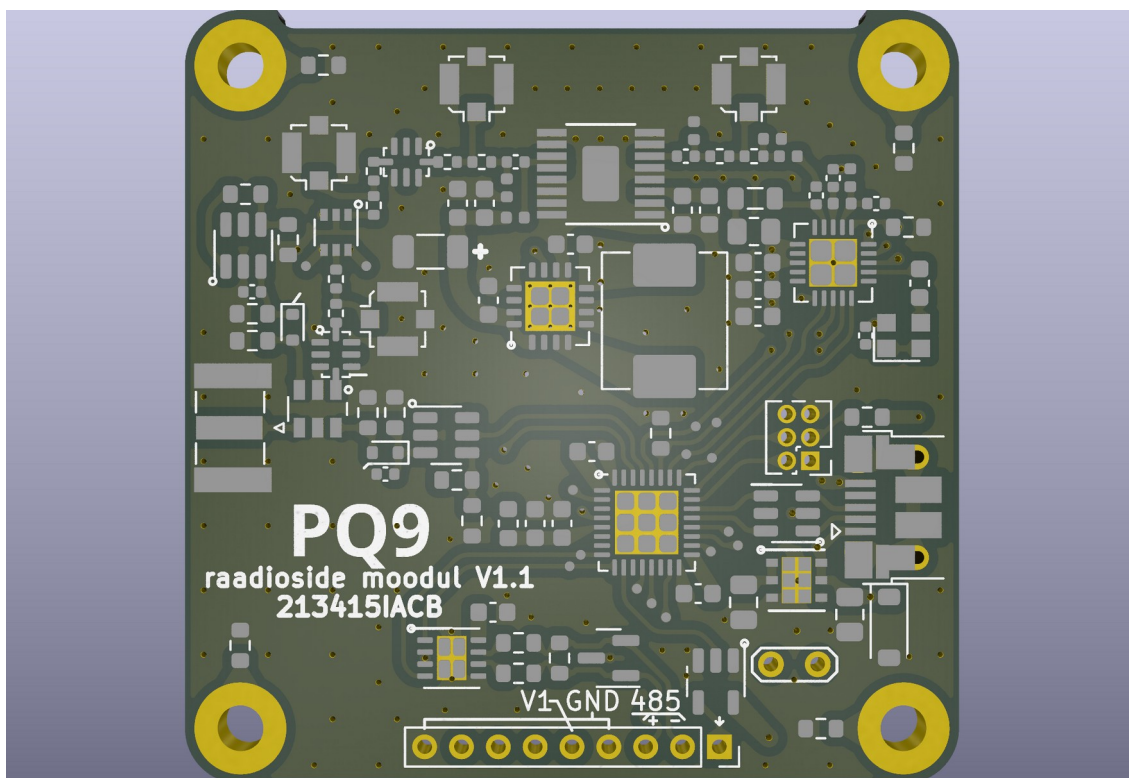
3 Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

11.05.2024

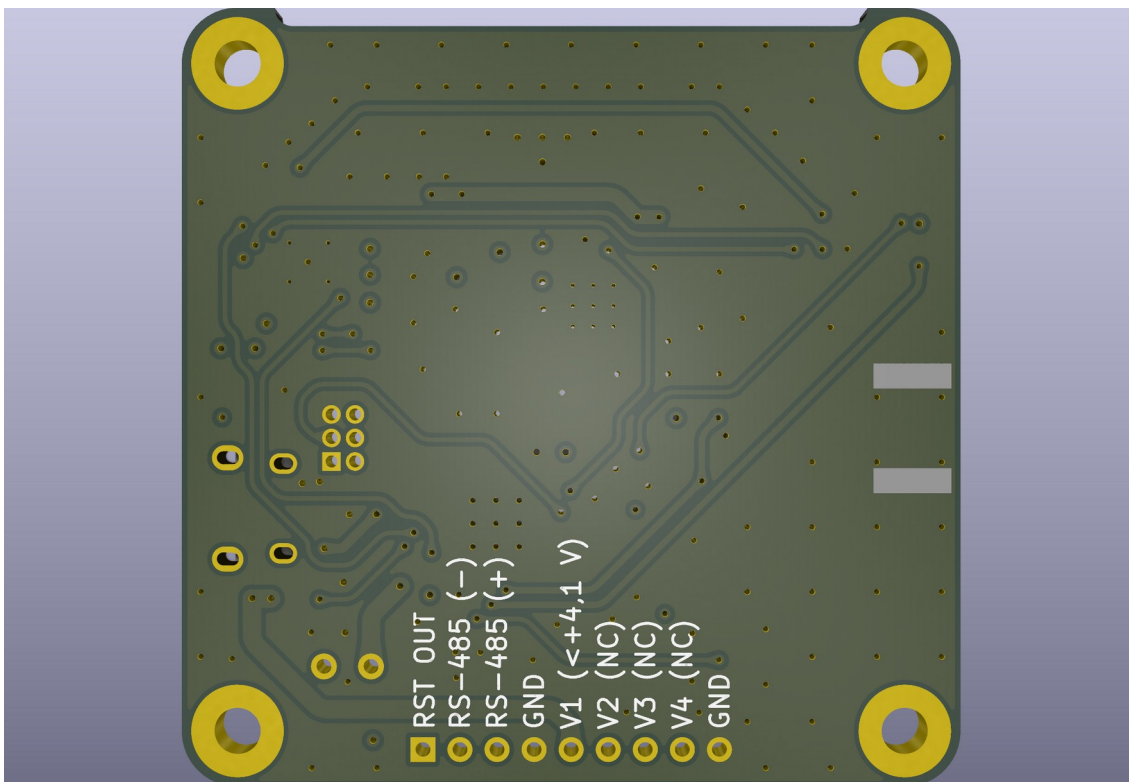
Lisa 2 – Trükkplaatide kihtide graafika

Järgnevalt on esitatud raadiosidemoodulite PCB esi- ja tagavaated ning vasekihtide graafika.

8.1 Raadiosidemoodul V1.1

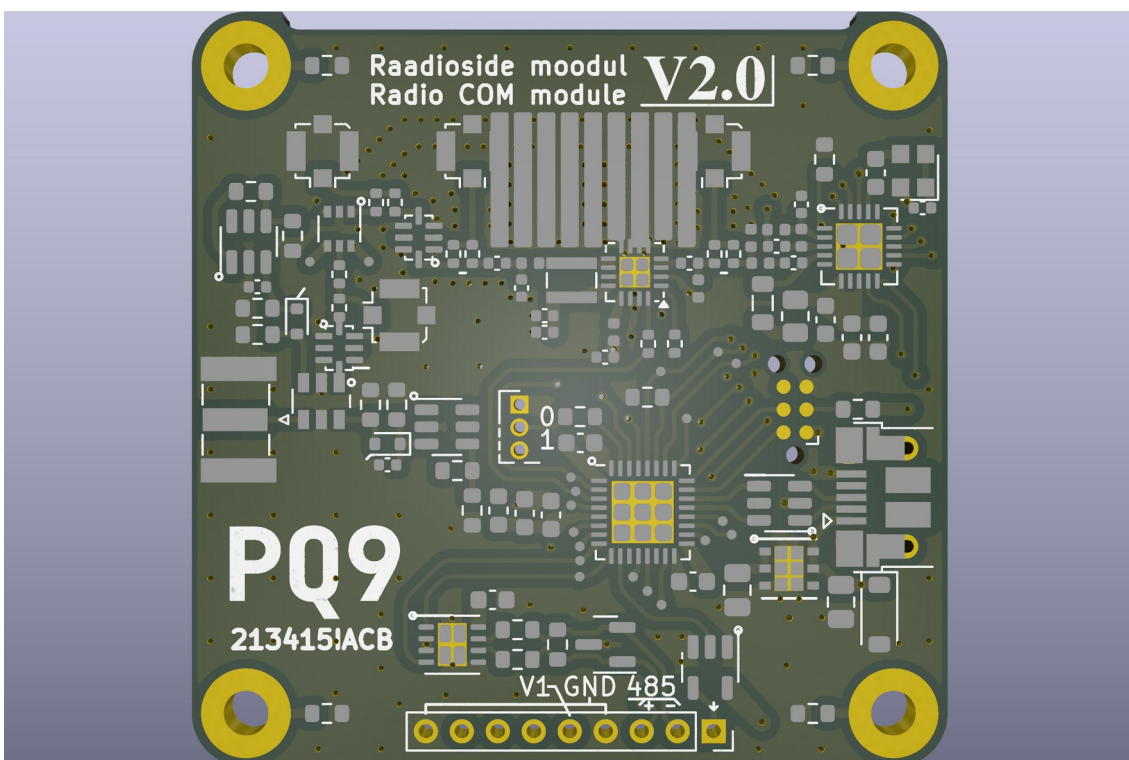


Raadiosidemooduli V1.1 trükkplaadi esivaade.

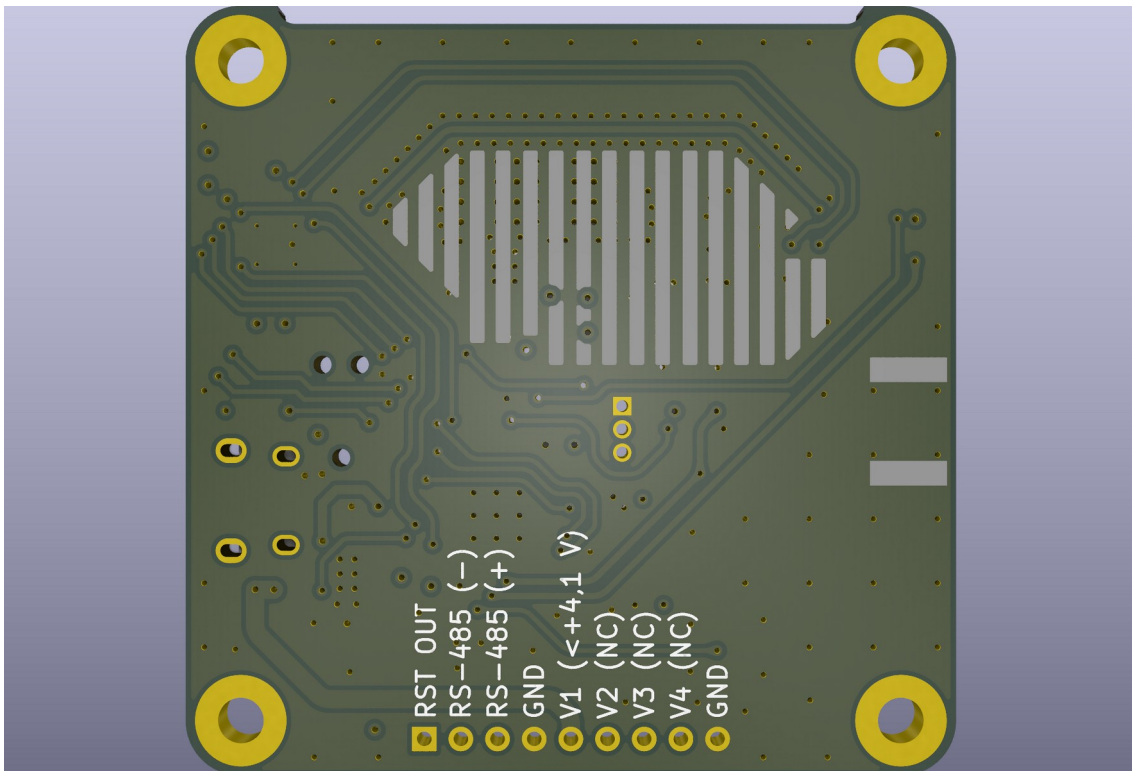


Raadiosidemooduli V1.1 trükkplaadi tagavaade.

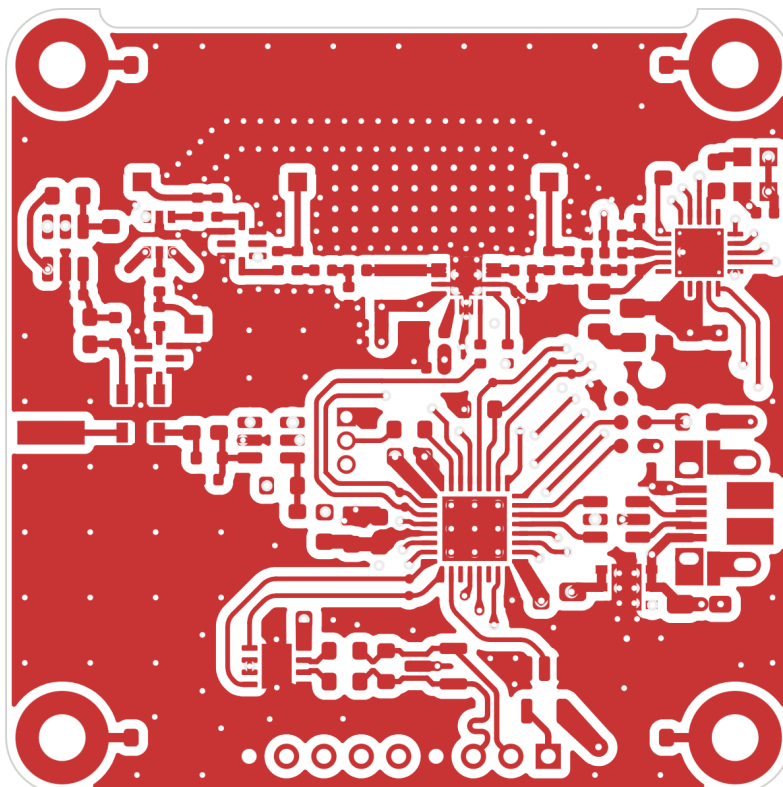
8.2 Raadiosidemoodul V2.0



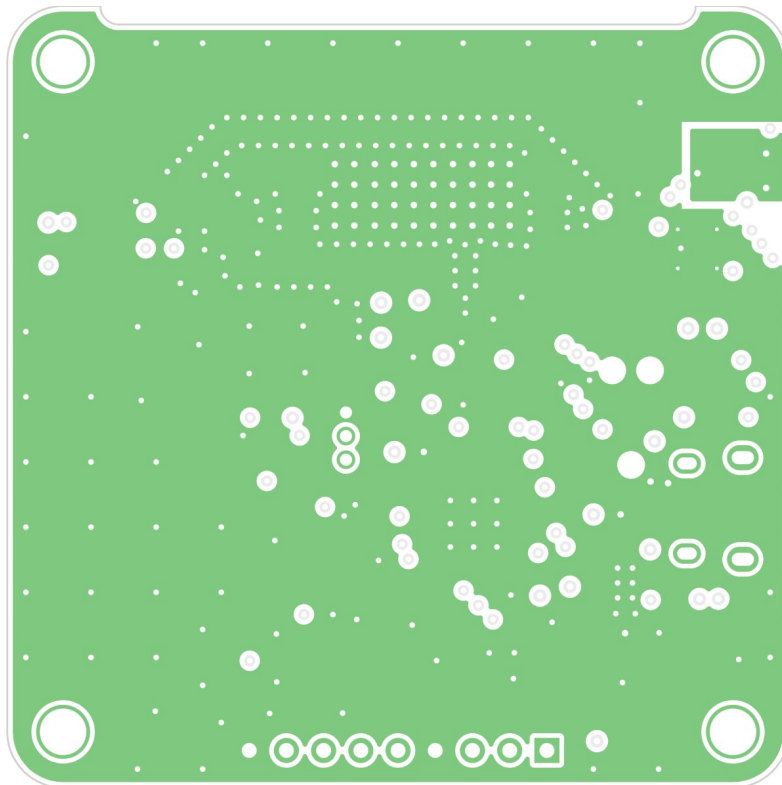
Raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi esivaade.



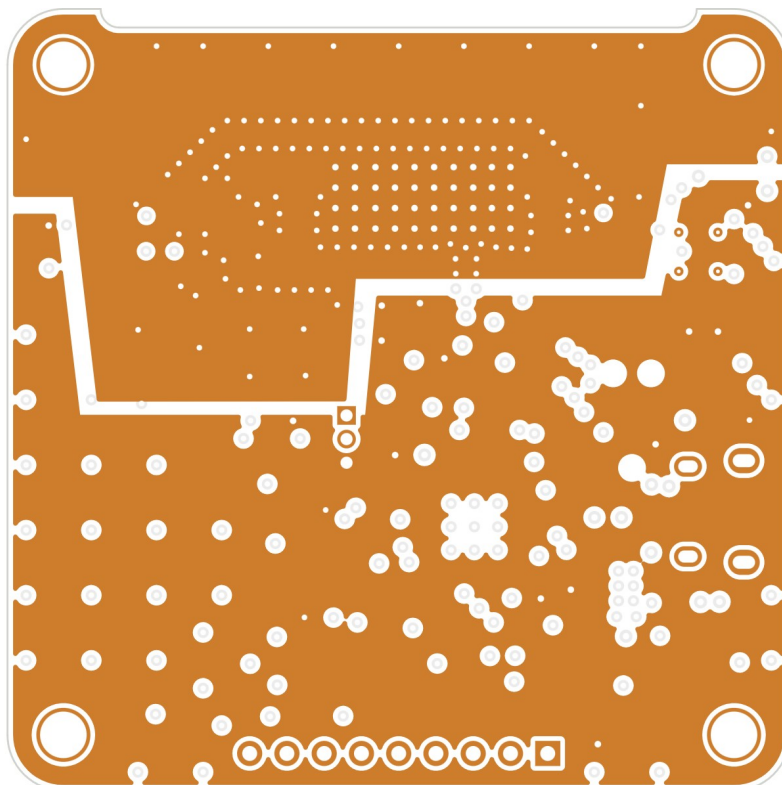
Raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi tagavaade.



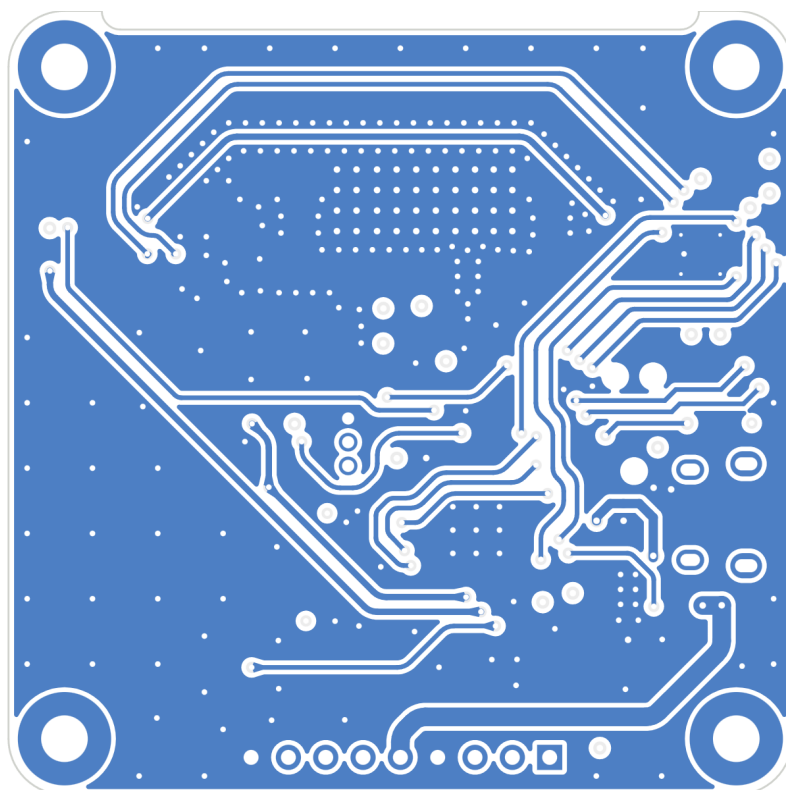
Raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi eesmine vasekiht (F-Cu)



Raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi maanduse vasekiht (In1-Cu)



Raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi 3,3 V ja maanduse vasekiht (In2-Cu)



Raadiosidemooduli V2.0 trükkplaadi tagumine vasekiht (B-Cu)

Lisa 3 – Komponentide nimekiri (BOM)

Järgnevalt on esitatud raadiosidemoodulite V1.1 ja V2.0 koostamiseks vajalike komponentide nimekirjad koos vastavate Mouser ID-dega.

Raadiosidemooduli V1.1 komponentide nimekiri.

Väärtus / nimetus	Mouser ID	Kogus
100 nF	963-HMK107BJ104KA-T	8
1 uF	963-MCAST168AB7105KT	1
10 uF	963-MSAST21GBB5106KT	2
100 nF	581-KGM05AR71E104KN	1
10 uF	963-MLAST168BB5106MT	3
1000 pF	581-KAM15AR72A102KT	1
100 uF (tantaal)	581-TLJA107M10R1400	1
8.2 pF	81-GJM1555C1H8R2FB1D	1
4.7 pF	81-GJM1555C1H4R7GB1D	1
2.2 pF	81-GJM1555C1H2R2GB1D	1
36 pF	81-GCM1555C1H360FA6D	1
2.2 uF	963-MSASU168BB5225KT	2
20 pF	81-GJM1555C1H200FB1D	1
62 pF	81-GCM1555C1H620FA6D	1
200 pF	81-GCM1555C1H201FA6J	1
SM712	576-SM712-02HTG	1
SMF4L5.0A	576-SMF4L5.0A	1
SMS7630-079LF	873-SMS7630-079LF	2
LFCG-42+	139-LFCG-42	2
USB_B_Micro	649-10103594-0001LF	1
Samtec SQT-109-01-LS	200-SQT10901LS	1
Molex MCRF 73412-0110	538-73412-0110	4
SMA	223-CON-SMA-EDGE-S	1
Jumper	538-22-28-4022	1

1 uH	673-PE-0603CLH1R0STS	1
6.8 uH	815-ASPI0630HI6R8T15	1
220 nH	994-0805HP-221XGRC	1
18 nH	81-LQW15AN18NG8ZD	1
62 nH	81-LQW15AN62NG00D	1
20 nH	81-LQW15AN20NG8ZD	1
56 nH	81-LQW15AN56NG8ZD	1
4.1 nH	81-LQW15AN4N1B0ZD	1
47 nH	81-LQW15AN47NG8ZD	1
3.4 nH	81-LQW15AN3N4G80D	1
10 k Ω	71-CRCW060310K0FKEAC	9
10 Ω pulse-proof thick-film	755-ESR03EZPF10R0	2
90 Ω	-	1
2.2 k Ω	603-RT0603BRD072K2L	1
178 Ω	279-RP73PF2A178RBTDF	1
0 Ω	594-MCS04020Z0000ZE0	8
50 Ω	603-RT0603BRE0750RL	2
90 k Ω	754-RR0816P-9092D93C	1
100 k Ω	667-ERA-3AED104V	1
487 k Ω	603-RT0603BRD07487KL	1
74LVC1G125	595-SN74LVC1G125DBVR	1
USBLC6-2SC6	511-USBLC6-2SC6	1
SN65HVD78DRBR	595-SN65HVD78DRBR	1
STM32L412K8U6	511-STM32L412K8U6	1
LD39200	511-LD39200PU33R	1
TPS61092	595-TPS61092RSAR	1
Si4468	634-SI4468-A2A-IMR	1
AS179-92LF	873-AS179-92LF	1
HMC453QS16G	584-HMC453QS16GE	1
TLV9061SIDBVR	595-TLV9061SIDBVR	2
BDCN-20-13+	139-BDCN-20-13	1
ABRACON FT2MNTUM-30.0-T1	815-FT2MNTUM-30.0-T1	1

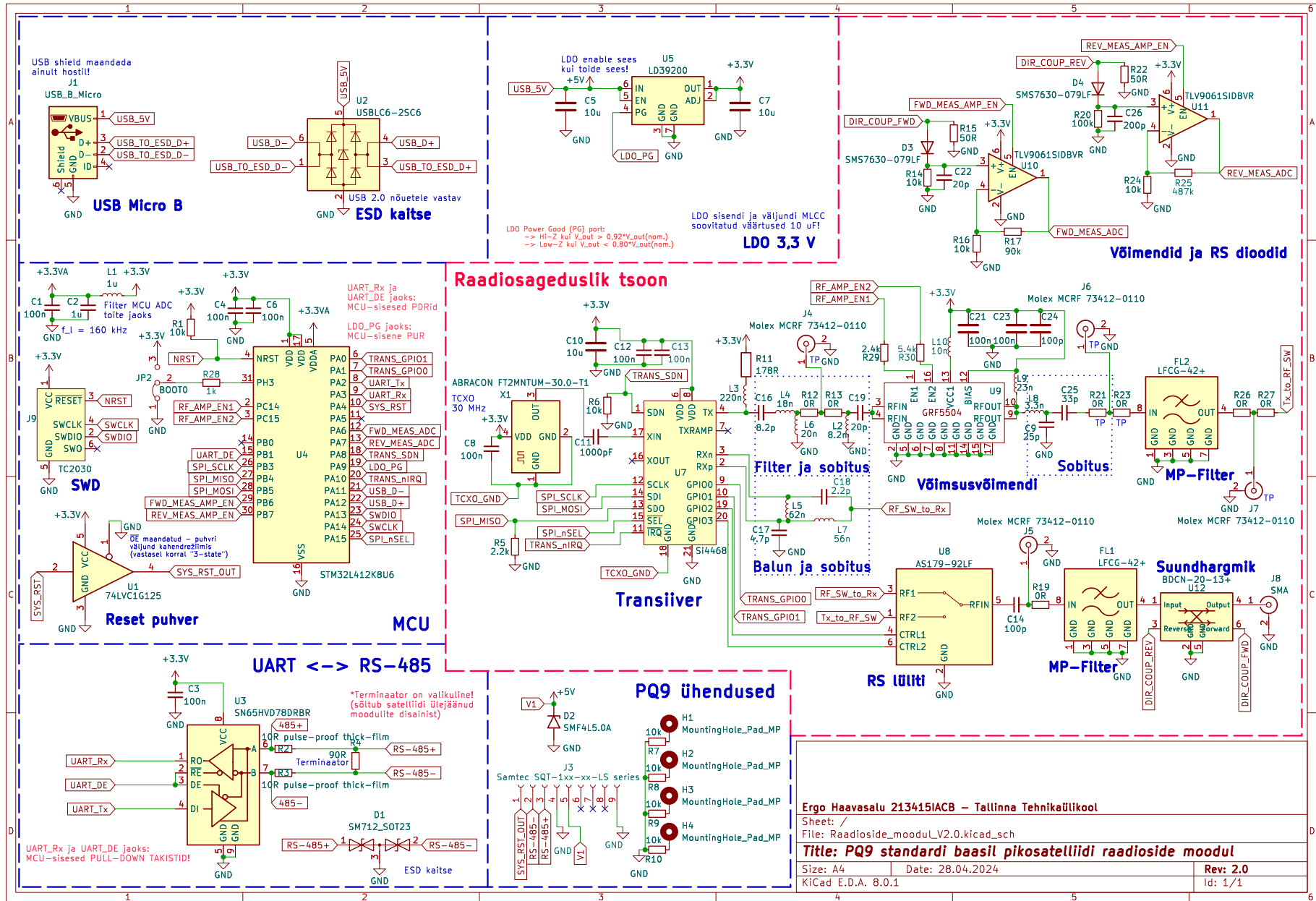
Raadiosidemooduli V2.0 komponentide nimekiri.

Väärtus / nimetus	Mouser ID	Kogus
100 nF	963-HMK107BJ104KA-T	6
1 uF	963-MCAST168AB7105KT	1
10 uF	963-MSAST21GBB5106KT	2
100 nF	581-KGM05AR71E104KN	3
10 uF	963-MLAST168BB5106MT	1
1000 pF	581-KAM15AR72A102KT	1
8.2 pF	81-GJM1555C1H8R2FB1D	1
4.7 pF	81-GJM1555C1H4R7GB1D	1
2.2 pF	81-GJM1555C1H2R2GB1D	1
20 pF	81-GJM1555C1H200FB1D	2
200 pF	81-GCM1555C1H201FA6J	1
25 pF	603-CC0402JRNPO9BN25	1
100 pF	80-C0402C101K3RAUTO	1
33 pF	81-GRM1555C1E330JA1D	1
SM712	576-SM712-02HTG	1
SMF4L5.0A	576-SMF4L5.0A	1
SMS7630-079LF	873-SMS7630-079LF	2
LFCG-42+	139-LFCG-42	2
USB_B_Micro	649-10103594-0001LF	1
Samtec SQT-109-01-LS	200-SQT10901LS	1
Molex MCRF 73412-0110	538-73412-0110	4
SMA	223-CON-SMA-EDGE-S	1
Jumper	855-M50-3530342	1
1 uH	673-PE-0603CLH1R0STS	1
220 nH	994-0805HP-221XGRC	1
18 nH	81-LQW15AN18NG8ZD	1
62 nH	81-LQW15AN62NG00D	1
20 nH	81-LQW15AN20NG8ZD	1
56 nH	81-LQW15AN56NG8ZD	1
8.2 nH	81-LQW15AN8N2G00D	1
3.3 nH	81-LQW15AN3N3G8ZD	1
23 nH	994-0908SQ-23NGLC	1
10 nH	81-LQW15AN10NG80D	1

10 kΩ	71-CRCW060310K0FKEAC	9
10 Ω pulse-proof thick-film	755-ESR03EZPF10R0	2
90 Ω	-	1
2.2 kΩ	603-RT0603BRD072K2L	1
178 Ω	279-RP73PF2A178RBTDF	1
0 Ω	594-MCS04020Z0000ZE0	8
50 Ω	603-RT0603BRE0750RL	2
90 kΩ	754-RR0816P-9092D93C	1
100 kΩ	667-ERA-3AED104V	1
487 kΩ	603-RT0603BRD07487KL	1
1 kΩ	667-ERA-3AEB102V	1
2.4 kΩ	603-RP0402BRD072K4L	1
5.4 kΩ	603-RC0402FR-075K36L	1
74LVC1G125	595-SN74LVC1G125DBVR	1
USBLC6-2SC6	511-USBLC6-2SC6	1
SN65HVD78DRBR	595-SN65HVD78DRBR	1
STM32L412K8U6	511-STM32L412K8U6	1
LD39200	511-LD39200PU33R	1
Si4468	634-SI4468-A2A-IMR	1
GRF5504	459-GRF5504	1
AS179-92LF	873-AS179-92LF	1
TLV9061SIDBVR	595-TLV9061SIDBVR	2
BDCN-20-13+	139-BDCN-20-13	1
ABRACON FT2MNTUM-30.0-T1	815-FT2MNTUM-30.0-T1	1

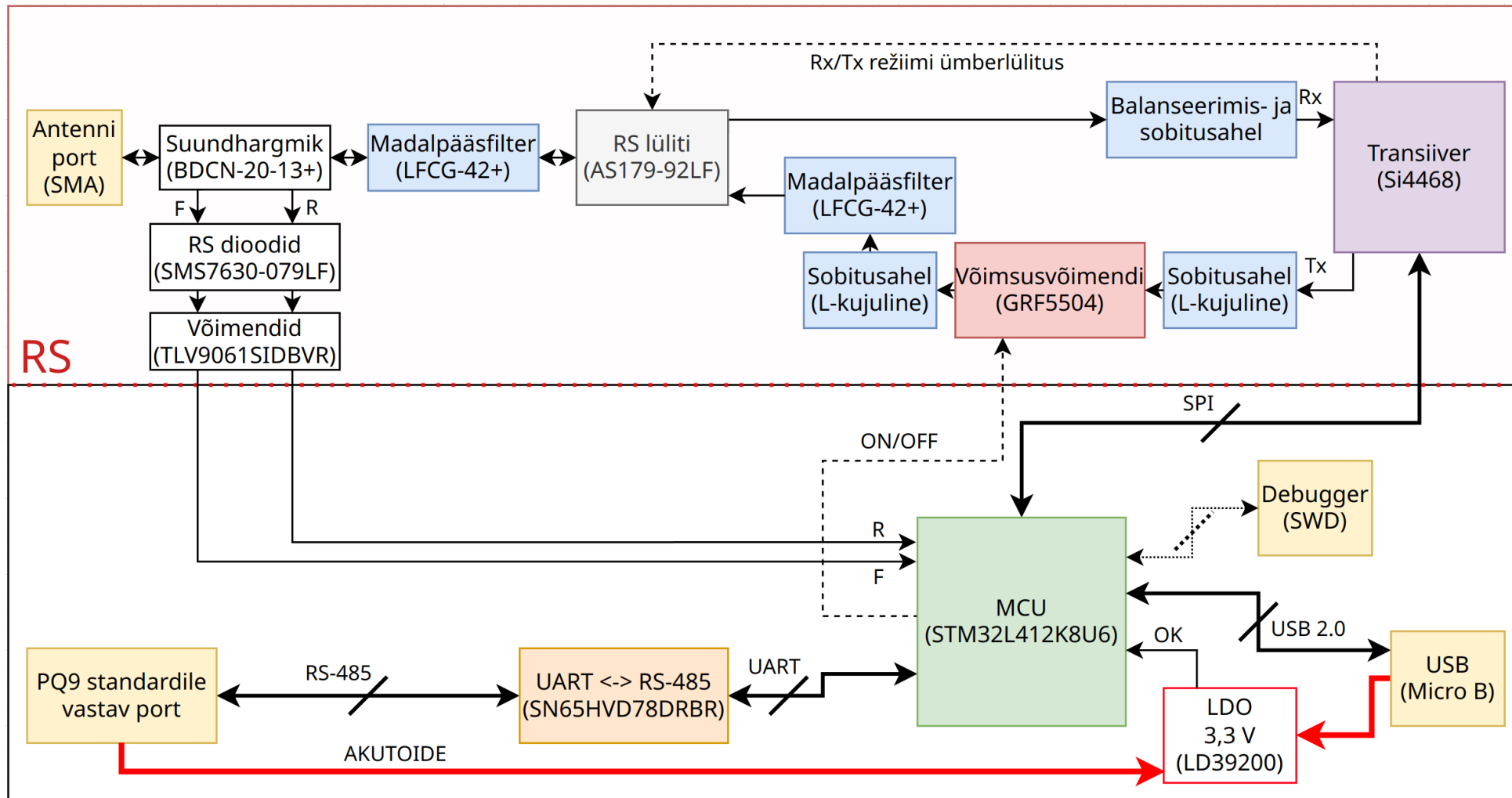
Lisa 4 – Skeemid

Järgnevalt on esitatud raadiosidemoodulite V1.1 ja V2.0 põhimõtteskeemid ja mooduli V2.0 plokk-skeem.



Ergo Haavasalu 213415IACB – Tallinna Tehnikaülikool	
Sheet: /	File: Raadioside_moodul_V2.0.kicad_sch
Title: PQ9 standardi baasil pikosatelliidi raadioside moodul	
Size: A4	Date: 28.04.2024
KiCad E.D.A. 8.0.1	Rev: 2.0
	Id: 1/1

Raadiosidemooduli V2.0 põhimõtteskeem.



Raadiosidemooduli V2.0 plokk-skeem.