

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkasuunnittelu

2017

Toni Oinonen

LANGATTOMAN MITTAUSJÄRJESTELMÄN RADION SUUNNITTELU JA TESTAUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikan koulutusohjelma | Elektroniikkasuunnittelu

2017 | 32

TkT Timo Tolmunen, DI Riku Lindström

Toni Oinonen

LANGATTOMAN MITTAUSJÄRJESTELMÄN RADION SUUNNITTELU JA TESTAUS

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja testata langattoman mittausjärjestelmän radiolähtin-vastaanottimen osuus ja tehdä käytettyjen antennien sovitus 50Ω :iin. Radiopiirin valinta oli tehty jo aiemmin ja sen soveltuvuus mittausjärjestelmän käyttöön tuli testata. Radio-prototyyppilevystä tehtiin diskreetti- ja balun-versiot. Toisessa radiolähttimen etupää (front-end) on toteutettu diskreeteillä komponenteilla ja toisessa ne ovat korvattu balun-komponentilla, joka toimii epäsymmetrisen ja symmetrisen linjan välisenä muuntajana, vähentäen passiivisten komponenttien määrää.

Antennien valinta ja mittaukset aloitettiin nollasta ja työ aloitettiin tekemällä antenni-prototyyppilevy, jonka avulla saatiin testattua valmistajan referenssiantennit sekä niihin tehdyt muutokset. Työhön kuului myös radiopiirin radiolähttimen standardinmukaiset mittaukset.

Työn toimeksiantajana on Pietiko Oy, joka myy ja nykyisin myös valmistaa omia mittalaitteita. Radiopiiri tulee heidän suunnittelemaan ja valmistamaan langattomaan mittausjärjestelmään.

Lopputuloksena opinnäytetyöstä saatiin valikoitua kytkennän balun-versio lopputuotteeseen sekä tehtiin standardinmukaiset testit ja mittaukset lähettimelle. Lisäksi lopputuotteeseen valittiin sopivin antenni mittausten ja testien perusteella sekä tehtiin antennille paras mahdollinen impedanssisovitus huomioiden laitteen kotelointi ja muu mekaniikka antennin ympärillä.

ASIASANAT:

langaton tiedonsiirto, radio, radioverkot, antenni

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics

2017 | 32

D.Sc. (Tech.) Timo Tolmunen, M.Sc. Riku Lindström

Toni Oinonen

DESIGNING AND TESTING OF RADIO FOR A WIRELESS MEASUREMENT SYSTEM

The purpose of this thesis was to design and to test the RX/TX-part of a wireless measurement system and also to match the used antennas to 50Ω . The component selection for the radio-IC was already made earlier and its suitability for use in the measuring system was to be tested. Discrete and balun versions of the radio prototype board were made. On the former board the receiver and transceiver side were made with discrete components and on the latter the discrete components were replaced with a balun that is a component that converts between a balanced signal and an unbalanced signal, reducing the amount of needed passive components.

Antenna selection and measurements were started from scratch and the work was started by making an antenna prototype board so that the manufacturer's reference antenna designs and changes to them could be tested. The testing of the transmitter according to the standards was also part of this thesis.

The assignment for the thesis came from Pietiko Oy that sells and currently also manufactures measuring devices. The radio circuit is part of a wireless measuring system that is designed and manufactured by them.

The final results of the thesis were the selection of the balun-version of the radio circuit for the end-product and good impedance match for the enclosed printed circuit board antennas

KEYWORDS:

wireless data transfer, radio, radio networks, antenna

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

1 JOHDANTO	1
2 RADION SUUNNITTELU	2
2.1 CC1201-piiri	2
2.2 KytKentäkaavio	3
2.3 Layout-suunnittelu	4
3 MITTAUSJÄRJESTELYT	6
3.1 SmartRF Transceiver Evaluation Board	6
3.2 SmartRF Studio	6
4 MITTAUKSET	7
5 ANTENNIT JA NIIDEN VIRITYS	17
5.1 Antennien ominaisuuksista tarkemmin	17
5.2 Teoreettinen sovitus	18
5.3 Käytännön sovitus	20
6 LOPPUPÄÄTELMÄT	23
LÄHTEET	24

KAAVAT

Kaava 1. Mittausepävarmuuden laskenta	10
Kaava 2. Taajuusreferenssin virhe	10

KUVAT

Kuva 1. CC1201-piirin lohkokaaavio	3
Kuva 2. CC1201-piirin kytkentäkaavio	4
Kuva 3. SmartRF Studio-ohjelmiston pääikkuna	8
Kuva 4. Lähetystaajuuden ja -tehon valinta	9

Kuva 5. Mitattu teho ja taajuusvirhe	9
Kuva 6. Lähetysvirheen mittaaminen diskreettilevyllä, kuvassa selvästi näkyvissä läheteeseen kuulumattomat sivupiikit	11
Kuva 7. Transienttitehon mittaaminen	13
Kuva 8. Emissiorajat	14
Kuva 9. Spurious-mittaus	15
Kuva 10. DN038 antenni ja sovituskomponentit	17
Kuva 11. DN024 antenni ja sovituskomponentit	18
Kuva 12. DN038 antennin sovitus Smithin kartan avulla	19
Kuva 13. DN024 antennin sovitus Smithin kartan avulla	20
Kuva 14. Mitattu resonanssitaajuus ilman kotelo	21
Kuva 15. Mitattu resonanssitaajuus kotelon kanssa	22

TAULUKOT

Taulukko 1. Moduloidun signaalin emissiorajat	12
Taulukko 2. Mitatut taajuusarvot	12
Taulukko 3. Mitattu moduloinnin kaistanleveys	14
Taulukko 4. Spurious-emissiorajat	15

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

2-GFSK	gaussinen taajuusavainnus (Gaussian Frequency Shift Keying)
Balun	epäsymmetrisen ja symmetrisen linjan välinen muuntaja
BW	kaistanleveys (Bandwidth)
dB	desibeli
dBm	desibeliä millivolttiin nähden
EMC	sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility)
f	taajuus (frequency)
F	kapasitanssi (Farad)
GPIO	yleiskäyttöinen portti (General Purpose Input/Output)
H	induktanssi (Henry)
IF	välitaajuuskaistanpäästösuodatin (Intermediate Frequency)
ISM	lupavapaa radiotaajuuskaista (Industrial, Scientific and Medical)
RF	radiotaajuus (Radio Frequency)
RX	vastaanottotila
SAW	pinta-aaltosuodatin (Surface Acoustic Wave)
SPI	sarjamuotoinen oheislaiteväylä (Serial Peripheral Interface)
Spurious	kaistan ulkopuoliset- ja harhalähetteet
SRD	milliwatti-teholuokan laitteita, jotka käyttävät joitakin ISM-kaistoja
TCXO	lämpötilakompensoitu kide (Temperature Controlled Crystal Oscillator)
TI	Texas Instruments
TrxEB	evaluointialusta
TX	lähetystila

W

watti

WLAN

langaton lähiverkkotekniikka (Wireless Local Area Network)

1 JOHDANTO

Langattomat mittausjärjestelmät ovat yleistymässä teollisuudessa ja erityisesti rakennusteollisuudessa. Esimerkiksi betonin kuivumisen seurantajärjestelmä voi säästää vuositasolla palkkakustannuksia tuhansia euroja, kun mittauksia ei tarvitse käydä tekemässä paikan päällä. Myös erilaiset pilvipalvelut tulevat yhä suosituimmiksi. Pilvipalvelussa kaikki mitattu tieto kerätään nimensä mukaisesti ”pilveen” eli tavanomaisesti loggerijärjestelmän valmistajan tarjoamaan internetpohjaiseen tulospalveluun tai verkkojärjestelmään.

Pietiko Oy on lähtenyt kehittämään omaa dataloggerijärjestelmää pilvipalveluajattelua hyödyntämällä. Laitteiston toimintavarmuuteen ja energiatehokkuuteen on panostettu ja ne on otettu huomioon mm. signaalin vastaanotossa sekä siinä, että laitteisto on sleep-tilassa, eli se ”nukkuu” suurimman osan ajasta ja herää siinä vaiheessa kun esim. lämpötilaa mitataan tai kun radiolinkki on aktiivinen. Radiolinkin toimintavarmuuteen taas on panostettu vastaanottimessa olevan antennidiversiteetin avulla. Käytössä on kahdet antennit; vastaanotin valitsee aina sen antennin käyttöön, jossa signaalinvoimakkuus on suurempi.

Lassi Ruokosen 2016 julkaisema insinööri työ käsittelee tätä samaa aihetta, mutta pääpaino hänen työssään oli keskittyä radiopiirin energiatehokkuuteen sekä radiolinkin protokollaan. Mainittu insinööri työ on toiminut apuna tätä työtä tehdessä. [1]

Työn pääpainona ovat radiolähettimen standardinmukaiset mittaukset, sekä lopputuotteessa käytettävien antennien valinta ja optimointi lopputuotteen mekaniikassa. Lisäksi prototyypilevyn kytkentäkaavioon ja piirilevylayout suunnitteluun luodaan katsaus. Lähteinä on käytetty suurimmaksi osaksi erilaisia datalehtiä ja ETSI:n standardia.

2 RADION SUUNNITTELU

Mittausjärjestelmän radiopiirinä on käytössä Texas Instrumentsin, myöhemmin käytetään lyhennettä TI, valmistama CC1201 RF-piiri (Radio Frequency). Se valittiin lopputuotteeseen sen pienen virrankulutuksen sekä hyvän linkkibudjetin ansiosta. Lisäksi se täyttää mm. Euroopan Unionin radiolähetysäännökset. Taajuusalueena toimii lupavaa 868 MHz alue, eli tällä taajuusalueella toimiva radiolähetin ei tarvitse viestintäviraston myöntämää radiolupaa. Varsinaiseksi lähetystaajuudeksi laitteistoon tulee 868,3 MHz.

Radion etupään (front-end) toteutukseen on kaksi vaihtoehtoista ratkaisua. Piirin valmistajan referenssikytkeä on tehty diskreeteillä komponenteilla, mutta toisena vaihtoehtona on balunia hyödyntävä ratkaisu, jolloin komponenttimäärää saadaan huomattavasti pienemmäksi ja piirilevysuunnittelua yksinkertaisemmaksi. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa käytetty balun-komponentti on Johanson Technologyn valmistama, erityisesti TI:n CC112x, CC117x ja CC12xx -sarjojen radiopiireille suunniteltu epäsymmetrisen ja symmetrisen linjan välinen muuntaja. [2]

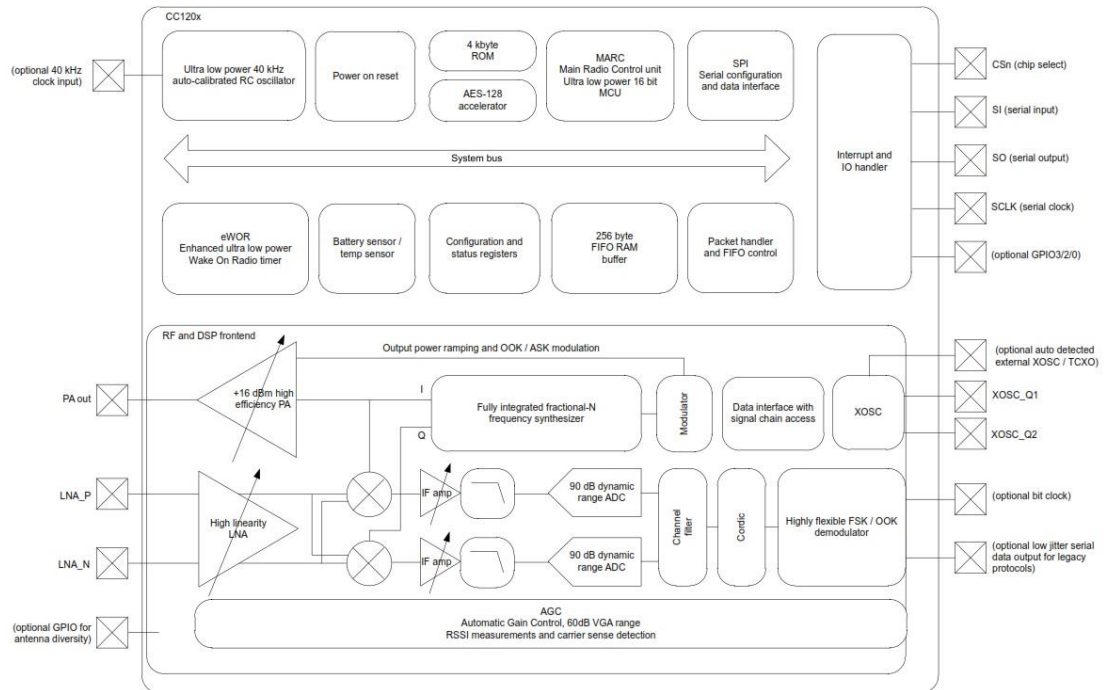
2.1 CC1201-piiri

CC1201 on täysin integroitu yhden piirin ratkaisu radiotaajuuksien lähetykseen ja vastaanottoon. Siinä on hyvä suorituskyky pienellä tehonkulutuksella. Myös kaikki tarvittavat suotimet ovat sisäänrakennettuna, joten kalliita Surface Acoustic Wave ja Intermediate Frequency (välitaajuus) eli SAW- ja IF-suotimia ei tarvita.

Piiri on erityisesti tarkoitettu lyhyen kantaman milliwatti-teholuokan, eli SRD-laitteille, jotka käyttävät alun perin teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön tarkoitettuja ISM-taajuusalueita: 164–190 MHz, 410–475 MHz ja 820–950 MHz.

CC1201 tarjoaa tuen paketinhallinnalle, datapuskuroinnille, purskelähetykselle, vapaan kanavan arvioinnille, linkin laadun osoitukselle ja Wake-On-Radio-toiminnolle. (Kuva 1) Piiriä ohjataan sarjamuotoisen oheislaitteväylän, Serial Peripheral Interfacen eli SPI-rapinnan avulla. Tyypillisesti piiriä ohjataan mikrokontrollerin avulla ja se tarvitsee toimi-

akseen vain vähän ulkoisia komponentteja. Piirissä pienimmät kanavasuodattimen kais-
tanleveydet ovat 50 kHz tai yli, joten se on hyvä ja edullinen ratkaisu sovelluksiin, joissa
ei tarvita erittäin kapeakaistaista lähetettä [3].

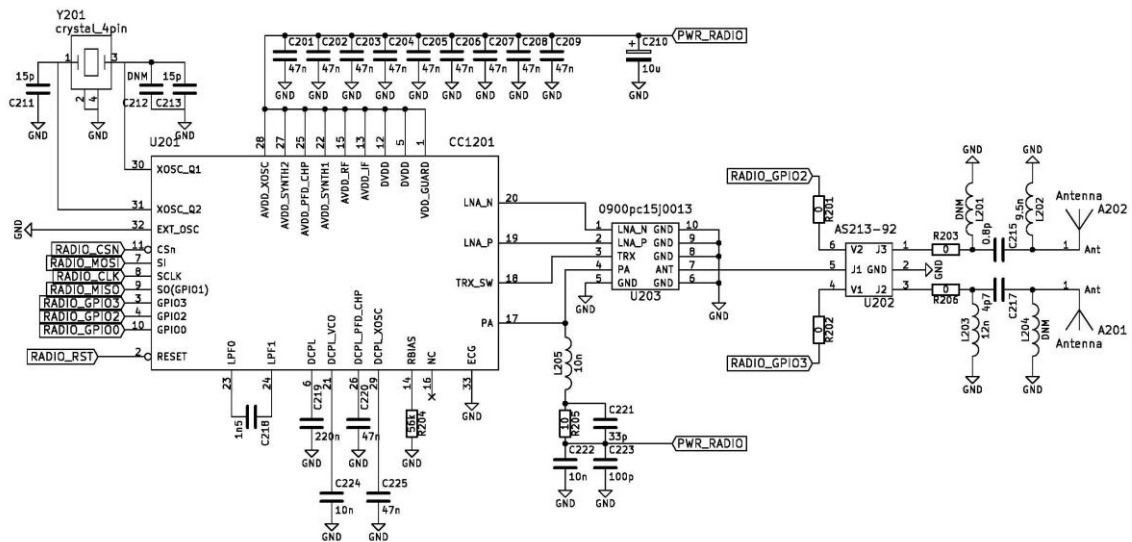


Kuva 1. CC1201-piirin lohkokaavio

2.2 KytKentäkaavio

KytKentäkaavio noudattaa suurimmilta osiltaan valmistajan referenssikytkentää. Piirissä on sisäänrakennettu korkean tarkkuuden taajuusarviointi ja kompensointirekisterit. Taa-
juuskompensointilohko mittaa taajuuseroa vastaanotetusta signaalista lasketun kanto-
aaltotaajuuden sekä oman kantoaaltotaajuuden välillä ja näiden erotus saadaan kom-
pensoitua. Tämä mahdollistaa halvempien kiteiden käytön piirin kanssa. Tarvittaessa
CC1201-piiriä (Kuva 2) voidaan käyttää myös lämpötilakompensoidun kiteen TCXO:n
kanssa, jonka avulla kiteen kelloaajuus saadaan pidettyä tarkemmin paikallaan [3].
TCXO:n huonot puolet ovat sen kalliimpi hinta ja virrankulutus; se kuluttaa huomattavasti
enemmän virtaa verrattuna tavalliseen kiteeseen, koska siinä on sisäänrakennettu läm-
pötilakompensointi [4].

RX/TX-osasta tehtiin kaksi eri versiota testejä varten, toinen diskreeteillä komponenteilla ja toinen balun-versiona. Balun-versiota käyttämällä saatiin piirilevyiltä korvattua 14 komponenttia ja erityisesti kelojen korvaus paransi piirin toimintaa, mikä tuli selväksi lähetyksen puolen mittauksia tehdessä. Tämä myös säästi piirilevyiltä tilaa, mikä oli suuri hyöty erityisesti lähettimien piirilevyillä.



Kuva 2. CC1201-piirin kytkentäkaavio

Kuvassa 2 nähtävissä valinnainen TCXO sekä balun ja RF-kytkin lähetyksen ja vastaanottopuolella.

2.3 Layout-suunnittelu

Lopputuotteeseen tulee kaksi antennia, jotka ovat neljännesaallonpituuden päässä toisistaan. CC1201-piiriin ja antennien tulee radiotaajuusalueella toimiva RF-kytkin, joka vaihtaa tarvittaessa käytettävää antennia. Tämä takaa hyvän signaalitason myös huonoissa olosuhteissa. Neljännesaallon päässä toisistaan olevilla antennilla pyritään erityisesti välttämään monitie-etenemisen aiheuttamat häipymät (multipath fading) sellaisessa ympäristössä, missä monitie-etenemistä tapahtuu, esim. rakennusten sisätiloissa [5].

RF-kytkin on Skyworksin valmistama, 100 MHz – 3 GHz taajuusalueella toimiva kytkin jota käytetään mm. WLAN (langaton lähiverkkotekniikka, Wireless Local Area Network), Bluetooth ja tietoliikennesovellutuksissa. Taajuudella 868,3 MHz sen eristysvaimennus

on tyypillisesti 27 dB. Huonona puolena samalla taajuusalueella kytkentähäviö on tyypillisesti 0,3 dB. Tämä on kuitenkin hyvin tyypillinen ja suhteellisen pieni RF-kytkimen vaimennus. [6]

Radiopiiri kuuntelee jatkuvasti molempia antennia ja kytkee päälle sen, jossa signaalitaso on korkein. RF-kytkin on yhdistetty CC1201-piirin GPIO-nastoihin ja näiden avulla voidaan ohjata RF-kytkimen toimintaa. [3]

3 MITTAUSJÄRJESTELYT

Radiopiirin toiminta testattiin TrxEB-evaluointilevyn (transceiver evaluation board) avulla. Testattava prototyyppilevy kytkettiin evaluointilevyyn ja tätä kautta radiopiirin säätöjä ja rekisteriarvoja voitiin muuttaa. Levyn mukana tulevan ohjelmiston avulla asetusten muuttaminen on erittäin helppoa. [7]

3.1 SmartRF Transceiver Evaluation Board

SmartRF-evaluointilevyä käytetään useissa TI:n vähäisen virrankulutuksen kehitysalustojen RF-lähetin ja – vastaanottolaitteissa. Sitä voidaan ohjata suoraan siinä olevan näytön ja näppäimien avulla, mutta tietokoneen ja SmartRF Studion avulla voidaan levyä ohjata huomattavasti monipuolisemmin, ohjelmiston avulla kaikkia CC1201-piirin asetuksia ja rekisteriarvoja voidaan muuttaa. [7] Rekisteriarvojen muutosta tarvittiin mittauksissa, koska prototyyppilevyllä oli kaksi antennia ja näistä vain toiseen tarvitsi ajaa signaalia. Antennien välillä siirryttiin RF-kytkimen avulla.

3.2 SmartRF Studio

Ohjelmiston avulla voidaan muuttaa CC1201-piirin asetuksia ja rekisteriarvoja monipuolisesti. Tärkeimpiä arvoja, mm. lähetystaajuuden ja lähetystehon valinta voidaan tehdä graafisen käyttöliittymän avulla. Harvemmin tarvittavat säädöt tapahtuvat rekisteriarvoja muuttamalla. Rekisterin avulla CC1201-piirin GPIO-pinnien logiikkatasoja voidaan säätää ja samalla RF-kytkimen ”asento” muuttuu.

Säädetyt rekisteriarvot on myös mahdollista ottaa ulos ohjelmasta tarvittaessa esim. ohjelmistokoodiin. Radiopiirin kaikki asetukset voidaan siis asettaa SmartRF Studion avulla halutunlaiseksi ja sen jälkeen kaikki rekisteriarvot voidaan ottaa ulos valmiina pakettina.

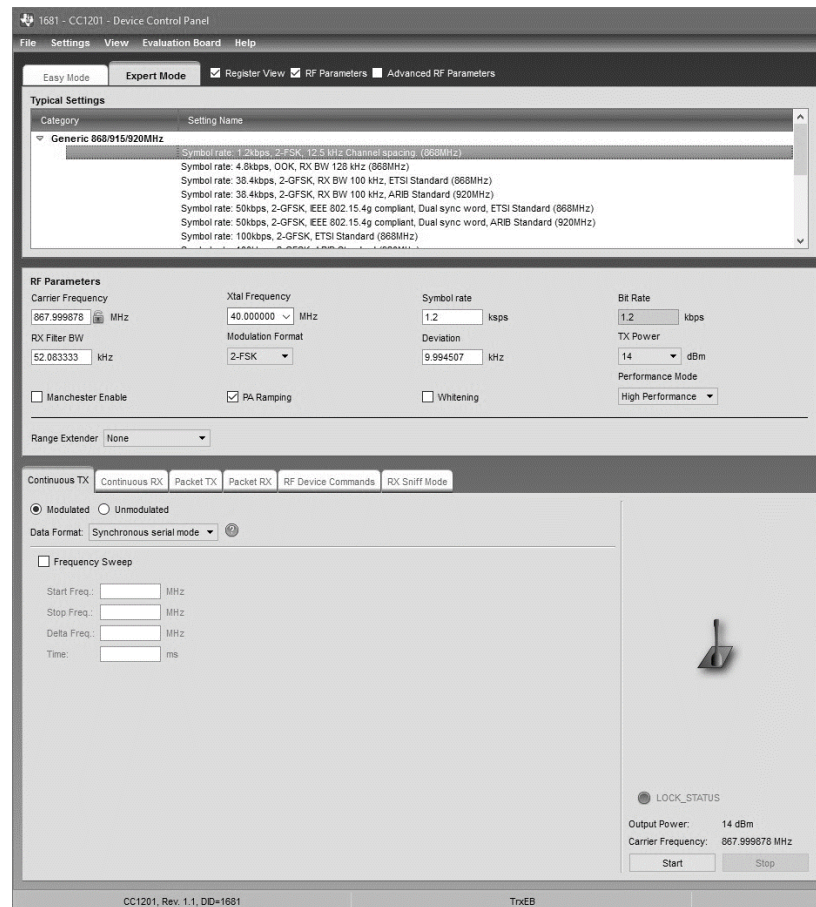
4 MITTAUKSET

Aikataulullisista syistä ja koska vastaanottapuolen mittauksien käytännön järjestelyt olisivat olleet turhan vaativat, työhön valikoitui vain lähetyspuolen mittaukset.

Mittaukset on toteutettu ETSI EN 300 220-standardin mukaisesti. Mittaukset koostuvat lähetystaajuuden virheen mittauksesta, lähetystehon mittauksesta, transienttien mittauksesta, modulointikaistanleveyden mittauksesta ja ei-haluttujen spuriouksien mittauksesta [8]. Lähetystaajuuden vakauden mittaus matalalla syöttöjännitteellä jäi mittausten ulkopuolelle koska loggerijärjestelmän vastaanottimessa sekä lähettimissä on jännitteen regulointi.

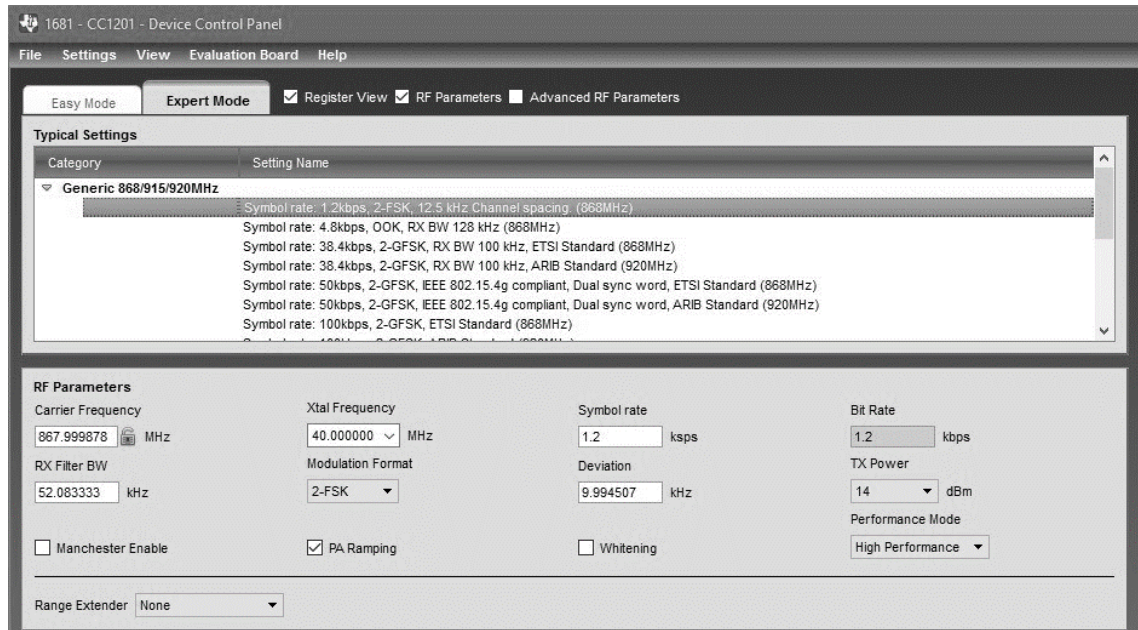
Mittaukset oli tarkoitus suorittaa balun-versiolle sekä diskreettiversiolle, mutta jo lähetystaajuuden virhettä mitattaessa balun-versio osoittautui suorituskyvyltään paremmaksi, joten diskreettilevyn kanssa ei suoritettu lähetystaajuuden virheen lisäksi muita mittauksia.

Mittauksissa tarvittavat säädöt ja rekisteriarvojen muutokset suoritettiin SmartRF Studion avulla, jolla ohjattiin evaluointialustaa ja siinä kiinni olevaa prototyyppilevyä.



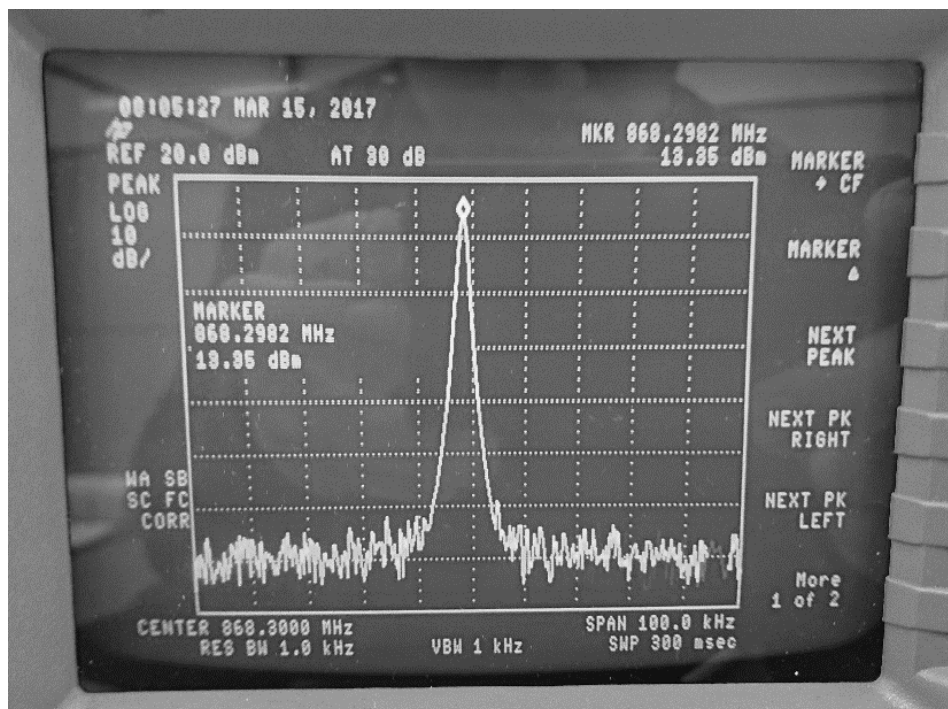
Kuva 3. SmartRF Studio-ohjelmiston pääikkuna

Lähetystaajuuden virheen mittausta oli mittauksista nopein suorittaa. Evaluointilevyn ohjelmistosta säädettiin lähetystaajuudeksi 868,3 MHz ilman modulointia, lähetystehoksi säädettiin 14 dBm ja spektrianalyysattorilla mitattiin lähetystaajuus sekä -teho. Lähetystaajuudeksi asetui kuitenkin 868,299866 MHz johtuen piirin digitaalisen taajuussyntetisaattorin rajallisesta taajuuden tarkkuudesta [3].



Kuva 4. Lähetystaajuuden ja -tehon valinta

Spektrianalysaattorin resoluutiokaistanleveys eli RBW ja taajuusväli säädettiin tarpeeksi kapeaksi, että mittaustarkkuus saadaan riittäväksi. Tässä tapauksessa resoluutiokaistanleveys oli säädetty 1 kHz:iin ja taajuusväli 100 kHz:iin.



Kuva 5. Mitattu teho ja taajuusvirhe

Mitatuksi lähetystehoksi saatiin 13,35 dBm ja lähetystaajuudeksi 868,298 MHz. Lähetystaajuuden virheeksi saatiin siis $868,299 \text{ MHz} - 868,298 \text{ MHz} = 1 \text{ kHz}$. Sallittu virhe on $\pm 12,5 \text{ kHz}$ alueella $>500 \text{ MHz} - 1 \text{ GHz}$, joten mitattu lähetysvirhe 2,866 kHz on hyväksyttävissä. [8]

Lähetystehon mittauksessa mittausepävarmuus on n. $\pm 6 \text{ kHz}$. Mittausepävarmuus on laskettu kaavalla 1.

Kaava 1. Mittausepävarmuuden laskenta

$$\pm (\text{taajuuslukema} * \text{taajuusreferenssin virhe} + \text{taajuusvälin tarkkuus} + 1 \% \text{ taajuusvälistä} + 20 \% \text{ resoluutiokaistanleveydestä} + 100 \text{ Hz} * N)$$

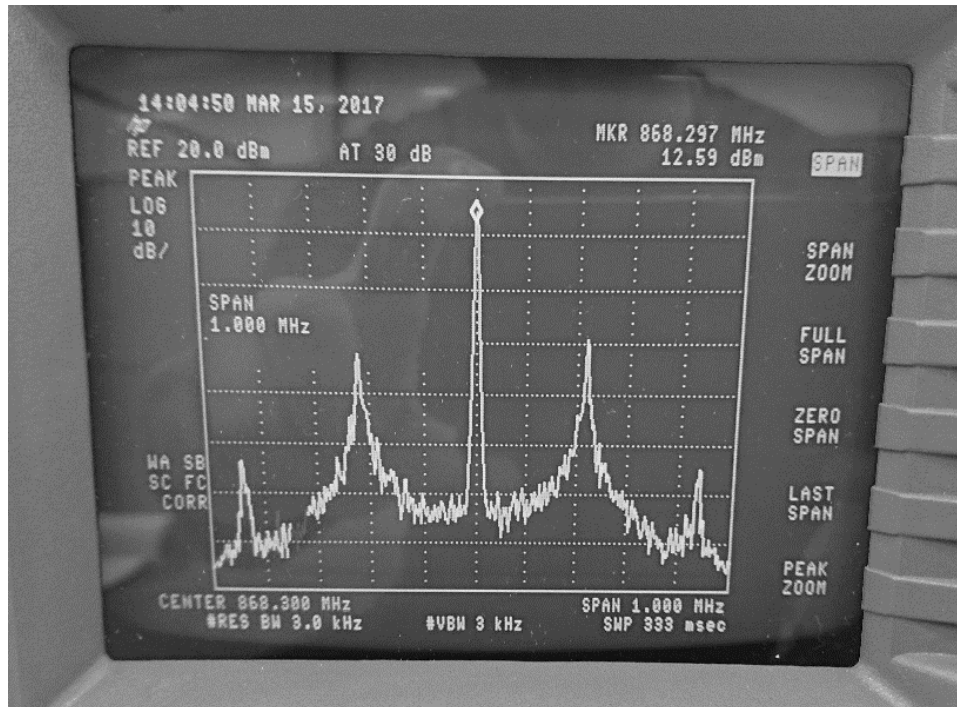
Taajuusvälin tarkkuus on yli 10 MHz alueella $\pm 3 \%$ taajuusvälistä. N on paikallisoskillaattorin harmoninen, tässä käytetään arvoa 1. [9] Taajuusreferenssin virhe saadaan laskettua kaavalla 2.

Kaava 2. Taajuusreferenssin virhe

$$\pm \text{ikäntymisprosentti} * \text{aika viimeisestä kalibroinnista} + \pm \text{lämpötilastabiliteetti} + \pm \text{alkuperäinen saavutettavissa oleva tarkkuus}$$

Kaavan 2 suureet saadaan spektrianalysointorin teknisistä tiedoista; ikäntymisprosentti on $\pm 2 * 10^{-6}$, aika viimeisestä kalibroinnista on 1 vuosi, lämpötilastabiliteetti on $\pm 5 * 10^{-6}$ ja alkuperäinen saavutettavissa oleva tarkkuus on $\pm 0,5 * 10^{-6}$. [9]

Diskreettilevyn lähetystaajuuden virhettä mitattaessa tuli heti selväksi, että levyn mittauksia ei ole järkevää jatkaa.



Kuva 6. Lähetyvirheen mittaus diskreettilevyllä, kuvassa selvästi näkyvissä lähetteeseen kuulumattomat sivupiikit

Lähetyteho oli 12,59 dBm, joka oli huonompi kuin balun-versiolla. Kuvassa 6 on selvästi nähtävissä varsinaisen lähetystaajuuden molemmin puolin sinne kuulumattomat piikit. Tämä johtui oletettavasti komponenttien asettelusta testilevyllä, erityisesti kelojen läheisyydestä, jolloin radiolähete pääsee vuotamaan kelojen välillä. Huolellisemmalla komponenttiasettelulla tämä olisi mahdollisesti vältettävissä, mutta diskreettiversio vie huomattavasti enemmän tilaa piirilevyllä verrattuna balun-versioon ja lähetytstehon häviö on hieman suurempi, joten myyntituotteeseen balun-versio on parempi.

Seuraavana mittauksena oli mitata transienttiteho. Mittaukset suoritettiin spektrianalyysaattorilla, jossa on "vuotava" huippuarvoilmaisim, eli quasi peak detector. Lähettimeen ajetaan moduloitua signaalia, tässä tapauksessa käytössä oli 2-GFSK. Bittinopeus oli 50 kb/s ja lähetytsteho 14 dBm.

Ennen mittauksia täytyi selvittää modulaatiokaistanleveyden reunojen taajuudet f_a ja f_b . Nämä saatiin ETSI EN 300-220 standardin taulukosta. (Taulukko 1).

Taulukko 1. Moduloidun signaalin emissiorajat.

Referenssi- kaistanleveys	Raja	Alempi verhoikäyrän minimitaajuus	Ylempi verhoikäyrän maksimitaajuus
1 kHz	1 μ W	$f_{e, alempi}$	$f_{e, ylempi}$
1 kHz	250 nW	$f_{e, alempi} - 200$ kHz	$f_{e, ylempi} + 200$ kHz
10 kHz	250 nW	$f_{e, alempi} - 400$ kHz	$f_{e, ylempi} + 400$ kHz
100 kHz	250 nW	$f_{e, alempi} - 1000$ kHz	$f_{e, ylempi} + 1000$ kHz

Kullakin RBW-asetuksella mitattiin verhoikäyrän minimi- ja maksimitaajuus halutussa tehopisteessä.

Taulukko 2. Mitatut taajuusarvot

RBW	Raja	Alempi verhoikäyrän minimitaajuus	Ylempi verhoikäyrän maksimitaajuus
1 kHz	1 μ W	868,233 MHz	868,362 MHz
1 kHz	250 nW	868,226 MHz	868,367 MHz
10 kHz	250 nW	868,191 MHz	868,406 MHz
100 kHz	250 nW	867,636 MHz	868,940 MHz

Taulukosta 2 saatiin laskettua ylimpien rivin erotus. $868,362$ MHz – $868,233$ MHz = $0,129$ MHz

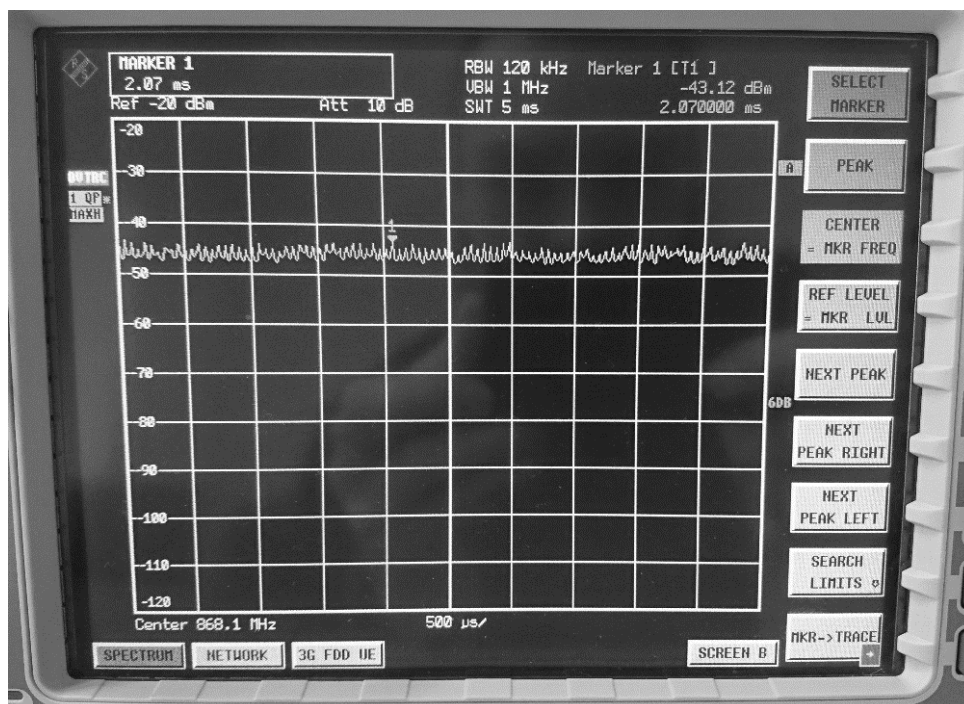
Saatua tulosta käytettiin kaistanleveytenä transienttitehoa mitattaessa.

Spektrianalysointilaitteen resoluutiokaistanleveydeksi asetettiin 120 kHz, taajuusväliksi valittiin nolla (zero span) ja piikin tunnistus sekä maksimi-arvon pito asetettiin päälle.

Koska lähetin luokitellaan standardin mukaan leveäkaistaiseksi [8], spektrianalysointilaitteen keskitaajuus säädettiin 100 kHz sivuun kaistan reunojen molemmin puolin eli taajuuden 868,429 MHz yläpuolelle ja taajuuden 868,171 MHz alapuolelle ($868,3$ MHz \pm 0,129 MHz).

Itse mittausta suoritettiin pätkimällä lähetystä ohjelmiston avulla 10 kertaa 60 s:n aikana lähetykskaistan ylä- ja alareunassa, eli mittauksia suoritettiin yhteensä 20 kertaa. Standardin mukainen mittausta sisältää vähintään 5 lähetyssykliä 60 s:n aikana. Yhden lähetyssyklin minimiaika on 1 s [8]. Mittauksista otettiin muistiin lähettimen maksimipiikit.

Kaistan alapuolella mitattu transienttiteho ei noussut pohjakohinatason yläpuolelle. (Kuva 7). Kaistan yläpuolen mittauksen suurin piikki oli $-44,2$ dBm (38 nW). ETSI:n standardin mukaan suurin sallittu piikki lähetykskaajudella 868,3 MHz on 250 nW (-36 dBm), joten piiri täyttää selvästi standardin määrittämät rajat [8].



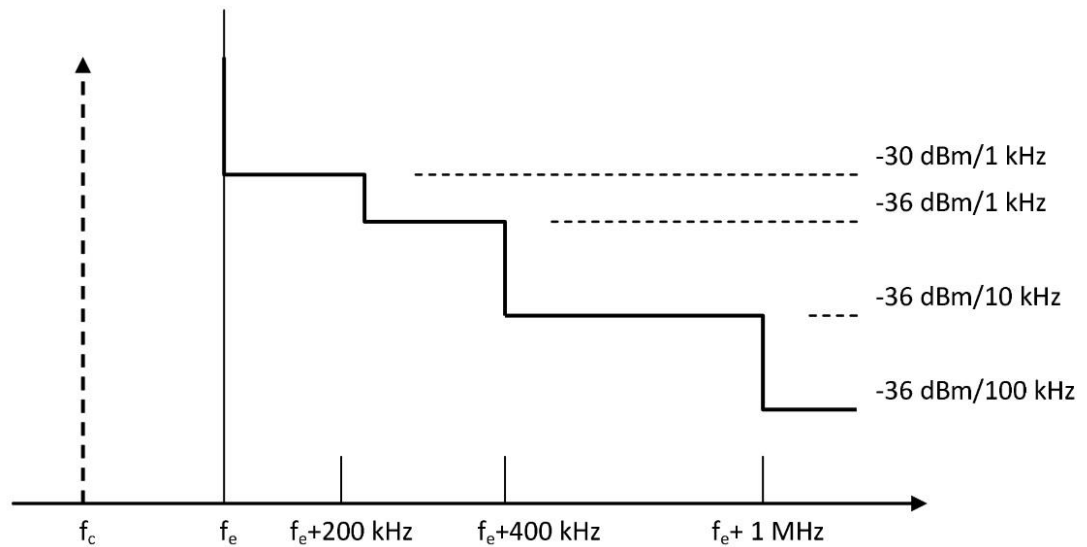
Kuva 7. Transienttitehon mittausta

Transienttitehon mittauksen jälkeen mitattiin moduloinnin kaistanleveys. Tällä saadaan selville sivukaistojen emissiotasot ja varmistettua, että ne pysyvät standardin rajoissa.

Kaistanleveyden mittauksissa käytettiin samoja f_e , f_a ja f_b taajuuksia kuin transienttitehon mittauksissa. Lähetykskaajuus säädettiin 868,3 MHz:iin, moduloinniksi valittiin 2-GFSK ja lähetykskaajuus säädettiin 14 dBm:iin. Resoluutiokaistanleveyttä vaihdetaan mittauksien välillä: 1 kHz, 10 kHz ja 100k Hz.

Moduloidun lähetyksen ollessa käynnissä, molemmiin puolin taajuutta etsitään taulukon 1. mukaiset tehopisteet. Mittaukset suoritettiin 20 kHz taajuusvälillä (span).

Tehopisteistä mitatun taajuuden pitää pysyä taulukon 1 emissiorajojen sisäpuolella.



Kuva 8. Emissiorajat

Taulukosta 3 nähdään, että mitatut taajuudet eivät lähetystaajuuden alapuolella alittaneet, eivätkä lähetystaajuuden yläpuolella ylittäneet standardin emissiorajoja.

Taulukko 3. Mitattu moduloinnin kaistanleveys

RBW / teho	Alempi verho- käyrän minimi- taajuus	Mitattu alempi taajuus	Ylempi verho- käyrän maksimi- taajuus	Mitattu ylempi taajuus
1 kHz / -30 dBm	868 MHz	868,222 MHz	868,6 MHz	868,373 MHz
1 kHz / -36 dBm	867,8 MHz	868,219 MHz	868,8 MHz	868,374 MHz
10 kHz / -36 dBm	867,6 MHz	868,039 MHz	869 MHz	868,430 MHz
100 kHz / -36 dBm	867 MHz	867,665 MHz	869,6 MHz	868,892 MHz

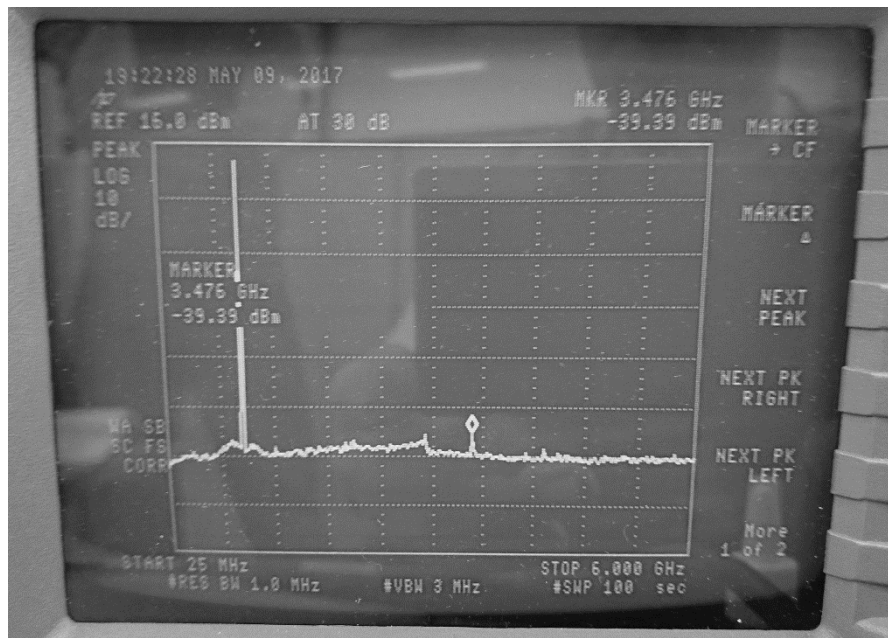
Viimeisenä mittauksena suoritettiin ei-halutut kaistan ulkopuoliset- ja harhalähetteet, myöhemmin käytetään termiä spurious. Koska lähetystaajuus on yli 470 MHz, spektri-

analysaattori säädettiin näyttämään koko taajuusväliä alueella 25 MHz – 6 GHz [8]. Lähettimen modulaattorille ajettiin näennäissatunnaista dataa sekä lähetin asetettiin maksimiteholle ja mahdolliset emissiopiikkien teholumemat otettiin talteen. Emissioita ei tarvitse tarkastaa ± 1000 kHz käytetyn kanavan reunoista [8].

Taulukko 4. Spurious-emissiorajat

Taajuus	Raja (käytössä)	Raja (valmiustilassa)
47 MHz – 74 MHz 87,5 MHz – 118 MHz 174 MHz – 230 MHz 470 MHz – 862 MHz	4 nW	2 nW
Muut alle 1000 MHz taajuudet	250 nW	2 nW
Taajuudet yli 1000 MHz	1 μ W	20 nW

Taulukosta 4 nähdään emissiorajat eri taajuusalueille.



Kuva 9. Spurious-mittaus

Ainoa piikki oli lähetystaajuuden 4. harmoninen, taajuudella 3,476 GHz. Piikin teho oli -39,39 dBm (115,08 nW), joka on selvästi taulukon 4. 1 μ W (-30 dBm) rajan sisällä [8].

Kuvassa 9 on nähtävissä toinen piikki taajuusalueen puolivälissä, mutta tämä johtuu spektrianalysaattorin sisäisestä toiminnasta ja se jätetään huomioimatta.

Valmiustilan mittauksissa esiintyneitä emissioita ei otettu talteen, koska mahdolliset emissiopiikit katosivat taustakohinaan.

Myös taajuuden stabiliteetin mittaus matalalla jännitetasolla ohitettiin, koska lopputuotteessa jännite on reguloitu 3,3 V:iin, joten matala jännitetaso ei vaikuta radiopiirin toimintaan.

Muut standardin sisältämät lähetysmittaukset eivät koskeneet testattavaa laitteistoa. [8]

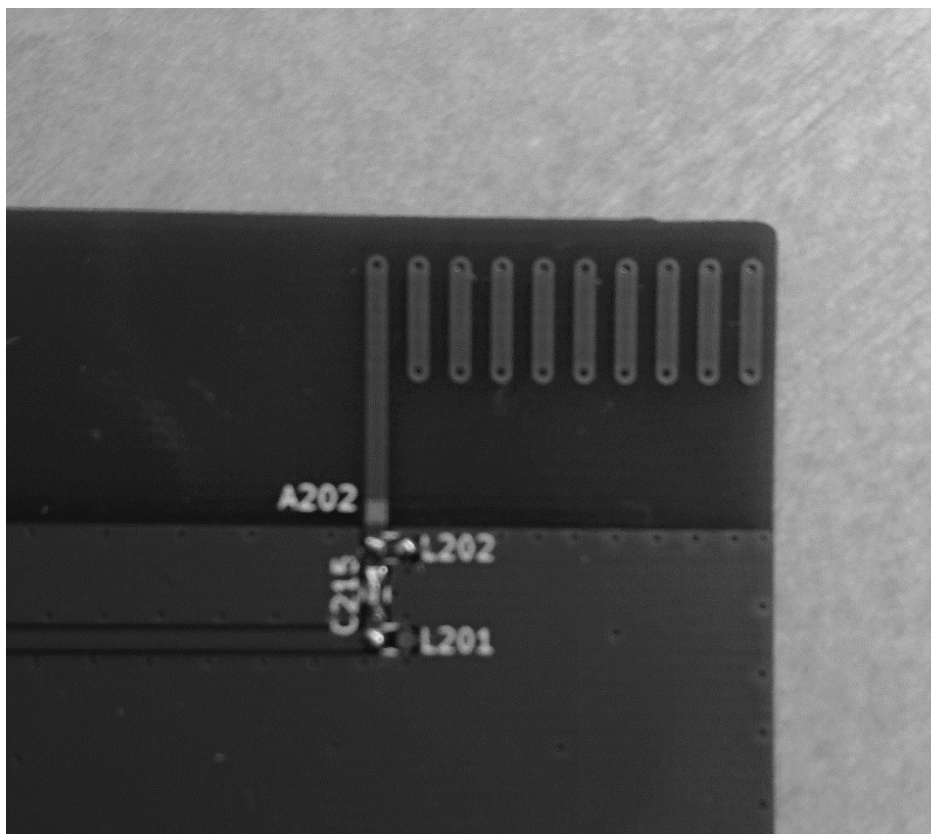
5 ANTENIT JA NIIDEN VIRITYS

Prototyypilevyissä oli käytössä kaksi TI:n piirilevyantennia; polveileva maatasoantenni DN024 ja heliksiantenni DN038.

Molemmat antennit ovat tarkoitettu 868 MHz:n, 915 MHz:n tai 920 MHz:n taajuusalueille. [10]

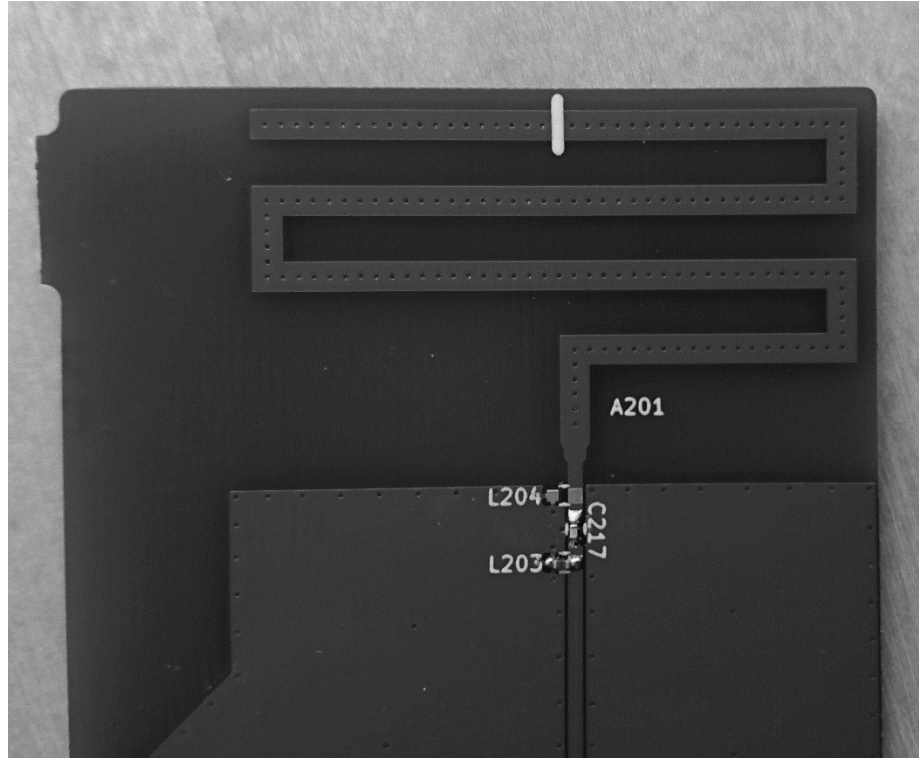
5.1 Antennien ominaisuuksista tarkemmin

DN024 antenna on mahdollista käyttää joko yksikaistaisena (868 MHz, 915 MHz tai 920 MHz) tai kaksoiskaistaisena (868 MHz ja 2440 MHz). [11] DN038 antenna voidaan käyttää vain yhdellä kaistalla (868 MHz, 915 MHz tai 920 MHz). [12]



Kuva 10. DN038 antenni ja sovituskomponentit

DN024 on polveileva maatasoantenni (monopoliantenni). Antenni on jo vakiona melko lähellä 50Ω :a, mutta π -verkon avulla antennia voidaan halutessa säätää esim. kotelon aiheuttaman resonanssitaajuuden muutoksen vuoksi. [11]



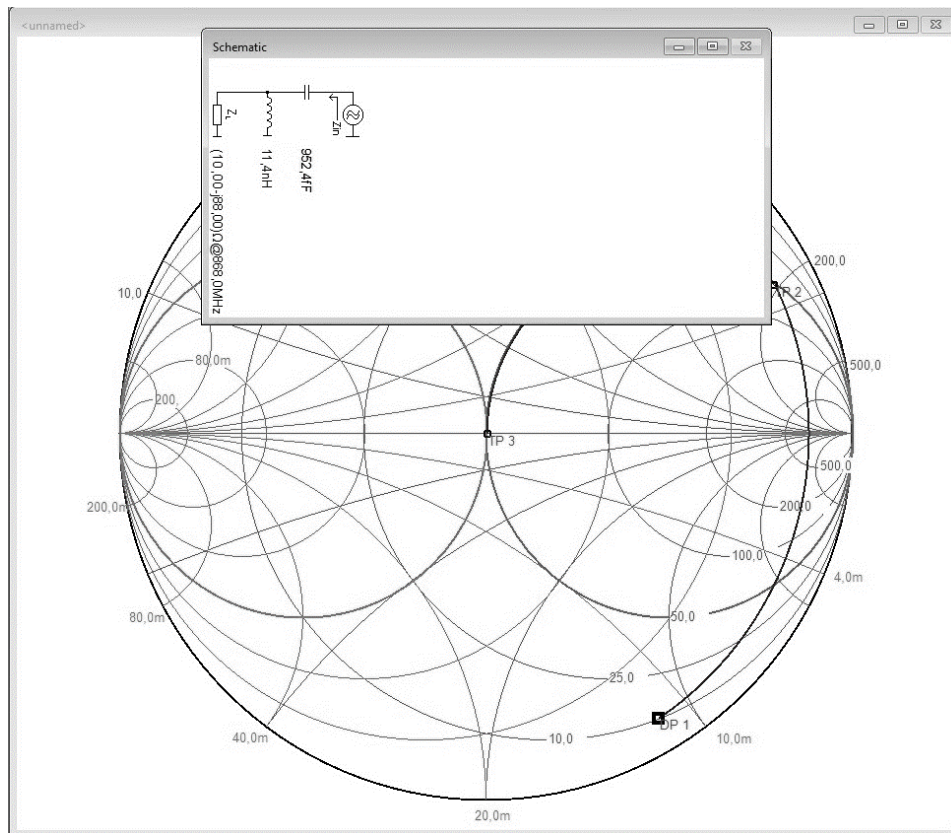
Kuva 11. DN024 antenni ja sovituskomponentit

Polveileva maatasoantenni karsiutui lopullisesta mittaussjärjestelmästä suuren kokonsa vuoksi, joten sen sovitus on testattu vain prototyypilevyn kanssa. Heliksiantenni saatiin testattua kuitenkin jo lopullisella lähetinpiirilevyllä.

5.2 Teoreettinen sovitus

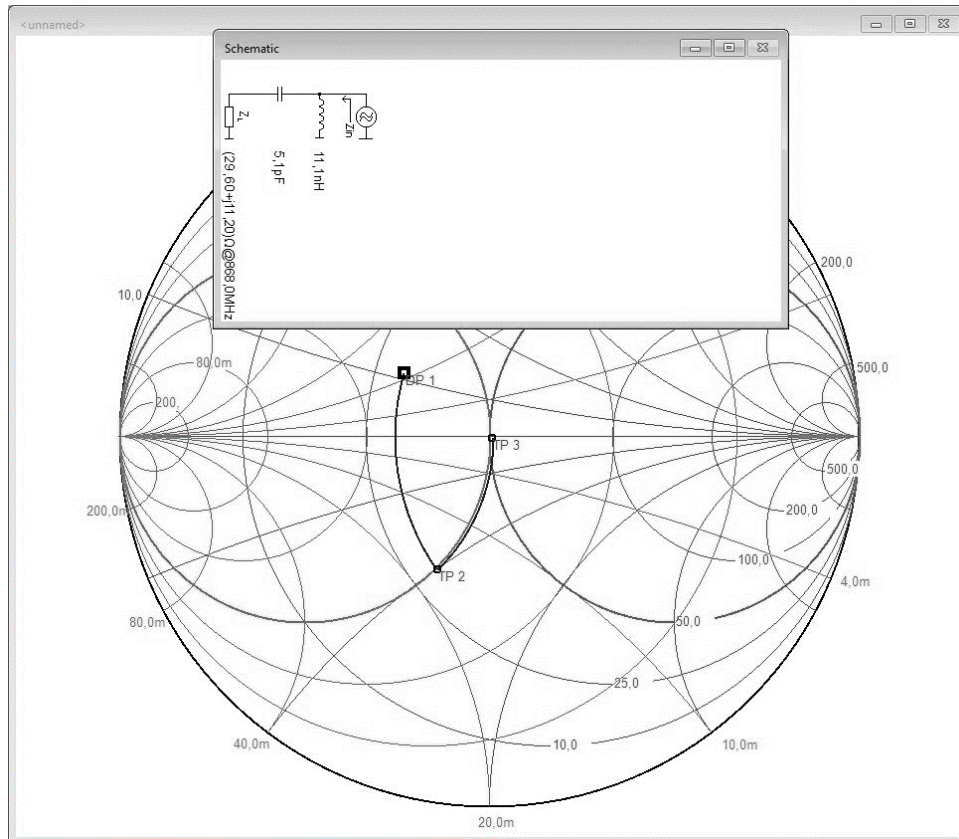
Antennit sovitettiin 50Ω :iin π -verkolla. Teoreettinen sovitus suoritettiin Smithin kartan avulla, mutta käytännön mittauksissa huomattiin, että komponentteja täytyi muuttaa huomattavasti teoreettisiin arvoihin verrattuna heliksiantennin kanssa. Tähän vaikuttivat voimakkaimmin piirilevyn maatason koko, jolla on merkittävä vaikutus resonanssitaajuuteen silloin, kun maatason koko on suhteellisen pieni käytettyyn taajuuteen nähden. Myös piirilevyn paksuus ja komponenteissa esiintyvät hajasuureet vaikuttivat resonanssitaajuuteen.

Monopoli antennin kanssa samaa ongelmaa ei havaittu, vaan komponenttien käytännön arvot pysyivät käytännössä samoina teoreettisten arvojen kanssa.



Kuva 12. DN038 antennin sovitus Smithin kartan avulla

Smithin kartalla DN038 heliksiantennille kelan induktanssiksi saatiin 11,4 nH ja kondensaattorin kapasitanssiksi saatiin 0,95 pF. Antennista kauimpana olevaa komponenttia ei siis tarvinnut käyttää lainkaan.



Kuva 13. DN024 antennin sovitus Smithin kartan avulla

DN024 monopoli antennille saatiin Smithin kartan kanssa kelan induktanssiksi 11,1 nH ja kondensaattorin kapasitanssiksi 5,1 pF. Monopoli antennin kanssa ei ollut tarvetta käyttää antennia lähimpänä olevaa sovituskomponenttia.

5.3 Käytännön sovitus

Alkuun molempien antennien sovituksen kanssa oli suuria ongelmia. Sovelletaessa teoreettisia arvoja käytäntöön, huomattiin että sovitus oli huomattavan paljon sivussa ja komponenttien vaihto ei vaikuttanut muuttavan resonanssitaajuutta halutulla tavalla. Antennia lyhentämällä resonanssitaajuus saatiin kuitenkin siirrettyä halutulle taajuudelle, mutta samalla resonanssikuoppa mataloitui huomattavasti. Pitkän selvittelyn jälkeen huomattiin, että sovituspiirissä käytetyt komponentit olivat laadultaan huonoja ja vaihtamalla ne eri valmistajan vastaaviin, saatiin resonanssitaajuus säädettyä kohdalleen ilman että antennia tarvitsi lyhentää.

Kuva 15. Mitattu resonanssitaajuus kotelon kanssa

Lopulliseksi induktanssiksi kotelon kanssa saatiin 3,9 nH ja kondensaattorin kapasitanssiksi 3,3 pF.

Polveilevan maatasoantennin DN024 sovitus oli huomattavasti helpompaa, vaikka huonolaatuiset sovituskomponentit vaikuttivat alkuun myös sen sovitukseen. Sovituskomponenteista tuli käytännössä identtiset teoreettisten arvojen kanssa, kelan induktanssiksi saatiin 12 nH ja kondensaattorin kapasitanssiksi 4,7 pF (vrt. teoreettiset arvot 11,1 nH ja 5,1 pF).

6 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tämän opinnäytetyön pääasiallinen tavoite oli mitata CC1201-piirin radiolähettimen toiminta standardin mukaisesti, sekä selvittää antennille sopiva sovitus 50 Ω :iin. Alun perin työhön kuului myös viranomaishyväksynnät ja muut CE-merkin valmistajanvakuutuksen edellyttämät mittaukset, eli mm. sähkömagneettiset yhteensopivuus-, eli EMC-mittaukset. Aikataulullisten syiden takia nämä jäivät kuitenkin tämän työn ulkopuolelle.

Työ aloitettiin vuoden 2016 alkukesästä tutustumalla TI:n CC1201 radiopiiriin. Myös prototyypilevyn suunnittelu tehtiin tällöin. Antennien sovitusta ja niiden mittauksia tehtiin keuhällä 2016. Tuolloin oli käytössä vielä huonolaatuiset sovituskomponentit, joten antennia ei vielä tässä vaiheessa saatu sovitettua halutulla tavalla.

Insinööriyön kannalta aikaa vievin prosessi oli löytää oikea standardi, jonka mukaan mittaukset tulisi suorittaa. Lopulta oikea standardi kuitenkin löytyi ja mittaukset voitiin suorittaa.

Radio täyttää ETSI:n standardin lähettimen osalta selvästi, hyvällä marginaalilla. Vastaanottimen standardinmukaiset mittaukset karsiutuvat mittauksista, koska nämä olisivat olleet insinööriyön aikataulun puitteissa vaikea toteuttaa.

Lopulliseen myyntituotteeseen antenniksi on tätä työtä kirjoittaessa (kevällä 2017) tulossa heliksiantenni (helical-antenna) DN038, sekä keraaminen chip-antenni. Polveileva maatasoantenni DN024 karsiutui lopputuotteesta pois suuren kokonsa vuoksi.

LÄHTEET

- [1] Ruokonen, Lassi, *Langattoman anturiverkon radiopiirin ajurihjelmisto*. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201605249400>
- [2] Johanson Technology, *Balun Datasheet*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <https://www.johansontechnology.com/datasheets/highly-integrated-passive-components/0900PC15J0013.pdf> (luettu 9.5.2016).
- [3] Texas Instruments, *CC1201 Datasheet*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1201.pdf> (luettu 9.5.2016).
- [4] Electronic Products, *TCXO vs. OCXO*. [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.electronicproducts.com/Passive_Components/Oscillators_Crystals_Saw_Filters/TCXO_vs_OCXO.aspx (luettu 5.4.2017).
- [5] Hanhela, Ari, *Antennidiversiteetin toteutus ja testaus 2,45 GHz:n radiomoduuliin*. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201105259556>
- [6] Skyworks, *AS213-92, AS213-92LF RF-Switch Datasheet*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/200193D.pdf> (luettu 9.5.2016).
- [7] Texas Instruments, *SmartRF transceiver Evaluation Board "TrxEB" User's Guide*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/ug/swru294a/swru294a.pdf> (luettu 9.5.2017).
- [8] ETSI, *EN 300 220-1 Standardi*. [www-dokumentti]. Saatavilla: www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_40/en_30022001v020401o.pdf (luettu 20.2.2017).
- [9] Hewlett Packard, *HP 8590 E-Series Technical Specifications*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.rlscientific.com/documenti/HP8591E.pdf> (luettu 26.4.2017).
- [10] Texas Instruments, *Antenna Selection Guide*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/swra161b/swra161b.pdf> (luettu 17.5.2016).
- [11] Texas Instruments, *Monopole PCB Antenna with Single or Dual Band Option*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/swra227e/swra227e.pdf> (luettu 17.5.2016).

- [12] Texas Instruments, *Miniature Helical PCB Antenna for 868 MHz or 915/920 MHz*. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/swra416/swra416.pdf> (luettu 17.5.2016)