

Sami Poikola

RFID-tunnisteen kehittäminen

Tekijä Otsikko	Sami Poikola RFID-tunnisteen kehittäminen
Sivumäärä Aika	40 sivua + 3 liitettä 3.6.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikkasuunnittelu
Ohjaaja	yliopettaja Matti Fischer
<p>Insinööriyössä perehdyttiin UHF-alueen RFID-järjestelmien toimintaan valmistamalla Metropolia Ammattikorkeakoululle useita 868 MHz:n RFID-tunnisteita käytettäväksi RFID-tekniikan opintojakson laboratoriotöissä. Lisäksi työssä perehdyttiin eri antenniratkaisuihin, joista piirilevylle valmistettiin dipoliantenni ja PIFA-antenni simulointitulosten perusteella. Lopuksi valmiilla piirilevyllä pystyttiin kommunikoidaan PE3001 RFID -sirun ja MBED-mikrokontrollerin välillä käyttäen SPI-väylää. MBED-mikrokontrolleria voitaisiin käyttää esimerkiksi LCD-näytön tai antureiden ohjaamiseen, mutta tässä työssä ei pidetty tarpeellisenä valmistaa monimutkaisempaa piirilevyä.</p> <p>Piirilevyt valmistettiin ja osa mittauksista toteutettiin oppilaitoksen tiloissa vektoripiirianalyysaattorin ja radiokaiuttoman huoneen avulla. Loput lukijalaitteen ja tunnisteiden väliseen vuorovaikutukseen liittyvät mittaukset suoritettiin Metropolian Electria-tutkimuskeskuksessa Vantaalla. Lukijalaitteena toimi Impinjin valmistama Speedway R1000 -lukija, joka kytkettiin lähiverkon kautta tietokoneelle, josta sitä ohjattiin. Lukijalaitteen lähettämä tehotaso oli 24 dBm.</p> <p>Tulokset olivat odotettua selvästi paremmat, sillä parhaiten toiminutta tunnistetta kyettiin lukemaan paristokäyttöisenä jopa n. 4 metrin päässä lukijalaitteesta ja ilman paristojakin noin 1,5 metristä. Muita tunnisteitakin kyettiin lukemaan ja ohjelmoimaan, joskin lyhyemmällä lukuetaisyydellä.</p>	
Avainsanat	RFID, UHF, MBED, SPI, tunniste, lukijalaitte, Impinj, PIFA

Author Title	Sami Poikola Implementing an RFID-transponder
Number of Pages Date	40 pages + 3 appendices 14 June 2011
Degree	Bachelor of Science
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics Design
Instructor	Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The objective of this thesis was to study UHF RFID-systems by implementing several RFID-transponders for the laboratory works of the RFID course at Metropolia University of Applied Sciences. In addition, several antenna configurations were studied of which a dipole antenna and a PIFA-antenna were made to printed circuit boards based on the simulation results. In the end, the printed circuit board made possible to communicate between the PE3001 RFID-chip and the MBED microcontroller by using the SPI-bus. The MBED microcontroller can be used for example to control LCDs and different sensors. However, this thesis did not include external applications for the SPI-bus.</p> <p>The printed circuit boards were manufactured in the premises of the school. Also, most of the measurements were conducted in the school's anechoic chamber with a vector network analyzer. The rest of the measurements were related to the relation of the transponder and the reader. These measurements were conducted in Metropolia's R&D unit Electria at Vantaa. The reader used was the Speedway R1000 manufactured by Impinj, which was connected to a PC by local area network. The reader was operated by 24 dBm transmit power.</p> <p>The results were better than what had been anticipated, due to the fact that the best transponder could be read up to 4 meters away from the reader when operated with batteries. Without batteries, a maximum of 1.5 meters was achieved. The other transponders were able to be detected by the reader, although the detection range was smaller.</p>	
Keywords	RFID, UHF, MBED, SPI, transponder, reader, Impinj, PIFA

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	RFID-teknologia	2
2.1	Radiotekniikan perusteet	2-3
2.2	RFID yleisesti	3-4
2.3	RFID-tunnisteiden luokittelu	4
2.3.1	Luokittelu toteutuksen mukaan	4-6
2.3.2	Luokittelu taajuuden mukaan	6-8
2.3.3	Luokittelu menetelmän mukaan	8-9
3	Antenni ja piirilevy	10
3.1	Työssä valmistettujen tunnisteiden rakenne	10-11
3.2	Antennisuunnittelun teoriaa	11-13
3.3	Kuorman sovittaminen	13-14
3.3.1	Smithin kartta	14-16
3.3.2	Smithin kartalla kulkeminen keskitetyillä elementeillä	16-17
3.4	Piirilevyn suunnittelu	17-18
3.5	Antennin mittaukset ja sovittaminen käytännössä	18
3.5.1	Vektoripiirianalysointin kalibrointi	18-19
3.5.2	Piirilevyn mittaukset	20-23
4	PE3001-sirun ohjelmointi	24
4.1	PE3001-sirun sisäinen rakenne	24-26
4.2	SPI-väylä	26-28
4.3	EPC Class 1 Generation 2 -standardi	28-29
4.4	Sirun muistialueet	29-30
4.5	Tunnisteiden hallinta ja tilat	30-32

5	MBED-mikrokontrolleri	33-34
6	Mittaustulokset ja tunnisteen toiminta käytännössä	35-37
7	Yhteenveto	38
	Lähteet	39-40
	Liitteet	
	Liite 1. RFID-tunniste dipoliantennilla	
	Liite 2. RFID-tunniste PIFA-antennilla	
	Liite 3. SPI-väylän komennot PE3001-sirulla	

Lyhenteet

CRC	Cyclic Redundancy Check. Tarkisteavain.
DSB	Double Sideband. Kaksipuoleinen sivukaista.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory. Uudelleenkirjoitettavaa ROM-muistia.
E(I)RP	Effective (Isotropically) Radiated Power. Pallomaisesti säteilevän tehon määrä.
EPC	Electronic Product Code. Koodi, joka kertoo tuotteen tärkeimmät tiedot.
MISO	Master In Slave Out. SPI-väylän signaalitie orjalaitteelta isäntälaitteelle.
MOSI	Master Out Slave In. SPI-väylän signaalitie isäntälaitteelta orjalaitteelle.
PIFA	Planar Inverted F-Antenna. Eräs antennityyppi.
RFID	Radio Frequency Identification. Radiotaajuinen tunnistus.
RNG	Random Number Generator. Satunnaislukugeneraattori.
SCLK	Serial Clock. SPI-väylän kellosignaalin signaalitie.
SPI	Serial Peripheral Interface. Sarjaliikenneväylä.
SSB	Single Sideband. Yksipuoleinen sivukaista.
(U)HF	(Ultra) High Frequency. 0,3–3 GHz taajuusalue.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tavoitteena oli UHF-alueen RFID-tunnisteiden suunnittelu ja käytännön toteutus, jotta voidaan valmistaa useita RFID-tunnisteita Metropolia Ammattikorkeakoulun RFID-tekniikan opintojakson laboratoriotöitä varten. Työ käsittää PE3001 RFID -sirun käyttöönoton, antennisuunnittelua, RFID-tekniikkaan perehtymistä ja erinäisiä mittausjärjestelyjä. Tunnisteet ovat rakenteeltaan puolipassiivisia, paristoilla varustettuja piirilevyjä.

Työssä perehdytään tarkoin mm. dipoliantennien impedanssi- ja resonanssimittauksiin vektoripiirianalysaattorilla, jossa käytetään hyödyksi oppilaitoksen tiloissa sijaitsevaa radiokaiutonta huonetta. Lisäksi selvitetään valmiin tunnisteen toimintaa lukijalaitteen lähettämässä magneettikentässä. PE3001-siru on myös EPC Class 1 Generation 2 -standardin mukainen RFID-siru, minkä vuoksi työssä tutkitaan lisäksi kyseenomaisen standardin sisältöä ja toimintavaatimuksia. Työssä esitellään SPI-väylän toimintaa sirun ja MBED-mikrokontrollerin välillä. Lisäksi työssä tehdään yksi PIFA-antennilla varustettu tunniste.

Työtä varten suunniteltu ja valmistettu piirilevy on tehty oppilaitoksen tiloissa, ja osa mittauksista on suoritettu Metropolian Electria-tutkimuskeskuksen tiloissa, jossa lukijalaite sijaitsee.

2 RFID-teknologia

2.1 Radiotekniikan perusasiat

Koska RFID-systeemit lähettävät sähkömagneettista säteilyä, on ne virallisesti luokiteltu radiolaitteiksi. Sähkömagneettinen säteily on valonnopeudella kulkevaa säteilyä, joka koostuu jatkuvasti muuttuvista sähkö- ja magneettikentistä. James Clerk Maxwellin neljännestä yhtälöstä (Ampèren laki Maxwellin korjauksella, kaava 1.) voidaan huomata, että piirissä kulkeva vaihtovirta indusoi ympärilleen muuttuvan magneettikentän.

Tämän jälkeen Maxwellin yhtälöiden kolmannesta yhtälöstä (Faradayn induktiolaki, kaava 2.) voidaan huomata, että muuttuva magneettikenttä aiheuttaa muuttuvan sähkökentän, joka vastavuoroisesti aiheuttaa Maxwellin kolmannen yhtälön mukaan jälleen uuden muuttuvan magneettikentän. Nämä vuorovaikutukset saavat aikaan sähkömagneettista säteilyä, joka johtimesta katsottuna etäisyydelle $\lambda/2\pi$ päästessään muuttuu sähkömagneettiseksi aalloksi. [1, s. 111–113; 2, s. 16–20.]

Maxwellin 4. laki (Ampèren laki Maxwellin korjauksella) on integraalimuodossa aika-harmonisessa tapauksessa:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{J} + j\omega\vec{D}) \cdot d\vec{S} = (\sigma + j\omega\epsilon) \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

jossa

\vec{H} = magneettikentän voimakkuus [A/m]

$d\vec{l}$ = silmukan suuntainen pituusalkio [m]

\vec{J} = virran tiheys [A/m²]

\vec{D} = sähkövuon tiheys [As/m²]

\vec{S} = suljetun pinnan ala [m²]

σ = ominaissähkönjohtavuus [S/m]

ω = kulmataajuus [rad/s]

ϵ = permittiivisyys [F/m]

\vec{E} = sähkökentän voimakkuus [V/m]

Maxwellin 3. laki (Faradayn induktiolaki) on integraalimuodossa aikaharmonisessa tapauksessa:

$$\oint_T \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -j\omega\mu \int_S \vec{H} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

jossa kaavassa 1. mainittujen muuttujien lisäksi

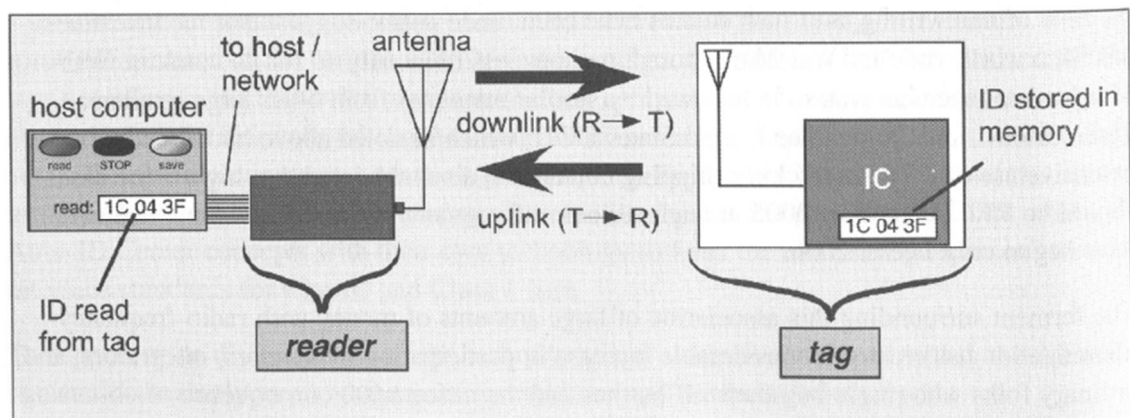
\vec{B} = magneettivuon tiheys [Vs/m²]

μ = permeabiliteetti [H/m]

Kaavoista voidaan todeta sähkömagneettisen säteilyn synty. [2, s. 18.]

2.2 RFID yleisesti

RFID-tekniologialla (*Radio Frequency Identification*) tarkoitetaan radioaalloilla tapahtuvaa langatonta tunnistamista systeemissä, joka koostuu minimissään lukijalaitteesta ja tunnistesta. Yleensä RFID-järjestelmissä on mukana myös jonkinlainen tietokanta, johon tunnistestien dataa verrataan tai tallennetaan. Kuvassa 1 nähdään RFID-järjestelmä yleisesti esitettynä, jossa *host computer* kuvaa tietokantaa. Lisäksi RFID-systeemiin voidaan liittää muita valinnaisia elementtejä, kuten antureita, mikrokontrollereita ja indikaattoreita. RFID:n käyttökohteita ovat esimerkiksi tietullit, kulunvalvonta, eläinten tunnistus ja joukkoliikenteen matkakortit.



Kuva 1. RFID-järjestelmä yksinkertaisesti esitettynä [3, s. 22]

Nykyään RFID-tekniikasta kaavallaan viivakoodin korvaajaa myös vähittäiskaupassa, kunhan tunnisteen kappalehinta saadaan pudotettua tarpeeksi alhaiseksi. RFID:n edut viivakoodiin verrattuna ovat esimerkiksi pidempi lukuetaisyys, mahdollisuus käyttää suuriakin määriä muistia, tietoturva sekä uudelleenohjelmoitavuus. Lisäksi RFID-tunniste ei tarvitse näköyhteyttä lukijaan.

RFID keksittiin ja otettiin käyttöön jo toisen maailmansodan aikana, kun englantilaiset laittoivat omiin lentokoneisiinsa tunnisteen, jolla pystyttiin tutkan avulla erottamaan oma lentokone vihollisen lentokoneesta. Toisen maailmansodan jälkeen RFID:n kehittäminen oli jokseenkin hidasta, ja vasta 1960-luvulla valmistettiin ensimmäiset kaupalliset 1-bittiset EAS-tunnisteet, joita käytettiin varkaudenestoon. Vuonna 1973 Mario W. Cardullo kehitti aktiivisen tunnisteen, jossa oli uudelleenohjelmoitava muisti. Samana vuonna Charles Walton kehitti passiivisen tunnisteen, jolla voitiin avata ovi näyttämällä tunnistetta lukijapiirille. [1, s. 1; 4, s. 2; 5, s. 37.]

2.3 RFID-tunnisteen luokittelu

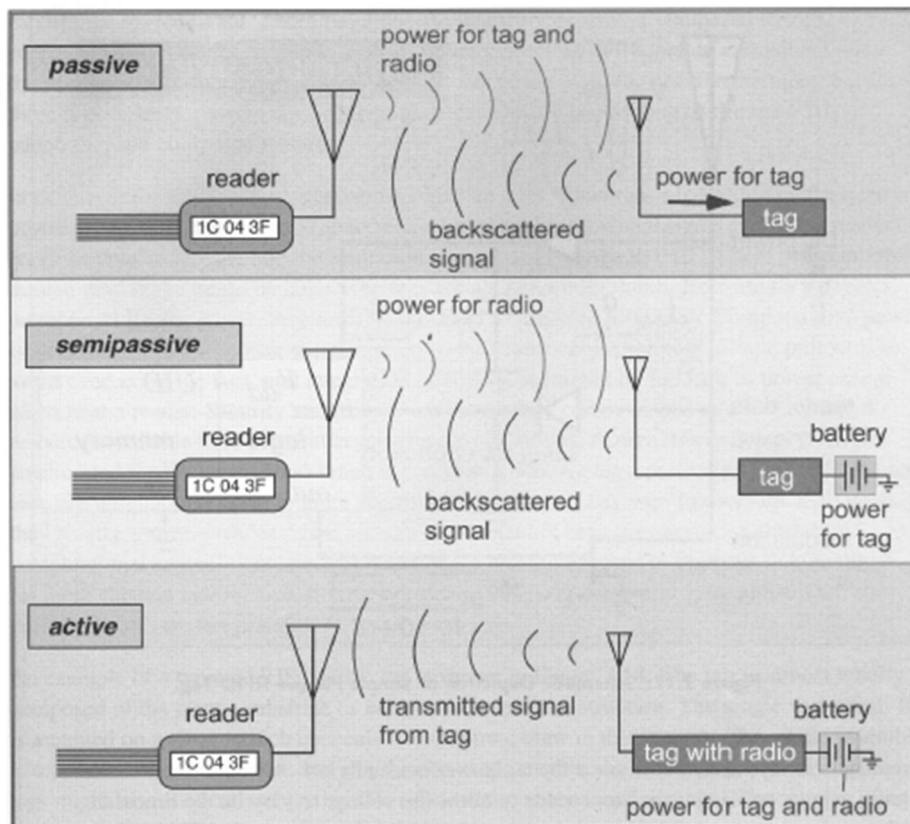
Tunnisteita voidaan luokitella usealla eri tavalla, eikä vakiintunutta käytäntöä ole. Yleisimmät luokittelut ovat käytettävän taajuusalueen, menetelmän sekä toteutuksen mukaan.

2.3.1 Luokittelu toteutuksen mukaan

Toteutuksen suhteen tunnisteen luokittelu voidaan jakaa kolmeen luokkaan kuvan 2 mukaan, eli passiivisiin, puolipassiivisiin sekä aktiivisiin tunnisteen luokkiin. Passiivinen tunniste ei sisällä omaa virtalähdettä, vaan joutuessaan lukijan magneettikenttään siihen indusoituu virtaa magneettikentästä syntyvän sähkökentän kautta, jonka jälkeen syntyvä jännite tasasuunnataan ja suodatetaan tasajännitteeksi. Takaisinsironnan avulla tunniste lähettää sen sirulta löytyvän vastauksen (tyypillisesti tunnistenumero) antennin kautta lukijalle.

Passiiviset tunnisteen luokkiin ovat yksinkertaisimpia tunnisteen luokkiin, ja näin ollen niiden fyysinen rakenne voi olla hyvinkin pieni. Tästä johtuen niiden hinnat ovat alhaisia, joten ne soveltuvatkin parhaiten massakäyttöön esimerkiksi vähittäiskaupassa. Lisäksi passiivisten

tunnisteiden käyttöikä voi olla useita kymmeniä vuosia, joten ne soveltuvat muita toteutustyyppijä paremmin ihonalaisiksi implanteiksi.



Kuva 2. Eri toteutustapojen väliset erot [3, s. 35]

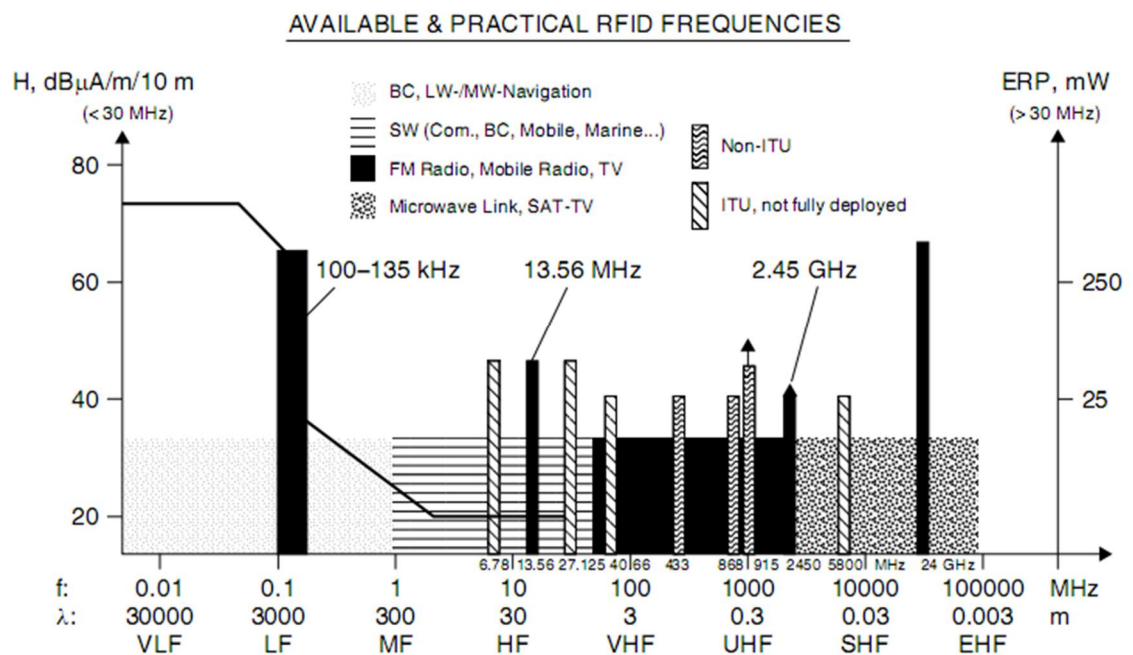
Puolipassiiviset tunnisteet sisältävät sirun ja antennin lisäksi oman virtalähteen (yleensä paristo), sekä mahdollisesti muistia (EEPROM, ROM). Puolipassiiviset tunnisteet ovat unitilassa niin kauan, kunnes joutuvat lukijalaitteen luomaan kenttään, jolloin sisäinen virtalähde käynnistyy. Puolipassiiviset tunnisteet ovat virtalähdettä käytettäessä passiivisia selkeästi tehokkaampia, ja niillä saavutetaan pidempi lukuikäisyys ja lähetysteho.

Puolipassiiviset tunnisteet eivät vaadi virtalähdettä toimiakseen, joten toiminta säilyy myös siinä tapauksessa, että tunnisteella oleva paristo on tyhjentynyt. Lisäksi mahdolliseen muistiin voidaan tallentaa tietoa, ja takaisin lähetettävän tunnistetiedon bittimäärä on korkeampi kuin passiivisessa tunnisteessa. Passiivisiin tunnisteisiin nähden puolipassiivisissa tunnisteissa heikompaa on niiden suurempi fyysinen koko virtalähteen takia, joka samalla nostaa myös valmistuskustannuksia.

Aktiiviset tunnisteet sisältävät puolipassiivisten tunnisteiden tapaan virtalähteen, mutta myös oman lähettimen. Lähettimen johdosta aktiiviset tunnisteet voivat keskustella lukijalaitteen kanssa samalla periaatteella kuin mitkä tahansa kaksi radiolähetintä, kuten radiopuhelimet. Aktiivisten tunnisteiden lähettämät signaalit ovat voimakkaita, joten korkeilla taajuuksilla on mahdollista saada jopa usean sadan metrin lukuetaisyys aikaiseksi. [5, s. 38; 6, s. 3–4; 7.]

2.3.2 Luokittelu taajuuden mukaan

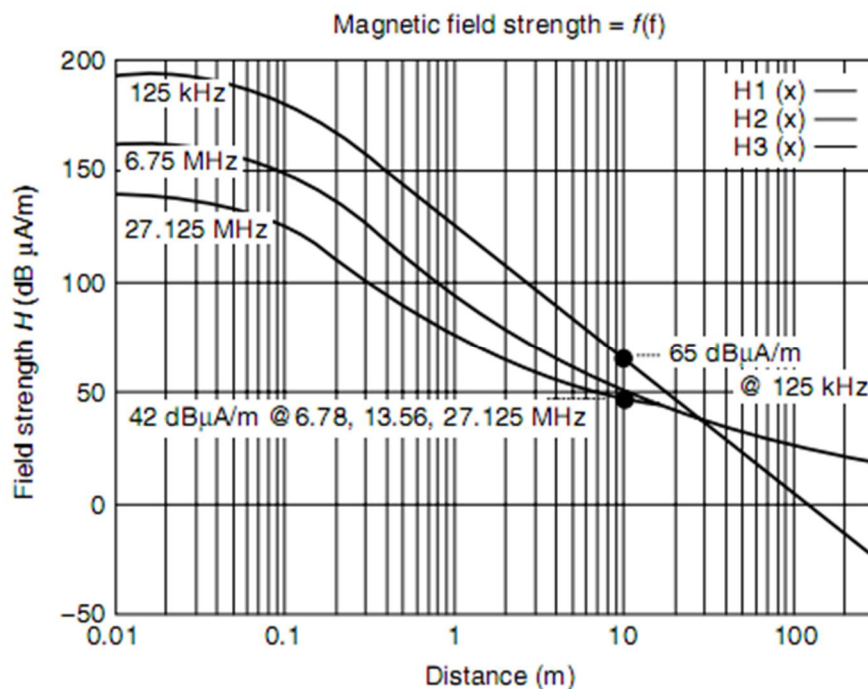
Koska RFID-järjestelmät synnyttävät ja säteilevät radioaaltoja, on käyttötaajuudet valittu niin, etteivät ne häiritse muilla kaistoilla kulkevia signaaleja. Yleisimmät taajuusalueet ovat taajuudet alle 135 kHz:n (LF-alue), taajuudet 6,78 MHz, 13,56 MHz ja 27,125 MHz (HF-alue), taajuudet 434 MHz, 868 MHz ja 915 MHz (UHF-alue) ja taajuudet 2,45 GHz, 5,8 GHz ja 24,5 GHz (mikroaaltoalue). Kuvassa 3 nähdään RFID-tekniikan käyttämät taajuudet. Tässä työssä keskitytään UHF-alueen taajuudelle 868 MHz, jolla PE3001-siru toimii.



Kuva 3. Käytössä olevat RFID-taajuudet [1, s. 162]

RFID-systeemien käyttämistä taajuuksista 27,125 MHz:iin asti toimitaan induktiivisella kytketyksellä, jossa antenni on LC-resonaattori. Tämän resonaattorin kela on yleensä piirilevyllä valmistettu suorakulmainen, spiraalimainen tai ympyrämallinen vedos kuparia eikä erillinen eli diskreetti komponentti piirilevyllä. Pienillä taajuuksilla voidaan myös käämiä ferriitin ympärille kuparia, joka toimii kytkennän kelana. Resonaattorin kelan kanssa kytketään rinnan diskreetti kondensaattori, sekä resonanssin hienosäätöä varten oleva säätökondensaattori, joiden avulla piiri saadaan resonanssiin oikealle taajuudelle. UHF- ja mikroaaltoalueen taajuuksilla RFID-järjestelmien toiminta perustuu sähkömagneettisiin kaukokenttiin. Alle 125 kHz:n taajuuksilla ja HF-alueella RFID-järjestelmien toiminta perustuu induktiiviseen kytketymiseen.

Taajuuden valinta riippuu paljon siitä, mitä systeemiltä odotetaan. Esimerkiksi pienillä taajuuksilla (LF- ja HF-taajuudet) tunkeutumissyvyys on korkea, mutta kantama lyhyt. Myös virrankulutus on pienempi, sillä tunnisteiden kelloaajuus on pieni, jolloin passiiviset tunnisteet toimivat heikommallakin lukijan antamalla kentällä. Pienillä taajuuksilla ollaan suurimman osan ajasta lähikentässä, jossa vaimennus on suurta verrattuna kaukokenttään. Tästä johtuen lukuetaisyys ei voi kasvaa kovinkaan suureksi verrattuna korkeampien taajuuksien systeemeihin.



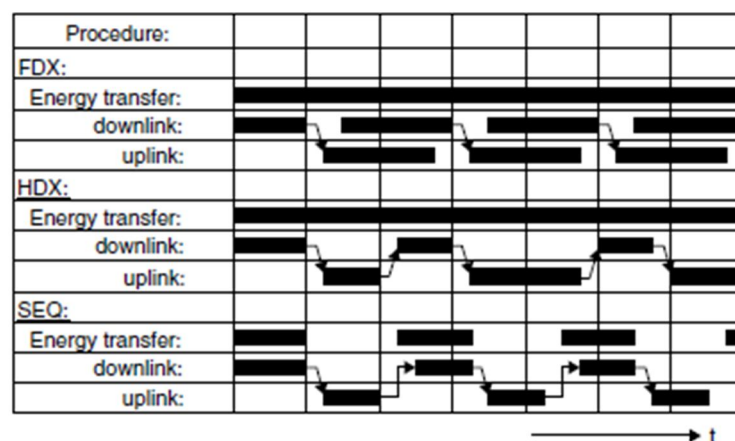
Kuva 4. Magneettikentän voimakkuuden suhde etäisyyteen eri taajuuksilla [1, s. 167]

Korkeilla taajuuksilla (UHF- ja mikroaaltotaajuudet) tiedonsiirto on nopeampaa, luoketäisyys pidempi, ja kellotaajuuden kasvu mahdollistaa mm. paremman tietoturvan ja mikrokontrollerien käytön. Lisäksi, induktiiviseen kytkeytymiseen perustuvissa RFID-systeemeissä kela-antennien fyysinen koko vaikuttaa esimerkiksi kaistanleveyteen ja hyvyyslukuun, jolloin suunnitteluvaiheessa on otettava huomioon antennin mitat. Kuvassa 4 nähdään kolmen eri taajuuden käyttäytyminen tarkasteltaessa kentän voimakkuutta lukijan ja tunnisteiden välisen etäisyyden suhteen. [1, s. 26; 5, s. 38–40.]

2.3.3 Luokittelu menetelmän mukaan

Kolmas tapa luokitella RFID-tunnisteita on menetelmä, joka tarkoittaa yksinkertaistettuna sitä, kuinka tunnisteelle siirtyy tehoa ja dataa lukijalta. Käytössä on kolme eri päämenetelmää; 1-bittinen EAS -menetelmä (*Electronic Article Surveillance*), duplex-menetelmä ja sekventiaalimenetelmä.

1-bittinen EAS -menetelmä on yksinkertaisin mahdollinen RFID-menetelmä, jossa tunnistaja joko on lukijan kentässä tai poissa siitä. 1-bittistä EAS -menetelmää käytetään esimerkiksi kauppojen varashälyttimissä, jolloin tuotteen maksamisen yhteydessä RFID-tunniste deaktivoitetaan, eikä varashälytys rupea hälyttämään poistumisen yhteydessä. Kuvassa 5 nähdään eri menetelmien toimintamenetelmät.



Kuva 5. Menetelmien välisiä eroja lähetyksen ja energiansiirron kannalta [1, s. 41]

Duplex-menetelmä jaetaan normaalisti kahteen alaluokkaan, eli half duplex -menetelmään (HDX), sekä full duplex -menetelmään (FDX). Full duplex -menetelmässä tieto siirtyy yhtä aikaa molempiin suuntiin, eli tunnisteealta lukijalaitteelle, ja päinvastoin, kun taas half duplex -menetelmässä tieto siirtyy vain yhteen suuntaan kerrallaan.

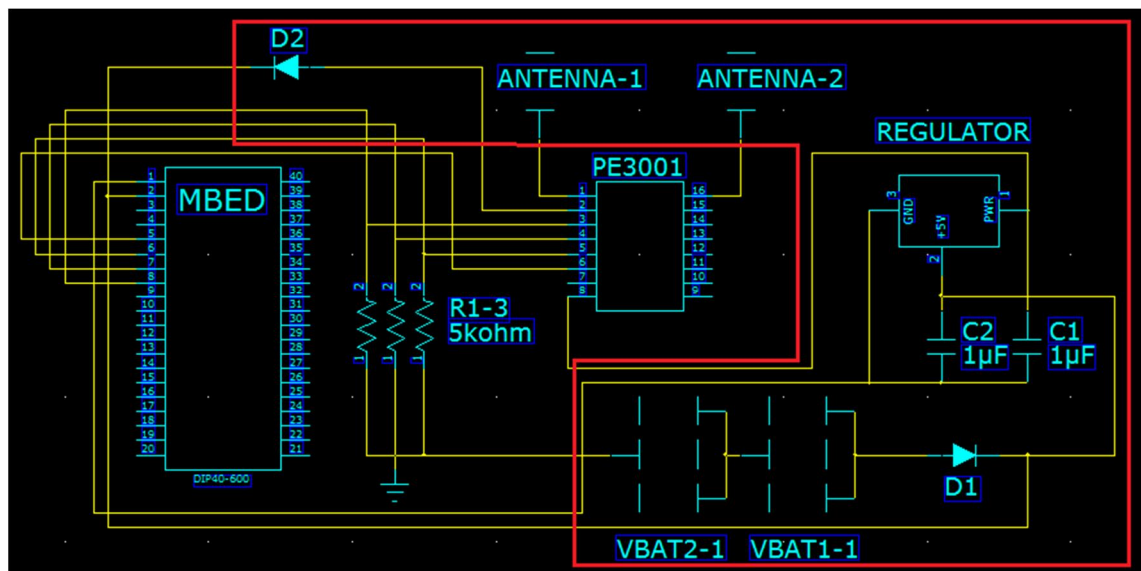
Alle 30 MHz:n taajuuksilla half duplex -menetelmän toteutus piirilevyllä on yksinkertaista, joten se on varsin suosittu valinta menetelmäksi näille taajuuksille. Kuvassa 4 nähdään duplex- ja sekventiaalimenetelmien toiminta energian- ja datansiirron kannalta tarkasteltuna. Tässä työssä käytettävä PE3001-siru toimii half duplex -menetelmän tavoin.

Kolmas menetelmätyyppi on sekventiaalimenetelmä, jossa energiaa ei siirry jatkuvasti lukijalta tunnisteealle, vaan lukijan virtalähde on aktiivisena ainoastaan silloin, kun se lähettää tunnisteealle tietoa. Tunnisteen lähettäessä vastausta lukijalle on lukijan virtalähde suljettuna. Sekventiaalimenetelmän ongelma on tunnisteealle menevän energian vähyys verrattuna duplex-menetelmään jolloin joudutaan mahdollisesti sisällyttämään virtalähteen tunnisteealle. [1, s. 11, 29–30, 40–41, 54–55.]

3 Antenni ja piirilevy

3.1 Työssä valmistettujen RFID-tunnisteiden rakenne

Insinööriyössä valmistettiin kolme puolipassiivista UHF-alueen tunnistetta, joiden yhteinen kytkentäkaavio on kuvassa 6. Kaavio voidaan jakaa karkeasti kolmeen osaan, joista seuraavaksi käsitellään punaisella ympäröity alue, eli tunnisteen antenni, sekä tehollähde. Kaaviossa olevat VBAT1-1 ja VBAT2-1 kuvaavat tunnisteen virtalähteitä, eli tässä tapauksessa litium-paristoja. Kaavion ANTENNA-1 ja ANTENNA-2 kuvaavat antennin eri haaroja, joista ANTENNA-1 on signaalitie, ja ANTENNA-2 virtuaalimaa.



Kuva 6. Työssä valmistettujen tunnisteen piirikaavio

Tunnisteessa otettiin huomioon MBED-mikrokontrollerin vaatima 4,5–9 V:n jännite laittamalla tunnisteeseen sarjaan kaksi 3 V:n paristoa, jolloin yhteisjännitteeksi saatiin 6 V. Tätä jännitettä pudotettiin hieman asettamalla paristojen jälkeen estodiodi D1, joka pudottaa jännitettä noin 0,7 V, eli oman kynnysjännitteensä verran. Lisäksi D1 estää virran kulkemisen paristojen ulostuloon siinä tapauksessa, että antennilta tulisi paristoja korkeampi jännite (kuten silloin, kun paristojen varaus on heikko tai olematon). Diodin D2 tehtävä on suojella PE3001-sirun ulostulonastaa, sillä paristojen jännite on lähes aina korkeampi kuin antennilta tuleva jännite. Paristojen korkea jännite voi vaurioittaa PE3001-sirua ilman estodiodin kytkemistä.

Diodin D1 jälkeen jännite kulkee regulaattorin sisäänmenonastaan, jossa jännitetaso putoaa 3,3 volttiin, joka on PE3001-sirun hyväksymissä rajoissa. Kytkennässä on myös mukana regulaattorin vaatimat 1 μF :n ohituskondensaattorit, jotka vähentävät elektromagneettisia häiriöitä, joita muista komponenteista voisi mahdollisesti aiheutua. [9.]

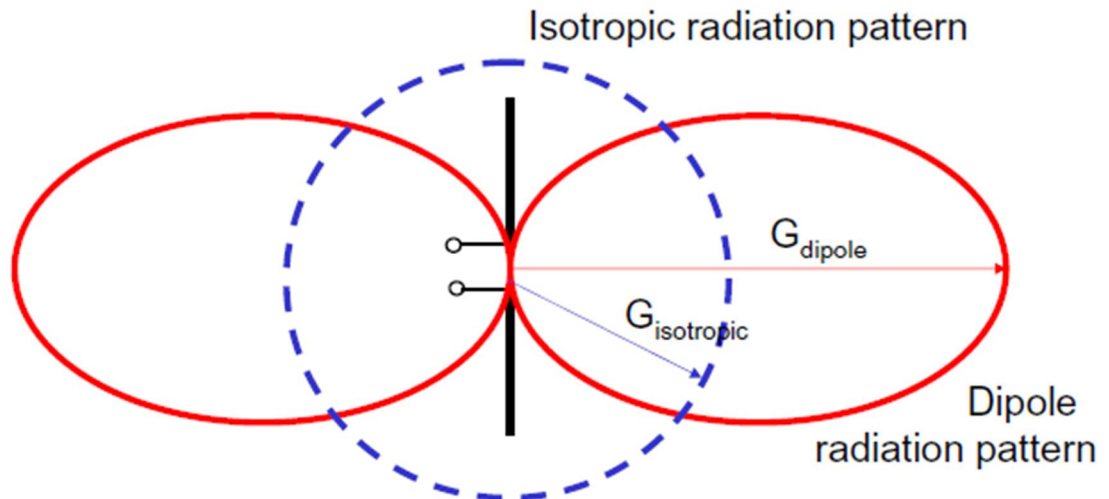
3.2 Antennisuunnittelun teoriaa

RFID-tunniste koostuu sirun ja muiden komponenttien lisäksi myös antennista, joka on koko tunnisteen kriittisin osa, sillä se vastaanottaa lukijalaitteelta tehoa. Lukijalaitteelta indusoituva tai säteilevä teho suodatetaan ja tasasuunnataan, jolla saadaan käyttöjännite tunnistetta varten. Lisäksi antenni lähettää vastauksen takaisin lukijalaitteelle. Sähköisesti tarkastellen antenni muuttaa sähkömagneettista säteilyä sähköiseksi signaaliksi ja päinvastoin.

Eräs tärkeimmistä antennin parametreista on vahvistus (*gain*), joka kuvaa sitä, kuinka paljon enemmän tehoa antennin suuntaavuudella saadaan verrattuna vertailutehoon, joka on kaiken antennin säteilemän tehon keskiarvo (jolloin antennin säteilykuvio on isotrooppinen eli graafisesti ilmaistuna pallomainen, jonka keskipisteessä antenni on). Suuntaavuus tarkoittaa siis sitä, mihin kohtaan antennin säteilykuviota sen lähetysteho keskittyy. Säteilykuvio on polaaridiagrammi, johon on graafisesti ilmaistu antennista säteilevän tehon suunnat sekä tehon määrä logaritmisesti.

EIRP tarkoittaa isotrooppista säteilytehoa, eli tehon siirtymistä lähtöpisteestä pallomaisesti joka suuntaan saman verran. Dipoliantenneissa suure on nimeltään ERP (*Effective Radiated Power*), joka käsittää antennin suuntaavuuden. EIRP on laskettavissa kaavan 10 mukaan. Kuvassa 7 nähdään EIRP:n ja ERP:n ero. [1, s. 119–121; 15, s. 3–4.]

$$P_{EIRP} = P_{ERP} * 1,64 \quad (3)$$

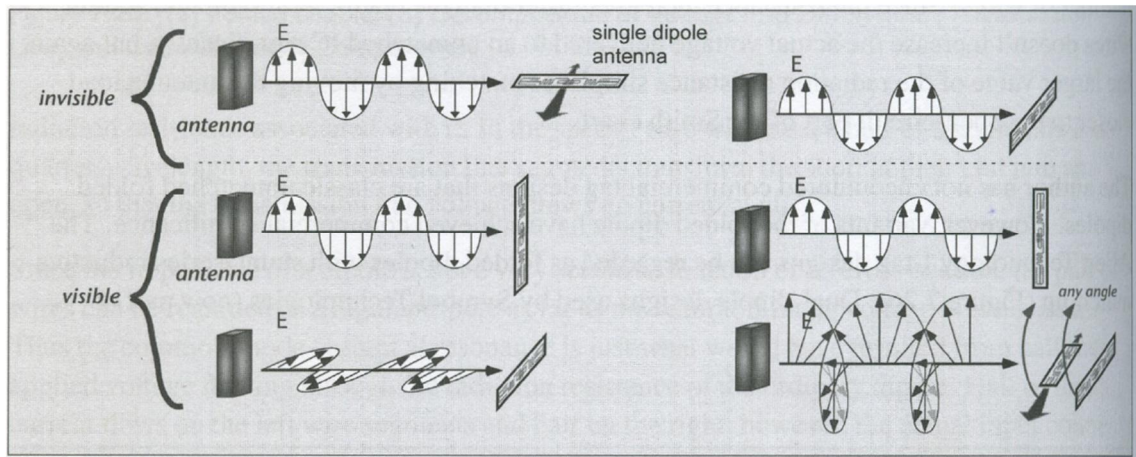


Kuva 7. EIRP:n ja ERP:n välinen ero teoriassa [15]

Toinen tärkeä parametri antenneille on sisäänmenoimpedanssi, joka on antennin syöttöpisteessä olevan jännitteen suhde syöttöpisteessä kulkevaan virtaan. Kolmas parametri antennin toiminnalle on kaistanleveys, joka ilmoittaa sen alueen, jolla antenni saavuttaa halutun toiminta-asteen. Kaistanleveys on siis taajuusalue, joka on toiminta-taajuuden ylä- ja alarajataajuuden erotus, ja se ilmoitetaan joko hertseinä tai prosenttilukuna antennin toimintataajuudesta.

Lisäksi antennin toimintaan vaikuttaa sen polarisaatio eli antennin sähkömagneettisen kentän vektorin (siis kentän amplitudin ja suunnan) kärjen piirtämä säteilykuvio yhden värähtelyjakson aikana. Käytännössä polarisaatio kertoo, miten sähkömagneettinen säteily etenee. Kuvasta 8 nähdään, että lukijalaite ei havaitse dipoliantennia, mikäli se on asetettu 90 asteen kulmaan lukijan lähettämään sähkökenttään E nähden. Sen sijaan lukijalaite havaitsee dipoliantennin aina, kun dipoliantenni on samassa tasossa lukijalaitteen lähettämän sähkökentän E kanssa.

Näiden kahden ääriasennon välissä lukijalaite voi havaita dipoliantennin, mutta antennien välinen etäisyys on ratkaiseva. Kaukana olevan dipoliantennin täytyy olla kunnolla asetettu (siis, lähes identtisesti sähkökentän kanssa), jotta lukijalaite havaitsisi sen. Lähempänä lukijalaitetta asennolla ei ole niin suurta merkitystä, kunhan se ei ole 90 asteen kulmassa sähkökenttään E nähden. [1, s. 121–123; 2, 156–158; 5, s. 113–114; 6, s. 4–6, 13–14; 8, s. 21.1–21.5.]



Kuva 8. Polarisaation vaikutus dipoliantennilla [3, s. 330]

3.3 Kuorman sovittaminen

Kuorman sovittaminen tarkoittaa piirin kuorman impedanssin asettamista siirtolinjaan (usein aaltojohto, kuten koaksiaalikaapeli tai mikroliuskajohto) siten, että säteilevä teho ei heijastu takaisin lähteeseen. Tällöin kuormaimpedanssi Z_L on generaattori-impedanssin Z_0 kompleksikonjugaatti eli liittoluku (kaava 4). Kompleksikonjugaatissa impedanssin resistanssi on sama kuin alkuperäisessä impedanssissa, mutta sen reaktanssi vaihtuu vastakkaismerkkiseksi.

$$Z_L = {}^*Z_0 \quad (4)$$

Konjugaattisesti tarkastellen jos $Z_0 = 50 + j50 \, \Omega$, niin $Z_L = 50 - j50 \, \Omega$. Usein generaattori-impedanssi kuitenkin on lähes puhtaasti resistiivinen, jolloin sovituspierillä kumotaan suoraan kuormassa oleva reaktanssi.

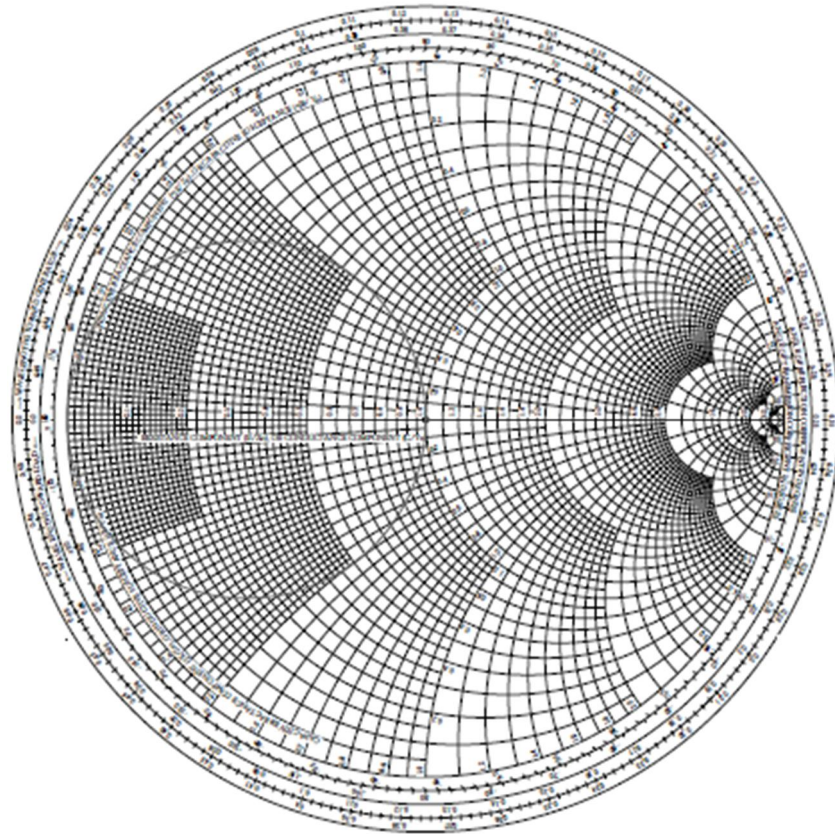
Siirtolinjan funktio on kuljettaa signaaleita sekä tehoa joko laitteiden välillä tai yksittäisen laitteen sisällä. Sovittaessa impedanssi kuormalle saadaan siis maksimaalinen teho, eikä säteilyhäviöitä tai signaalien vääristymistä synny. Yleisin sovitusimpedanssi on $50 \, \Omega$, joskin muitakin sovitusimpedansseja esiintyy, kuten $75 \, \Omega$. Tässä työssä antennin impedanssi sovitetaan PE3001-sirun valmistajan mittaamaan sisäänmenoimpedanssiin $15 - j74 \, \Omega$. [9, s. 12.]

Sovituksessa on huomioitava taajuus, sillä eri taajuusalueilla on toteutuksen suhteen huomattavia eroja. Alhaisilla taajuuksilla (UHF-taajuudet tai alle) voidaan sovitus toteuttaa keskitetyillä elementeillä eli reaktiivisilla komponenteilla, jotka kytketään kuormapiiristä siirtolinjaan. Toinen vaihtoehto keskitetyillä elementeillä sovittamiselle olisi neljännesaaltomuuntajasovitus, mutta koska tässä työssä käytetään keskitettyjä elementtejä, siihen ei paneuduta tarkemmin. Mikroaaltoalueella sovittaminen toteutetaan mikroluiskajohdoilla käyttäen esimerkiksi matala-/korkeaimpedanssisovitusta.

Keskitetyillä elementeillä sovittaminen on käytännössä kuormasta tulevien heijastuksien kumoamista reaktiivisten komponenttien aiheuttamien heijastusten avulla. Reaktiivisia komponentteja käyttämällä saadaan maksimaalinen tehonsiirto aikaiseksi, kun taas resistiivisiä komponentteja käyttämällä saataisiin absorptiota kuormaan, joka heikentää kuorman vastaanottamaa tehoa. Onkin siis usein järkevää olla käyttämättä resistiivisiä komponentteja sovitukseen, joskin tietyissä sovelluksissa resistiivisyys on eduksi. [2, s. 33, 65–75; 10.]

3.3.1 Smithin kartta

Smithin kartta (kuva 9) on ympyrämuotoinen diagrammi, jonka kautta voidaan selvittää piiristä useita tärkeitä parametreja, kuten impedanssi, heijastuskerroin, sirontaparametrit, kohina ja stabiilius. Eräs tärkeimmistä käyttökohteista Smithin kartalla on impedanssisovitus, jonka avulla voidaan sovittaa kuormaimpedanssit siirtolinjalle ilman monimutkaisia tietokonesovelluksia. Smithin kartalle voidaan toteuttaa impedanssisovitus usealla eri tavalla, joskin tässä työssä käytämme vain keskitetyillä elementeillä sovittamista.



Kuva 9. Smithin kartta pienennetyssä koossa [10]

Smithin karttaa käyttäessä on tärkeää normalisoida impedanssit, jotta ne voidaan esittää kartan eri kohdissa. Impedanssisovitus tapahtuu siten, että ensiksi normalisoidaan kuormaimpedanssi Z_L Smithin kartalle käyttäen kaavaa 5, jossa z_L on normalisoitu kuormaimpedanssi ja Z_0 on generaattori-impedanssi.

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (5)$$

Normalisoinnin jälkeen kuormaimpedanssi voidaan sijoittaa kartalle, ja tämän jälkeen voidaan sovittaa kuorma haluttuun pisteeseen, joka useassa tapauksessa on siis kartan keskipiste. Kartalla olevat ympyrät ovat reaaliympyröitä, joka tarkoittaa sitä, että ympyrän kaikissa pisteissä on reaaliosa täysin sama. Kartan keskellä kulkeva vaak akseli on impedanssin reaaliosan akseli, josta nähdään kunkin pisteen reaaliosan normalisoitu arvo. Täten jokaisen ympyrän reaaliosa on helposti luettavissa reaaliakselilta. Keskiakselin kolme tärkeää kohtaa ovat sen vasemmassa äärilaidassa (oikosulku, jossa

heijastuskerroin on -1), keskellä (keskipiste, jossa heijastuskerroin on 0) sekä oikeassa ääri laidassa (avoin piiri, jossa heijastuskerroin on 1).

Kartan keskiakselin yläpuolella on induktiivinen alue, ja sen alapuolella kapasitiivinen alue. Impedanssin imaginääriosan normalisoidun arvon voi lukea kartan kehältä löytyvistä luvuista, jotka kuvaavat ympyrän ylemmällä puolikkaalla sen induktiivisen reaktanssin, ja alemmalla puolikkaalla sen kapasitiivisen reaktanssin arvoa. Imaginääriosan arvo luetaan vetämällä suora viiva kartan keskipisteestä laitaan, kulkemalla kyseenomaisen impedanssin lävitse. Tällöin imaginääriosa on se lukuarvo, johon suora viiva päättyy laidalla. [2, s. 33, 65–75; 10.]

3.3.2 Smithin kartalla kulkeminen keskitetyillä elementeillä

Sovittaminen keskitetyillä elementeillä tapahtuu siten, että kuormasta siirtolinjaan kytketään yksi tai kaksi reaktanssia kohti generaattoria joko rinnan-rinnan, rinnan-sarjaan, sarjan-rinnan tai sarjan-sarjaan kuormaimpedanssin kanssa. Kun tiedetään kuormaimpedanssi (jonka resistanssi $\neq 0$), voidaan Smithin karttaa avuksi käyttäen sovittaa impedanssi halutuksi vaivattomasti. Sovittamisessa ideana on kulkea kartalla imaginääriosia pitkin haluttuun pisteeseen, jolloin tehohäviöitä ei synny.

Smithin kartalla kulkeminen keskitetyillä elementeillä tapahtuu seuraavasti. Kartalla kuljetaan reaaliasympyröitä pitkin haluttuun suuntaan. Kun kuljetaan alaspäin, niin impedanssin imaginääriosa pienenee, jolloin sen kapasitiivinen reaktanssi kasvaa. Sen sijaan ylöspäin kuljettaessa induktiivinen reaktanssi kasvaa. Jokainen kuljettu matka reaaliasympyröitä pitkin vastaa reaktanssia, joka voidaan realisoida sovituksesi käyttämällä sarjaan kytkettyä kondensaattoria tai kela.

Sarjakondensaattorin kapasitanssiarvo C_S voidaan laskea kaavalla 6, ja sarjakelan induktanssiarvo L_S kaavalla 7:

$$z_{cap} = \frac{Z_0}{j\omega C_S} \quad \rightarrow \quad C_S = \frac{Z_0}{\omega z_{cap}} \quad (6)$$

$$z_{ind} = j\omega L_S Z_0 \quad \rightarrow \quad L_S = \frac{z_{ind}}{\omega Z_0} \quad (7)$$

Mikäli on tarve, voidaan Smithin kartta peilata, jolloin siirrytään impedanssisovituksesta admittanssisovitukseen. Admittanssi on impedanssin käänteisarvo, jolloin Smithin kartan ylempi puolikas on kapasitiivista aluetta, ja alempi puolikas induktiivista aluetta. Kartalla admittanssipuolelle siirtyminen tarkoittaa sitä, että impedanssikohdasta peilautetaan kartan keskipisteen kautta toiselle puolelle karttaa. Tällöin alaspäin reaali-osaympyröitä kuljettaessa impedanssin imaginääriosaa kasvaa, ja ylöspäin kuljettaessa imaginääriosaa laskee. Jokainen kuljettu matka admittanssisovituksessa vastaa susceptanssia, joka voidaan realisoida käyttämällä rinnankytkettyä kondensaattoria tai kela.

Rinnankytketyn kondensaattorin kapasitanssiarvo C_p voidaan laskea kaavalla 8, ja rinnankytketyn kelan induktanssiarvo L_p kaavalla 9:

$$y_{cap} = j\omega C_p Z_0 \quad \rightarrow \quad C_p = \frac{y_{cap}}{\omega Z_0} \quad (8)$$

$$y_{ind} = \frac{Z_0}{j\omega L_p} \quad \rightarrow \quad L_p = \frac{Z_0}{\omega y_{ind}} \quad (9)$$

PE3001-sirun sisäänmenoimpedanssiksi on valmistaja ilmoittanut $15 - j74 \Omega$, mikä tarkoittaa sitä, että antennin impedanssi on sovitettava konjugaattisesti siihen. Tällöin Smithin kartalla tulisi kulkea pisteeseen $15 + j74 \Omega$, jotta heijastukset saadaan kumottua tehohäviöiden välttämiseksi. [2, s. 33, 65–75; 10.]

3.4 Piirilevyn suunnittelu

Tunnistetta varten oli tarkoitus valmistaa piirilevy, jossa on dipoliantennin, sovituskomponenttien ja PE3001-sirun lisäksi jännitelähde, tässä tapauksessa kaksi 3 V paristoa sarjaankytkettynä, MBED-mikrokontrolleri kolmella $5 \text{ k}\Omega$ alavetovastuksella, kaksi diodia rajoittamassa virran kulkusuuntaa, sekä jänniteregulaattori kahden mikrofaradin kondensaattorin kanssa. Piirilevy suunniteltiin PADS-ohjelmistolla, jonka avulla saatiin sekä piirikaavio että piirilevy toteutettua. Piirilevyn fyysiset mitat ovat $69 \text{ mm} * 147 \text{ mm}$, jotka ovat antennin pituudesta johtuen varsin siedettävät työn tarkoitusta varten.

Piirilevyn yläosa on kokonaan varattu dipoliantennille, ja tätä varten kaikki ylimääräinen kupari poistettiin valmistusvaiheessa yläosasta, jotta välttyttäisiin hajareaktansseilta dipolin ja kuparipinnan välillä. Sen sijaan kortin muu alue oli kokonaan kuparin peitos-

sa, ja tästä alueesta tehtiinkin kortin maa-alue. Kortilla kiinnitettiin huomiota myös EMC-asioihin siten, että paristot asetettiin kortin reunaan, ja MBED-mikrokontrolleri kortin alaosaan, jotta antenni saisi mahdollisimman vähän häiriötä. Lisäksi PE3001-siru sijoitettiin likipitään kiinni sovituspäihin, jotta sovituspäihin ja sirun välinen etäisyys ei aiheuttaisi huomattavaa epäsovitusta. [9.]

3.5 Antennin mittaukset ja sovittaminen

Kun kortti oli saatu jyrskyä LPKF ProtoMat S62 -laitteella (liite 1), oli seuraavana vuorossa antennin mittaus käyttäen HP E8714 -vektoriiriianalysaattoria. Vektoriiriianalysaattori on laite, jolla voidaan mitata testikappaleen (esimerkiksi antenni tai vahvistin) S-parametrejä. Näitä parametreja käytetään, kun halutaan selvittää esimerkiksi heijastuskerroin, impedanssi, vahvistus ja muita vastaavia arvoja. Tässä työssä haluttiin selvittää antennin resonanssitaajuus sekä impedanssi läheltä PE3001-sirun sisäänmenoa.

Ennen kuin mittausjärjestely voitiin toteuttaa, oli vektoriiriianalysaattori kalibroitava siten, että käytössä olevat kaksi Mini-Circuitsin valmistamaa koaksiaalikaapelia, sekä koaksiaalikaapeleista valmistettu mittapää voitiin jättää huomioitta itse mittauksissa. Korkeilla taajuuksilla siirtolinjat aiheuttavat vaiheensirtoa sekä vaimennusta, joten tästä johtuen kalibrointi on tarpeen, jotta nämä seikat saadaan eliminoitua. Kaapeleiden kanssa käytettyjä SMA naaras-naaras -adaptereita ei kalibroitu, sillä niiden vaikutus mittausjärjestelyssä on minimaalinen. [11; 12, s. 27-29; 13; 14]

3.5.1 Vektoriiriianalysaattorin kalibrointi

Vektoriiriianalysaattorin kalibrointi toteutettiin siten, että aluksi se nollattiin laitteen Preset-toiminnolla. Tämän jälkeen asetettiin näytölle haluttu taajuuskaista. Tässä mittauksessa kaistaksi asetettiin 700 MHz–1 GHz. Taajuuden asettamisen jälkeen aloitettiin kaapeleiden kalibrointi siten, että ne kytkettiin ketjuun laitteen Reflection-portista, ja kaapeleiden toiseen päähän asetettiin HP:n kalibrointilaite.

Kalibroinnissa ideana on syöttää laitteelle kaapeleiden kautta kolme eri impedanssia käyttäen laitteen Enhanced Response -toimintoa. Nämä impedanssit ovat Smithin kartan kolme vakiopistettä. Ensiksi syötetään avoin piiri, joka on siis Smithin kartan oike-

assa laidassa sijaitseva piste. Tämän jälkeen laitteelle syötetään oikosulku, joka sijaitsee Smithin kartalla vasemmassa laidassa. Kolmantena laitteelle syötetään kuorma, joka tässä tapauksessa on Smithin karta keskipiste, eli 50 ohmia. Viimeisenä vaiheena kalibroitipalikka irroitetaan, ja kaapeleiden toinen pää kytketään vektoripiirianalysaattorin Transmission-porttiin. Tämän jälkeen laite ei enää huomioi kaapeleita mittauksissa.

Kaapeleiden lisäksi oli tärkeää saada eliminoitua mittapään aiheuttamat vaikutukset mittauksissa. Tämä on hieman kaapeleiden kalibrointia hankalampaa, sillä mittapään kolmas portti ei ole varustettu millään liittimellä, vaan siinä on pelkästään kaksi koaksiaalikaapeleiden sisäjohtinta. Mittapään vaikutusten eliminointi suoritettiin siten, että kaapeleiden kalibroinnin jälkeen juotettiin mittapään sisäjohtimet kiinni sekä mittapään ulkovaippaan, että toisiinsa.

Tämän jälkeen vektoripiirianalysaattorilta valittiin kalibroitilaksi Reflection Port Extension -tila, jossa tarkastellaan heijastuksen (*reflection*) käyttäytymistä Smithin kartalla. Tarkoituksena tässä on aiheuttaa vektoripiirianalysaattorille heijastusviivettä sen verran, että heijastuskäyrä sijoittuu kartan vasempaan äärilaitaan eli oikosulkuun. Heijastusviiveen arvoksi saatiin lopulta luettua 998,24 ns.

Heijastusviiveen mittaamisen jälkeen mittapään sisäjohtimet ja ulkovaippa juotettiin irti toisistaan, joskin sisäjohtimet jätettiin vielä keskenään oikosuljetuiksi. Seuraavaksi tarkoituksena oli eliminoida mittapään siirtoviiveet käyttäen vektoripiirianalysaattorin Transmission Port Extension -tilaa. Tässä tilassa ideana on tarkastella siirtopuolella (*transmission*) vaihetta, ja säätää siirtoviivettä niin, että näytölle asetetulla taajuusalueella vaihe on vaakasuora, eikä siis muutu ollenkaan halutulla kaistalla.

Kun vaihe on saatu asetettua niin, että kuvaaja näytöllä on silmämääräisesti horisontaalinen, on kalibrointi päätöksessään. Tämän jälkeen kaapeleiden ja mittapään aiheuttamat vaimennukset ja vaiheensirrot on täysin eliminoitu, ja piirilevyn mittaaminen voidaan aloittaa. Tässä työssä kalibrointi onnistui hyvin, ja ongelmia ei esiintynyt. [11; 12, s. 27-29; 13; 14.]

3.5.2 Piirilevyn mittaukset

Mittaukset aloitettiin juottamalla piirilevy kiinni mittapään sisäjohtimiin siten, että vektoriiriianalysoitsaattorin Reflection-portista tullut kaapeli oli kytkettynä dipoliantennin signaalihaarassa, ja Transmission-portista tullut kaapeli dipoliantennin virtuaalimaahaa-
rassa. Mittapää juotettiin kiinni n. puolivälissä dipoliantennin haarautumiskohtaa ja PE3001-sirun sisäänmenoa, kuten kuva 10 osoittaa.



Kuva 10. Mittapää juotettuna dipoliantenniin

Juottamisen jälkeen tarkasteltiin ensiksi antennin resonanssitaajuutta katsomalla heijastuspuolelta logaritmista magnitudiasteikkoa. Piirilevyä jysittäessä dipoliantennin pituus jätettiin tarkoituksella laskettua pidemmäksi, sillä FR-4 -levyjen valmistaja ilmoittaa levyissä käytettävän kuparin dielektrisyysvakion heittävän ilmoitetusta arvosta mahdollisesti jopa $\pm 10\%$. Tämän takia antennin resonanssitaajuus on aluksi haluttua pienempi, jolloin vältetään levyn uusiksi tekeminen, mikäli dielektrisyysvakio heittäisikin väärään suuntaan.

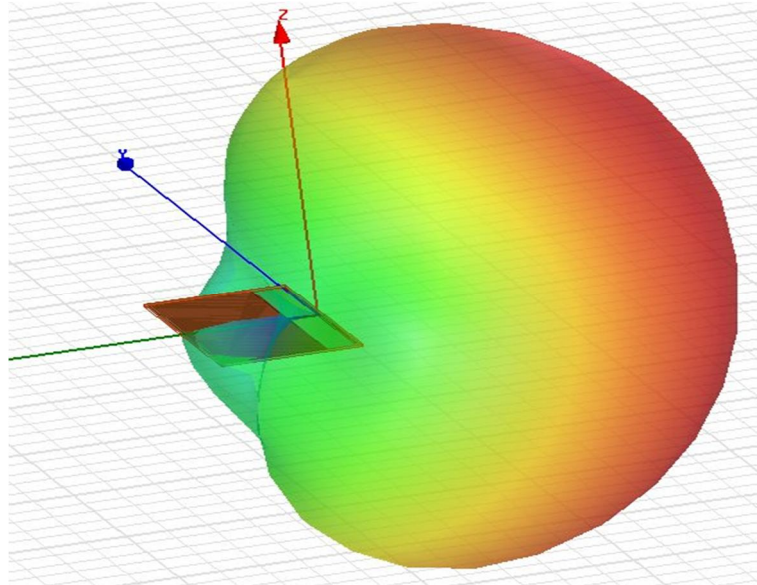
Resonanssitaajuus saadaan lähelle haluttua 868 MHz:iä leikkaamalla dipoliantennin molemmista päistä irti kuparia käyttäen mattoveistä. Kun dipoliantennin fyysinen pituus pienenee, sen resonanssitaajuus kasvaa. Työssä leikattiin antennista kerrallaan 1 mm:n pituisia paloja, jolloin lähestyttiin pikkuhiljaa haluttua taajuutta. Kun haluttu taajuus oli hyvin lähellä, pienennettiin leikattua pituutta, ja näin ollen hienosäädettiin resonanssitaajuudeksi haluttu arvo. Lopulta antennin resonanssitaajuudeksi saavutettiin 868 MHz, ja vektoripiirianalysointiltaan voitiin lukea, että resonanssitaajuudella heijastus putoaa noin 23–24 dB. Tämä arvo oli riittävän hyvä antennin toiminnalle, joten antennia ei säädetty sen enempää.

Kun resonanssitaajuus saatiin säädettyä kohdalleen, oli tämän jälkeen vuorossa Smithin kartan tarkastelu. Kartalta voitiin heti huomata, että resonanssitaajuudella antennin impedanssi oli n. 40Ω , eli puhtaasti reaalinen. Kohdeimpedanssi oli PE3001-sirun sisäänmenoimpedanssin kompleksikonjugaatti, eli $15 + j74 \Omega$. Täten sovitusta toteutettiin käyttäen antennista katsoen sarjakondensaattoria ja rinnankondensaattoria. Kondensaattorien arvot saatiin käyttäen kaavoja 6 ja 8, jolloin sarjakondensaattorin arvoksi tuli 1,7 pF ja rinnankondensaattorin arvoksi noin 3,4 pF.

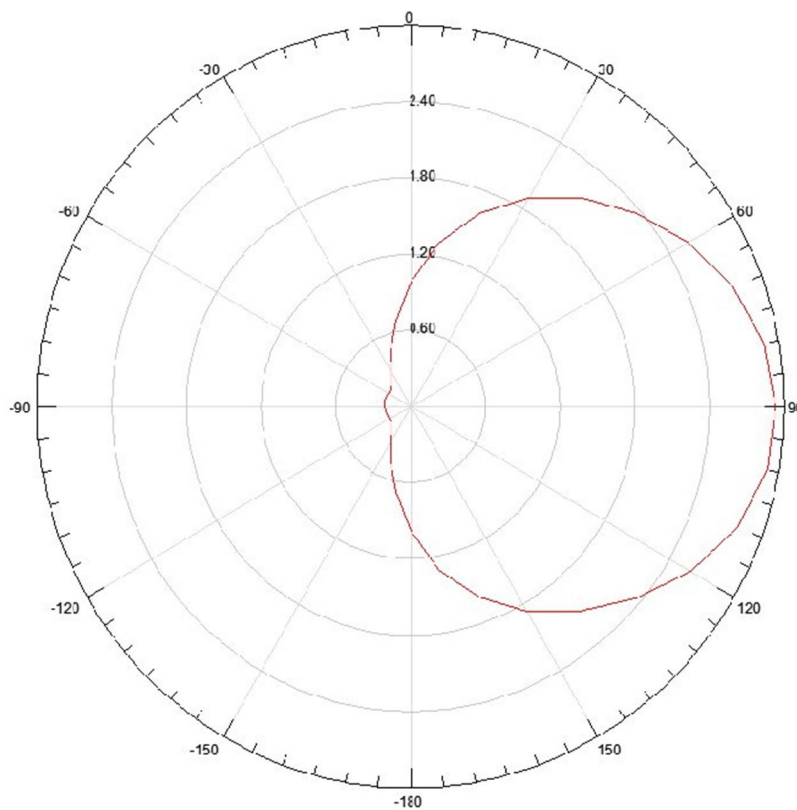
Valitettavasti sovituksessa tai mittauksissa oli ongelmia, ja näin ollen antennin mitattu impedanssi $25 - j3 \Omega$ ei sovituskondensaattoreiden lisäämisen jälkeen ollut PE3001-sirun liittolukua lähelläkään. Ongelmaa selvitettiin muun muassa käyttämällä eri koaksiaalikaapeleita, tekemällä uusi piirilevy ja vaihtamalla kondensaattorit. Syy ei kuitenkaan selvinnyt, joten päädyimme simuloimaan dipoliantennin Ansoftin HFSS 17.0 -ohjelmalla. Simulointien yhteydessä huomattiin, että kortilla oleva kuparista muodostuva maa-alue aiheuttaa antennille induktiivista reaktanssia, joka kulki Smithin kartalla halutun impedanssipisteen ($15 + j74 \Omega$) kautta. Näin ollen pystyttiin asettamaan simulointiohjelmassa tämä piste halutuksi arvoksi, jolloin dipoliantennin fyysinen pituus asetettiin ainoaksi muuttujaksi.

Simulaatiotulosten valmistuttua ohjelma tarjosi dipoliantennin pituudeksi 68,4 millimetriä. Tämän jälkeen valmistettiin uusi piirilevy, ja komponentit juotettiin kiinni. Simulointien yhteydessä saatiin otettua kaksi- ja kolmiulotteiset säteilykuviot HFSS 17.0 -ohjelmalla. Kuvassa 11 nähdään kolmiulotteinen esitys, jossa säteilyteho on suuntautunut kuvan punaisiin kohtiin. Kuvasta 12 voidaan huomata antennin suuntaavuus,

joka kuvaajan mukaan on likimain 3 dB. Kuva 12 on tarkempi esitys kuvan 11 kolmiulotteisesta kuvasta, eli kuvista saadaan jokseenkin selkeä käsitys antennin suuntaavuudesta.

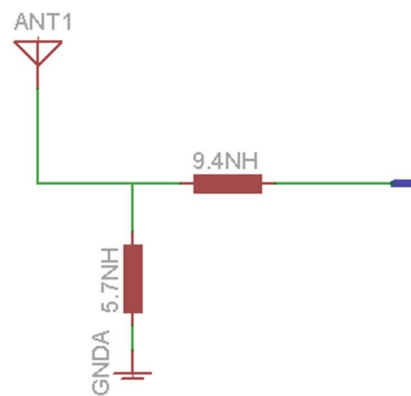


Kuva 11. Dipoliantennin simuloitu suuntakuvi kolmiulotteisesti esitettynä



Kuva 12. Dipoliantennin suuntakuvi yläpuolelta katsottuna

Työn loppuvaiheilla tehtiin testimielessä ns. PIFA-antennilla varustettu RFID-tunniste (liite 2), jolla haluttiin tarkastella kuinka PE3001-siru toimisi toisenlaisella antennilla kuin dipoliantenni. Antenni simuloitiin myös Ansoftin HFSS 17.0 -ohjelmistolla asettaen parametreiksi sisäänmenoimpedanssin 50Ω , ja taajuudeksi 868 MHz. Sisäänmenoimpedanssi ei tällä kertaa ollut kompleksikonjugaatti sirun impedanssista, vaan sovitus toteutettiin sirusta antenniin, eikä päinvastoin kuten dipoliantennilla. Antenni sovitettiin kuvan 999 mukaan kahdella kelalla, joiden arvoiksi saatiin 9,4 nH ja 5,7 nH.

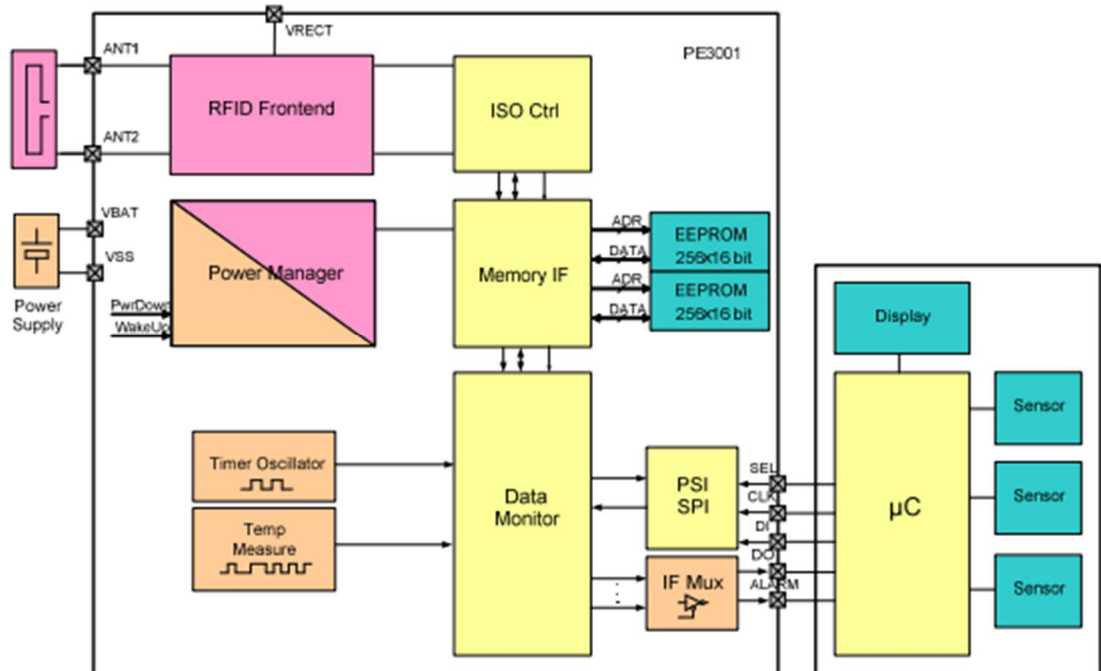


Kuva 13. PIFA-antennin sovituspiiri

4. PE3001-siru ja sen ohjelmointi

4.1 PE3001-sirun sisäinen rakenne

PE3001 on UHF-alueen integroitu RFID-siru, joka vastaanottaa tehoa antennilta, ja luo vastaussignaalin, jonka antenni siroaa takaisin lukijalaitteelle. Kuvassa 14 nähdään, että siru sisältää RFID etupää -kytkennän (Frontend), EEPROM-muistia, liitännät antennille ja paristoille, SPI-väylän ulkoisia laitteita varten, Data Monitor -ohjaimen, joka monitoroi esimerkiksi lämpötiloja, ja tärkeimpänä ISO Ctrl -ohjaimen, joka hallinnoi tunnisteen ja lukijalaitteen välistä kommunikointia tunnisteen osalta. Lisäksi ISO Ctrl hallinnoi tunnisteen EEPROM-muistia. Sirulla on myös Power Manager -ohjain, jonka avulla siru voi kytkeä tunnisteen oman virtalähteen tarpeen vaatiessa päälle. [9.]

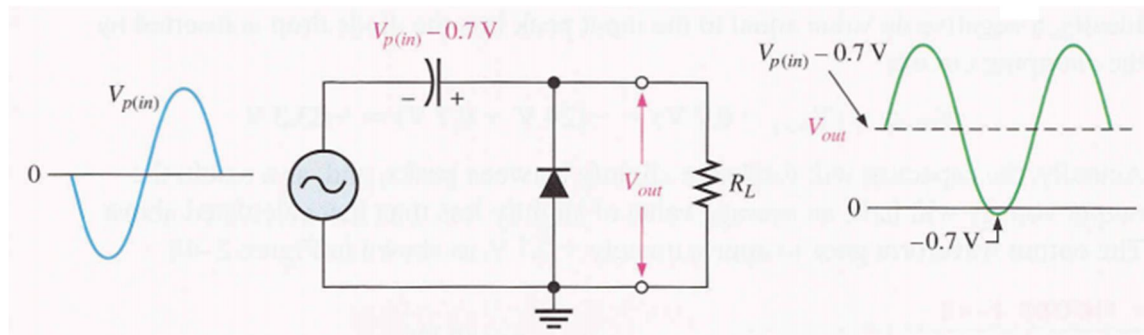


Kuva 14. PE3001-sirun sisäinen rakenne [10]

Sirun RFID etupää -kytkennän sisällä on modulaattori, joka demoduloi lukijalaitteelta saapuvan amplitudimoduloidun (SSB- tai DSB-ASK) signaalin. Modulaatio tarkoittaa korkeataajuisen signaalin muokkaamista siten, että haluttu data sisällytetään signaaliin jossain muodossa, kuten amplitudiin, vaiheeseen tai taajuuteen.

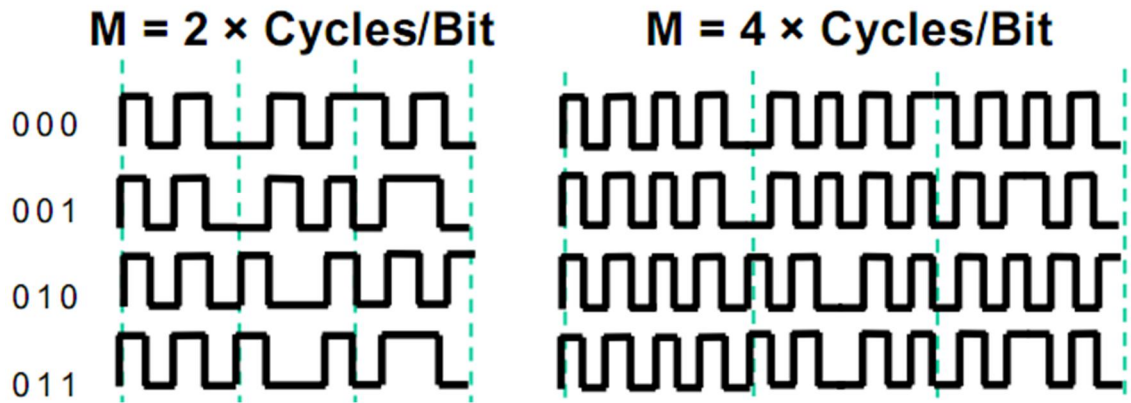
Kun etupääkytkentä on demoduloinut vastaanotetun signaalin, se muutetaan seuraavaksi RF:stä DC:ksi. Etupääkytkentä sisältää aina jonkinlaisen tasasuuntauksen, sekä usein jännitteen tasonnostajan ja jännitetuplaajan. Tasasuuntauksessa käytetään useimmiten kokoaaltotasasuuntausta, mutta myös yksinkertaisemmat puoliaalto-tasasuuntauskytkennät ovat joissain tapauksissa käytössä.

Etupääkytkennän jännitteen tasonnostaja (kuva 15) on yksinkertainen diodia ja kondensaattoria käyttävä kytkentä, jossa AC-signaaliin lisätään DC-signaali. Tällöin signaalin alin arvo on diodin kynnyksjännite negatiivisena (yleensä noin $-0,7\text{ V}$). Tasolukolla ja jännitteentuplaajalla saadaan tasasuuntausvaiheessa korkeampi DC-jännite aikaan, joten ne ovat käyttökelpoisia RFID-siruissa, jotka vaativat korkeahkon jännitteen. Kaiken varalta siruissa on aina jänniteregulaattori sisällä, jotta käsitelty DC-jännite ei olisi amplitudiltaan yli sirun maksimijännitteenkeston. [5, s. 4–9; 16, s. 48–62, 74–77.]



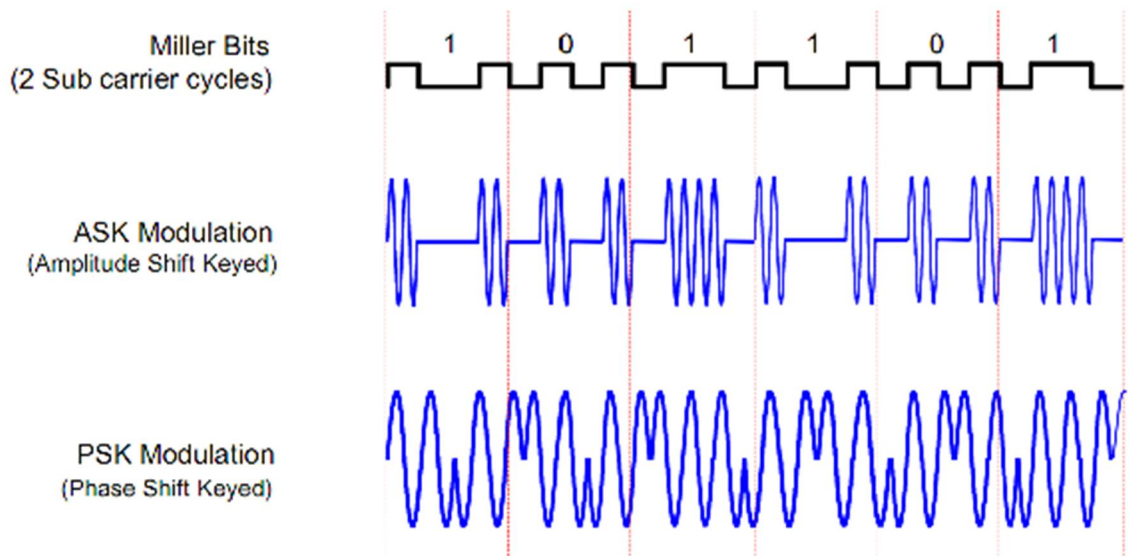
Kuva 15. Jännitteen tasolukko [16, s. 75]

Vastaanotettavan signaalin käsitelyään PE3001-siru takaisinsiroaa lukijalaitteelle vasti-
neen käyttämällä digitaalista amplitudi- (ASK) tai vaihemodulaatiota (PSK) siten, että
sirun sisällä oleva shunttipiiri aiheuttaa tunnisteen antennin heijastuskertoimelle muu-
toksen, jolloin aikaan saadaan modulaatio. Ennen modulaatiota signaali kuitenkin koo-
dataan käyttämällä Miller- tai FM0-koodausta. Tämän työn mittausjärjestelyssä käytet-
tiin Miller-koodausta, jossa voidaan käyttää kahta, neljää tai kahdeksaa kanta-aaltojak-
soa per bitti. Miller-koodauksessa tila ei vaihdu kahden loogisen nollan välillä tai loogi-
sen ykkösen kahden keskimmäisen kanta-aaltojakson välissä, kuten kuvasta 16 näh-
dään.



Kuva 16. Miller-koodaus kahdella ja neljällä kantaaltojaksolla [15]

Miller- tai FMO-koodausta käytetään aina, kun dataa liikkuu takaisinsiroamalla tunnistelta lukijalaitteelle. Tunniste päättää modulaatityyppin (joskin siruissa modulaatityyppi voi mahdollisesti olla lukittu valmistajan toimesta tietyksi), ja lukijalaite tiedonsiirtonopeuden ja koodausmenetelmän. Kuvassa 17 on esitetty Miller-koodattu signaali ASK- ja PSK-moduloituina. [15; 18.]

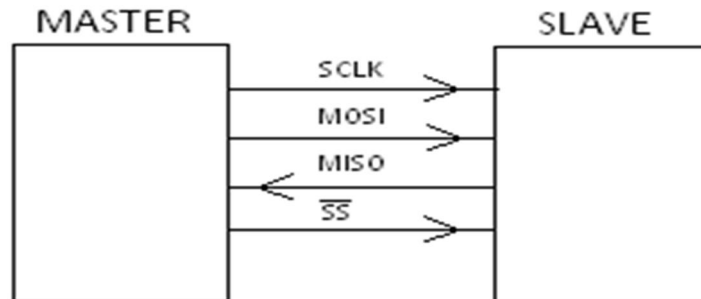


Kuva 17. Miller-koodattu signaali PSK:na ja ASK:na [15]

4.2 SPI-väylä

SPI-väylä on master-slave -tyylinen sarjaliikennemalli, joka sisältää 3–4 signaalitietä isäntälaitteen (tässä työssä MBED-mikrokontrolleri) ja orjalaitteen (tässä työssä

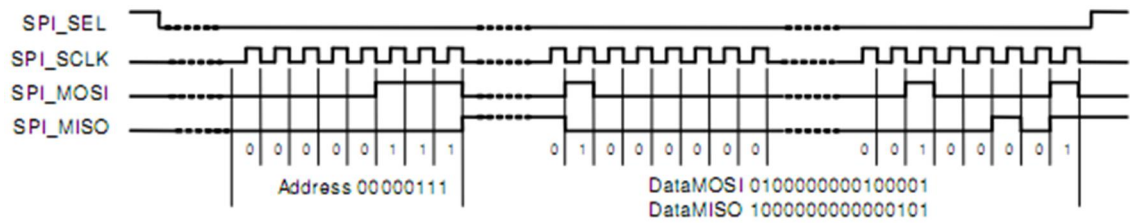
PE3001-siru) välillä kuvan 18 mukaisesti. On mahdollista käyttää useaa orjalaitetta samassa SPI-väylässä, joskin orjalaitteista vain yksi voi olla kerrallaan aktiivisena. Isäntälaitteita voi SPI-väylässä olla vain yksi. SPI-väylä toimii full duplex -menetelmällä.



Kuva 18. SPI-väylä isäntälaitteen ja orjalaitteen välillä

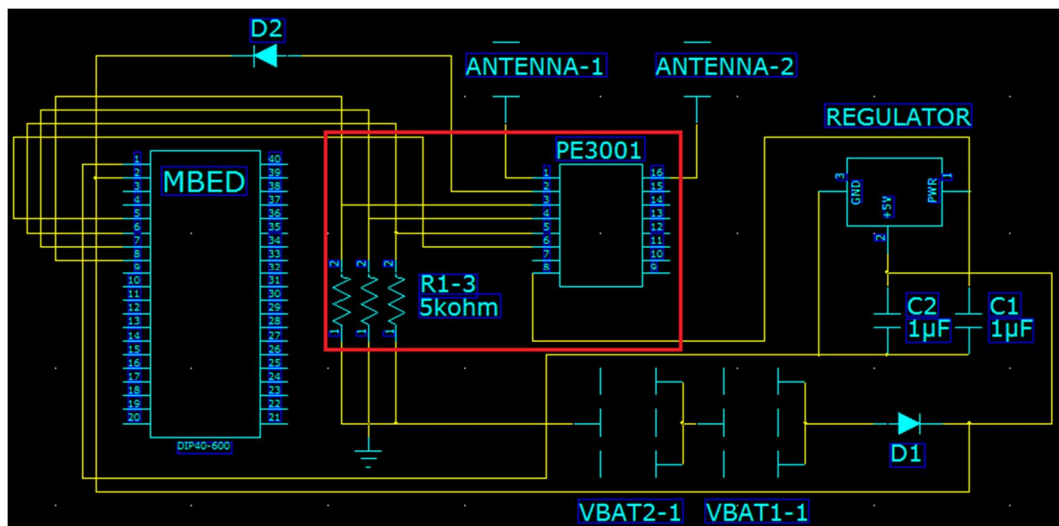
Signaaleista ensimmäinen on SCLK (Serial Clock), joka synkronoi tiedonsiirtoa isäntälaitteen kautta käyttäen isäntälaitteen luomaa kello-signaalia. Laitteiden välisen tiedonsiirron mahdollistavat signaalitiet ovat MOSI (Master Out Slave In, eli data joka kulkee MBED-mikrokontrollerilta PE3001-sirulle) ja MISO (Master In Slave Out), jotka toimivat siis SCLK-kellon tahdissa. Neljäs, yhden orjalaitteen tapauksessa valinnainen signaaliliinja on SS/CS (Slave Select/Chip Select), jolla valitaan se orjalaite, jolla halutaan kommunikoida isäntälaitteen kanssa. Lisäksi PE3001-sirulla on SPI_SEL-nasta, jolla SPI-väylä aktivoidaan tarpeen vaatiessa. Tämä nasta on kytketty MBED-mikrokontrollerin nastaan 8, ja se on alhaalla aktiivinen.

Tiedonsiirto kahden SPI-laitteen välillä toimii laitteiden sisäisten 8- tai 16-bittisten siirtorekistereiden välillä, joissa bittejä shiftataan (siirretään) alkaen MSB:stä. SPI-käskyt alkavat sillä, että isäntälaitte asettaa kellon siten, ettei käytössä oleva taajuus ole korkeampi kuin orjalaitteen maksimitaajuus. Sen jälkeen isäntälaitte asettaa orjalaitteen CS-tilan loogiseksi nolaksi, jolloin orjalaite aktivoituu, sillä CS on alhaalla aktivoituva. Tämän jälkeen MOSI- ja MISO-signaalitiet siirtävät dataa laitteiden välillä. Liitteessä 3 on nähtävillä PE3001-sirun sisäisiä SPI-komentoja, joita voidaan ajaa MBED-mikrokontrollerilla. Kuvassa 19 nähdään SPI-väylän tiedonsiirtoa.



Kuva 19. Tiedonsiirto SPI-väylällä [9]

SPI-väylää käyttämällä saadaan käyttöön ulkoisia apuvälineitä, kuten tässä työssä käytettävä MBED-mikrokontrolleri. Lisäksi tunnistelle pystyttäisiin sisällyttämään erinäisiä antureita, joita PE3001-siru voisi käyttää lukijan kanssa kommunikoidessaan. Työssä valmistetussa tunnisteeissa SPI-väylä vaatii jokaiselle PE3001-sirulle menevältä signaalilinjalta ns. alasetovastukset kuvan 20 mukaisesti, joilla varmistetaan sirulle sisäänmenevien signaalien tasoksi looginen nolla, kun SPI-väylä ei ole käytössä. [17.]



Kuva 20. PE3001-siru ja alasetovastukset piirikaaviolla

4.3 EPC Class 1 Generation 2 -standardi

EPC Class 1 Generation 2 -standardi (lyhennettynä Gen2) on EPCglobal Inc:n toteuttama standardi UHF-alueen RFID-tunnisteille. Kyseisen standardin tarkoituksena on yhdenmukaistaa maailman RFID-käytäntöjä, jotta teknologiakehitys vauhdittuisi entisestään. Itse EPC (*Electronic Product Code*) on numerosarja, joka tallennetaan tunnisteen

sirulle. Tällä koodilla voidaan selvittää tietokannasta kaikki tarpeellinen tieto liittyen tavaraan, johon tunniste on kiinnitetty.

Gen2-standardi määrittelee UHF-alueen taajuuskaistalla 860–960 MHz toimiville tunnistelle erinäisiä vaatimuksia, kuten piirien fyysiset koot ja loogiset toiminnot. Tässä työssä käytetty PE3001-siru toimii tämän standardin mukaan, ja siten standardi asettaa sirun ohjelmoinnin kannalta erinäisiä vaatimuksia. Lisäksi Gen2-standardissa toimintamenetelmäksi on määritelty half duplex -menetelmä, joka toimii ITF-muodossa (*Interrogator-talks-first*), eli lukijalaitte avaa kommunikoinnin. [6, s. 17–32; 15; 18.]

4.4 Sirun muistialueet

PE3001-sirulla sijaitsee neljä muistipankkia, jotka määrittelevät sirun toiminnan. EPC-muistipankki sisältää kaikki EPC Class 1 Generation 2 -standardin mukaiset tiedot, kuten 96-bittisen EPC-koodin (rekisterit 02–07h), 16-bittisen CRC-, eli tarkisteavainrekisterin (00h) sekä 16-bittisen Protocol Control -rekisterin (01h), jonka avulla voidaan määrittellä EPC-koodin koko yhdestä seitsemään sanaan. Lisäksi Protocol Control -rekisteri sisältää 9-bittisen numerointijärjestelmän, johon voidaan sisällyttää EPCglobal Inc:n tunnistetieto. EPC-koodi itsessään kertoo tarvittavat tiedot kohteesta, johon tunniste on kiinnitetty tai affilioitu.

Reserved-pankki sisältää sirun salasana, kuten 32-bittiset Kill-komennon ja Access-komennon sekä esimerkiksi mittauslaskurin. Kill-salasanana tuhoaa sirun, kun se lähetetään lukijalaitteelta. Salasanan voi asettaa sirun Reserved-rekisterissä kahdesta 16-bittisestä muistipaikasta (00h ja 01h), ja sitä ei pystytä lukemaan sirusta, mikäli lukitus on asetettu päälle. Kill-komentoa ei voida ajaa, mikäli rekisterissä salasanaksi on määriteltä nolla, kuten aina vakiona ennen ensimmäistä ohjelmointia. Näin ollen komento voidaan ajaa vain silloin, kun Kill-salasanana on erikseen ohjelmoitu sirulle lukijalaitteelta.

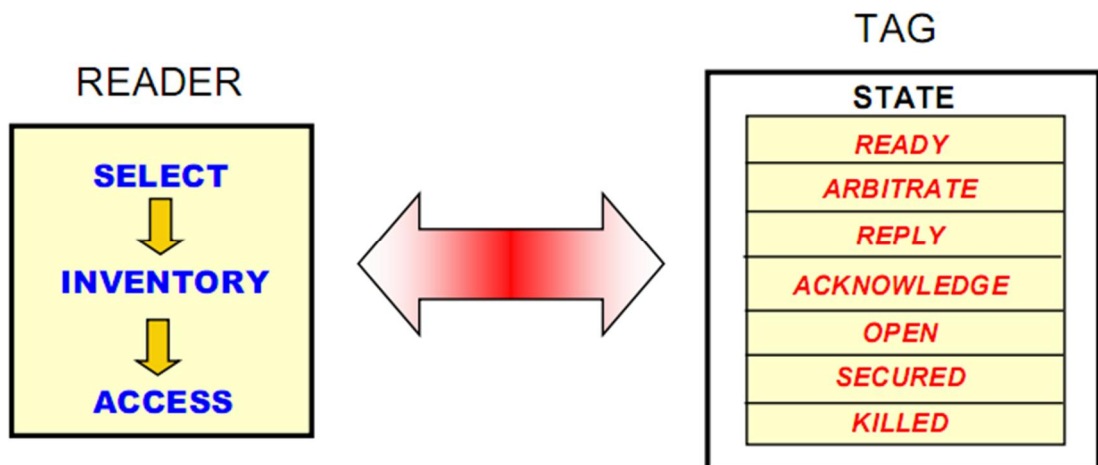
Access-komennon avulla siru siirtyy Secured-tilaan (suojattu), jolloin lukittuihin rekistereihin pystyy kirjoittamaan. Kuten Kill-komennossa, Access-komentoa ei voida ajaa, mikäli salasanana on asetettu nolaksi. Myös Access-komennon salasanana on aina vakiona nolla, ellei sitä erikseen ohjelmoida. Ilman Access-salasanana, siru on aina Secured-

tilassa. Mikäli sirun salasana poikkeaa nolasta, eikä Access-komentoa ole ajettu, siru on Open-tilassa (avoin), eikä tällöin pääse käsiksi lukittuihin rekistereihin.

Sirun TID-pankissa (*Tag Identification*) on sirun valmistajan luomat tunniste- ja valmistustiedot. Sen lisäksi se sisältää kaikki tiedon monitorointia varten tarvittavat tiedot ja asetukset, sekä säätörekisterit esimerkiksi lämpötila-antureille ja sisäiselle oskillaattorille. TID-pankki sisältää kaiken tarpeellisen tiedon esimerkiksi sen suhteen, jos halutaan tunnistaa yksi tietty tunniste useamman joukosta. Viimeinen muistipankki sirulla on User-pankki, johon käyttäjä voi tallentaa haluamaansa tietoa, kuten ulkoisten laitteiden mittaustuloksia tai vastaavaa. TID-pankin LogSize-rekisteri määrittelee User-pankin muistialueen koon. [15, s. 22–25; 18, s. 37–43.]

4.5 Tunnisteiden hallinta ja tilat

Tunnisteiden hallinta on eräs tärkeä osa RFID-tekniikkaa, jotta pystytään ohjaamaan tavaraliikennettä tehokkaasti. Tätä varten EPC Gen2:ssa on käytössä kolmivaiheinen jaottelu tunnisteille. Kuvassa 21 esitetään eri vaiheet, sekä tunnisteen eri tilat.

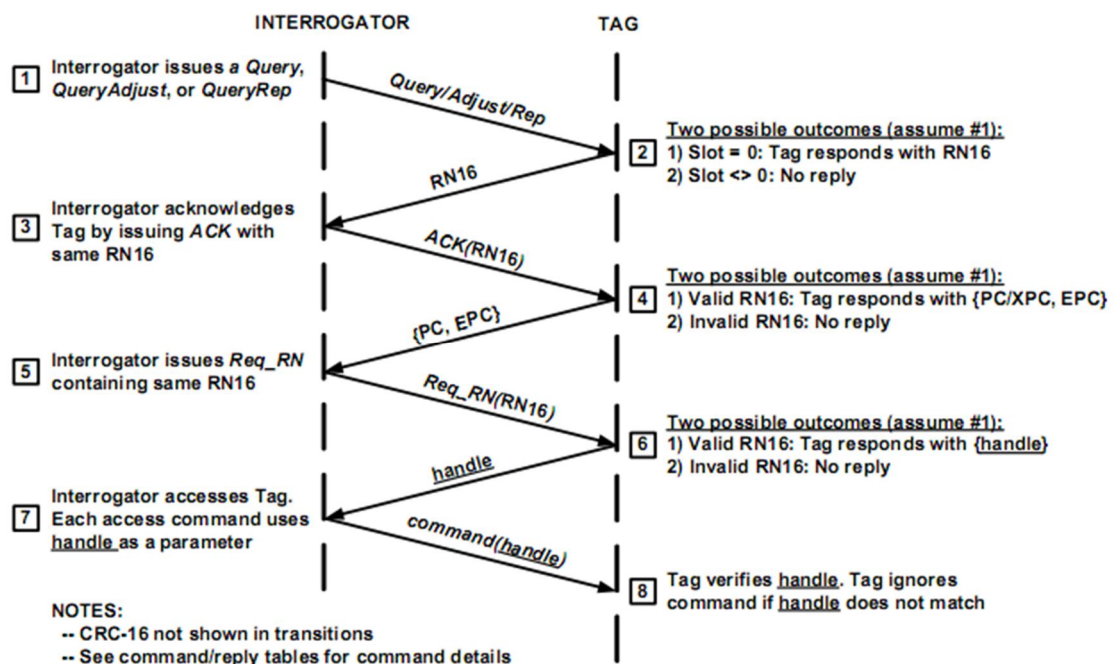


Kuva 21. Tunnisteiden hallinta ja tilat EPC Class 1 Gen2 -standardissa [15, s. 26]

Aluksi kaikki tunnistet on jaettu eri neljään eri istuntoon (*Session*, S0–S3). Istunto on kiinteä osa hallinnan ensimmäistä ja toista vaihetta, joissa tunnistet jaetaan käsiteltäviksi. Lisäksi jokaisessa istunnossa on kaksi tilaa tunnisteille, A ja B. Kun tunnistetiden hallinta aloitetaan, lukijalaite lähettää Select-komennon tunnisteille, jossa ensiksi määritellään istunnon numero, jotta voidaan valita tietyt tunnistet.

Tämän jälkeen määritellään Select-komennon loppuparametrit, eli *Mask* (bittijono, jota vertaillaan tunnisteiden muistin kanssa), *MemBank* (muistipankki johon Mask-parametriä verrataan), *Pointer* (kohta, josta vertailu alkaa), *Length* (bittijonon pituus) ja *Action* (kuinka tunnistet muuttavat tilaansa jos ne ovat yhteneväisiä Mask-parametrin kanssa). Select-komento voidaan ajaa useammin, jotta saadaan isompi tunnistejoukko valittua seuraavaa vaihetta varten. Käytännössä istunto on siis vain joukkio tunnisteita, joihin voidaan jakaa halutut tunnistet esiohjelmoinnin yhteydessä. Tunnistet siis jaetaan kahdeksaan eri joukkoon (neljä eri istuntoa, joilla kullakin kaksi eri tilaa), joista Select-komennolla valitaan yhden istunnon jompikumpi tila kerrallaan.

Hallinnan toinen vaihe eli Inventory-vaihe on tunnistetiden järjestämistä lukujärjestykseen, sillä lukijalaite ei voi lukea useaa tunnistetta samanaikaisesti. Kuten kuvassa 22 asia esitetään, Inventory-RN-vaihe alkaa siten, että lukijalaite lähettää tunnisteele Query-komennon (kuvan 22 vaihe 1), jonka yhteydessä tunniste menee Arbitrate-tilaan.



Kuva 22. Inventory- ja Access-komentojen käyttäytyminen [18]

Query-komennon tärkeimpinä parametreinä ovat käytettävä taajuus, tiedonsiirtonopeus, modulaatiomenetelmä, tunnistetiden SlotCounter-laskureiden käyttämä luku Q, istuntonumero ja Inventory-tila (A tai B). Jokaisella tunnisteelella on sisäinen 15-bittinen

SlotCounter-laskuri, johon tunnisteiden sisäinen satunnaislukugeneraattori (RNG) arpoo satunnaisen luvun lukujen 0 ja 2^Q-1 väliltä, jossa Q on luku 0–15. Laskuri toimii siten, että kun lukijalaite lähettää Query-komennon ja laskurissa on jokin muu luku kuin nolla, tunniste ei lähetä vastinetta lukijalle, jolloin kysely alkaa alusta. Jokaisen kyselyn päätteeksi laskuri dekrementoi itseään luvulla yksi, jolloin tietyn ajan kuluessa laskuri on väkisin pudonnut nolnaan. Kun laskuri päättyy nolnaan, tunniste menee Reply-tilaan, jossa se lähettää lukijalle vastauksena RN16-luvun (kuvan 22 kohta 2), joka on satunnaisgeneroitu 16-bittinen bittijono.

Vastineeksi lukijalaite lähettää ACK-komennon (*Acknowledged*) tunnisteelle (kuvan 22 kohta 3), jonka parametrinä on tunnisteiden RN16-luku. Jos RN16-luku on sama, kuin mitä tunniste alunperin lähetti lukijalle, menee tunniste Acknowledged-tilaan, ja lähettää EPC- ja PC-koodinsa lukijalle (kuvan 22 vaihe 4). Tämä on vaihe, joka päättää Inventory-komennon. Jos RN16-luku on eri, kuin mitä tunniste alunperin lähetti lukijalle, palaa tunniste takaisin Arbitrate-tilaan ja SlotCounteriin satunnaisgeneroidaan uusi arvo.

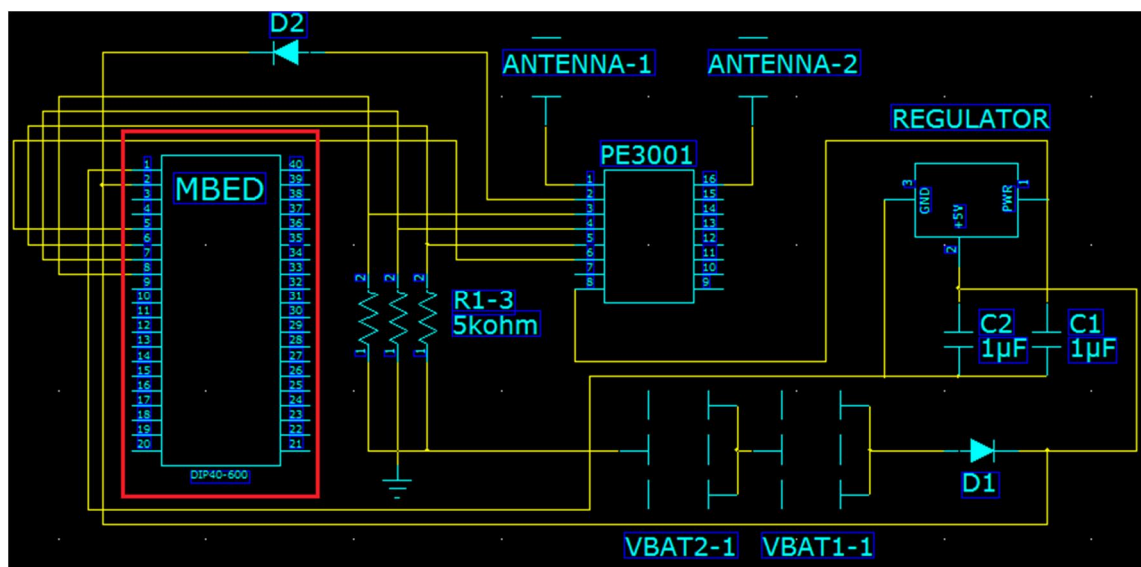
Tunnisteiden hallinnan viimeinen vaihe on Access-vaihe, jossa yksittäistä tunnistetta käsitellään. Ensimmäisenä lukijalaite lähettää Req_RN-komennon (*Request Random Number*, kuvan 22 vaihe 5), jossa parametrina on sama RN16-luku kuin edellisissäkin vaiheissa. Jos tunniste havaitsee RN16-luvun samaksi kuin alunperin, se lähettää lukijalle 16-bittisen handle-luvun (tunnisteiden eräänlainen tunnisteluku, kuvan 22 vaihe 6). Tässä vaiheessa lukijalaite saa tunnisteiden käyttöönsä ja pystyy tällöin syöttämään haluttuja komentoja. Jokaisen komennon parametrina tulee olla handle-luku. Mikäli handle-luku on väärin tai sitä ei käytetä parametrina, tunniste ei hyväksy lukijalaitteen lähettämiä komentoja.

Access-vaiheessa voidaan siis hallita tunnistetta erinäisin komennoin, joista suurinta osaa pystytään ajamaan Open-tilassa, mikäli Reserved-muistipankin AccessPwd-rekisteri on asetettu nolaksi. Ainoastaan tunnisteiden eri muistipankkien lukitsemista säätelevät Lock- ja BlockPermaLock-komennot vaativat Secured-tilan jokaisessa tilanteessa. Jokainen komento vaatii parametrikseen tunnisteiden handle-bittijonon, jolloin mahdolliset tiedonsiirron virheet huomataan. Lisäksi komennot sisältävät CRC16-tarkisteavaimen. [16, s. 37–76; 17, s. 26–44.]

5. MBED-mikrokontrolleri

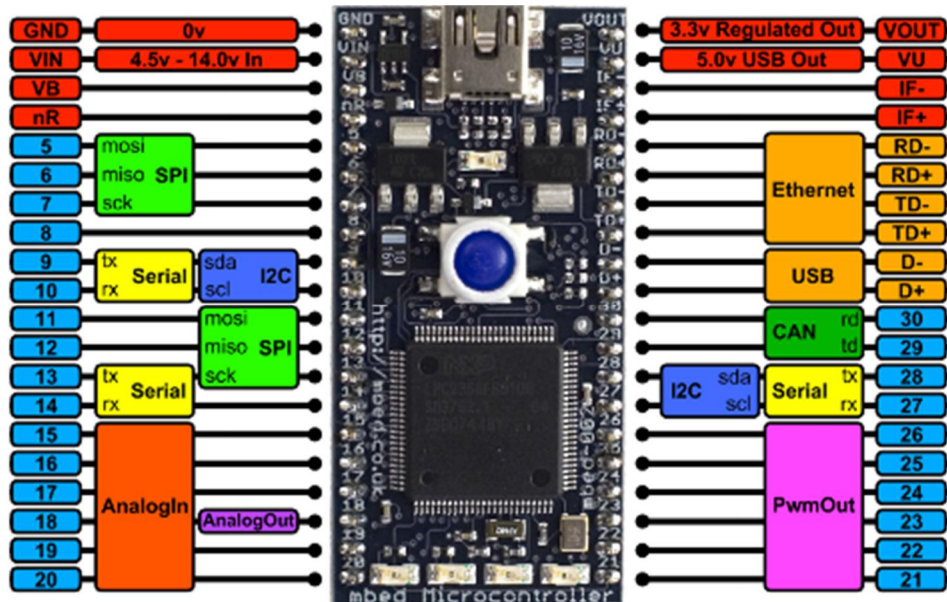
MBED-mikrokontrolleri on NXP Designin valmistama monipuolinen USB-ohjelmoitava ARM-prosessorilla varustettu mikrokontrolleri, jonka ohjelmointikieli on C++. MBED-mikrokontrollerin erikoisuus on siinä, että se on ainoastaan ohjelmoitavissa www-pohjaisella ohjelmointialustalla osoitteessa www.mbed.org. MBED-palvelu on puhtaasti cloud-pohjainen (pilviverkko), eli kaikki työkalut (mm. kääntäjä ja työtilat), sekä tiedot ovat tallennettuna NXP Designin palvelimille käyttäjäkohtaisesti, eikä niitä pysty käyttämään itsenäisesti. Näin ollen MBED-mikrokontrollerin ohjelmointi vaatii Internet-yhteyden. Toisaalta www-pohjaisuus tarkoittaa sitä, ettei alustalla ole väliä. Näin ollen palvelua pystyy käyttämään niin PC-pohjaisilla Windows- ja Linux-käyttöjärjestelmillä, kuin Mac-pohjaisella OS X -käyttöjärjestelmällä.

MBED-mikrokontrolleri saa normaalisti käyttöjännitteensä tietokoneen USB-väylästä, jolloin se ei tarvitse erillistä jännitelähdettä. MBED-mikrokontrolleria voidaan kuitenkin operoida myös syöttämällä 4,5–14 V:n jännite nastaan 2. Tässä insinööriyössä MBED-mikrokontrolleri saa käyttöjännitteensä paristoilta VBAT1-1 ja VBAT2-1, kuten kuva 23 osoittaa.



Kuva 23. MBED-mikrokontrolleri piirikaaviossa.

Kuvassa 24 nähdään laitteen eri nastat ja niiden käyttötarkoitukset, kuten kolme USART-, kaksi SPI-, ja kaksi I2C-väylää, sekä CAN- ja USB-väylät. Lisäksi mikrokontrollerissa on Ethernet-liitäntä ja PWM-ulostulo. Tässä työssä käytetään SPI-väylää varten nastoja 5-8.



Kuva 24. MBED-mikrokontrolleri ja sen eri nastat

MBED-mikrokontrollerin ohjelmointi aloitetaan rekisteröitymällä ja kirjautumalla sivustolle, jonka jälkeen Compiler-valikosta aukeaa ohjelmointiympäristö. Kun ohjelma on valmis, se käännetään Compiler-näppäimestä, jonka jälkeen syntyvä .bin-tiedosto tallennetaan MBED-mikrokontrollerin sisäiseen muistiin. MBED-mikrokontrolleri esiintyy tietokoneilla ulkoisena muistina, hieman muistitikun tapaan. Tallennuksen jälkeen poistetaan vanhat .bin-tiedostot MBED:stä, jonka jälkeen painetaan MBED-mikrokontrollerin päällä olevaa sinistä nappulaa, joka ohjelmoi piirin.

6. Mittaustulokset ja tunnisteen toiminta käytännössä

Testiympäristönä toimi Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimusyksikkö Electrician tilat, jossa lukijalaitteena toimi Impinjin valmistama Speedway-lukija. Lukijalaitteen antenni oli Huber+Suhnerin valmistama antenni, joka oli peitetty muovisen kuoren sisälle. Antenni kytkettiin koaksiaalikaapelilla lukijalaitteeseen, ja lukijalaite edelleen lähiverkon kautta tietokoneeseen. Lukijalaitteeseen saatiin yhteys edelleen lähiverkon kautta käyttäen lukijan laitekohtaista IP-osoitetta, jolloin tietokoneen selaimella pystyttiin asettamaan RFIDemo-ohjelmassa lukijalaitteen säädöt kohdalleen. Mittaus aloitettiin asettamalla Settings-valikosta koodausmenetelmäksi Miller-koodaus 8 kantaaltokierroksella. Lukijan lähetystehoksi säädettiin 24 dBm, joka on wateissa mitattuna noin 0.25 W. Tämä on varsin matala lähetysteho, sillä Euroopassa sallitaan nykyään jopa 2 W:n maksimilähetysteho EIRP:nä (*Effective Isotropically Radiated Power*).

Tämän jälkeen avattiin Operation-valikko, josta valittiin aktiiviseksi *Auto Continue* ja *Act Once* -valinnat. Lopuksi painettiin Start-näppäintä, jonka jälkeen lukijalaite aktivoitui. Kuvasta 25 nähdään, että lukijalaitteen kentässä on kaksi tunnistetta joiden EPC-koodit ovat näkyvissä.

EPC	Count	Last Status
300030180019000032000000012C 26		
3000E20034118B02011412260137 49		

Read Rate (tags/sec) 15
 Running Time (hh:mm:ss) 0:00:02
 Total Tags 2
 Total Active Tags 2
 Auto Continue
 Act Once
 Read TID
 Start Continue Clear

Kuva 25. RFIDemo-ohjelman Operation-valikko

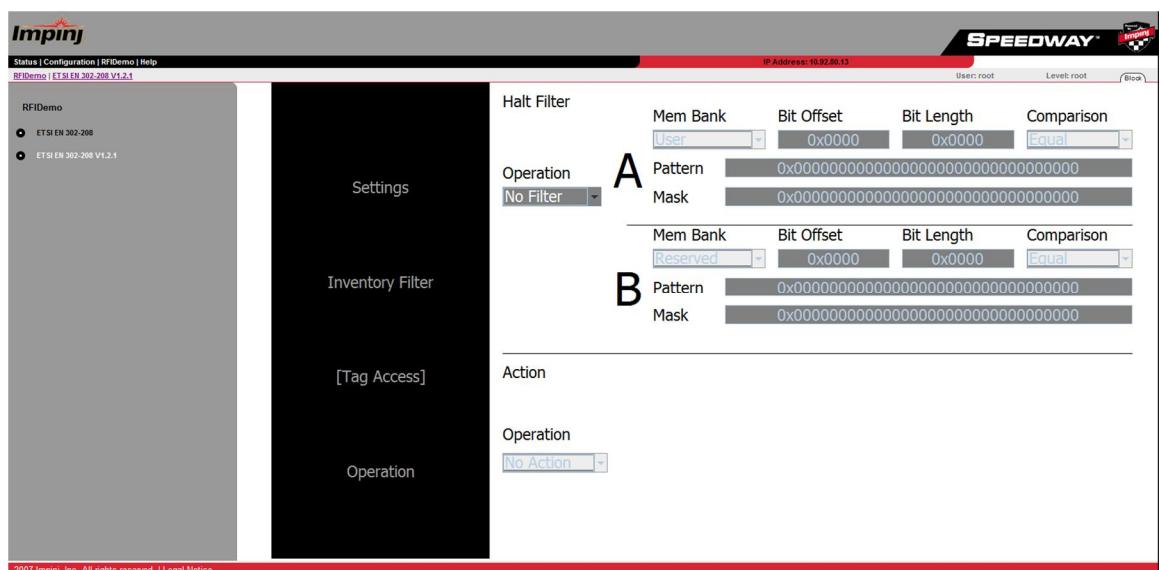
Tämän jälkeen arvioimme suurinpiirtein toimintaetäisyyden tunnisteen ja lukijalaitteen välillä. Taulukosta 1 voidaan nähdä mittaustulokset eri tunnisteen osalta.

Taulukko 1.

Antenni	Etäisyys paristoilla	Etäisyys ilman paristoja
Dipoliantenni A	4 m	1,5 m
Dipoliantenni B	1,5 m	1,5 m
PIFA-antenni	0,5 m	0 m

Tuloksista voidaan päätellä, että dipoliantenni A:lla varustettu tunniste toimii hyvin, sillä paristot tuovat selkeää parannusta lukuetaisyyteen. Dipoliantenni B:lla varustettu tunniste saavuttaa passiivisena saman lukuetaisyyden kuin A:kin, mutta paristojen kanssa lukuetaisyys ei muutu. On näin ollen selkeää, että virransyötössä on jonkinlainen ongelma, kuten kontaktihäiriö juotoksessa, tai viallinen paristokanta.

PIFA-antennilla varustettu tunniste selviytyi mittauksista heikoiten, sillä sen lukuetaisyys paristoillakin on vain puoli metriä, ja ilman paristoja sitä ei havaittu ollenkaan. On mahdollista, että RFIDemo-ohjelma häiriintyi mittausten aikana, sillä dipoliantennein varustetut tunnisteet olivat usein aiemmissa testauksissa kadonneet lukijalaitteen kentästä kesken mittailujen. Lisäksi mittaushuone oli normaali työhuone usealla sähkölaitteella varustettuna, joten sekin saattoi vaikuttaa mittauksiin jollain tasolla. Mittaukset tulisikin suorittaa häiriösuojatussa huoneessa kunnollisella ohjelmistolla ja laitteistolla, mutta käytännössä se ei ollut tämän työn puitteissa mahdollista.



Kuva 26. Lukijalaitteen ohjelmointiympäristö

Mittauksien yhteydessä huomattiin, että tunnisteet saattoivat olla EPC-koodeiltaan niin pitkiä, että lukijalaite eritteli ne kahdeksi eri tunnisteeksi RFIDemo-ohjelmassa, joista toinen oli lyhyt EPC-koodi "0000". Ongelma ratkaisiin ohjelmoimalla tunnisteiden sirun EPC-muistipankki uudestaan. Ohjelmointi tapahtui avaamalla RFIDemo-ohjelmasta Tag Access -valikon, jonka avulla sirun eri muistipankkeihin päästään käsiksi, kuten kuvassa 26 esitettiin. Valitsemalla Halt Filter -osasta Operation-tilaksi *A Only* aukeaa Action-osaan eri toimintoja. Action-osan Operation-tilasta löytää peruskomennot, kuten Read-, Write-, Kill- ja Lock-komennot.

Komentoja ohjataan valitsemalla Mem Bank -valikosta haluttu muistipankki, kuten EPC tai User, jonka jälkeen valitaan Comparison-valikosta *Equal*. Tämän jälkeen Action-osasta valitaan haluttu komento, jonka jälkeen ruudun alaosassa on kahdeksan 16-bittistä lukusaraketta, joihin voidaan kirjoittaa heksalukuina haluttu tieto. Jotta voitiin poistaa ylimääräinen "0000"-tunniste, oli asetettava EPC-muistipankin osoitteeseen 01h (eli toiseen 16-bittiseen lukusarakeeseen) *PC+EPC Length* oikeaksi. Tämä onnistui tarkastelemalla PE3001-sirun datalehteä, josta voitiin huomata, että kyseinen asetus oli 5-bittinen osuus (bitit 11–15) rekisteristä 01h. Ensiksi tuli tehdä Read-komento kyseiselle rekisterille, jotta voitiin selvittää bittien 0–10 tilat. Tämän jälkeen haluttiin bittien 11–15 tilaksi 00101b, joten koko 16-bittinen luku tuli muuttaa heksamuotoon, jotta se voitiin syöttää ohjelmaan. Heksamuunnoksen (2800h) jälkeen "0000"-tunniste katosi ohjelman lukukentästä.

7. Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli perehtyä UHF-alueen RFID-tunnisteiden toimintaan ja rakenteisiin valmistamalla kolme eri tunnistetta antenneineen. Pää tavoite oli saada tunnisteluettua ja ohjelmoitua lukijalaitteella, sekä perehtyä antennien valmistukseen ja sovitukseen. Tunnisteiden optimointia työssä ei nähty tarpeelliseksi tehdä, joten esimerkiksi virrankulutus saattaa olla teollisiin ratkaisuihin nähden moninkertainen, ja piirilevyn *layout* saattaa vaikuttaa mahdollisiin piirilevyn sähkömagneettisiin häiriöihin, joita tosin työn yhteydessä ei suoranaisesti havaittu.

Mikäli tunnisteita haluttaisiin optimoida koon tai virrankulutuksen suhteen, pitäisi mikrokontrolleriksi valita Ultra Low Power -mikrokontrolleri, ja esimerkiksi dipoliantennin haaroja pitäisi taivutella fyysisen koon pienentämiseksi. MBED-mikrokontrolleri valittiin sen helppokäyttöisyytensä vuoksi, ja senkin takia, että opiskelijat käyttävät sitä muillakin kursseilla. Lisäksi paristot olivat isokokoisia ja halpoja, joten tunnisteen virtalähdettäkin voisi parantaa.

Ongelmia työssä oli esimerkiksi sovituksen suhteen tietyillä prototyypilevyillä, mutta niistä selvittiin simulointiohjelmistojen avulla, joita olisi työn aikana mielellään käyttänyt enemmänkin. Lisäksi työn alkuvaiheilla käytettävä taajuus vaihtui 13,56 MHz:stä 868 MHz:iin, joka aiheutti pientä päänvaivaa. Lopputuloksena valmistuneet kolme tunnistetta toimivat jokseenkin vaihtelevasti lukuetaisyden kannalta, mutta niillä voidaan silti toteuttaa RFID:n perusasia, eli etätunnistus. Työssä olisi ollut hyvä päästä tutkimaan tunnisteteiden toimintaa radiokaiuttomassa huoneessa, mutta käytännön esteistä johtuen se ei onnistunut.

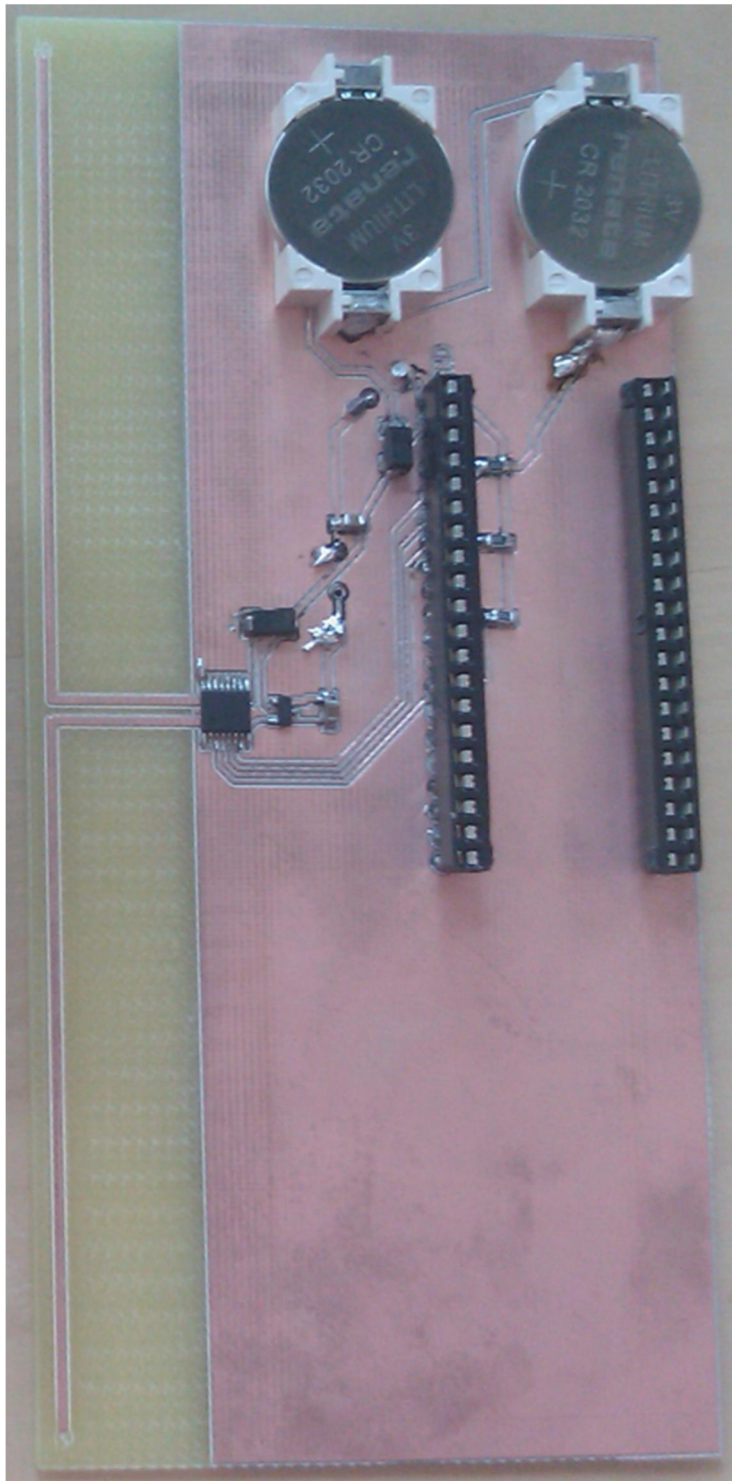
Työssä valmistettuja RFID-tunnisteita pystytään varmasti käyttämään hyödyksi Metropolia Ammattikorkeakoulun RFID-tekniikan opintojaksolla, sillä PE3001-siru vaikuttaa korkealaatuiselta, ja Impinj:n Speedway R1000 -lukijalaitteen käyttöönotto on varsin yksinkertaista. Lisäksi ohjelmointiympäristö on toimiva, joskin hieman askeettinen ja kömpelö. Uskon, että opiskelijat saavat tunnisteteiden avulla tuntumaa EPC Class 1 Generation 2 -standardin sisältöön, sekä he pääsevät tutkimaan usean tunnisteen hallintaa samanaikaisesti.

Lähteet

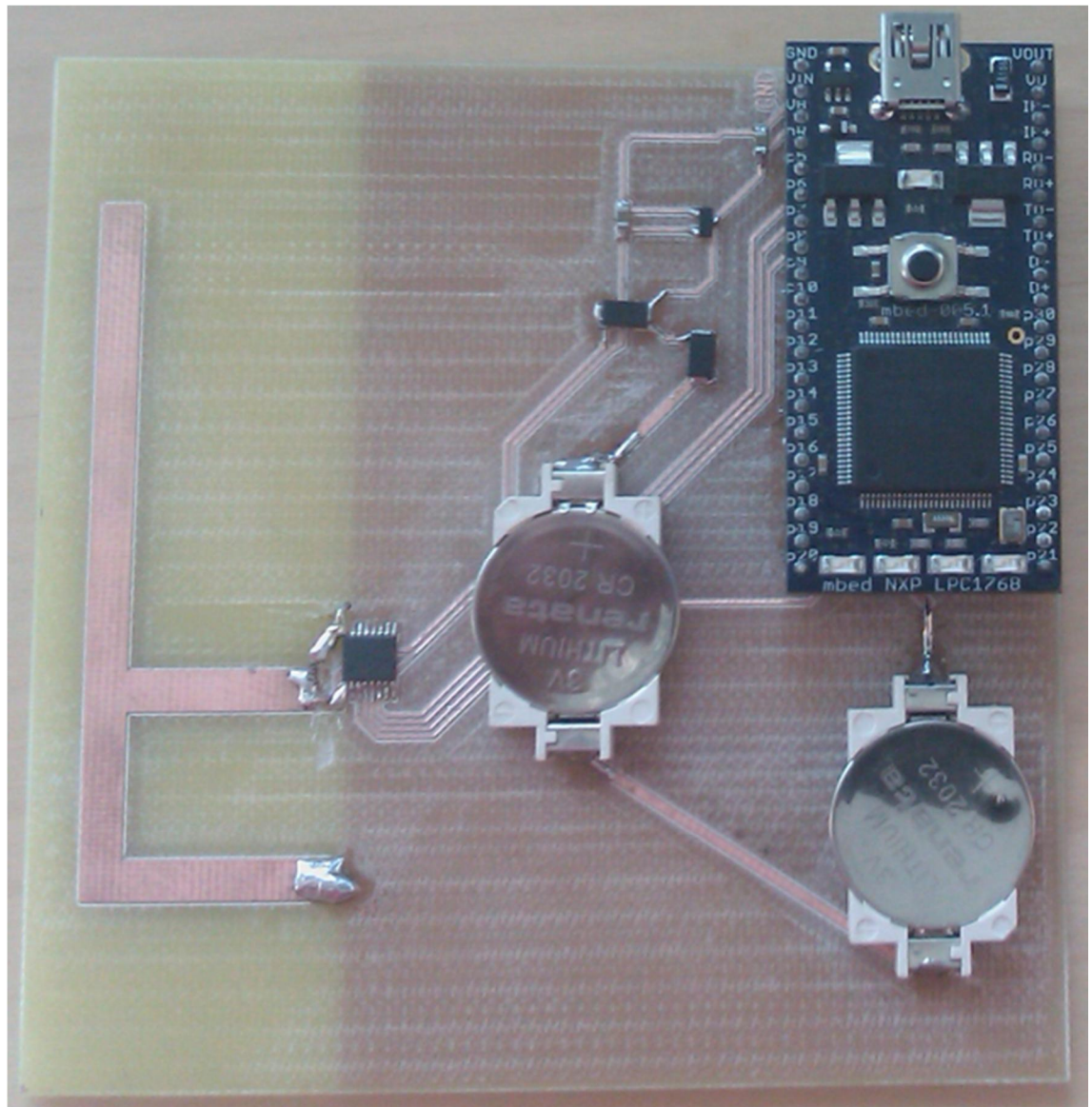
- 1 Finkenzeller, Klaus. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contact-less Smart Cards and Identification, Second edition. John Wiley & Sons Inc. 2003.
- 2 Räisänen, Antti; Lehto, Arto. Radiotekniikan Perusteet, 12. painos. Otatieto. 2007.
- 3 Dobkin, Daniel M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Newnes. 2007
- 4 Roberti, Mark. The History of RFID Technology. RFID Journal, (WWW-dokumentti). <http://www.rfidjournal.com/article/view/1338>. Luettu 16.2.2011
- 5 Curty, Jari-Pascal; Declercq, Michel; Dehollain, Catherine; Norbert, Joehl. Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems. Springer Science+Business media LLC. 2007.
- 6 Ahson, Syed; Ilyas, Mohammad. RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2008
- 7 RFIDLab Finland Ry. RFID-tietoutta, (WWW-dokumentti). <http://www.rfidlab.fi/rfid-tietoutta>. Luettu 16.2.2011.
- 8 The American Radio Relay League, Inc. The ARRL Handbook for Radio Communications, 87th edition. 2010.
- 9 PE GmbH. PE3001 Data sheet (WWW-dokumentti). <http://www.pe-gmbh.com/ew-ad-don/ftp/icproduct/datasheets/rfid/pe3001/PE3001,%20UHF%20RFID%20Data%20Monitoring%20IC%20-%20Data%20Sheet.pdf>. Luettu 22.3.2011.
- 10 Valmu, Heikki. Smithin kartan perusteet. EVTEK Ammattikorkeakoulu.
- 11 Kaldjob, Eddy Brice; Geck, Bernd; Eul, Hermann. Impedance Measurement of Properly Excited Small Balanced Antennas. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 8, 2009.
- 12 Yang, Li; Rida, Amin; Tentzeris, Manos M. Design and Development of Radio Frequency Identification (RFID) and RFID-Enabled Sensors on Flexible Low Cost Substrates. Morgan & Claypool Publishers.
- 13 Zhu, Hailong; Ko, Y.C. Andrew; Ye, Terry T. Impedance Measurement for Balanced UHF RFID Tag Antennas.
- 14 Koskinen, Tomi; Rajagopalan, Harish; Rahmat-Samii, Yahya. Impedance Measurement of Various Types of Balanced Antennas with the Differential Probe Method. Department of Electrical Engineering, University of California, LA.

- 15 TI-RFID. UHF Gen 2 System Overview (WWW-dokumentti).
http://rfidusa.com/superstore/pdf/UHF_System_Overview.pdf. Luettu 15.5.2011.
- 16 Floyd, Thomas L. Electronic Devices Conventional Current Version, 7th Edition. Pearson Education, Inc. 2005.
- 17 Ubicom. Serial Peripheral Interface (SPI) and Microwire/Plus implementation Using the SX Communications Controller (WWW-dokumentti).
www.parallax.com/dl/appnt/sx/An20Spi.pdf. Luettu 29.5.2011.
- 18 EPCglobal Inc. EPC™ Radio-Frequency Identification Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.2.0 (WWW-dokumentti).
http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/uhfc1g2/uhfc1g2_1_2_0-standard-20080511.pdf. Luettu 14.5.2011

Liite 1. RFID-tunniste dipoliantennilla



Liite 2. RFID-tunniste PIFA-antennilla



Liite 3. SPI -väylän komennot PE3001-sirulla

Address	Data	Command
0x06	0x8000	Set Wakeup
0x06	0x0000	Clear Wakeup
0x20	0x0018	Set Sleep, Reset
0x01	0x0000	Clear EEPROM CTRL
0x02	0x0000	Clear EEPROM Address
0x03	0x0000	Clear EEPROM DATA
0x3A	0x0080	Enable CP
		wait for 10ms

Table 25 – Serial interface – disable

Address	Data	Command
0x3A	0x0000	Disable CP
0x20	0x0018	Set Sleep, Reset
0x06	0x4000	Set Power down
0x06	0x0000	Clear Power down

Table 26 – Serial interface – write EEPROM

Address	Data	Command
0x01	0x00C0	Set Mem, Set EEPROM
0x02	address	Set Address
0x03	data	Set Data
0x01	0x00C8	Set Erase
		wait for 4ms
0x01	0x00C0	Clear Erase
0x01	0x00C2	Set Write
		wait for 4ms
0x01	0x00C0	Clear Write

Table 27 – Serial interface – read EEPROM

Address	Data	Command
0x01	0x00C0	Set Mem, Set EEPROM
0x02	address	Set Address
0x01	0x00C1	Set Read
0x03	0x0000	Read Data the memory data will be received at the MISO pin
0x01	0x00C0	Clear Read