



Lauri Viitanen

Langaton anturiverkko hiukkaspitoisuusmittarien tiedonsiirtoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Automaatiotekniikka
Insinöörityö
22.11.2010

Tekijä Otsikko	Lauri Viitanen Langaton anturiverkko hiukkaspitoisuusmittarien tiedonsiirtoon
Sivumäärä Aika	62 sivua +1 liite 22.11.2010
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Kappaletavara-automaatio
Ohjaaja(t)	Tuotekehityspäällikkö Kari Toivokoski Lehtori Timo Tuominen
<p>Tässä insinööryössä kehitettiin Sintrol Oy:lle langaton anturiverkko hiukkaspitoisuusmittareiden tiedonsiirron tarpeisiin. Työ koostui järjestelmän tekniikan valinnasta, tiedonsiirtoprotokollan suunnittelusta ja ohjelmoinnista C-kielellä sekä pilottijärjestelmän käyttöönotosta ja testauksesta</p> <p>Insinööryön motivaatio syntyi kasvavasta trendistä käyttää langattomia anturiverkkoja myös teollisuuden sovelluksissa. Langattoman tiedonsiirron katsottiin lisäävän Sintrol Oy:n tuotteiden markkina-arvoa tarjoamalla helpomman ja nopeamman – ja ennen kaikkea edullisemmän – ratkaisun perinteisille kaapeloiduille mittausjärjestelmille.</p> <p>Insinööryön aikana kehitettiin langaton tiedonsiirtoprotokolla, joka muodostaa langattoman verkon automaattisesti, jakaa osoitteet verkon laitteille ja ohjaa liikenteen lyhyintä mahdollista reittiä pitkin. Työn aikana kehitettiin myös Texas Instrumentsin CC1101-radiopiiriin perustuva radiokortti.</p> <p>Insinööryön lopputuloksena saatiin toimiva anturiverkkojärjestelmä, joka ensimmäisen toimituksen käyttöönoton yhteydessä tehdyissä testeissä osoittautui tehokkaaksi tavaksi siirtää mittaustietoa teollisuusympäristössä.</p> <p>Insinööryön aikana kehitetty järjestelmä avaa useita jatkokehitysmahdollisuuksia ja kehitys näiden osalta jatkuu Sintrol Oy:ssä</p>	
Avainsanat	langaton anturiverkko, radiotaajuuksinen tiedonsiirto, automaattinen verkon muodostus, CC1101

Author Title	Lauri Viitanen Wireless sensor network for dust monitor data collection
Number of Pages Date	63 (total number of pages including appendices) 22 November 2010
Degree Programme	Automation technology
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Kari Toivokoski, Research and development manager Timo Tuominen, Lecturer
<p>The aim for this final year project was to develop a wireless sensor network for dust monitor data collection for Sintrol Oy. The project consisted of choosing the right technology and components as well as designing and programming a communications protocol using C-programming language. This final year project ended with the commissioning of the first complete system delivered.</p> <p>The subject of this project was chosen based on the growing trend on wireless communication networks in the industrial sector. Wireless communication was believed to increase the market-value of Sintrols products by offering an easier and faster – as well as cheaper – way to replace traditional cable-based data transmission networks.</p> <p>Also, a communication protocol was developed during this project. The protocol forms the wireless network, assigns addresses and routes data via the shortest available route automatically. A radio module based on Texas Instruments CC1101 transceiver was also developed.</p> <p>As a result of this project a fully functional wireless sensor network was developed. The system proved reliable and efficient during the commissioning of the first complete system.</p> <p>The wireless sensor network opens new possibilities for further development of new products and some of these are already being developed at Sintrol Oy.</p>	
Keywords	wireless sensor network, radio frequency communication, self-forming network, CC1101

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Käytetyt lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sintrolin hiukkaspitoisuusmittarit	3
3	Langattomat anturiverkot	4
	3.1 Hyödyt	5
	3.2 Sovellukset	6
4	Verkkojen tiedonsiirtotekniikka	7
	4.1 Verkkotopologiat	7
	4.2 Radioaaltojen eteneminen	9
	4.3 Kantama ja sen arviointi	13
	4.4 Antennit	15
	4.5 Taajuusalueet	15
5	Tekniikan valinta	18
	5.1 Axsem AX5042	21
	5.2 Texas Instruments CC1101	28
6	Ohjelmistokehitys	31
	6.1 CC1101:n rekisteriarvot	31
	6.2 Pakettimuotoisen datan lähetys ja vastaanotto	32
7	RF-Link-protokolla	34
	7.1 Verkon muodostus	38
	7.2 Pakettien reititys	41
	7.3 Master-laitteen toiminnot	43
	7.4 Paketin rakenne	43

8	Radiokortin kehitys	44
8.1	Sovitinkortti	45
8.2	Testaus ja vianhaku	46
9	Pilottijärjestelmä	48
9.1	Laitteiston rakennus	49
9.2	Järjestelmän käyttöönotto	50
10	Tulevaisuuden kehityssuunnat	52
11	Yhteenveto	53
	Lähteet	54
	Liitteet	
	Liite 1. Pilottijärjestelmän havainnekuva	

Käytetyt lyhenteet

AC	Alternating Current, vaihtovirta
AD	Analog/Digital, muunnos analogiatasosta digitaaliseksi tiedoksi
ASK	Amplitude Shift Keying, amplitudimodulaatio
AVR	Advanced Virtual RISC, Atmelin valmistama mikrokontrollerityyppi
CCA	Clear Channel Assesment, lähetystaajuuden käytettävyyden arviointi
CRC	Cyclic Redundancy Check, virheentarkistustekniikka
CS	Chip Select, SPI-väylän piirinvalintasignaali
DC	Direct Current, tasavirta
FEC	Forward Error Correction, virheenkorjauslagoritmi
FSK	Frequency Shift Keying, taajuusmodulaatio
GCC	GNU Compiler Collection, C ja C++ -kääntäjät
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying, erikoissovellus taajuusmoduloinnista
IO	Input / Output, mikrokontrollerin lähtö- ja tuloliitännät
ISM	Industrial, Scientific, Medical, lupavapaat taajuusalueet
ISP	In System Programming, mikrokontrollerien ohjelmointiliitäntä
ITU	International Telecommunication Union, kansainvälinen telekommunikaatiounioni
JTAG	Joint Test Action Group, IEEE-standardi ohjelmiston ja laitteiston testaus- rajapinnalle
LOS	Line Of Sight, näköyhteys
MISO	Master Input slave Output, SPI-väylän tiedonsiirtosignaali slavelta- laitteelta master-laitteelle
MOSI	Masetr Output Slave Input, SPI-väylän tiedonsiirtosignaali master- laitteelta slave-laitteelle
MSK	Minimum Shift Keying, modulointimenetelmä

NDT	Nondestructive Testing, ainetta rikkomaton testaus
OSI	Open System Interconnection reference model, tiedonsiirto-protokollien toimintaa kuvaava malli
PER	Packet Error Rate, pakettivirhemäärä
PSK	Phase Shift Keying, vaihemodulaatio
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
QLP	Quad Leadless Package, eräs elektroniikkakomponenttien kotelo
QoS	Quality of Service, verkon siirtotien laatu
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying, neliportainen vaihemodulaatio
RISC	Reduced Instruction Set Computer, suoritinarkkitehtuuri
RS485/232	Recommended Standard, sarjamuotoisen liikenteen standardeja
SCLK	SPI Clock, SPI-väylän tiedonsiirtoa tahdistava kellosignaali
SPI	Serial Peripheral Interface, sarjamuotoinen väylä mikrokontrollerin ja oheislaitteiden väliseen tiedonsiirtoon
SRAM	Static Random Access Memory, eräs käyttömuistityyppi
TWI	Two Wire Interface, tiedonsiirtoväylä
TÜV	Technischer Überwachungsverein, testaus ja sertifiointijärjestö
UDID	Unique Device IDentification, laitteiden uniikki yksilöintikoodi
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver-Transmitter, sarjaliikenteen lähetys- ja vastaanottotoiminto
USB	Universal Serial Bus, tietokoneiden ja oheislaitteiden välillä käytettävä sarjamuotoinen tiedonsiirtostandardi
WSN	Wireless Sensor Network, langaton anturiverkko

1 Johdanto

Sintrol Oy tuo maahan ja myy teollisuusautomaation, kunnallistekniikan ja laboratorio-tekniikan automaation mittalaitteita. Sintrol-konserniin kuuluu Sintrol Oy:n lisäksi PPM-Systems Oy. Tuotevalikoima koostuu muun muassa analysaattoreista, erilaisista prosessimittauksista, NDT (Nondestructive testing) -testauslaitteista ja -kemikaaleista, röntgenlaitteista sekä punnitustekniikan laitteista ja virtausmittareista.

Sintrol työllistää tytäryhtiöineen noin 45 henkeä, ja konsernilla on toimipisteitä Helsingin Konalassa sijaitsevan päätoimipisteen lisäksi Oulussa, Lappeenrannassa, Moskovassa, Kazakstanissa ja Pekingissä. Yritys on perustettu vuonna 1975, ja alussa toiminta oli maahantuontiin painottuvaa. Myöhemmin yritys laajensi toimintaansa hiukkaspitoisuusmittareiden valmistukseen ja kuuluu nykyään suurimpien hiukkaspitoisuusmittarivalmistajien joukkoon.

Sintrol valmistaa hiukkaspitoisuusmittareita useisiin eri käyttötarkoituksiin. Yrityksen päätuoteryhmänä ovat S300-sarjan hiukkaspitoisuusmittarit, joita käytetään aina yksinkertaisista pneumaattisen kuljetuksen seurantasovelluksista TÜV (Technischer Überwachungsverein) –hyväksynnän vaativiin voimalaitospäästömittauksiin. S300-sarjaan kuuluu 4 eritasoista mittalaitetta, joiden ominaisuudet vaihtelevat yksinkertaisista relehälytyksistä aina tarkkoihin mg/m^3 -tason hiukkaspitoisuusmittauksiin (S300-sarjan yleisesite.)

Sintrol valmistaa lisäksi Snifter-hiukkaspitoisuusmittarisarjaa, joka on tarkoitettu pääasiassa pussisuodattimien kunnonvalvontaan. Lisäksi yrityksen uusimpana tuotteena voidaan mainita Dumo-hiukkaspitoisuusmittarit vapaan ilmatilan hiukkaspitoisuuden mittaamiseen.

Työsuhteeni Sintrolissa alkoi vuoden 2008 keväällä opintoihin liittyvän työharjoittelun merkeissä. Jo tuolloin oli keskustelimme työnantajan kanssa mahdollisuudesta jatkaa yrityksessä myös insinööriyön parissa. Aihe tuli ajankohtaiseksi vuoden 2008 loppusyksystä, ja minut siirrettiin myyntiharjoittelijan tehtävistä työskentelemään hiukkaspitoisuusmittareiden tuotekehityksen parissa.

Palaverissa toimitusjohtaja Karl Ehrstömin ja tuotekehityspäällikkö Kari Toivokosken kanssa aiheeksi valikoitui langattoman kommunikoinnin lisääminen omiin tuotteisiin.

me. Työn tavoitteeksi asetettiin langattoman tiedonsiirtojärjestelmän prototyypin suunnittelu ja toteutus. Työn laajuus kuitenkin kasvoi sen edetessä ja lopputuloksena saatiin langaton anturiverkko, jossa verkon muodostus tapahtuu automaattisesti kuten myös liikenteen reitittäminen verkon eri solmupisteiden välillä.

Tässä insinööriyössä käsittelen langattomia anturiverkkoja yleensä ja niiden tiedonsiirtoon liittyvää teoriaa sekä selostan pintapuolisesti kehitetyn järjestelmän. Tarkkoja yksityiskohtia en esitä, sillä kehitetty järjestelmä on myytäväksi tarkoitettu tuote. Järjestelmän kanssa on käytetty myös muita kehitteillä olevia ratkaisuja, ja näidenkin käsittely on jätetty tarkoituksella hyvin suppeaksi.

Edellä mainitun lisäksi kerron myös lyhyesti ensimmäisestä toimitetusta järjestelmästä ja sen toiminnasta. Lopuksi käsittelen tulevaisuuden kehityssuuntia sekä mahdollisuuksia, joita insinööriyön aikana kehitetty järjestelmä tarjoaa.

2 Sintrolin hiukkaspitoisuusmittarit

Sintrol Oy valmistaa kahdeksaa erilaista hiukkaspitoisuusmittarimallia. Suurin tuoteryhmä on teollisuuden kanavien hiukkaspitoisuutta mittaavat S300- ja Sniftermallisarjat, joihin kuuluu yhteensä 7 erilaista mittalaitetta. Lisäksi Sintrol valmistaa vapaan ilmatilan hiukkaspitoisuutta mittaavaa Dumo-mittalaitetta.

Hiukkaspitoisuusmittareiden toiminta perustuu tribosähköiseen ilmiöön. Mittalaitteen anturisauva asennetaan kanavaan, jossa kulkevat hiukkaset siirtävät varauksia anturisauvaan ohittaessaan tai osuessaan siihen. Varaukset kulkevat anturisauvasta laitteen elektroniikkaan, joka vahvistaa varauksen ja luo tästä varauksien vaihtelusta mittasignaalin, joka on suoraan verrannollinen kanavassa kulkevaan pölypitoisuuteen. Mittalaitteet havaitsevat jopa $0,3 \mu\text{m}$ kokoiset hiukkaset, alkaen $0,1 \text{ mg/m}^3$ konsentraatiosta. (S300-sarjan yleisesite.)

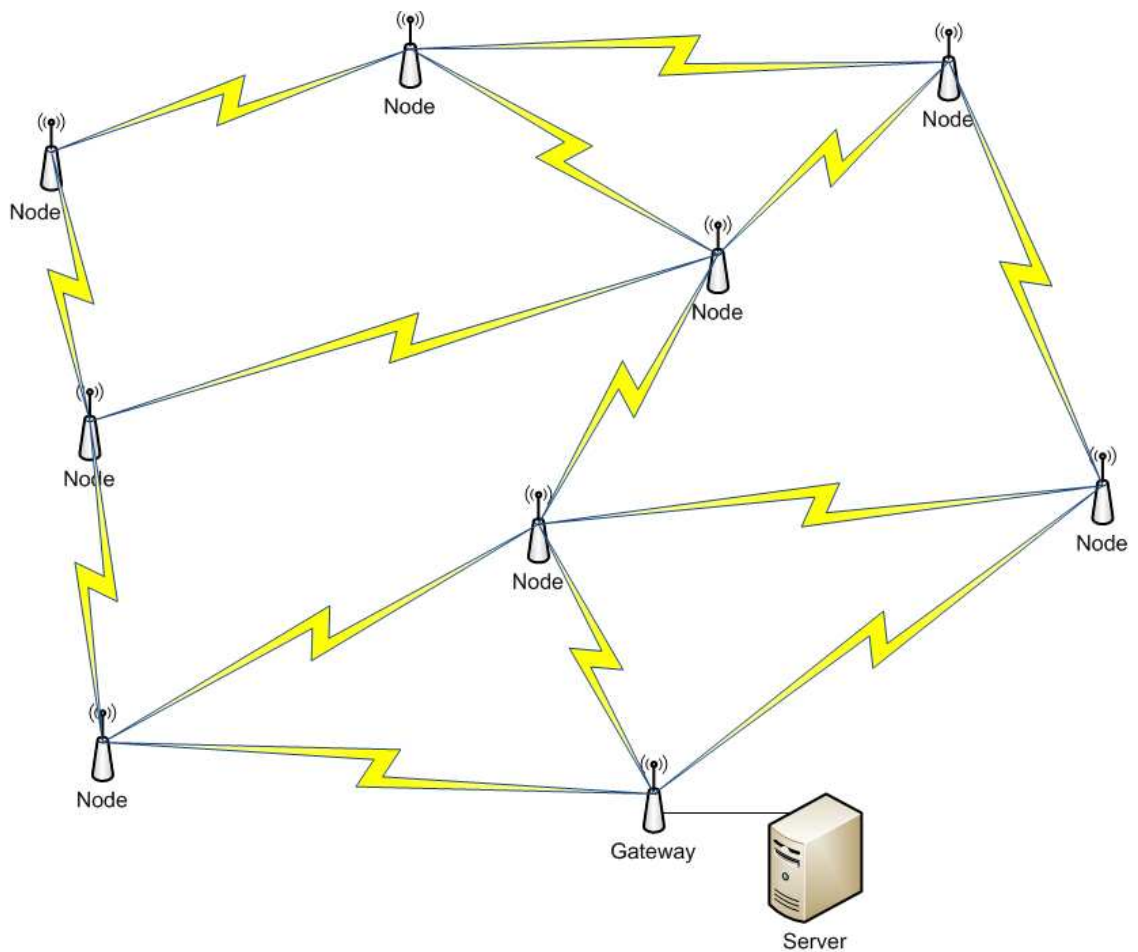
Kaikilla hiukkasilla on jonkin suuruinen varaus. Kulkiessaan kanavassa eteenpäin hiukkanen törmäilee kanavan seiniin eikä lennä suoraviivaisesti. Tämä ilmiö on suurimmillaan erityisesti ilmakehässä olevien mutkien kohdalla. Hankautuessaan kanavan seinämiä vasten hiukkaset varautuvat staattisesti. Tämä varauksen syntyminen johtuu kanavan pinnalla olevien atomien erilaisesta kyvystä luovuttaa elektroneja verrattuna kanavassa liikkuviin hiukkasiin. (Viitanen 2004: 9.)

Mittalaitteissa on toiminto, joka asettaa mittausalueen automaattisesti. Mittari tarkkailee kanavassa olevaa hiukkaspitoisuutta mallista riippuen noin 10 ... 60 minuutin ajan, ja määrittää tämän keskiarvon perusteella mittausalueen ylä- ja alarajat sekä myös hälytysrajat.

Osa malleista voidaan kalibroida näyttämään hiukkaspitoisuutta mg/m^3 -asteikolla gravimetrisen isokineettisen vertailumittauksen avulla (S300-sarjan yleisesite).

3 Langattomat anturiverkot

Langaton anturiverkko (WSN, Wireless Sensor Network) on järjestelmä, joka koostuu useasta keskenään langattomasti mittaustietoa siirtävistä mittalaitteista (node tai slave) ja gateway (myös master) –laitteesta, joka kerää tiedon ja siirtää sen eteenpäin muihin järjestelmiin käsittelyä varten. Tiedonsiirto tapahtuu pääsääntöisesti radiotaajuuksilla, mutta myös muut vaihtoehdot – kuten infrapuna tai optinen tiedonsiirto – ovat mahdollisia, joskin hyvin harvoin käytettyjä. (Lewis 2004: 1.)



Kuva 1. Havainnekuva langattomien anturiverkkojen rakenteesta

Verkon kattavuuden parantamiseksi anturiverkoissa käytetään useimmiten kommunikointiprotokollia, jotka reitittävät liikenteen tarvittaessa usean eri solmupisteen kautta. Tällöin verkon kattama alue ei ole riippuvainen yksittäisen radiolinkin kantomathasta, vaan viestin kuljetusta ketjuttamalla saavutetaan moninkertainen verkon maantieteellinen laajuus. Käytettävät tiedonsiirtoprotokollat tarkkailevat usein myös verkon tilaa ja yksittäisen solmupisteen vikaantuessa voivat ohjata liikenteen uutta reittiä. Tämänlai-

nen itsensä korjaava verkko jatkaa toimintaansa vaikka useampikin solmupiste vikaantuisi, niin kauan kun on olemassa jokin reitti gateway-laitteelle. (Lewis 2004: 3-4.)

Energiankulutuksen minimointi on usein avainasemassa anturiverkkojen laitteissa, sillä niistä halutaan usein paristo- tai akkukäyttöisiä. Parhaimmillaan laitteet toimivatkin jopa vuosia ilman mitään kaapelointia ja huoltoa.

Langattomien anturiverkkojen kehitys lähti liikkeelle sotilastekniikasta. Tekniikkaa sovellettiin muun muassa sukellusveneiden havaitsemiseen *Sound Surveillance System* (SOSUS) –järjestelmässä sekä sitä seuranneessa *Integrated Undersea Surveillance System* (IUSS) –järjestelmässä. Vaikkakin järjestelmissä on huomattavia eroja nykyisiin anturiverkkoihin, on toiminta-ajatus hajautetusta mittaamisesta ja tiedon siirtämisestä sama. (Haenselmann 2006: 1.)

Langattomia anturiverkkoja käytetään tyypillisimmin erilaisissa olosuhdemittauksissa, kun halutaan mitata laajalta alueelta tietoja useassa eri sijainnissa. Näitä mitattavia suureita voivat olla esimerkiksi lämpötila, ilmankosteus, valoisuus, CO₂-pitoisuus, liikkeen tunnistus tai melu. (Hännikäinen & Hämäläinen 2009.)

3.1 Hyödyt

Langattomat anturiverkot ovat yleistyneet teollisuus- ja rakennusautomaatioissa useasta eri syystä. Suurin yksittäinen kannustin yrityksille langattoman verkkotekniikan käyttöönotossa on kustannussäästöt. Kun tieto siirretään langattomasti, kaapelointikulut vähenevät huomattavasti. Liitettäessä uusia mittauksia olemassa olevaan teollisuusympäristöön voivat kaapelointikulut olla jopa tuhansia euroja metriltä. Myös ulkotiloissa tehtävät kaapeloinnit, etenkin maahan kaivettavat kaapelit, tulevat helposti kalliiksi, sillä teollisuusympäristöissä kaivutöiden aloittaminen vaatii useimmiten maaperätutkimuksen mahdollisten haitallisten kemikaalien varalta. (Kagan 2007.)

Kaapelointitarpeen vähäisyydestä johtuen langattomien anturiverkkojen käyttöönotto on myös nopeaa verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. Verkkojen keskitetty hallinta myös helpottaa mittalaitteiden ylläpitoa ja hallintaa. (Kagan 2007.)

3.2 Sovellukset

Uusia sovelluksia langattomille anturiverkoille kehitetään jatkuvasti. Lääketieteessä anturiverkoilla voidaan mitata potilaan elintoimintoja ja tarpeen vaatiessa tehdä mittausten perusteella hälytyksiä lääkärille tai ambulanssihenkilökunnalle. Myös pieniä, nieltäviä pillerin kokoisia langattomasti kommunikoivia videokameroita on jo kehitetty, ja nämä mahdollistavat tähytykset edullisesti ja helposti verkon siirtäessä videokuvan potilaan ruoansulatusjärjestelmästä. (Haenselmann 2006: 9.)

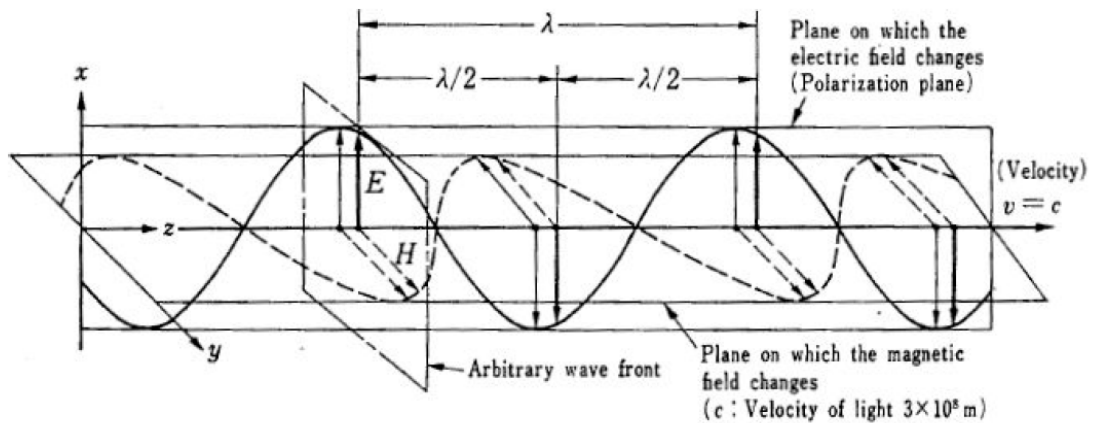
Ympäristömittaukset ovat laajasti käytetty sovellusalue langattomille anturiverkoille. Näissä sovelluksissa mitataan esimerkiksi lämpötiloja, ilman kosteutta, valoisuutta ja äänenvoimakkuutta sekä tarkkaillaan alueella tapahtuvaa liikettä. Anturiverkoilla saadaan kustannustehokkaasti tarkkailtua suurenkin maantieteellisen alueen olosuhteita. (Hännikäinen & Hämäläinen 2008.)

Verkkoja käytetään myös taloautomaation mittauksissa, joissa tyypillisesti jokaiseen huoneeseen voidaan sijoittaa useita antureita tarkkailemaan esimerkiksi huoneen lämpötilaa ja valoisuutta, jolloin näiden säätö taloautomaation avulla on mahdollista. Langaton verkkotekniikka soveltuu erinomaisesti taloautomaation tarpeisiin etenkin silloin, kun halutaan lisätä mittauksia jo olemassa olevaan rakennukseen eivätkä kaapelointityöt ole mielekkäitä suurten kustannusten takia. (Haenselmann 2006: 10.)

Langattomalla tiedonsiirrolla on myös haittapuolensa, joten kaikkiin sovelluksiin se ei käy. Aikakriittiset mittaukset esimerkiksi koneiden ohjauksessa on syytä toteuttaa edelleenkin perinteisillä kaapeloiduilla antureilla, mutta näissä tapauksissa etäisyydet ovat useimmiten varsin kohtuullisia.

4 Verkkojen tiedonsiirtotekniikka

Langattomien anturiverkkojen tiedonsiirto perustuu lyhyen kantaman radiotekniikoihin. Näillä tekniikoilla tarkoitetaan pienitehoisia, tyypillisesti alle 500 mW lähetysteholla toimivia radiolähtimiä ja -vastaanottimia. Rajatun lähetystehon vuoksi laitteiden kantomatka on muutamista metreistä korkeintaan joihinkin kilometreihin. Radioliikenne on useimmiten toteutettu lupavapailla radiotaajuuksilla.

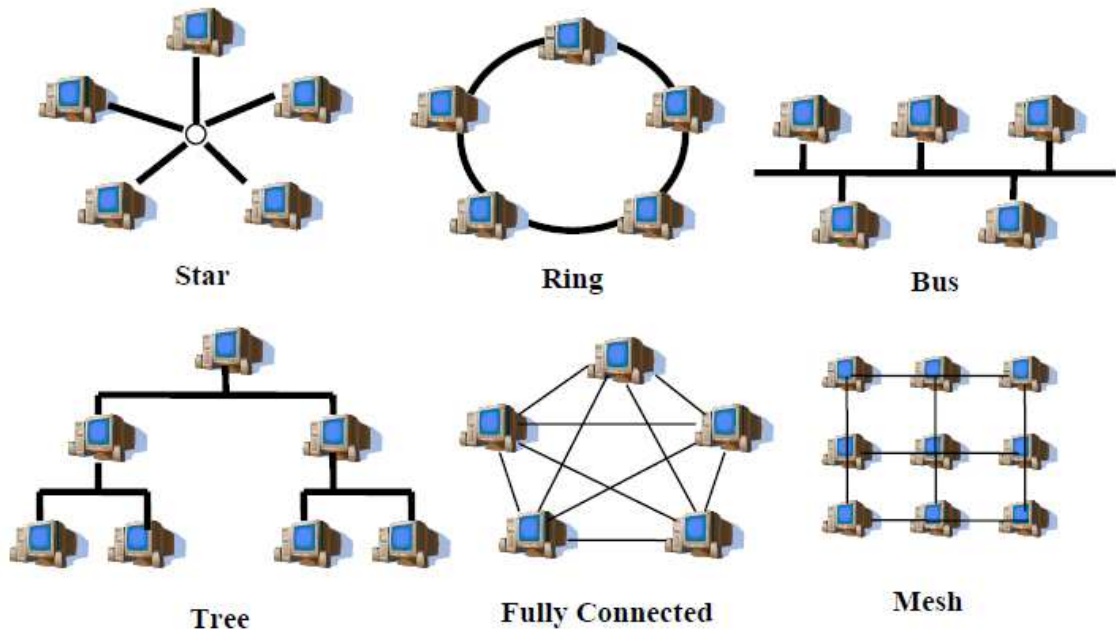


Kuva 2. Yksinkertaisen sähkömagneettisen aallon malli (Struzak 2006: 18).

Radioaallot ovat osa elektromagneettisen säteilyn spektriä, ja ilmiö on tunnettu jo 1800-luvulta lähtien. Radioaallot koostuvat kaiken elektromagneettisen säteilyn tavoin sekä sähkö- että magneettikentästä, jotka ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Aallot etenevät aina valon nopeudella (vrt. kuva 2). Radiotaajuista säteilyä tutkivaa fysiikan alaa kutsutaan sähködynamiikaksi. (Laasonen 2003: 2.)

4.1 Verkotopologiat

Kaikki verkot voidaan jakaa eri topologioihin sen perusteella, miten tietoa siirretään verkossa ja miten verkon eri laitteet ovat kytkeytyneenä toisiinsa. Verkotopologian valintaan vaikuttaa verkolta vaadittu tiedonsiirtokapasiteetti ja siirtotien laatu (Quality of Service, QoS). QoS sisältää asioita kuten viestin siirtämiseen kuluvan ajan, bittivirheiden määrän, pakettivirheiden määrän ja lähetystehotarpeen. (Lewis 2004: 2.)



Kuva 3. Yleisimmät verkkotopologiat (Lewis 2004: 2).

Langaton anturiverkko koostuu mittapisteistä, jotka pystyvät käsittelemään tietoa sekä lähettämään että vastaanottamaan viestejä. Verkot voivat noudattaa joko pelkästään jotain yleisintä topologiaa tai olla niiden yhdistelmiä. (Lewis 2004: 2.)

Tähti-, rengas- ja puu-topologioita noudattavat verkot ovat yleensä hyvin yksinkertaisia ja tuottavat hyvän QoS:n. Näillä topologioilla on yksinkertaisuudesta johtuen myös haittapuolensa; yhdenkin solmupisteen vaurioituminen katkaisee pahimmassa tapauksessa jopa koko verkon tiedonsiirron. Väylämallinen verkkotopologia on käytännöllinen lähinnä ainoastaan kaapeloiduissa verkoissa, ja sitä käytetäänkin yleisesti teollisuuden sovelluksissa, esimerkiksi automaation kenttäväylissä. Väylätopologiaa vastaava topologia langattomassa tiedonsiirrossa on täysin kytketty topologia. Nämä verkot ovat myös vikasietoisuuden kannalta parempia kuin tähti- ja puuverkot, sillä yksittäisen laitteen vikaantuminen ei lopeta koko verkon toimintaa.

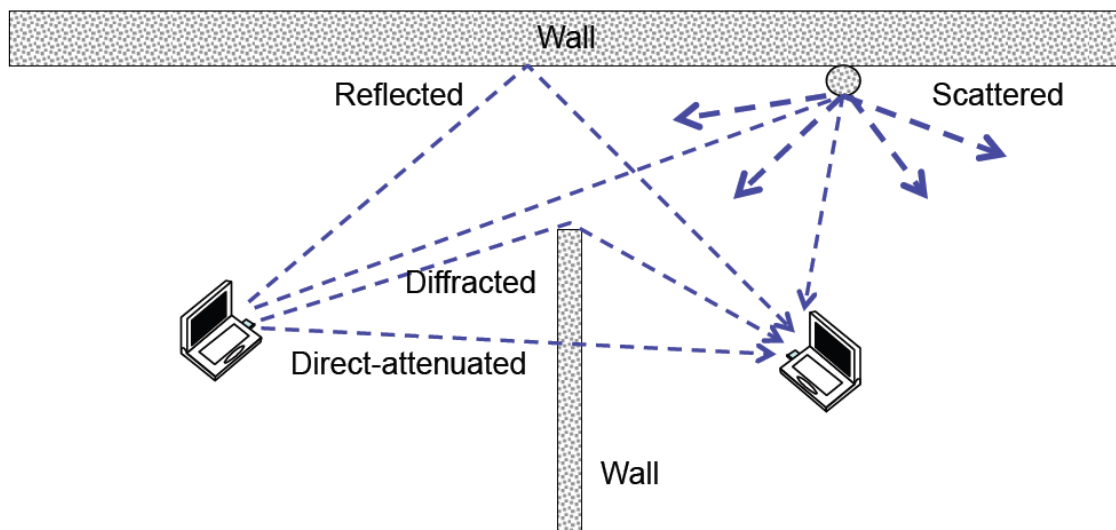
Aitoa vikasietoisuutta tavoiteltaessa ainoiksi todellisiksi vaihtoehdoiksi jäävät täysin kytketty ja mesh-verkkotopologiat ja varauksin myös tähtitopologia. Ongelmana täysin kytketyissä verkoissa on yhteysmäärien eksponentiaalinen kasvu uusien solmupisteitä lisättäessä, jolloin liikenteen reititys verkossa muuttuu hyvin monimutkaiseksi ja paljon laskentatehoa vaativaksi. Mesh-verkoissa jokainen solmupiste on kytketty ainoastaan sitä lähimpänä oleviin solmupisteisiin, jolloin kytkentöjen määrä pysyy rajallisina, mutta verkon vikasietoisuus pysyy silti korkeana. Haittapuoleksi mesh-verkoilla voidaan lukea

QoS:n heikkeneminen viestien kulkiessa useiden solmupisteiden kautta. (Lewis 2004: 2-3.)

Radioverkoissa mesh-topologia on tehokas valinta, sillä rajatun kantamansa ansiosta jokainen solmupiste on todellisuudessa yhteydessä ainoastaan sitä lähellä oleviin muihin laitteisiin. QoS:n heikkenemistä monen linkkivälin käytön vuoksi pyritään usein rajoittamaan käyttämällä älykkäitä reitittäviä protokollia, jotka valitsevat lyhyimmän ja vahvimman linkkivälin automaattisesti. (Lewis 2004: 2-3.)

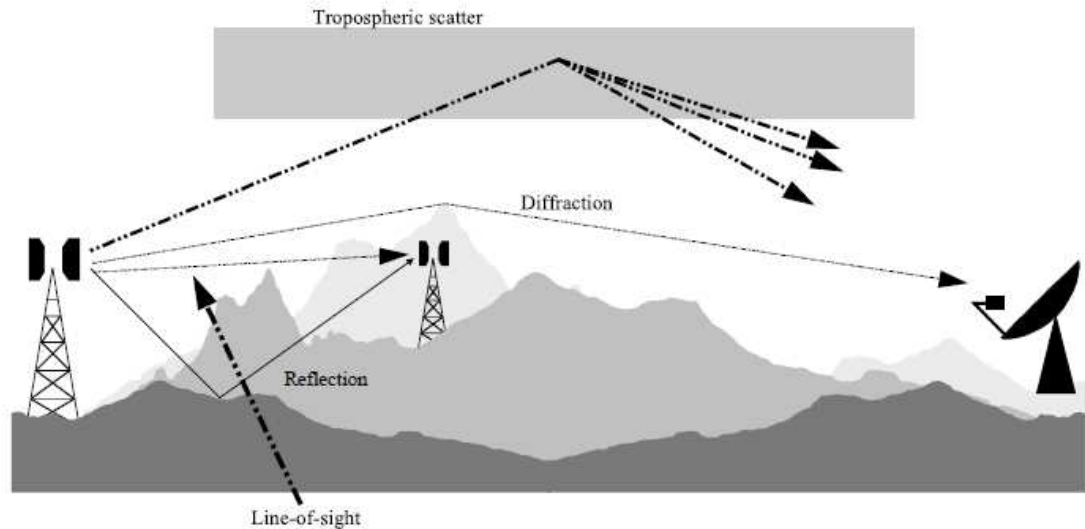
4.2 Radioaaltojen eteneminen

Radioaaltojen etenemistavat voidaan jakaa neljään eri perusmekanismiin, joita ovat suora vapaan tilan eteneminen (ns. LOS, Line Of Sight), heijastuminen, diffraktio ja sironta.



Kuva 4. Radioaaltojen etenemismekanismit sisätiloissa (Struzak 2006: 39).

Näiden etenemismekanismien lisäksi on useita muita etenemismalleja, jotka eivät kuitenkaan ole oleellisia langattomien anturiverkkojen tapauksissa, vaan vaikuttavat lähinnä suurten, sadoista tuhansien kilometrien etäisyydellä toimivien radiolinkkien tapauksissa. Radioaallot voivat edetä pinta-aaltolina, troposfäärihajonnan avulla, ionosfäärissä tapahtuvien heijastusten kautta tai jopa muuttuvien säälmiöiden aiheuttamien heijastusten avulla. (Struzak 2006: 44.)



Kuva 5. Radioaaltojen etenemismekanismit ulkotiloissa (Struzak 2006: 40).

Seuraavassa esittelen lyhyesti lyhyen kantaman, korkeintaan muutaman kilometrin, radioyhteyksiin vaikuttavat etenemismekanismit.

4.2.1 Vapaan tilan eteneminen

Yksinkertaisin radioaaltojen etenemismekanismi on esteettömässä vapaassa tilassa tapahtuva suora eteneminen, niin kutsuttu Line Of Sight –eteneminen. Radioaallot etenevät suoraviivaisesti, esteettä, lähetinantennista vastaanottimeen. Vapaan tilan etenemismallit ovat käyttökelpoisia satelliittiyhteyksien ja vapaan tilan mikroaaltolinkkien teoreettisessa tarkastelussa sekä lyhyillä esteettömän näköyhteyden päässä toisistaan olevilla anturiverkkolinkeillä. (Laasonen 2003: 2-3)

Vapaan tilan radioyhteyksiä voidaan tarkastella Friisin vapaan tilan yhtälöllä (1), joka kuvaa lähetystehon, vastaanotetun tehon, lähetysetaisyyden ja aallonpituuden keskinäisiä riippuvuuksia.

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 P_t \quad (1)$$

P_r	vastaanotettu teho
P_t	lähetetty teho
G_t	lähetinantennin vahvistus
G_r	vastaanotinantennin vahvistus
λ	aallonpituus
R	vastaanottimen ja lähettimen välinen etäisyys

Friisin yhtälöstä voidaan todeta kaikkien eri radioyhteyteen liittyvien perusparametrien vaikutus vastaanotettuun tehoon ja sitä kautta myös saavutettavaan yhteysetäisyyteen. (Laasonen 2003: 3.)

Anturiverkkosovelluksia suunniteltaessa Friisin yhtälöstä kannattaa huomioida erityisesti taajuuden vaikutus saavutettavaan kantamaan. Koska siirrettävä tietomäärä on tyypillisesti hyvin pientä, ei suurta tiedonsiirtokapasiteettia tarvita. Tästä seuraa se, että kantaman maksimoimisen vuoksi kannattaa verkko sijoittaa toimimaan alle 1 GHz taajuusalueelle.

4.2.2 Eteneminen heijastumalla

Jos lähettimen ja vastaanottimen välillä ei ole suoraa näköyhteyttä, on radioyhteys kuitenkin mahdollista saavuttaa. Radioaallot heijastuvat aallonpituuttaan suuremmista kahden erilaisen aineen rajapinnoista heijastuslain mukaan. Heijastus voi siis syntyä muustakin kuin kiinteästä pinnasta. Heijastuksissa tapahtuu aina jonkin verran radioaaltojen absorboitumista heijastavaan pintaan, joten saavutettava tiedonsiirtoetäisyys on heikompi verrattuna vapaan tilan etenemiseen. (Laasonen 2003: 3.)

Heijastuksissa tapahtuu radioaaltojen suunnan muutoksen lisäksi myös muita muutoksia riippuen heijastavan pinnan sähköisistä ominaisuuksista ja muodosta sekä aaltorintaman tulokulmasta. Vaimenemisen ja suunnan muuttumisen lisäksi on mahdollista, että radioaaltojen vaihe tai polarisaatio muuttuu. Peilimäisen heijastuksen lisäksi heijastus voi olla heijastavasta pinnasta riippuen myös hajottava, jolloin kokonaisenergia heijastuu, mutta energian kuljettama informaatio vääristyy tai katoaa kokonaan. (Struzak 2006: 62.)

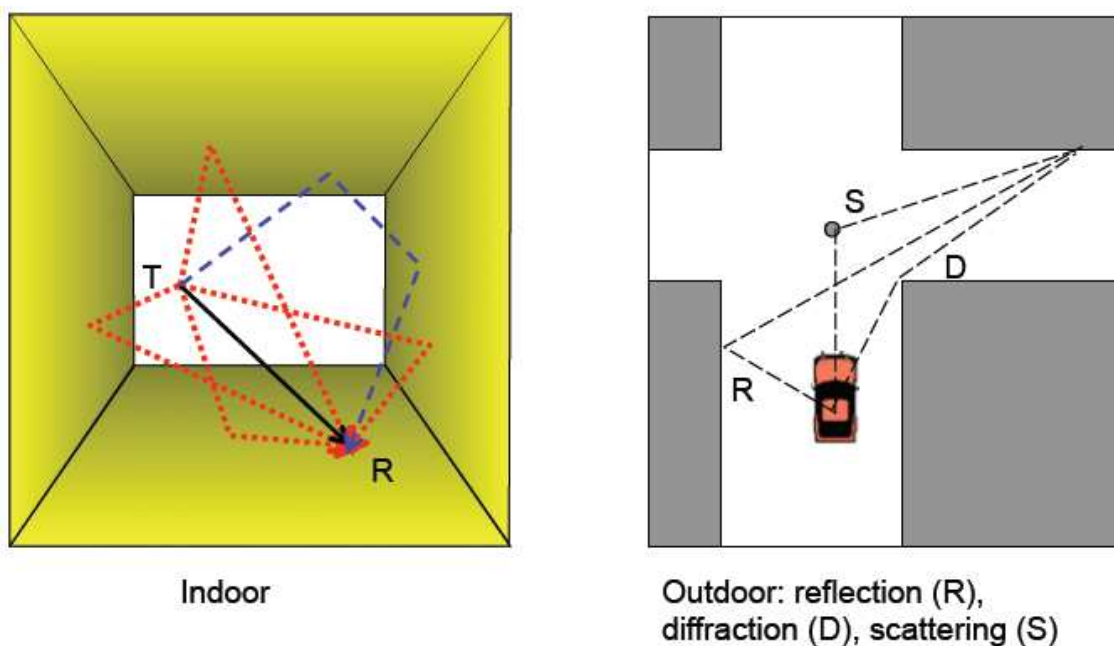
4.2.3 Eteneminen diffraktion avulla

Diffraktio on radioaaltojen etenismekanismi, jossa aaltorintaman suunta muuttuu sen ohittaessa esteitä (seinät, oviaukot). Diffraktio mahdollistaa radioaaltojen etenemisen reunojen ympäri tai horisontin taakse. Huygensin periaate kuvaa jokaisen pisteen aaltorintamassa lähteeksi seuraavalle aaltorintamalle, josta se pystyy etenemään reuna- ja paikoista myös muutoin varjoon jääville alueille. (Laasonen 2003: 3.)

4.2.4 Eteneminen sironnan avulla

Kun radioaallot osuvat aallonpituuttaan pienempään kohteeseen, tapahtuu heijastumisen sijasta aallon sironta. Sironnassa myös radiosäteilyn polarisaatio voi muuttua (Struzak, s. 46). Sironneet radioaallot etenevät sirontakohteesta useaan eri suuntaan, jolloin myös lähetetty energia siroaa laajalle alueelle, näin pienentäen saavutettavaa kantamaa. (Laasonen 2003: 3.)

4.2.5 Monitie-eteneminen



Kuva 6. Monitie-eteneminen sisä- ja ulkotiloissa (Struzak 2006: 85).

Käytännössä kaikissa reaali maailman radioyhteyksissä radioaallot etenevät noudattaen useampaa etenismekanismia. Osa aalloista kulkee suoraan lähettimeltä vastaanottimeksi, mahdollisesti vaimentuen välillä olevista esteistä tai seinistä. Osa aalloista heijastuu lähellä olevien seinien tai maanpinnan kautta ja osa siroaa puiden, valotolppien

tai muiden vastaavien kautta. Etenemistä tapahtuu myös diffraktion kautta aaltorintaman muuttaessa suuntaansa esimerkiksi seinässä olevan oviaukon kohdalla.

Eri reittiä kulkevat radioaallot kulkevat eripituisen matkan lähettimen ja vastaanottimen välillä. Tästä seuraa, että radioaallot saavuttavat vastaanottimen eri aikoihin. Parhaimmassa tapauksessa monitie-eteneminen mahdollistaa jopa pidemmät yhteysvälit eri reittejä saapuneiden radioaaltojen summavaikutuksen ollessa lähetettyä viestiä vahvistava, mutta vaikutus voi olla myös päinvastainen. Monitie-etenemisen seurauksena lähetetty viesti voi vääristyä vastaanottimella niin pahasti, että sitä ei pystytä luotettavasti lukemaan. (Struzak 2006: 86.)

4.3 Kantama ja sen arviointi

Radioyhteys tarvitsee toimiakseen lähettimen, vastaanottimen sekä antennit. Useimmiten lähetin ja vastaanotin on yhdistetty samaksi laitteeksi, niin sanotuksi transceiveriksi (transmitter + receiver). Jokaisella lähettimellä ja vastaanottimella on oma lähetystehonsa ja vastaanottoherkkyytensä. Lähetysteho on useimmiten vakio modulointitavasta, yhteysnopeudesta ja muista tiedonsiirtoparametreista riippumatta, mutta vastaanottimen herkkyys muuttuu näiden parametrien mukaan.

Vastaanottimen herkkyys kertoo, kuinka paljon alkuperäinen signaali on saanut vaimentua, jotta se vielä erotettaisiin taustakohinasta. Nämä arvot ilmoitetaan pienitehoisten radiolaitteiden tapauksessa yleensä desibeleinä verrattuna yhteen milliwattiin, dBm:nä. Vastaanottimen herkkyys ilmoitetaan tyypillisesti arvona, jossa pakettivirhemäärä (PER-arvo, Packet Error Rate) ylittää 1 %.

Jokaisella radiolinkillä on lähettimestä ja vastaanottimesta riippuva maksimivaimentuma, jonka jälkeen lähetetty viesti on vielä luettavissa. Tätä arvoa kutsutaan myös linkkibudjetiksi. Linkkibudjetti voidaan laskea, kun tiedetään lähettimen lähetysteho, vastaanottimen herkkyys ja antennien vahvistus sekä antennikaapeleiden häviöt.

Esimerkiksi: valitaan lähetin, jonka lähetysteho on 1 mW eli vahvistus $G_t = 1$ dBm. Vastaanottimeksi valitaan laite, jonka herkkyys G_r on -92 dBm. Lähetin- ja vastaanottinantennien vahvistus, G_a , on kumpikin 1,5 dBm, ja antennikaapeleiden vahvistus (häviöt), G_c , -0,5 dBm. Tällöin lopulliseksi linkkibudjetiksi saadaan

$$G_t + 2G_a + 2G_c - G_r = 95 \text{ dBm} \quad (2)$$

Friisin yhtälön (1) avulla voidaan laskea signaalin vaimennus tietyillä yhteysparametreillä ja arvioida yhteyden toimivuutta. Yhtälön 2 avulla laskettu linkkibudjetti kertoo suurimman mahdollisimman vaimennuksen, millä yhteys vielä toimii, ja laskennallinen vaimennus saadaan Friisin yhtälön avulla.

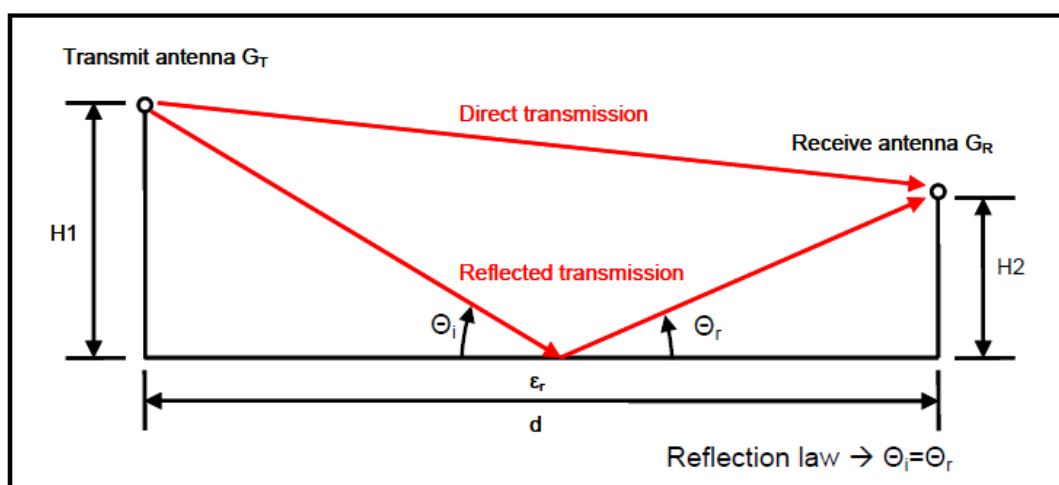
Esimerkiksi: valitaan radiolaitteet, jotka toimivat 2445 MHz taajuudella, ja tavoitteena on siirtää tietoa 100 m etäisyydellä näköyhteydellä olevien laitteiden välillä.

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 P_t = \left(\frac{\frac{3 \cdot 10^8}{2445 \cdot 10^6}}{4 \cdot \pi \cdot 100} \right)^2 1 \text{ mW} = 9,534 \cdot 10^{-9} \text{ mW} = -80,2 \text{ dBm} \quad (3)$$

Friisin yhtälön avulla huomataan, että kyseisen siirtovälin vaimennus, 80,2 dBm, on pienempi kuin siirtojärjestelmän linkkibudjetti, 95 dBm, joten yhteyden voidaan olettaa toimivan. (Kvaksrud 2008: 3.)

Käytännössä kantamaan vaikuttavat myös monet muut asiat alkaen ympäristöstä ja jopa sääilmiöistä. Myös radiolähteyksen moduloinnilla on vaikutusta kantamaan, ja etenkin ASK (Amplitude Shift Keying) -modulaatio heikentää kantamaa, koska kantoaallon amplitudia moduloimalla myös kokonaislähetysteho laskee.

Todellisuudessa kuitenkin hyvin harvoin saavutetaan tilannetta, jossa vaimeneminen noudattaisi pelkästään Friisin yhtälöä. Signaali etenee useimmiten vähintään kahta eri reittiä, ja tätä kuvataan usein niin sanotulla maaheijastusmallilla, jossa signaali etenee sekä suoraan lähettimen ja vastaanottimen välillä että heijastuen maan kautta.



Kuva 7. Maaheijastusmalli (Kvaksrud 2008: 4).

Maan kautta heijastunut signaali kulkee pidemmän matkan kuin suoraan kulkenut, jolloin lähettimen ja vastaanottimen välisestä etäisyydestä riippuen eri teitä edenneet signaalit voivat joko heikentää tai vahvistaa toisiaan. Tästä seuraa se, että tietyillä yhteysetäisyyksillä linkki ei toimi, vaikka Friisin yhtälö niin antaisikin olettaa. (Kvaksrud 2008: 4.)

4.4 Antennit

Antennit ovat hyvin tärkeässä osassa radioyhteyksien toiminnassa. Antennien toiminta on symmetristä niin lähetyksessä kuin vastaanotossakin, eli vahvistus on sama sekä lähetettävälle että vastaanotetulle signaalille. Anturiverkkosovelluksissa käytetään yleensä yksinkertaisia dipoli- tai monopolianteenneja. Monopoliantenni on niin sanottu isotrooppinen säteilijä, eli radiosäteily jakautuu tasaisesti kaikkialle antennin ympärille. Käytännössä kuitenkin jokaisella monopoliantennillakin on oma säteilykuvionsa, ja ne säteilevät tehoa eri lailla eri suuntiin. Dipoliantennin säteilyvoimakkuus on riippuvainen suunnasta, josta antenna tarkastellaan. (Särkimäki 2004: 18.)

Myös suunta-antenneja käytetään joissain sovelluksissa, kun halutaan suunnata lähettimen säteilykuvio tarkasti tiettyyn suuntaan kantaman maksimoimiseksi. Lyhyiden etäisyyksien sovelluksissa antenni voidaan valmistaa myös suoraan piirilevyllä kupariveitona tai käyttää keraamista antennielementtiä. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä huomiota laitekotelointiin ja sen aiheuttamaan mahdolliseen signaalin vaimenemiseen.

Radiosäteilyn polarisaatio on riippuvainen antennista. Polarisaatio voi olla joko vaakapysty- tai ympyräpolarisaatiota. Polarisaatiohäviöiden välttämiseksi on sekä lähettävän että vastaanottavan antennin oltava samalla tavalla polarisoituja (Särkimäki 2004: 19.)

Antennin mitoitus riippuu käytettävästä taajuudesta. Pituus määräytyy aallonpituuden osina, ja yleisimmin käytettävät antennityypit ovatkin niin sanotut koko- puoli tai neljännesaallon antennit.

4.5 Taajuusalueet

Suomessa radiotaajuuksia hallitsee Viestintävirasto, joka toimii kansainvälisen telekommunkaatiunionin (ITU, International Telecommunication Union) alaisuudessa. Viestintävirasto määrää taajuuksien käytöstä ja määrittää lupavapaat ja luvan vaativat taajuudet tavoitteenaan radiotaajuuksien tasapuolinen saatavuus, tehokkaan ja tarkoituk-

senmukaisen sekä riittävän häiriöttömän käytön turvaaminen. (Radiotaajuusmääräys 2007.)

Lähes kaikki langattomat anturiverkot toimivat kansainvälisesti lupavapailla ISM-taajuuksilla (Industrial, Medical, Scientific). Näitä taajuuksia käytetään viestiliikenteen lisäksi niiden aiheuttamien paikallisten vaikutusten takia esimerkiksi mikroaaltouuneissa, joissa 2,4 GHz taajuinen säteily saa vesimolekyylit värähtelemään ja lämpenemään.

ISM-taajuuksien lisäksi on olemassa myös kansallisia lupavapaita taajuuksia sekä maanosittain voimassa olevia määräyksiä.

Taulukko 1. Lupavapaat kansainväliset ISM-taajuusalueet (Frequently asked questions, ITU).

Taajuusalue	Keskitaajuus
6,765 – 6,795 MHz	6,780 MHz
13,553 – 13,567 MHz	13,560 MHz
26,957 – 27,283 MHz	27,120 MHz
40,66 – 40,70 MHz	40,68 MHz
433,05 – 434,79 MHz	433,92 MHz
902 – 928 MHz	915 MHz
2,400 – 2,500 GHz	2,450 GHz
5,725 – 5,875 GHz	5,800 GHz
24 – 24,25 GHz	24,125 GHz
61 – 61,5 GHz	61,25 GHz
122 – 123 GHz	122,5 GHz
244 – 246 GHz	245 GHz

Taajuusalueet ovat jaettu useaan eri osaan käyttötarkoituksen ja sallitun lähetystehon mukaan. Viestintäviraston ääräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä (15W/2006 M) määrää lupavapaiden taajuuksien käytöstä ja määrittää suurimmat sallitut lähetystehot, kaistanleveydet ja käyttösuhteet. (Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä 2006.)

Taajuuksien käyttöä säädellään viestintäviraston määräysten lisäksi myös lakitekstillä. Laki radiotaajuuksista ja telelaitteista asettaa omat vaatimuksensa taajuuksien käytölle,

joita viestintäviraston määräyksen täsmentävät. (Laki radiotaajuuksista ja telelaitteista 16.11.2001/1015. 2001.)

Kaikki ISM-taajuudet eivät ole tasapuolisessa käytössä, vaan osa taajuuksista on jopa ruuhkautunut. Eniten liikennettä on 2,4 GHz:n taajuusalueella, jossa toimivat muun muassa WLAN-verkot ja langaton Bluetooth-tekniologia. Jopa perinteiset mikroaaltouunit käyttävät 2,4 GHz taajuista säteilyä ja saattavat aiheuttaa pakettivirheitä samalla alueella toimiviin tiedonsiirtoverkkoihin. (Kamerman, 2000; Golmie ym., 2001.)

5 Tekniikan valinta

Suunniteltavalle anturiverkolle asetettiin useita tavoitteita, näitä olivat muun muassa

- riittävä kantama
- helppo käyttöönotto
 - automaattisesti muodostuva verkko
 - automaattisesti reitittävä verkko
- edulliset valmistuskustannukset
- yhteensopivuus Sintrolin tuotteiden kanssa
- integroitavuus suoraan Sintrolin tuotteisiin, pieni piirilevyypinta-alan käyttö
- mahdollisuus laajentaa järjestelmää siten, että siihen voidaan kytkeä myös muiden valmistajien tuotteita
- mahdollisuus käyttää järjestelmää joka puolella maailmaa.

Nämä vaatimukset mielessä alettiin selvittää eri vaihtoehtoja toteuttaa verkon radioliikennettä hoitava laitteisto.

Tämä osuus työstä aloitettiin etsimällä tietoa markkinoilla olevista ratkaisuksista ja eri mahdollisuuksista toteuttaa tietoa radiotaajuuksilla siirtävä järjestelmä. Selvityksen aikana nousi esiin kaksi vaihtoehtoa: käyttää joko valmista radiomoduulia tai rakentaa koko radiolaitteisto komponenttitasolta asti itse.

Taajuusaluetta valittaessa huomio piti kiinnittää vaatimuslistan kohtiin pitkästä kantomatkasta ja maailmanlaajuisesta käyttöympäristöstä. Tämä tarkoitti käytännössä alle 1 GHz ISM-taajuuksia, joilla saavutetaan hyvä kantama ja riittävä tiedonsiirtonopeus.

Keskusteluissa tuotekehityspäällikkö Kari Toivokosken kanssa päädyttiin käyttämään kehitystyön pohjana olemassa olevaa Snifter-tuoteperheen uusinta piirikorttia, jonka päälle radiolähetintä lähdettiin rakentamaan lisämoduuliksi. Pohjana olevassa piirikortissa on joko Atmelin valmistama ATmega32- tai ATmega644-mikrokontrolleri. Nämä kontrollerit ovat 8-bittisiä AVR (Advanced Virtual RISC) -kontrollereita, jotka sisältävät RISC-ytimen (Reduced Instruction Set Computer) lisäksi FLASH-ohjelmamuistia, SRAM-käyttömuistia (Static Random Access Memory), mallista riippuen eri määriä IO-linjoja sekä sarjaliikenneväyliä. Näiden ominaisuuksien lisäksi ATmega-sarjan mikrokontrollereissa on useimmiten myös AD-muuntimia (Analog/Digital) ulkoisen analogiaviestien

digitointiin, sekä PWM (Pulse Width Modulation) -pulssinleveysmodulaatiolähtöjä. (AT-mega32 datasheet)

Itse mittaus ja mittatiedon käsittely ei ole laskennallisesti kovin intensiivistä, joten prosessointiaikaa jää huomattavia määriä käyttämättä. Tämän vuoksi päädyttiin siihen, että radiolaitteesta rakennetaan pelkkä ”tyhmä radiopiiri”, joka ei sisällä enempää älyä. Ajatuksena oli, että mittalaitteen oma prosessori kykenee hoitamaan radioverkon vaatimat toiminnot ongelmitta, jolloin myös säästetään valmistuskustannuksissa, kun radiopäähän ei tarvita omaa suoritinta.

Käytössä oleva mikrokontrolleri asetti omat vaatimuksensa radiotekniikalle ja etenkin sille, miten radiolähetin/vastaanotin kytketään siihen. Käytännössä vaihtoehtoja oli kaksi: liittää radiolaitte prosessoriin joko USART-sarjaväylää (Universal Synchronous Asynchronous Transmitter-Receiver) käyttäen tai SPI-väylää (Serial Peripheral Interface).

Toteutustapaa pohtiessa mietittiin kummankin vaihtoehdon etuja ja haittoja. Seuraavassa taulukossa on esitetty tekijät, joiden perusteella valinta tehtiin.

Taulukko 2. Eri toteutusvaihtoehtojen vertailu.

Moduulitoteutus	Radiopiiri ja mikrokontrolleri -toteutus
+ valmis laite, kehitystyön määrä vähäistä	+ järjestelmä täysin räätälöitävissä omiin tarpeisiin
+ valmiiksi hyväksytyjä laitteita	+ pienempi hinta
+ useita valmiita rajapintoja	+ samalla laitteella voidaan operoida ympäri maailman
+ standardien mukaisia – mahdollista liittyä olemassa olevien verkkojen jäseneksi	+ järjestelmä helposti laajennettavissa ja muokattavissa
- raskaat protokollapinot – ”liikaa ominaisuuksia” (esim. ZigBee)	+ laajemmat mahdollisuudet: oma tuote, oma protokolla, omat toistimet, omat gatewayt esim. USB-väylään
- ominaisuuksien lisääminen vaikeaa ellei mahdotonta	+ hinta
- hinta	- vaaditaan enemmän kehitystyötä
	- hyväksyntäprosessit

Toteutustavan valinnassa päädyttiin rakentamaan koko radiolaitteisto itse komponenttitasolta alkaen. Tällä mahdollistettiin järjestelmän suurempi räätälöitävyys, kustannustehokkuus ja integroitavuus olemassa oleviin tuotteisiin sekä helpompi jatkokehitys, kun kaikki radioon liittyvät parametrit ovat itse määriteltävissä ja muokattavissa. Haittapuolena tällä toteutustavalla verrattuna valmiisiin radiomoduuleihin on tietenkin järjestelmän monimutkaisuus ja suurempi suunnittelutyön tarve. Kuitenkin räätälöitävyys ja pienemmän piirilevyypinta-alan tarve katsottiin niin suureksi eduksi, että tähän ratkaisuun päädyttiin.

5.1 Axsem AX5042

Radiopiiriksi valittiin sveitsiläisen Axsemin valmistama AX5042-radiopiiri, jonka tärkeimmät ominaisuudet ovat seuraavat (AX5042 datasheet):

- Samalla piirillä sekä lähetin että vastaanotin (transceiver)
- Ohjelmoitavissa toimimaan 400-470 MHz ja 800-930 MHz välillä olevilla ISM-taajuuksilla
- Useinta modulointivaihtoehtoja, muun muassa ASK,PSK, QPSK, MSK, FSK ja GFSK
- Siirtonopeus ohjelmoitavissa välillä 0,1-600 kbps
- Ohjelmoitavissa oleva kaistanpäästösuodatin, kaistanleveys valittavissa välillä 4,8-600 kHz
- RS-232- ja SPI-yhteensopiva
- Herkkyys jopa -122 dBm
- Lähetysteho ohjelmoitavissa, korkeintaan + 10 dBm
- 24 bitin lähetys ja vastaanottopuskurit

Ohjelmistokehityksen nopean alkuunpääsyn takia tilasin AX5042-demosarjan, joka sisälsi kaksi 433 MHz alueella toimivaa AX5042-piirin ympärille rakennettua radiomoduulia ja kaksi 868 MHz taajuudella toimivaa moduulia. Lisäksi sarjaan kuului USB (Universal Serial Bus) -liitäntäiset emolevyt, joihin radiomoduulit voitiin liittää. Myös neljäsosaallon monopoliantennit sekä 433 että 868 MHz taajuusalueille kuuluivat demosarjaan. Lisäksi mukana tuli PC-ohjelmisto, jolla voitiin testata radiolinkkien toimivuutta sekä laskea radiopiirin rekisteriarvot taajuuden, siirtonopeuden sekä muiden arvojen perusteella.



Kuva 8. Axsem AX5042 demosarja.

Lyhyen tutustumisen ja laitteiston testaamisen jälkeen seuraava vaihe oli liittää AX5042 Sniflerin piirikortilla olevaan ATmega32-mikrokontrolleriin. Kommunikointi kontrollerin ja radiopiirin välillä päätettiin toteuttaa SPI-väylällä, sillä UART-väylä on varattuna käytölliittymän käyttöön, ja SPI-väylä oli helposti johdotettavissa kortilla olevasta ohjelmointiliitimestä.

SPI-väylä on sarjamoitoinen full-duplex-väylä, eli dataa siirretään samanaikaisesti sekä master-laitteelta slave-laitteelle että toisinpäin. SPI-väylä perustuu niin sanottuihin siirtorekistereihin, jotka vaihtavat sisältönsä keskenään tiedonsiirron aikana. SPI-väylän kaapelointi vaatii neljä johdinta: CS, MOSI, MISO ja SCLK. Näistä CS (chip select) -linja aktivoi aina tietyn slave-laitteen kerrallaan, jolloin väylää voidaan käyttää usean ohjelaitteen kanssa kommunikointiin. MOSI (Master Output Slave Input), siirtää rekisterin sisällön master-laitteelta slave-laitteelle, MISO (Master Input Slave Output) -linjan hoitaessa siirron toiseen suuntaan. SCLK (SPI Clock) -linja hoitaa tiedonsiirron bittitahdistuksen.

5.1.1 Sovitinkortin suunnittelu ja toteutus

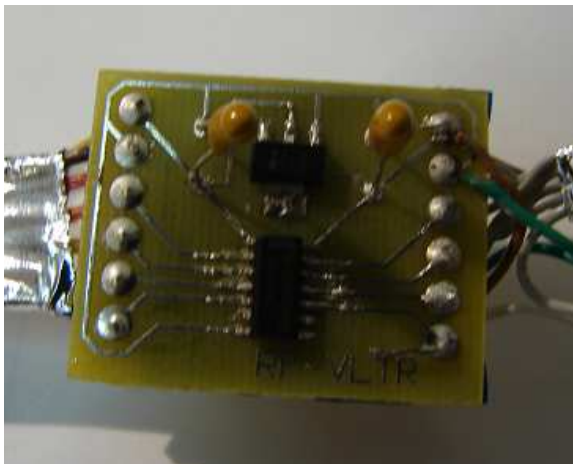
Snifter-tuoteperheen piirikorttien sisäinen käyttöjännite on 5 VDC, joka muodostetaan 12 – 24 VDC suuruisesta syöttöjännitteestä. AX5042-radiopiirin käyttöjännite on 2,5 VDC, joten laitteita ei voitu kytkeä suoraan toisiinsa, vaan väliin tarvittiin käyttöjännit-

teen ja signaalitason muuttava sovitinkortti. Mikäli signaalit olisivat kulkeneet ainoastaan mikrokontrollerilta radiopiirille, olisi tasomuunnoksesta selvitty vastuksilla toteutetulla jännitteenjaolla ja lineaariregulaattorilla oheiskomponentteineen, jotka tekisivät radiopiirin käyttöjännitteen.

Lyhyen selvitystyön jälkeen helpoimmaksi tavaksi toteuttaa signaalien tasomuunnos valittiin Texas Instrumentsin valmistama logiikkatasomuunnin TXB0104D, joka muuntaa signaalitason haluttuun jännitteeseen ja kykenee tekemään muunnoksen jopa 100 Mbps:n nopeudella. Lisäksi valittiin STMicroelectronicsin SOT223-koteloinen lineaariregulaattori ja kaksi keraamista kondensaattoria.

Itse sovitinkortti piirrettiin KiCAD-suunnitteluohjelmistolla. Ensimmäisenä suunniteltiin kortin kytkentäkaavio, jonka jälkeen komponentit sijoiteltiin piirilevy pohjalle ja kytkettiin toisiinsa kuparivedoilla. Koska Sintrolilla ei vielä tässä vaiheessa ollut laitteita prototyyppilevyjen valmistukseen, tilattiin piirilevyjä pieni erä ulkopuoliselta piirilevyvalmistajalta. Tätä varten täytyi luoda valmistustiedostot, niin sanotut gerber-tiedostot, joiden pohjalta piirilevyt voitiin valmistaa.

Piirilevyjen ja komponenttien saavuttua voitiin komponentit juottaa piirilevyille, johdottaa sovitinkortti sekä Snifter-kortille että radiomodulille ja testata, että tasomuunnos toimii. Testien varmistettua toimivuuden päästiin ohjelmistokehitys aloittamaan.



Kuva 9. AX5042-piirille tehty sovitinkortti.

5.1.2 Ohjelmistokehitys

Kun radiopiiri oli saatu kytkettyä mikrokontrolleriin, aloitettiin ohjelmiston kehitystyö. Koska anturiverkko on lisäominaisuus jo olemassa oleville mittalaitteille, suoritettiin kehitys samalla ympäristöllä ja ohjelmointikielellä, jota oli käytetty laitteiden ohjelmointiin aikaisemminkin. Seuraavassa kuvailen lyhyesti ohjelmiston kehitysympäristön.

Kehitysympäristö

Sintrolin hiukkaspitoisuusmittareiden ohjelmisto on kirjoitettu C-ohjelmointikielellä. Ohjelmointiympäristönä Atmelin valmistamille 8-bittisille mikrokontrollereille on niin ikään Atmelin toimittama AVR Studio 4. AVR Studio 4 käyttää GCC (GNU Compiler Collection) -kääntäjiä ja linkkereitä ohjelmakoodin kääntämiseen ja linkittämiseen ajettavaksi tiedostoksi. AVR Studiassa on ohjelmointiympäristön lisäksi myös debuggaustoiminnot, joilla ohjelman ajoa päästään tarkastelemaan lähemmin vianetsintätarkoituksessa. Debugging-toiminnallisuus vaatii JTAG-ohjelmointiliitännän (Joint Test Action Group) käyttöä, mutta koska Snifter-korteilla on ainoastaan ISP (In System Programming) -ohjelmointimahdollisuus, ei debuggaustoimintoja voitu käyttää.

Valmiit ohjelmatiedostot siirretään Snifter-kortille AVRISP mkII-ohjelmointilaitteen avulla. ISP-liityntä mahdollistaa mikrokontrollerin ohjelmoinnin sen ollessa jo kiinni piirikortissa. Tämä mahdollistaa myös helpomman laitteiden tuotannon, kun ohjelmointi ja testaaminen voidaan yhdistää samaan työvaiheeseen. Kuvassa 10 on esitetty Snifter-piirikortti ja siihen kytketty AVRISP mk II -ohjelmointilaite.

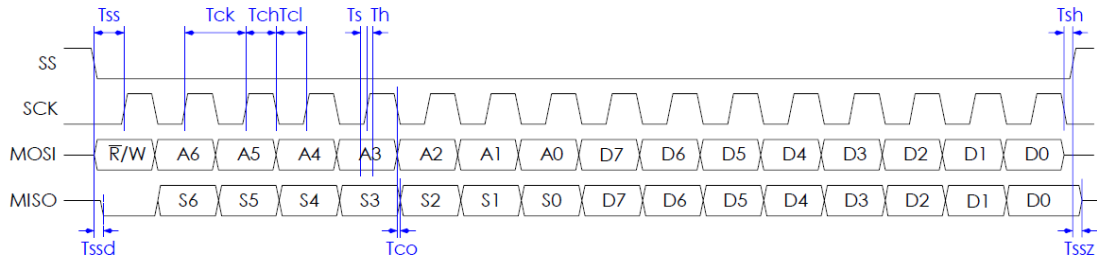


Kuva 10. AVRISP mk II –ohjelmointilaite yhdistettynä Sniffer-piirikorttiin.

SPI-kommunikointirutiinit

Ensimmäinen vaihe ohjelmistokehityksessä oli luoda funktiot, joilla Sniffer-kortin mikrokontrolleri pystyy kirjoittamaan ja lukemaan dataa radiopiiriltä. Koska Atmega32- ja Atmega644-kontrollereissa on valmiina SPI-toiminnot, oli tämä vaihe kohtuullisen nopea suorittaa. SPI-kommunikoinnissa radiopiirin kanssa tiedonsiirron ensimmäinen bitti kertoo radiopiirille, kirjoitetaanko sille dataa vai luetaanko. Kirjoituksessa ensimmäisen merkkibitin jälkeen tulee 7-bittinen rekisteriosoite, johon dataa kirjoitetaan, ja seuraavat 8 bittiä ovat kirjoitettava data. Samalla AX5042 siirtää statusrekisterinsä paluuarvona mikrokontrollerille. (AX5042 Programming manual.)

SPI-kommunikaation ajoitukset on tarkkaan määritelty AX5042-radiopiirin datasheetissä ja kommunikaation toimivuuden takia väylä piti saada käyttäytymään täsmälleen valmistajan määritysten mukaisesti. Väylän kellosignaalin ajoitus, vaihe ja invertointi sekä piirin valintasignaali ja suurimman sallitun väylätaajuuden tuli olla valmistajan asettamien arvojen mukaisia. (AX5042 Programming manual.)



Kuva 11. SPI-väylän ajoitus (Axsem AX5042 datasheet: 31).

Kun radiopiiriltä luetaan dataa, on ensimmäinen bitti tiedonsiirrosta invertoituna lukuun nähden. Seuraavat 7 bittiä valitsevat luettavan rekisterin osoitteen ja seuraavat 8 jätetään huomiotta. Jälkimmäisen 8 bitin aikana radiopiiri siirtää paluuarvona halutun rekisterin sisällön mikrokontrollerille.

AX5042:n rekisteriarvot

Radiopiirin toimintaa, taajuutta, modulointia ja muita siihen liittyviä asioita säädellään kirjoittamalla piirille halutut rekisteriarvot. Eri rekisterejä on yhteensä 62 kappaletta, ja osa niistä on sekä kirjoitettavia että luettavia osan ollessa ainoastaan luettavia rekisterejä, jotka sisältävät tietoa esimerkiksi radiopiirin tilasta, piirin sarjanumeron tai muuta vastaavaa. Axsem toimitti ohjelman, jolla rekisteriarvot pystyi laskemaan syöttämällä halutut taajuudet, modulaatiot ynnä muut. Käytännössä rekisteriarvot jouduttiin kuitenkin laskemaan käsin, sillä ohjelman laskemilla arvoilla radioyhteyttä ei saatu muodostettua. Käsin lasketut arvot erosivatkin ohjelmalla tuotetuista arvoista, ja näiden avulla kommunikaatio saatiin toimimaan.

Kommunikointi ja löydetyt ongelmat

Kommunikointi kahden radiopiirin välillä tapahtuu siten, että lähetys aloitetaan lähettämällä niin sanottu preamble, aluke. Tämä aluke koostuu vaihtelevista 1- ja 0-biteistä ja on kestoaltaan 3 – 32 tavua. Alukkeen pituus vaikuttaa eniten siihen, minkälainen herkkyys vastaanottimelta voidaan saavuttaa. Pidempi aluke mahdollistaa tarkemman vastaanoton ja sitä kautta myös suuremman vastaanottoherkkydenherkkyden ja linkkibudjetin. (AX5042 Programming manual.)

Alukkeen tarkoituksena on mahdollistaa lähettävän radion vahvistimen täyden tehon saavuttaminen. Alukkeen aikana myös vastaanottava radio tahdistuu datan mukaan ja alukkeen lähetys myös alustaa lähettimen enkooderin ja vastaanottimen dekooderin. Aluketta valittaessa on tärkeää, että se sisältää mahdollisimman paljon bittimuutoksia: riippuen siitä, käytetäänkö datan koodauksessa Manchester-algoritmia, on aluketavu joko 0x55, 0xAA, 0x00 tai 0xFF. (Axsem AX5042 Programming manual: 39)

Alukkeen jälkeen voidaan aloittaa varsinaisen datan lähetys. Lähettimelle kirjoitetaan lähetettävää dataa, ja vastaanotin vastaanottaa datan sisäiseen puskuriin sekä ilmoittaa vastaanotetusta datasta mikrokontrollerille keskeytyspyynnöllä, jonka havaittuaan mikrokontrolleri hakee vastaanotetun datan radiopiiriltä. Ohjelmistokehityksen tässä vaiheessa kuitenkin törmättiin ongelmiin, jotka lopulta johtivat AX5042-radiopiirin hylkäämiseen.

Havaittu ongelma liittyi keskeytyspyyntöihin. Radiopiirillä onnistuttiin lähettämään tavuja ja vastaanottimelta pystyttiin manuaalisesti vastaanottopuskuria lukemalla lukemaan lähetetty tavu. Kuitenkaan odotettua keskeytyspyyntöä ei saatu vastaanotetuista tavuista. Ongelmaa selvitettiin aluksi omin voimin tutkimalla mahdolliset rautapuolen viat tarkistamalla kaikki kytkennät radiopiirien, sovitinkorttien ja mikrokontrollerien väliltä ja testaamalla, että sovitinkortin yli syötetty testisignaali saapui oikeanlaisena perille mikrokontrollerille. Kun nämä testit eivät paljastaneet vikaa, jatkettiin selvitystä tarkistamalla kaikki rekisteriarvot, jotka liittyivät keskeytyksiin, ja lopulta laskemalla kaikki rekisteriarvot uudelleen jopa useamman kerran. Tästä ei vielä selvittänyt vian syytä.

Viimein otettiin yhteyttä radiopiirin valmistajan tukeen ja pyydettiin varmistamaan kytkennän ja rekisteriarvojen oikeellisuus. Valmistaja ei kuitenkaan löytänyt mitään ongelmia tehdystä kytkennästä tai lasketuista rekisteriarvoista. Ajanhukan minimoimiseksi päätettiin hylätä Axsemin radiopiiri ja valita uusi piiri, jolla kehitystä jatkettaisiin.

5.2 Texas Instruments CC1101

Uuden radiopiirin löytäminen oli helpompaa ja nopeampaa, kun nyt mielessä oli tarkka kuva siitä, mitä piirillä pitäisi pystyä tekemään. Uudeksi transceiveriksi valittiin Texas Instrumentsin valmistama CC1101, jonka tärkeimmät ominaisuudet on esitelty seuraavassa (CC1101 datasheet):

- transceiver, lähetin ja vastaanotin samalla piirillä
- ohjelmitavissa toimimaan 300-348, 387-464 ja 779-928 MHz välillä olevilla ISM-taajuuksilla
- useinta modulointivaihtoehtoja, muun muassa. ASK,PSK, QPSK, MSK, FSK ja GFSK
- ohjelmitava kaistanpäästösuodatin
- siirtonopeus ohjelmitavissa välillä 0,1 – 500 kbps
- SPI- ja TWI (Two wire Interface) -liitynnät
- herkkyys jopa -116 dBm
- lähetysteho ohjelmitavissa, korkeintaan + 12 dBm
- 64 tavun lähetys ja vastaanottopuskurit

CC1101 eroaa AX5042:sta huomattavasti useallakin ominaisuudella tarkasteltuna. Taajuusalueet, lähetysteho ja modulointivaihtoehdot ovat monipuolisempia CC1101:llä, mutta Axsemin parempi vastaanottoherkkyys mahdollistaa suuremman linkkibudjetin ansiosta jonkin verran pidemmän kantaman. Texas Instrumentsin radiopiirillä on kuitenkin yksi huomattava etu Axsemin piiriin nähden: lähetys- ja vastaanottopuskurit ovat kooltaan yli 21-kertaiset, mikä mahdollistaa sen, että koko lähetettävä paketti voidaan kirjoittaa kerrallaan puskuriin ja myös vastaanotettaessa radiopiiri voi itsenäisesti hoitaa datan vastaanoton ja ilmoittaa vasta, kun koko paketti on luettavissa.

Muutoin ominaisuudet kahden valitun radiopiirin välillä ovat hyvin samankaltaiset: molemmat on pakattu 20-pinniseen 4x4 mm kokoiseen QLP (Quad Leadless Package) -koteloon, molempien virrankäyttö on varsin maltillista, maksimissaan noin 50 milliampeeria lähetystilassa, ja molemmat piirit tarvitsevat vain kourallisen ulkoisia komponentteja toimiakseen. (CC1101 datasheet; AX5042 datasheet.)

CC1101:n ominaisuuksiin kuuluu myös laitetaso tuki pakettiradiotoiminnoille, CCA (Clear-Channel Assesment) -toiminto sekä Wake-On Radio -toiminto. Nämä ominaisuudet tekevät tästä piiristä ylivertaisen haluttuun käyttöön Axsemin radioon verrattuna.

Nämä ominaisuudet mahdollistavat nopeamman ohjelmistokehityksen, sillä esimerkiksi alukkeen lisääminen paketteihin, CRC-tarkistussummien (Cyclic Redundancy Check) laskeminen ja tarkistaminen tapahtuu haluttaessa täysin automaattisesti. CC1101 osaa myös tarkistaa automaattisesti paketin osoitteen ja jättää datan huomiotta, mikäli paketti ei ole osoitettu itselle. (CC1101 datasheet.)

Jotta ohjelmistoa päästäisiin kehittämään mahdollisimman pian, tilattiin myös CC1101-radiopiirille demosarja. Tällä kertaa tilaukseen valittiin ainoastaan kaksi 868 MHz-taajuudelle sovitettua radiomoduulia, jotka normaalisti liitettäisiin Texas Instrumentsin laajempaan demoympäristöön. Tässä tapauksessa koko demoympäristölle ei ollut tarvetta, koska radiomoduuli tultaisiin Axsemin piirin tapaan liittämään itse suunnitellulla sovitinkortilla Snifter-piirikorttiin.

Sovitinkortin suunnittelu ja valmistus

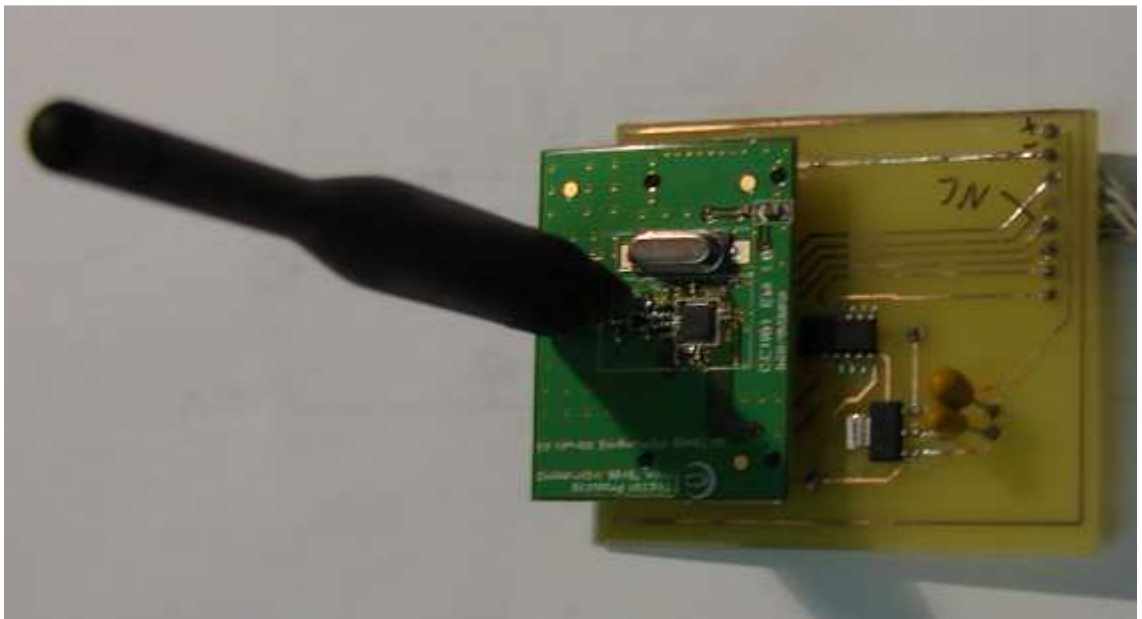
CC1101:n käyttöjännitteeksi soveltuu tasajännite väliltä 1,8 – 3,6 V. Tämän takia jouduttiin jälleen suunnittelemaan sovitinkortti, jolla sekä käyttöjännite että signaalitasot saatiin pudotettua Snifter-kortin 5 voltista tarvittavalle tasolle. Tarvittavat komponentit ja kytkennät oli selvitetty jo Axsemin radiopiirin sovitinkortin valmistuksessa, joten tällä kertaa riitti ainoastaan itse piirilevyn suunnittelu. Tilatuissa radiomoduuleissa oli pohjassa liittimet, joilla moduuli liitettäisiin demoympäristön muihin laitteisiin. Sovitinkortti tuli siis suunnitella niin, että radiokortti voitiin liittää siihen samoja liittimiä käyttäen.

Yritykseen oli tässä vaiheessa saatu hankittua tarvittavat välineet piirilevyjen valotukseen ja syövyttämiseen, joten tarvetta levyjen tilaamiseen ulkopuolelta ei enää ollut. Valittuani sopivat liittimet sovitinkortin ja radiomoduulin välille ja piirrettyäni sovitinkortin loppuun voitiin levy valmistaa valotusmenetelmällä.

Piirilevyn valmistus valotusmenetelmällä tapahtuu lyhyesti selitettynä seuraavasti. Haluttu kuvio tulostetaan läpinäkyvälle kalvolle siten, että kohdat, joihin piirilevyllä halutaan jäävän kuparia jäävät mustiksi. Tulostettu kalvo asetetaan valoherkällä lakalla lakatun piirilevyn päälle, ja levy asetetaan valotuslaitteeseen, joka kytketään päälle lakan ominaisuuksista riippuvaksi ajaksi. Valotuksen jälkeen piirilevy kehitetään lipeäliuoksella, joka poistaa lakan niiltä kohdilta, jotka ovat saaneet ultravioletivaloa valotuslaitteessa.

Piirilevyn syövytys tapahtuu joko ferrikloridilla, natriumpersulfaatilla tai jopa suolahapolla. Nopein tulos saavutetaan suolahappoa ja vetyperoksidia käyttämällä, mutta tällöin on huolehdittava tarkoin tilan tuuletuksesta ja hapon oikeaoppisesta hävittämisestä. Valotettu ja kehitetty piirilevy upotetaan syövytysnesteeseen, jolloin kupari syöpyy pois kohdista, joista lakka on poistettu. Tuloksena on tarkkarajainen piirilevy.

Piirilevyn syövytyksen jälkeen jäljellä oleva lakka poistetaan liuottimella, ja levyyn voidaan juottaa komponentit. Komponenttien juottamisen jälkeen levy johdotettiin Snifter-korttiin kiinni, ja radiomoduuli painettiin kiinni liittimiinsä. Kuvassa 12 on esitetty valmis sovitinkortti ja siihen liitetty CC1101-radiomoduuli.



Kuva 12. CC1101 ja sovitinkortti.

6 Ohjelmistokehitys

Ohjelmistokehitys aloitettiin muokkaamalla AX5042-piirille tehdyt SPI-rutiinit siten, että ne toteuttivat uuden radiopiirin asettamat vaatimukset. Tarvittavat muutokset koskivat lähinnä SPI-väyläliikenteen ajoitusta ja tavujen välillä tarvittavia taukoja. (Namtvedt 2007)

SPI-rutiinien toimivuus saatiin testattua kirjoittamalla rekisteriarvoja ja lukemalla arvot sanoista rekistereistä. Näiden täsmätessä voitiin todeta kommunikoinnin toimivan.

Texas Instruments on julkaissut radiopiirien ohjelmistokehityksen avuksi tarkoitetun SmartRF Studio -ohjelmiston, joka oli suurena apuna omaa ohjelmaa kirjoitettaessa.

6.1 CC1101:n rekisteriarvot

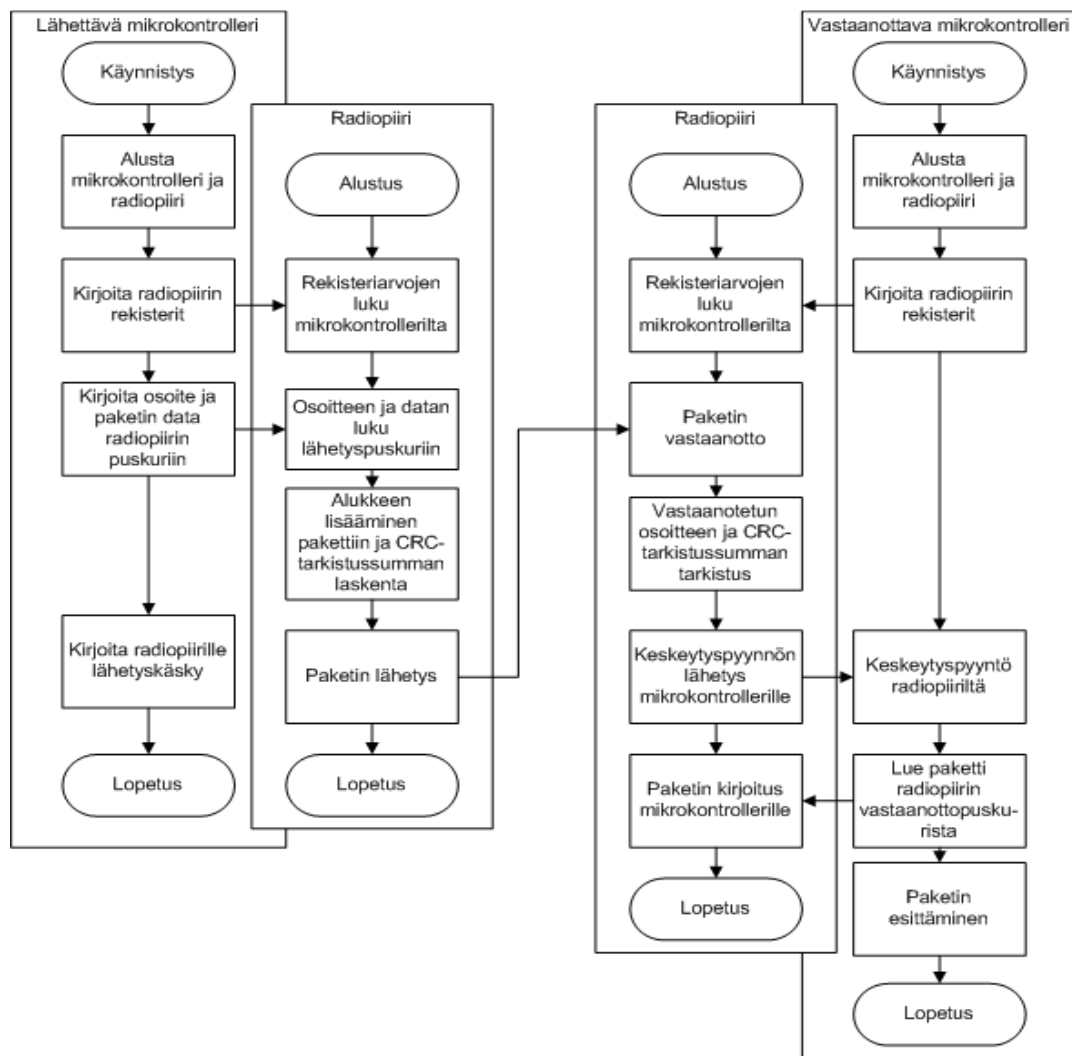
Radiopiirin toimintaa ja kaikkia sen asetuksia ohjataan kirjoittamalla piirin rekistereihin 8-bittisiä tavuja. Nämä rekisterit määräävät muun muassa käytettävän taajuuden, modulaation, lähetystehon ja tiedonsiirtonopeuden. Rekistereillä vaikutetaan myös radiopiirin käyttöön esimerkiksi tilanteessa, jossa piiri on vastaanottanut ehjän datapaketin.

Rekisteriarvojen laskenta CC1101-piirille tapahtuu helpoiten käyttämällä SmartRF Studio -ohjelmaa, johon syötetään halutut kommunikointiparametrit. Testejä varten kommunikointi määriteltiin toimivaksi 868,300 MHz taajuudella, FSK-modulaatiolla ja 38,4 kbps nopeudella. Samalla valittiin myös käyttöön pakettiradio-ominaisuudet, ja asetettiin radiopiiri lisäämään jokaiseen pakettiin automaattisesti 10 tavun mittainen alue ja 2 tavun mittainen CRC-tarkistussumma. Piiri määrättiin toimimaan siten, että se lukee sekä itselleen että yleislähetysosoitteeseen lähetetyt viestit ja jättää muut huomiotta. Radiopiiri asetettiin myös ilmoittamaan keskeytyspyynnöllä aina, kun se on vastaanottanut täydellisen paketin, joka läpäisee CRC-tarkistuksen. SmartRF Studio muodosti tämän jälkeen annettujen parametrien mukaiset rekisteriarvot, jotka voitiin kirjoittaa radiopiirille sellaisenaan.

6.2 Pakettimuotoisen datan lähetys ja vastaanotto

Kun siirretään digitaalista tietoa radioteitse, siirretään se yksittäisinä paketteina. Paketit koostuvat otsikkotiedoista, joita voivat olla vastaanottajan osoite, lähettäjän osoite, paketin koko ja paketin yksilöivä tunnus, sekä dataosasta, jossa varsinainen hyötykuorma kuljetetaan.

Pakettien lähettämistä ja vastaanottamista varten oli kirjoitettava ohjelmistofunktiot, jotka luovat paketin, kirjoittavat sen radiopiirille ja pyytävät piiriä lähettämään paketin. Keskeytyspyynnön vastaanotettuaan mikrokontrollerin tuli myös pystyä lukemaan data radiopiirin vastaanottopuskurista ja esittää se käyttäjälle. Kuvan 13 vuokaavio kuvaa yksinkertaistetusti yksittäisen paketin lähetys-vastaanottoa.



Kuva 13. Yksittäisen paketin lähetys ja vastaanotto.

Radiopiiri-tekstillä merkityissä lohkoissa tapahtuva datan käsittely ei tarvitse mikrokontrollerin puuttumista asiaan. CRC-tarkastussummien laskenta ja tarkistaminen kuten myös radiopakettien muodostaminen puskuriiin kirjoitetusta datasta sekä osoitteen tarkistus vastaanoton yhteydessä tapahtuu täysin laiteetasolla. Tämä säästää mikroprosessorin resursseja itse mittauksen tekemiseen ja korkeamman tason reititysfunktioihin.

Kun kuvan 13 mukaisen toiminnan toteuttava ohjelmakoodi oli kirjoitettu, voitiin paketin lähetystä testata. Lähettävällä laitteella syötettiin käsky lähettää paketti, jolloin vastaanottava laite vastaanotti paketin ja esitti saapuneen datan käyttöliittymänsä välityksellä. Lähetetyn ja vastaanotetun datan täsmätessä kommunikoinnin voitiin todeta toimivan. Tässä vaiheessa ohjelmisto koostui SPI-kommunikaatiofunktioista, radiopiirin alustus- ja rekisteriarvojen kirjoitusfunktioista sekä pakettien lähetykseen ja vastaanottoon tarvittavista funktioista. Näiden toimintojen pohjalta voitiin seuraavaksi aloittaa kommunikointiprotokollan kehittäminen.

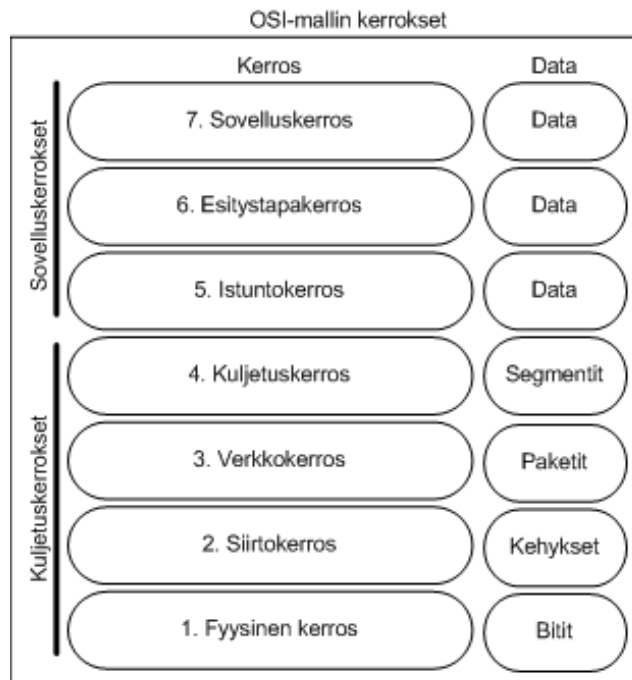
7 RF-Link-protokolla

Markkinoilta löytyneissä radioverkkojärjestelmissä ei ollut tämän sovelluksen tarpeisiin täysin sopivaa ratkaisua, joten sellainen päätettiin kehittää itse. Tämä tarkoitti myös kommunikointiprotokollan suunnittelua ja toteutusta. Protokollan haluttiin täyttävän seuraavat vaatimukset:

- keveys, vaatii vain vähän laskentatehoa
- automaattinen verkon muodostus
- automaattinen reititys
- automaattinen osoitteiden jako slave-laitteille
- luotettava kommunikointi teollisuusympäristössä.

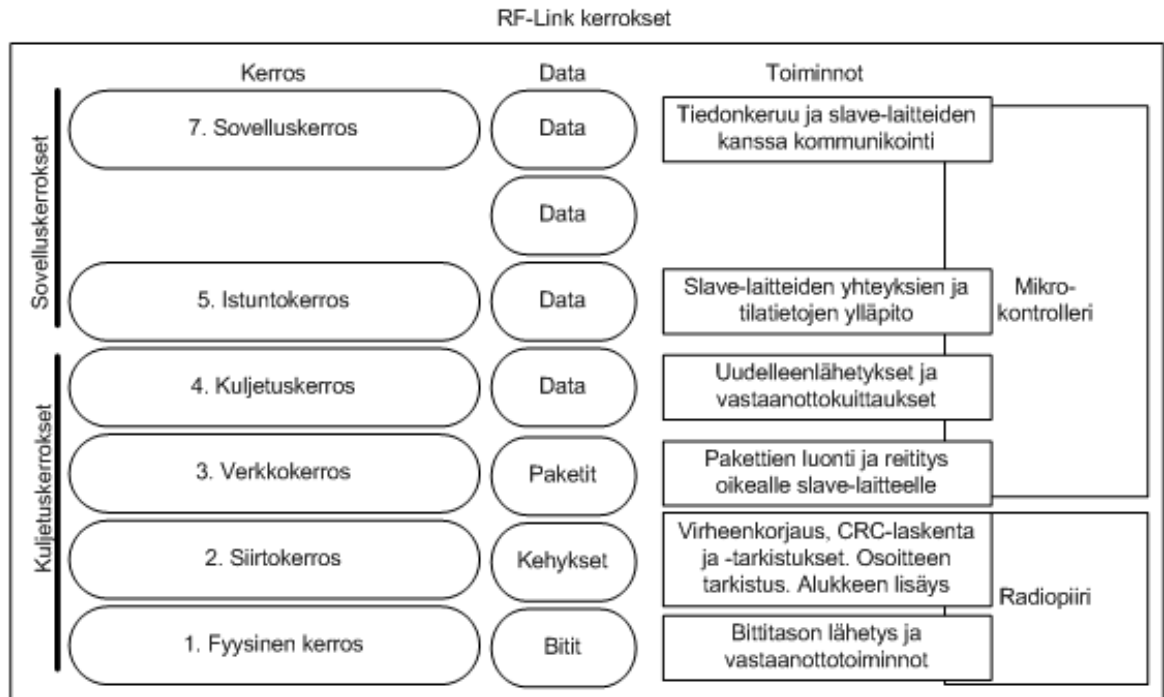
Kehityksen ja ohjelmointityön tuloksena syntyi tässä luvussa kuvatut toiminnot toteutettava tiedonsiirtoprotokolla. Kaikki ohjelmisto lukuun ottamatta radiopiirin rautatasolla suorittamia toimintoja on kirjoitettu C-kielillä.

Tiedonsiirtoprotokollat voidaan kuvata OSI-mallin (Open System Interconnection Reference Model) avulla. OSI-malli on kehitetty 1980-luvun alussa ja se on kansainvälinen ISO-standardi. Malli koostuu seitsemästä eri kerroksesta ja kuvaa tiedonsiirtoprotokollien toimintoja ja niiden keskinäisiä suhteita. Harvoin kuitenkin tietoa siirretään täysin OSI-mallin mukaisella protokollapinolla, mutta malli kuvaa silti hyvin peruseräitteet protokollien toiminnasta ja keskinäisestä suhteesta. OSI-mallin 7 kerrosta on esitetty kuvassa 14. (Laitinen 2005: 2.)



Kuva 14. OSI-referenssimalli.

OSI-mallilla voidaan kuvata RF-Link-protokolla hyvin kattavasti. RF-Link-protokolla toteuttaa kaikki OSI-mallin kerrokset esitystapakerrosta lukuun ottamatta. Kuvassa 15 on esitetty OSI-mallin mukaan RF-Linkin toteuttama protokollapino, kerrottu jokaisen eri kerroksen suorittamat toiminnot sekä esitetty myös kyseisen toiminnon fyysisesti toteuttava laite.



Kuva 15. RF-Link-protokollapino.

Tässä kuvatut toiminnot ovat ne toiminnot, jotka verkon master-laitte toteuttaa. Slave-laitteiden toiminnot ovat muuten samat, mutta sovelluserroksella ainoastaan vastaanottaa master-laitteen pyyntöihin. Sekä slave- että master-laitteet pitävät istunterroksen toiminnoillaan yllä muiden kuuluvuusalueellaan olevien slave-laitteiden tilatietoja.

Kuljetuserroksen toiminnot huolehtivat siitä, että paketit saavuttavat varmasti kohteensa. Tämä kerros huolehtii siis datan uudelleenlähetyksistä ja kuittauksista. Mikäli kuittausta ei vastaanoteta tietyn ajan kuluessa, lähetetään paketti uudestaan. Koska tässä sovelluksessa siirrettävät datamäärät ovat varsin pieniä, ei kuljetuserroksen tarvitse huolehtia sille tyypillisesti kuuluvasta pakettien segmentoinnista ja uudelleenkasaamisesta, vaan kaikki tarvittava tieto voidaan pakata yhteen pakettiin.

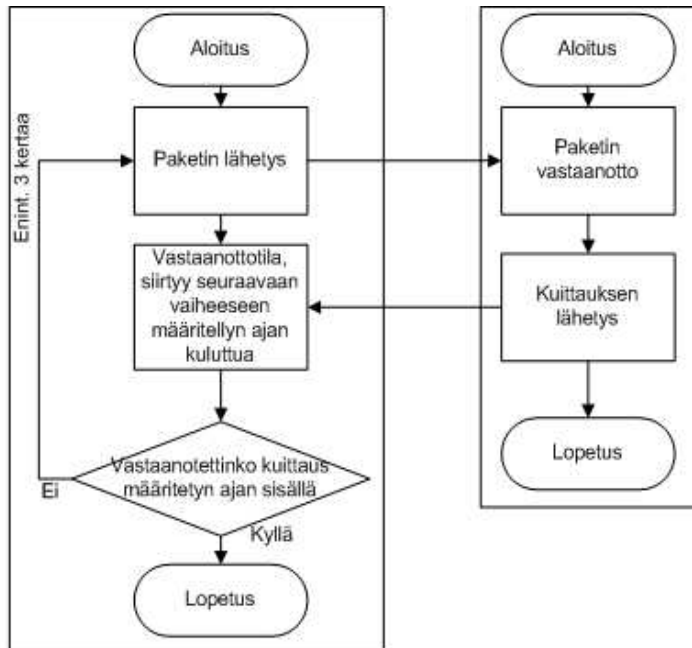
Verkkuserroksen toiminnot muodostavat datasta paketin lisäämällä siihen reititystietojen perusteella oikean kohdeosoitteen ja muut reititystä varten tarvittavat tiedot, kuten esimerkiksi seuraavan solmupisteen osoitteen. Verkon luontivaiheessa verkkuserkos huolehtii myös reititystaulun päivityksestä ja parhaan mahdollisen reitin valinnasta.

Siirtuserkos on ensimmäinen kerros, jonka toiminnot hoidetaan täysin laitepohjaisesti radiopiirillä. Tämä kerros lisää pakettien alkuihin alukkeet ja loppuun laskemansa CRC-tarkastussumman. Siirtuserkos lisää myös FEC-virheenkorjauksen (Forward Error Cor-

rection) vaatimat bitit ja huolehtii datan lomituksesta. Vastaanotossa kerroksen tehtäviin kuuluu FEC-virheenkorjauksen suorittaminen, lomituksen poisto, osoitteen tarkistus ja CRC-tarkastussumman tarkistus. Mikäli virheitä havaitaan tässä vaiheessa, paketti hylätään ja jäädään odottamaan uudelleenlähetystä. Paketti hylätään myös, jos se on osoitettu jollekin muulle laitteelle.

Fyysinen kerros huolehtii datan lähettämisestä radioaaltojen välityksellä bitti bitiltä. Fyysinen kerros suorittaa datan moduloinnin kantoaaltoille valittujen parametrien mukaisesti. Tällä kerroksella tapahtuu myös datan vastaanotto radioaalloilta ja datan erottaminen kantoaaltoista.

Ensimmäinen vaihe itse protokollan kirjoittamisessa oli paketin uudelleenlähetystoiminnon lisääminen. Tämän lähetys-kuittaus/uudelleenlähetys-toiminnon lisääminen takaa sen, että viesti saadaan välitettyä perille, vaikka yksittäinen paketti jäisikin vastaanottamatta. Kun lähettäjä on lähettänyt paketin, se jää odottamaan kuittaus-tietystä etukäteen määritellyksi ajaksi. Mikäli kuittaus-tietystä ei tässä ajassa vastaanoteta, voidaan olettaa, että paketti ei koskaan päässyt perille. Tällöin paketti pitää lähettää uudestaan. Tätä silmukkaa ei voida jäädä kiertämään loputtomiin, vaan tietyn toistomäärän jälkeen on syytä olettaa, että vastaanottava laite on joko vioittunut tai muuten kykenemätön lähettämään vastausta. Tällöin kuvassa 13 esitetty toiminnallisuus muutetaan siten, että lähetys- ja vastaanottolohkojen tilalle lisätään kuvan 16 mukaiset toiminnot.

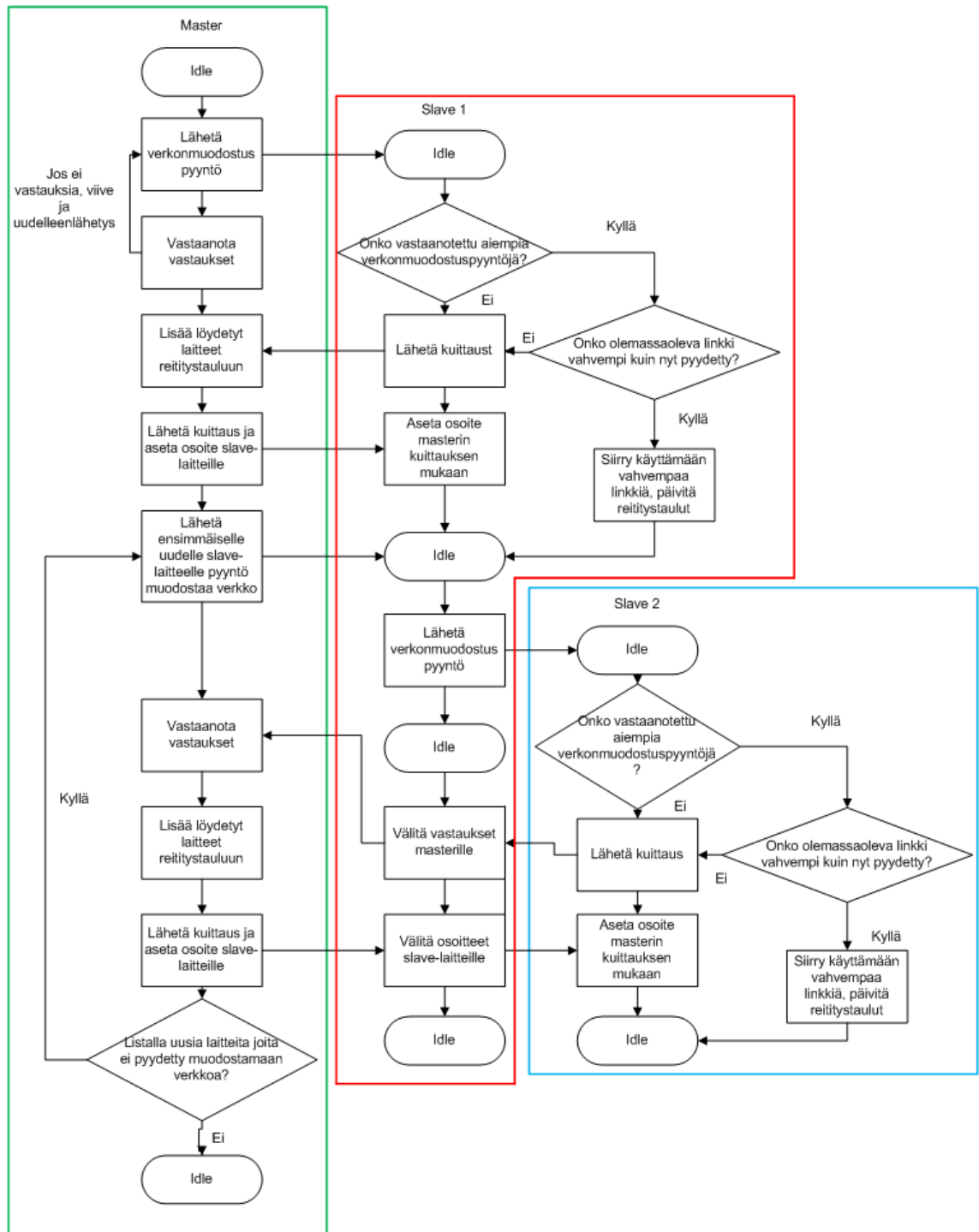


Kuva 16. Lähetyks ja vastaanottokuittaus –toiminto.

7.1 Verkon muodostus

Verkon muodostuksen automatisointi oli projektin hankalin vaihe. Tätä toimintoa varten tuli kehittää menetelmät, joilla selvitetään kantomatkan sisällä olevat laitteet ja näiden laitteiden kantomatkan sisällä olevat laitteet ja niin edelleen. Koska viestiä voidaan ketjuttaa usean verkon solmupisteen läpi, pitää myös kaikkien laitteiden kantomatkan sisällä olevat laitteet selvittää. Samalla täytyi myös muodostaa toiminnot, jotka luovat reititystaulut näiden tietojen perusteella ja valitsevat myös vahvimman tai lyhyimmän yhteysvälin. Samalla kun tämä toiminto suoritetaan, jaetaan löydetyille laitteille myös osoitteet.

Tuloksena syntyi ohjelmakoodi, joka toteuttaa kuvassa 16 esitetyn vuokaavion toiminnot. Vuokaaviossa on kuvattu esimerkki niin sanotun kaksitasoisen verkon muodostuksesta (Master -> Slave 1 -> Slave 2).



Kuva 16. Verkon muodostus.

Sanallisesti kuvattuna tapahtumasarja on seuraavanlainen: master-laitte lähettää kyselyn kantamatkansa sisällä olevista laitteista, ja kaikki laitteet, jotka kuulevat tämän pyynnön, vastaavat siihen. Mikäli laitteella on jo lyhyempi ja vahvemman kuulumuuden reitti master-laitteelle, jättää laite vastaamatta pyyntöön. Jotta slave-laitteiden lähetykset eivät menisi päällekkäin, odottaa jokainen laite sattumanvaraisen ajan, korkeintaan

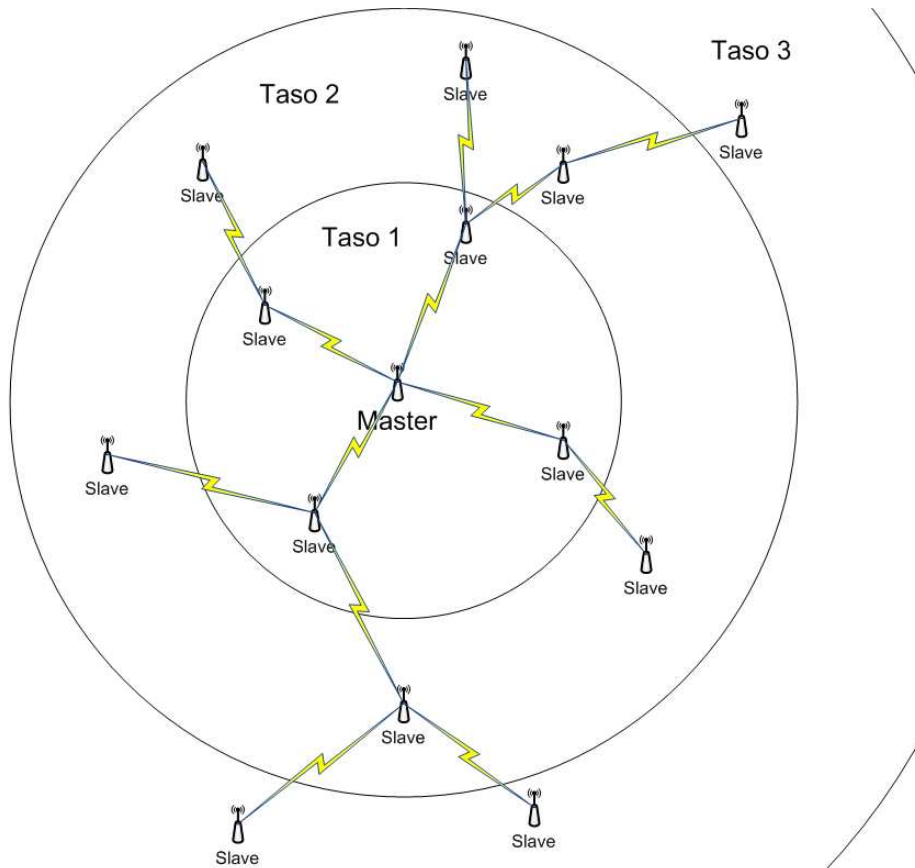
joitain satoja millisekunteja, ja tarkistaa vielä, että kanava on tällöin vapaana ennen lähetystä.

Master-laite lähettää yksitellen kuittauksen verkkoon liittymisestä jokaiselle havaitsemalleen laitteelle ja asettaa samalla slave-laitteelle osoitteen, jota käytetään jatkossa kommunikoinnin ja reitityksen apuna. Verkonmuodostusvaiheessa yksittäiset laitteet tunnistetaan niiden uniikin 32-bittisen laiteosoitteen, niin sanotun UDID (Unique Device Identification) -koodin avulla. Samalla kun kuittauksia lähetetään, lisätään myös uudet laitteet reititystauluun.

Kun kaikille laitteille on asetettu osoitteet ja ne on lisätty reititystauluun, pyydetään ensimmäistä uutta laitetta (slave 1) lähettämään verkonmuodostuspyyntö. Ensimmäinen slave-laite lähettää kyselyn kantomatkansa sisällä olevista laitteista, ja laitteet, jotka eivät vielä ole liittyneet verkkoon lähettävät kuittauksen slave 1 -laitteen kautta master-laitteelle. Kuittaus lähetetään ainoastaan, jos slave 2 -laite ei ole jo entuudestaan verkon jäsen tai verkonmuodostuspyynnön kautta oleva radiolinkki on lyhyempi tai vahvempi kuin vanha yhteys. Slave 1 -laite lisää slave 2 -laitteen omaan reititystauluunsa välittäessään sen viestiä master-laitteelle, joka puolestaan viestin vastaanotettuaan lisää slave 2 -laitteen omaan reititystauluunsa ja lähettää sille kuittauksen mukana uuden osoitteen slave 1 -laitteen välityksellä.

Mikäli reititystaulussa on vielä laitteita, joita ei ole pyydetty muodostamaan verkkoa, lähetetään seuraavalle laitteelle verkonmuodostuspyyntö ja edellisessä kappaleessa kuvattu kierto käydään uudestaan. Tätä prosessia toistetaan niin kauan, että kaikille löydetyille laitteille on lähetetty pyyntö muodostaa verkko, eikä uusia laitteita enää löydy. Niin kauan kuin uusia laitteita löytyy, etsitään laitteita vielä lisää seuraavista verkon tasoista.

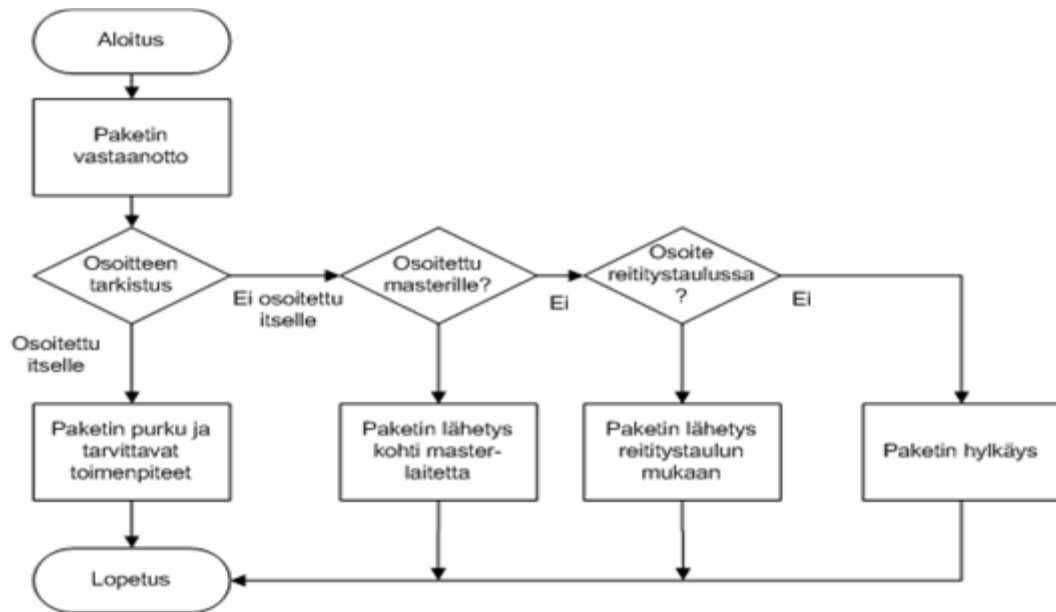
Tällä tavoin muodostettu verkko luo niin sanotun laajennettu tähti -verkkotopologian, jonka malli on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Automaattisesti muodostetun verkon topologia.

7.2 Pakettien reititys

Jotta datapaketit löytäisivät lähettäjältä vastaanottajalle tarvittaessa useankin linkkivälin yli, pitää niiden reitti määrittää jollain tavalla. Tämä reititys perustuu verkon luontivaiheessa kerättyihin reititustauluihin: tietoon siitä, mitä kautta viesti kulkee tietylle laitteelle. Kuvassa 18 on esitetty, miten reititys tapahtuu.



Kuva 18. Paketin reititys.

Käytännön tasolla reititys tapahtuu niin, että laitteen vastaanotettua paketin tarkistetaan, onko paketti osoitettu itselle. Jos paketti on osoitettu jollekin muulle laitteelle ja tämä laite löytyy omasta reititustaulusta, lähetetään paketti uudestaan suoraan kohdelaitteelle tai laitteelle, joka on seuraava hyppy kohti tavoiteltua kohdetta. Sama pätee myös, jos paketti on osoitettu verkon master-laitteelle. Tällöin paketti lähetetään joko suoraan master-laitteelle tai laitteelle, joka on seuraava hyppy kohti master-laitetta.

Paketin purku ja tarvittavat toimenpiteet sisältävät toiminnot, joilla paketista tarkistetaan, mihin toimenpiteisiin sen vastaanottaminen johtaa, ja suoritetaan nämä toimenpiteet. Useimmissa tapauksissa tarvitsee lähettää vähintään kuittaus paketin vastaanottamisesta, jolloin käytetään jälleen reititustauluja oikean reitin valitsemiseksi.

7.3 Master-laitteen toiminnot

Master-laitteen tehtävänä on huolehtia verkon muodostuksesta sekä tiedon keräämisestä slave-laitteilta. Tiedonkeruu tapahtuu automaattisesti vuorotellen jokaiselta reititystaulussa olevalta laitteelta. Samalla kun slave-laitteilta kysellään mittausarvoja, ylläpidetään myös tietoa laitteen tilasta. Mikäli tietty slave-laite ei vastaa, vaikka sitä on yritetty tavoittaa useamman kerran, merkitään laite offline-tilaan. Koska laitteet voivat joutua merkityksi offline-tilassa oleviksi esimerkiksi lyhyehkön virtakatkon takia, käydään reititystaulun offline-tilaan merkityt laitteet läpi aina noin kahden minuutin välein.

Verkon muodostustoiminto käynnistetään aina manuaalisesti, ja verkon muodostuksessa syntynyt reititystaulu pitää tallentaa laitteen haihtumattomaan muistiin antamalla tallennuskäsky. Kun master-laite käynnistetään, se tarkistaa, onko muistissa reititystaulua, ja taulun löytäessään lukee sen ja aloittaa tiedonkeruun slave-laitteilta automaattisesti. Tällöin verkko palautuu myös master-laitteeseen kohdistuvista virtakatkoista.

Tiedonsiirtoa varten master-laitteelta muihin järjestelmiin laitteisiin ohjelmoitiin Modbus slave -toiminto, jonka avulla se voidaan liittää lähes mihin tahansa järjestelmään. Myös prototyyppiä kehitetty Sintrolin tiedonkeruuhjelmiston uusin versio sisältää Modbus master -toiminnon, jolloin radioverkon liittäminen siihen oli mahdollista.

7.4 Paketin rakenne

Paketti koostuu otsikkotiedoista ja datasta. Otsikkotietoihin kuuluu reitityksessä tarvittavat osoitetiedot, paketin yksilöivä tunnus ja paketin sisältötyypin ilmoittava koodi sekä lähettävän laitteen tilatietoja ilmoittava kenttä. Otsikkotietojen ja lähettävän laitteen tilatietojen avulla muodostetaan reititystaulut ja myös reititetään liikenne normaalissa toimintatilassa.

Paketit erotellaan juoksevalla numeroinnilla, jotta pyynnöt ja kuittaukset voidaan yhdistää toisiinsa ja tiedetään, mihin pakettiin vastaanotettu kuittaus on. Paketin otsikkokennässä on myös tieto paketin sisältämästä tiedosta: paketti voi olla esimerkiksi pyyntö lähettää mittausarvot, kuittaus pyyntöön tai pyyntö aloittaa verkonmuodostus. Erilaisia pakettityyppejä on yhteensä 14 kappaletta.

8 Radiokortin kehitys

Texas Instrumentsin CC1101-radiomoduuleista on julkisesti saatavilla kytkentäkaaviot, piirilevyesimerkki ja komponenttiluettelo eri taajuusalueita varten. Nämä muodostivat hyvän pohjan, kun oman radiokortin kehitys aloitettiin.

Oman radiokortin kehitys aloitettiin, kun suurin osa protokollan ominaisuuksista oli saatu ohjelmoitua. Radiolaitteita tarvittiin testauksiin enemmän kuin aiemmin käytössä olleet 2 kappaletta, joten tämä oli luonnollinen vaihe aloittaa suunnittelu. Toinen vaihtoehto olisi ollut hankkia lisää valmiita radiomoduuleita.

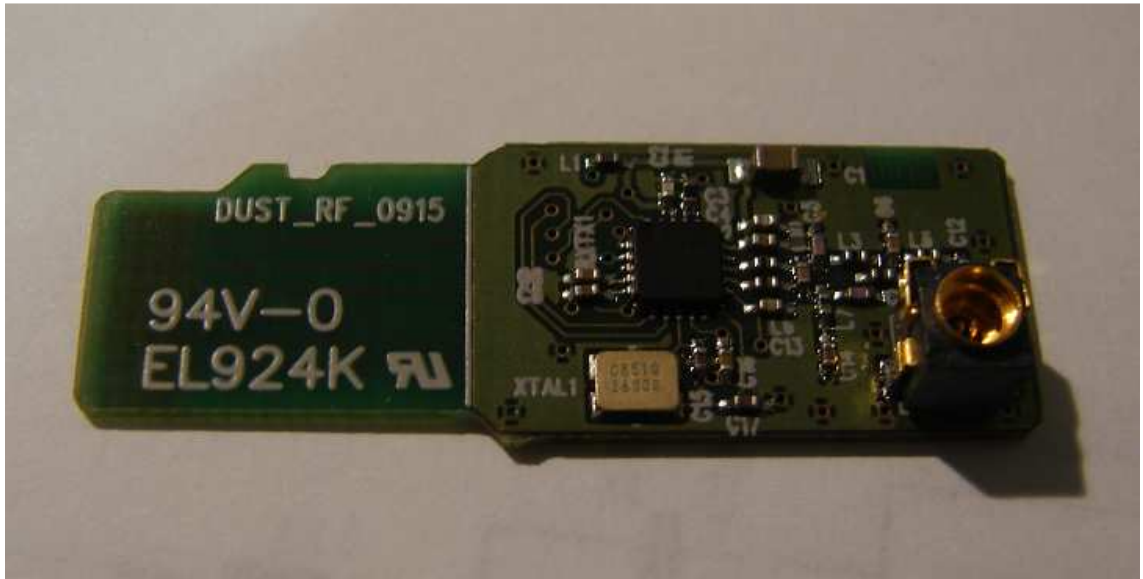
Radiokortista haluttiin tehdä mahdollisimman pienikokoinen, jotta se voitaisiin pakata helposti jo olemassa oleviin koteloihin. Kortista haluttiin myös helposti muihin laitteisiin liitettävä. Erilaisia liitinvaihtoehtoja tutkittiin ja liittynäksi valittiin microSD-korttiliitin. MicroSD on muistikortti, jota käytetään muun muassa matkapuhelimissa tiedon tallennukseen. Ajatuksena oli, että liittimeen voisi asettaa joko muistikortin mittaustiedon paikallista tallennusta varten tai radiokortin mittaustiedon eteenpäin välittämiseen. MicroSD-korteille voidaan kirjoittaa tietoa myös SPI-väylää käyttämällä, joten tämä valinta mahdollisti helposti myös muistikorttien käytön.

Itse radiokortin piirilevyn piirtäminen päätettiin jättää Kivihaan alihankkijalle, joka on tehnyt aiemminkin paljon suunnittelutyötä Sintrolille. Päätökseen vaikuttivat oma piirilevysuunnittelukokemuksen vähäisyys ja suunniteltavan radiopiirin vaativuus, sillä esimerkiksi antennisovituksen kaikki kuparivedot tuli mitoittaa 50 ohmin impedanssiin halutulla lähetystaajuudella, jotta lähetyksessä itsessään syntyvät häviöt olisivat mahdollisimman pieniä.

Suunnittelua varten toimitettiin CC1101-radiomodulin kytkentäkaaviot, piirilevykuvat sekä osaluettelot. Myös microSD-muistikortin SPI-väylän signaalijohtimien järjestys selvitettiin, jotta radiokortti voitaisiin suunnitella samoin yhteensopivuuden varmistamiseksi. Kortille valittiin antenniliittimeksi pienikokoinen MMCX-liitin.

Radiokortille harkittiin myös lisättäväksi optio käyttää keraamista antennielementtiä, mutta tästä ominaisuudesta luovuttiin suuren pinta-alarpeen vuoksi. Myös piirilevylle kuparivedoilla rakennettu antenni hylättiin samasta syystä. Näiden antenniratkaisujen sijaan kortille lisättiin mahdollisuus käyttää ulkoisen antennin sijaan myös yksinkertaista lanka-antennia sovelluksissa, joissa ei tarvita suuria tiedonsiirtoetäisyyksiä.

Radiokortin suunnitelmien valmistuttua korttia tilattiin pieni prototyyppierä sen toiminnan varmistamiseksi.

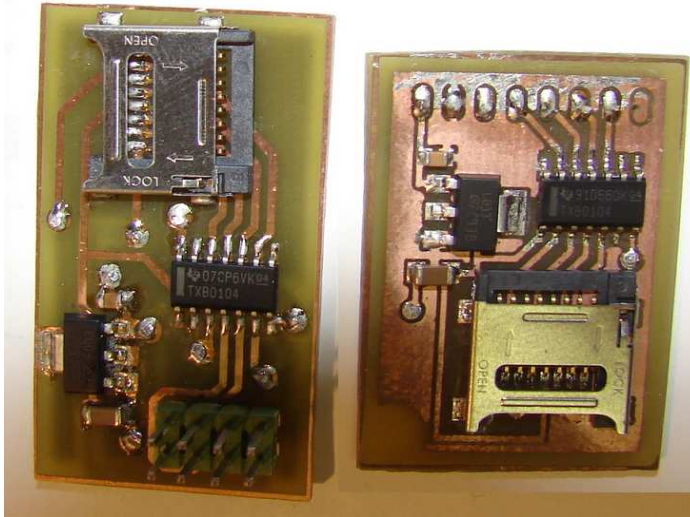


Kuva 19. MicroSD-korttipaikkaan sopiva radiokortti.

8.1 Sovitinkortti

Mittalaitteita, joissa olisi vielä ollut suoraan microSD-korttipaikka, ei ollut. Näin ollen radiokortin yhdistämiseksi Snifter-korttiin tuli jälleen suunnitella ja toteuttaa sovitinkortti, joka huolehtii käyttöjännitteestä sekä signaalitasojen muuttamisesta. KytKentäkaavio ja tarvittavat osat olivat jo edellisten sovitinkorttien ansiosta tiedossa, jolloin ainoat tarvittavat muutokset olivat microSD-liittimen lisääminen kortille ja itse piirilevyn suunnittelu uudestaan.

Sovitinkortin piirilevy valmistettiin samalla tavalla kuin CC1101-radiomoduulin piirilevy, ja kun komponentit oli juotettu paikoilleen ja tarvittavat johdotukset tehty, oli kortti valmis testausta varten. Kortti testattiin vielä syöttämällä siihen suoraan testisignaalia ja varmistamalla, että tasomuunnos toimii ja radiokortille syötettävä käyttöjännite on oikea.



Kuva 20. Sovitinkortteja microSD-radiokortille.

8.2 Testaus ja vianhaku

Oma radiokortti liitettiin sovitinkortin avulla Snifter-kortille, jotta korttia päästäisiin testaamaan. Tarkoituksena oli varmistaa kortin toimivuus sekä antennisovituksen käytännön toimivuus kantomatkatestein. Yhteyttä kortille ei kuitenkaan saatu, vaikka itse sovitinkortti oli testattu ja toimivaksi todettu. Vianhaku käynnistettiin vertaamalla kortin kytkentää CC1101-esimerkkikortin kytkentään. Syy ei selvinnyt vielä tässä vaiheessa, ja selvitystä jatkettiin varmistamalla, että kaikki kortin komponentit oli juotettu kunnolla paikoilleen ja signaalit kulkivat mikrokontrollerilta radiopiirille asti.

SPI-väylän liikennettä tarkemmin selvitettyä huomattiin, että piiri reagoi sen valintasignaalin aktivointiin ilmoittamalla valmiudestaan muuttamalla oman lähtösignaalin tilaa. Tästä huolimatta tiedonsiirto ei kuitenkaan toiminut. Nyt oli saatu selville, että signaalit kulkevat radiopiirille asti ja radiopiiri on valmiudessa, mutta ei vastaa. Tämä antoi aiheita epäillä, että piirin kellosignaali on jotain vikaa. Lähemmässä tarkastelussa huomattiin, että radiokortin kiteen liitännässä oli käytetty väärän kiteen tietoja, minkä vuoksi kide oli oikosulussa. Kide juotettiin irti, oikosulku korjattiin katkaisemalla piirilevyltä kupariveto ja juottamalla kide takaisin. Tämän toimenpiteen jälkeen radiopiirille saatiin yhteys ja lähetys sekä vastaanotto voitiin testata.

Pakettien lähetystä ja vastaanottoa testattiin ensin sisätiloissa. Kun liikenteen oli todettu toimivan, voitiin siirtyä suorittamaan kantomatkatestejä ulkotiloissa. Tätä varten laitteiden virransyöttö hoidettiin kytkemällä laitteet kuuteen sarjaan kytkettyyn paris-

toon. Testit suoritettiin asettamalla master-laite kiinteästi paikoilleen ja kulkemalla slave-laitteen kanssa poispäin lähettimestä. Kantamaksi saatiin noin 220 metriä, jolla tiedonsiirto toimi vielä luotettavasti. Radiokortin todettiin täyttävän sille asetetut vaatimukset.

9 Pilottijärjestelmä

Eräs asiakas tiedusteli Sintrol Oy:ltä mahdollisuutta langattomaan hiukkasmittausjärjestelmään. Haluttu mittausjärjestelmä koostui kahdeksan piipun hiukkasmittauslaitteesta ja vastaanottimesta sekä mittautiedot esittävästä laitteistosta. Tarvetta kytkeä mittaukset muihin järjestelmiin ei ollut. Asiakas halusi hoitaa tiedonsiirron langattomasti, sillä etäisyydet olivat suuria ja mittauspisteet olivat laajalla alueella suuren teollisuusrakennuksen ympärillä. Kaapelointikustannukset olisivat nousseet huomattavan suuriksi, joten langaton tiedonsiirto katsottiin oikeaksi vaihtoehdoksi.

Oman verkon kehityksen ollessa alkutekijöissään päätettiin järjestelmä tällöin toteuttaa suomalaisen Nokeval Oy:n valmistamilla langattomilla tiedonsiirtolaitteilla. Nämä laitteet ottavat sisääntulosignaalina 4...20 mA virtaviestin ja lähettävät sen langattomasti korkeintaan noin sata metriä. Järjestelmään on saatavilla myös toistimia kantaman laajentamiseksi sekä erilaisia vastaanottimia käyttötarkoituksesta riippuen. (Langattomien lähettimien tuoteluettelo 2008.)

Asiakkaan luona käytiin selvittämässä mahdollisuutta toteuttaa järjestelmän tiedonsiirto langattomasti Nokevalin laitteilla. Epäilynä oli, että alueella toimivan valimon takia siirrossa saattaisi olla ongelmia esimerkiksi induktiouunien aiheuttamien häiriöiden takia. Testit suoritettiin talvella 2008–2009 kiinnittämällä lähetin haluttuihin mittauspaikkoihin ja kartoittamalla vastaanottimen avulla kuuluvuusalueet samalla tarkkaillen mahdollisia valimotoiminnan aiheuttamia häiriöitä. Näiden mittauksen perusteella laadittiin suunnitelma lähettimien, tarvittavien toistimien ja vastaanottimen sijainnista. Koska mittausjärjestelmä ei ole reitittävä, tarvittiin toistimia yhteensä neljä kappaletta tiedonsiirron toiminnan varmistamiseksi. Testien aikana ei havaittu normaalia enempää virheitä tiedonsiirrossa.

Asiakkaan päätös järjestelmän tilauksesta kuitenkin siirtyi eteenpäin. Asia tuli ajankoh- taiseksi noin vuosi myöhemmin, jolloin oman mittajärjestelmän kehitys oli jo niin pitkäl- lä, että asiakkaalle tarjottiin mahdollisuutta toimia pilottijärjestelmän asennuspaikkana, minkä asiakas hyväksyi ja tilasi mittausjärjestelmän.

Liitteessä 1 on havainnekuva asiakkaan tilaaman langattoman hiukkaspitoisuusmittaus- järjestelmän osista. Järjestelmä koostuu kahdeksasta mittalaitteesta, joihin on lisätty radiopiiri sovitinkortteineen. Lisäksi jokainen mittalaite tarvitsee 24 voltin tasajänni-

tesyötön. Järjestelmän vastaanotin – master-laite – tarvitsee niin ikään 24 voltin tasajännitesyötön. Master-laite on kytketty RS-485-sarjaväylällä USB-RS485-muuntimeen, joka on kytketty tietokoneeseen ja siinä ajettavaan tiedonkeruuohjelmistoon. Tietokoneen ja master-laitteen välinen tiedonsiirto toimii Modbus-protokollan välityksellä.

9.1 Laitteiston rakennus

Koska langattomia mittalaitteita ei ollut aiemmin toimitettu asiakkaille, ei valmista ratkaisua laitteiden rakenteesta ja koteloinnista ollut olemassa. Sintrolin S300-mittalaitesarjan kotelointi tarjosi hyvän mahdollisuuden toteuttaa myös langaton mittalaite, sillä kotelossa on runsaasti tilaa. Koteloa piti muokata ainoastaan siten, että siihen lisättiin mahdollisuus kiinnittää antenni. Sään- ja mekaanisen kestävyuden maksimoimiseksi antenni lisättiin kotelon alapintaan, osoittamaan pystysuoraan alaspäin. Polarisaatiohäviöitä ei pääse syntyään niin kauan kuin kaikkien laitteiden antennit ovat täysin pystysuorassa, joten tämä asennustapa ei tuottanut ongelmia.

Kaikkiin kahdeksaan koteloon lisättiin antennit ja piirikortit sekä kaapelointi, minkä jälkeen mittalaitteet olivat testausta vaille valmiit. Testit suoritettiin Sintrolin normaalin tuotantomennettelyn mukaan.

Master-laitteen koteloinnille ei niin ikään ollut valmista ratkaisua, ja kotelointi päädyttiin toteuttamaan Sintrolin kytkentärasioista tutulla kotelolla. Tämä kotelo on mitoiltaan riittävä piirikortille sekä radiokortille, ja IP65-suojausluokka mahdollistaa asennuksen myös ulkotiloihin. Piirikortti sekä antenni ja kaapelointi asennettiin koteloon, samoin laitteen tilaa ilmaiseva LED-valo. Koteloon suunniteltiin myös tarra, jonka liimaamisen jälkeen laite oli valmis testausta varten. Kuvassa 21 näkyy vasemmalla reunassa valmis radioverkon master-laite ja oikealla puolella yksi kahdeksasta hiukkaspitoisuusmittarista.



Kuva 21. Master-laite ja hiukkaspitoisuusmittari.

9.2 Järjestelmän käyttöönotto

Kun laitteet oli toimitettu asiakkaalle ja asiakas oli huolehtinut laitteiden mekaanisesta asennuksesta sekä käyttöjännitteiden kytkennästä, päästiin tekemään järjestelmän käyttöönotto. Koska kyseessä oli järjestelmän ensimmäinen asennus, haluttiin sen toiminnasta vaativassa teollisuusympäristössä saada mahdollisimman paljon tietoa. Tämän takia käyttöönotto käytiin tekemässä itse.

Käyttöönotto aloitettiin käymällä asiakkaan kanssa läpi kaikki laitteet ja tarkistamalla niiden asennus. Samalla varmistettiin myös asetusten oikeellisuus. Myös master-laitteen asennuspaikka tarkistettiin ja todettiin aiemmin Nokevalin laittella tehtyjen määrittelyjen mukaisesti. Asiakkaan tietokoneelle asennettiin tarvittava tiedonkeruuhjelmisto ja USB-RS485-muunnin, minkä jälkeen päästiin varmistamaan kommunikoinnin toimivuus master-laitteen kanssa. Tiedonkeruuhjelmistolle syötettiin myös oikeat Modbus-osoitteet ja -rekisterit, joita tarvittiin mittaustietojen lukemiseksi master-laitteelta.

Nokevalin laitteilla tehtyjen testien perusteella oletettiin, että vain pieni osa kahdeksasta mittalaitteesta pystyisi kommunikoimaan suoraan master-laitteen kanssa. Muiden laitteiden reittien oletettiin muodostuvan useamman hypyn kautta suurista etäisyyksis-

tä ja vaativasta ympäristöstä johtuen. Verkonmuodostusvaiheessa – täysin vastoin kaikkia odotuksia – kaikki laitteet kuitenkin vastasivat ja liittyivät verkkoon suoralla yhteydellä ilman mitään tarvetta reitittää liikennettä usean slave-laitteen kautta. Vastatettu signaalivoimakkuus vaihteli laitteesta riippuen välillä -80 dBm ... -98 dBm, joten koko linkibudjettia ei käytetty ja varaa olisi ollut vielä hieman pidemmillekin yhteysväleille.

Kuvassa 22 on esitetty esimerkki asiakkaan hiukkaspitoisuusmittariasennuksesta.



Kuva 22. Esimerkki langattoman hiukkaspitoisuusmittarin asennuksesta.

Kuvasta 22 näkyy hyvin olosuhteet, joissa langattoman tiedonsiirron tulee toimia. Alueella on paljon metallirakenteita, joista syntyy sekä heijastumia että sirontaa. Osa mittalaitteista oli myös korkeiden seinämien takana, ainoastaan yksi laite kahdeksasta oli suorassa näköyhteydessä master-laitteen kanssa. Näistä vaikeista olosuhteista huolimatta tiedonsiirto toimi luotettavasti.

10 Tulevaisuuden kehityssuunnat

RF-Link-projekti jatkuu yhä Sintrol Oy:ssä, ja järjestelmää on tarkoitus kehittää ja laajentaa. Tuleviin mittalaitteisiin radiopiirit integroidaan suoraan laitteen omille piirikoille, jolloin erillisistä radiokorteista ja sovittimista päästään eroon. MicroSD-liitännällä laite voidaan myös tarjota vaihtoehtona paikallisen datan keräämiseen microSD-muistikortille.

Tällä hetkellä RF-Link-verkon vikasietoisuus on heikko. Yksittäisen laitteen vikaantuessa verkosta putoaa pois vähintään vikaantunut laite. Jos vikaantuneen laitteen välityksellä reititetään viestejä syvemmälle verkkoon, menetetään yhteys koko kyseiseen haaraan. Vaihtoehtoisia reittejä ei etsitä automaattisesti, vaan reititystaulujen luonti pitää käynnistää manuaalisesti vaihtoehtoisten reittien löytämiseksi. Yksi tulevaisuuden kehityssuunnista olisikin lisätä järjestelmään ominaisuus reitin vaihtamiseen, jos vanha reitti ei enää siirrä tietoa halutulla tavalla.

Suunnitelmissa on myös kasvattaa radioverkon kantamaa lisäämällä radiopiirin yhteyteen vahvistin, jolloin päästäisiin käyttämään suurinta sallittua 500 mW lähetystehoja (Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistajuuksista ja käytöstä 2006). Tämä tarkoittaisi kantaman moninkertaistumista.

11 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä kehitettiin Sintrol Oy:lle langaton anturiverkko hiukkaspitoisuusmittareiden tiedonsiirron tarpeisiin. Alun perin tarkoituksena olleen prototyypin rakentamisen sijaan työ laajeni ja verkosta kehitettiin toimiva ratkaisu. Työn laajuuden kasvaminen tarkoitti myös työhön käytetyn ajan kasvua, ja tästä syystä kehitystyö tähän pisteeseen asti on voinut noin puolitoista vuotta.

Verkko toteuttaa sille asetetut vaatimukset järjestäytymällä automaattisesti sekä tekeillä reitityksen automaattisesti. Tavoite helposta käyttöönotosta voidaan siis katsoa saavutetuksi.

Ensimmäinen pilottijärjestelmä on toimitettu ja otettu käyttöön. Vaativista olosuhteista huolimatta langaton tiedonsiirto toimii jopa yli odotusten ja toiminta on huomattavasti parempaa kuin samaan sovellukseen aiemmin testatulla kilpailijan järjestelmällä. Järjestelmää on toimitettu nyt myös toinen koekäyttösovellus Isoon Britanniaan.

Markkinanäkymät langattomalle tiedonsiirrolle ovat hyvät käyttöönoton helppouden ja kaapelointitarpeen vähäisyyden takia. Vallitseva trendi tiedonsiirtoratkaisuissa on siirtymässä langattomien ratkaisujen suuntaan myös teollisuudessa.

RF-Link-järjestelmä avaa paljon jatkokehitysmahdollisuuksia ja mahdollistaa jatkossa kokonaisen uuden tuotesarjan markkinoille tuomisen.

Lähteet

ATmega32 datasheet. WWW-Dokumentti,

<http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf>. Luettu 15.10.2008.

Axsem AX5042 Datasheet, versio 2.2. WWW-dokumentti, <http://www.axsem.com/web/documents/reguserspace/ax5042/AX5042_DS_V2_2.pdf>. Luettu 28.10.2008.

Axsem AX5042 Programming Manual, versio 2.2. WWW-dokumentti, <http://www.axsem.com/web/documents/reguserspace/ax5042/AX5042_DS_V2_2.pdf>. Luettu 12.11.2008.

Frequently asked questions, ITU. WWW-dokumentti, <<http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html>>. Luettu 3.11.2010.

Golmie ym. 2001. Interference in the 2.4 GHz ISM Band: Impact on the Bluetooth Access Control Performance. Maryland, National Institute of Standards and Technology.

Haenselmann, Thomas. 2006. Sensornetworks. WWW-dokumentti, <http://pi4.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book/sensor_networks.pdf>. Luettu 26.4.2010.

Hännikäinen & Hämäläinen. 2009. Langaton anturiverkko tositoimiin. Prosessori-lehti 11/2009.

Kagan, H. 2007. Implementing wireless networks in a manufacturing environment. WWW-dokumentti, <<http://www.automationmag.com/wireless/features/implementing-wireless-networks-in-a-manufacturing-environment.html>>. luettu 20.7.2010.

Kammerman ym. 2000. Microwave Oven Interference on Wireless LANs operating in the 2.4 GHz ISM Band. Nieuwegein, Lucent Technologies.

Kvaksrud, Tor-Inge. 2008. Range measurements in an open field environment, Texas Instruments Design Note DN018. WWW-dokumentti, <<http://focus.ti.com/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>>. Luettu 4.3.2010.

Laasonen, Kari. 2003. Radio Propagation Modeling, Algorithms for ad hoc networking. Seminaariesitelmä 22.9.2009. Helsingin yliopisto. Helsinki.

Laitinen, Jukka 2009. F5-sisältökytkimen käyttö redundanttisen palveluympäristön rakentamiseen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Helsinki.

Laki radiotaajuuksista ja telelaitteista 16.11.2001/1015. 2001.

Langattomien lähettimien tuoteluettelo. 2008. Nokeval Oy. WWW-dokumentti, <http://www.nokeval.com/pdf/catalog/fi/Langattomat_lahettimet_2008.pdf> Luettu 2.12.2008.

Lewis, F. L. 2004. Wireless Sensor Networks. Ft. Worth, The University of Texas at Arlington.

Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä 15W/2006 M. 2006. Helsinki, Viestintävirasto.

Namtvedt, Siri. 2007. Texas Instruments Design Note DN503, SPI Access. WWW-dokumentti, <<http://focus.ti.com/lit/an/swra112b/swra112b.pdf>>. Luettu 7.9.2009.

Radiotaajuusmääräys 4 J/2007 M. 2007. Helsinki, Viestintävirasto.

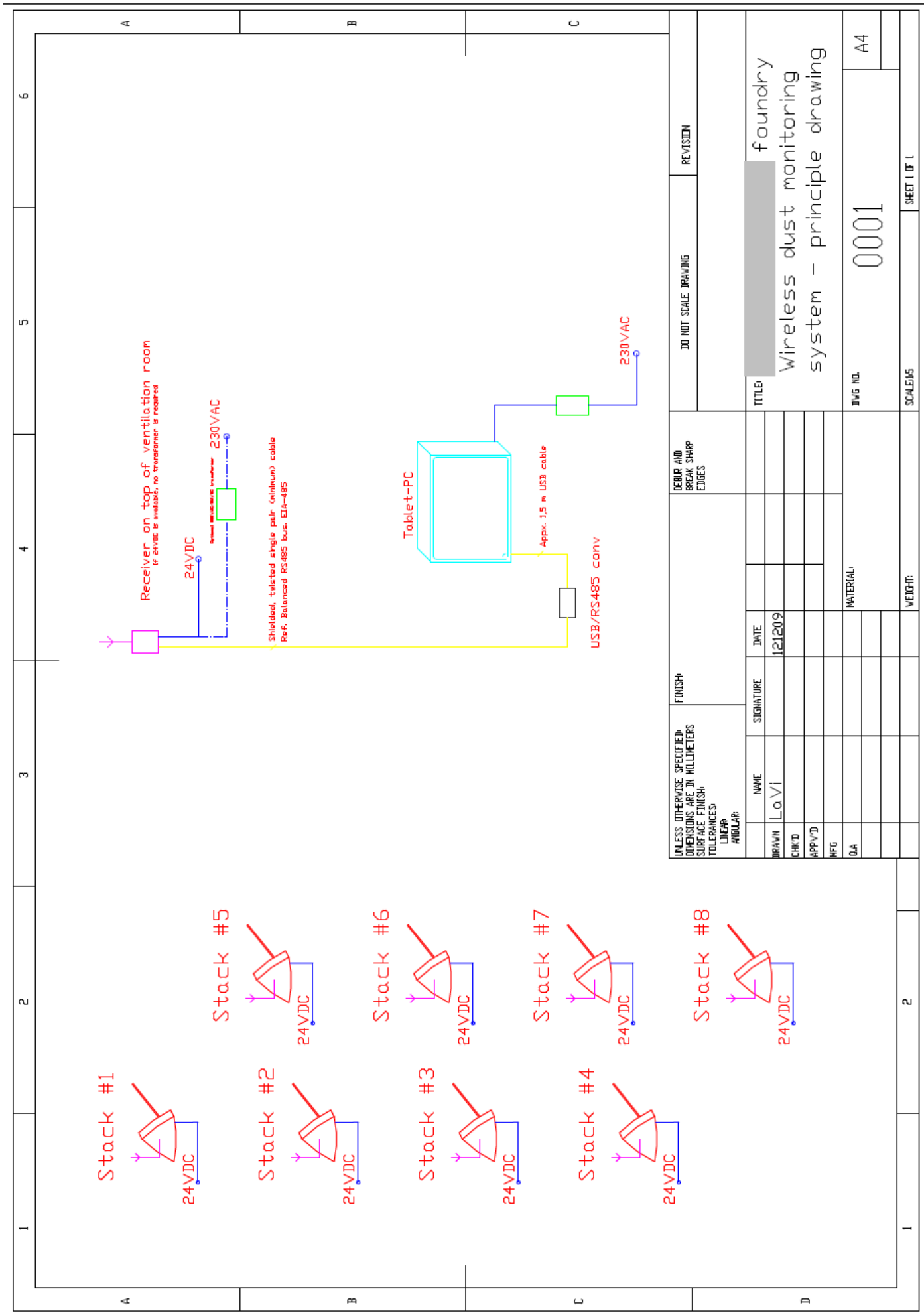
S300-sarjan yleisesite. Sintrol Oy, Helsinki.

Struzak , Ryszard. 2006. Radio-wave propagation basics. ITCP-ITU URSI School on Wireless Networking for Development, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics ICTP (luentosarjan materiaali).

Särkimäki, Ville. 2004. Lyhyen kantaman radiolähettimien soveltuvuus sähkökäyttöjen kunnonvalvonnan ja etädiagnostiikan tiedonsiirtotarpeisiin. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto.

Texas Instruments CC1101 Datasheet. WWW-dokumentti, <<http://focus.ti.com/lit/ds/swrs061f/swrs061f.pdf>>. Luettu 30.1.2009.

Viitanen, Johan. 2004. Dieselmoottorin hiukkaspäästöjen mittaus. Insinööriyö, Helsinki



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH		TOLERANCES		TEAR AND BREAK SHARP EDGES		TITLE	
TOLERANCES		LINEAR		ANGULAR		DRAWING NO.	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE			foundry	
CHK'D	LoVi		12/209			wireless dust monitoring system - principle drawing	
APP'VD						0001	
MFG						A4	
Q.A.						SCALE:5	
						SHEET 1 OF 1	