



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

JARI-PEKKA MANNINEN

LANGATTOMAN KILAVI-SENSORISOLMUN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastajat: prof. Lauri Sydänheimo
ja prof. Pekka Ruuskanen
Tarkastajat ja aihe hyväksytyt
Sähkö- ja tietotekniikan
tiedeneuvoston
kokouksessa 3. joulukuuta 2008

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

MANNINEN, JARI-PEKKA: Langattoman KILAVI-sensorisolmun kehittäminen

Diplomityö, 60 sivua, 3 liitesivua

Huhtikuu 2010

Pääaine: Elektroniikkatuotanto

Tarkastajat: professori Lauri Sydänheimo, professori Pekka Ruuskanen

Avainsanat: Sensori, sensoriverkko, KILAVI, langaton kommunikaatio

Langattomien järjestelmien käyttö koti- ja teollisuusympäristössä on kasvanut huomattavasti viime vuosina. Erityistä huomiota tutkimus- ja kehitystyössä ovat saaneet langattomat sensorit. Sensoriverkkojen käyttö kiinteistöjen automatisoinnissa tuo huomattavia etuja, ja niiden voidaan sanoa parantavan elämisen laatua. Sensoriverkoston kehittämisessä on kuitenkin vielä monia haasteita, jotta niiden toiminta saadaan optimoitua kiinteistöjen käyttöön.

Tampereen teknillisen yliopiston Rauman tutkimusyksikössä on aiemmin kehitetty taloautomaatioon soveltuvaa KILAVI-protokollaa. Se on suunniteltu energiatehokkaaksi, mutta samalla tarpeeksi monipuoliseksi takaamaan luotettavan ja turvallisen tiedonsiirron. Tämä diplomityö on tehty osana ECOMfort living (Energy efficient and comfort living) -projektia. Työn tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa toimiva sensoriverkkoalusta sekä aloittaa KILAVI-protokollan toiminnallisuuksien toteuttaminen. Työ pohjautuu aiemmin TTY Rauman tutkimusyksikössä tehtyihin tutkimuksiin ja saatuihin tuloksiin.

Työn aikana saatiin tavoitteiden mukaisesti suunniteltua ja rakennettua sensoriverkkosolmu. Solmusta teetettiin useampi kopio, ja niihin ohjelmoitiin KILAVI-protokollan perustoiminnallisuuksia. Työn lopussa sensorisolmut pystyivät itsenäisesti keräämään lämpötilatietoa ympäristöstä, lähettämään kerätyn tiedon KILAVI:n periaatteiden mukaisesti verkkoon, välittämään tietoa ja prosessoimaan vastaanotettua tietoa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

MANNINEN, JARI-PEKKA: Development of wireless KILAVI sensor node

Master of Science Thesis, 60 pages, 3 Appendix pages

April 2010

Major: Electronic production

Examiners: Professor Lauri Sydänheimo, professor Pekka Ruuskanen

Keywords: Sensor, sensor network, KILAVI, wireless communication

The use of wireless systems in house and industrial environment has increased substantially in recent years. Wireless sensors have received special attention from research and development. The use of sensor networks in real estate automation offers many benefits and can be said to increase living quality. However there are still many challenges before wireless sensors can be introduced into real estate use.

Tampere University of Technology, Rauma research unit has developed KILAVI protocol for the use of real estate automation. It has been developed energy efficient but also sufficiently versatile to guarantee reliable and safe data transfer. This thesis is a part of ECOMfort living (Energy efficient and comfort living) -project. The objective of this work is to design and carry out viable sensor network node and to begin programming KILAVI protocol functions. This thesis is based on prior research and results made in TUT Rauma research unit.

During this work sensor network node was designed and carried out as planned. Several copies were made and basic KILAVI protocol functions were created. At the end of the work sensor nodes were able to gather temperature information from the surrounding environment, send gathered information according to the rules of KILAVI, transfer information between nodes and process received information.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana ECOMfort living (Energy efficient and comfort living) -projektia Tampereen teknillisen yliopiston Elektroniikan laitoksen Rauman tutkimusyksikössä. Projektin tarkoituksena on kehittää kiinteistöympäristöön soveltuvaa langatonta automaatiojärjestelmää. Tämän työn kokonaisuuteen kuuluivat sensorisolmujen suunnittelu ja toteuttaminen sekä KILAVI-protokollan perustoiminnallisuuksien ohjelmointi.

Haluan kiittää työn ohjaajana toiminutta vanhempi tutkija Mikael Soinia saamistani neuvoista ja kannustuksesta. Kiitän myös työn tarkastajina toimineita professoreita Lauri Sydänheimoa ja Pekka Ruuskasta. Lauri Sydänheimoa haluan kiittää lisäksi saamastani tuesta ja mahdollisuudesta suorittaa diplomityöni Rauman tutkimusyksikössä. Lopuksi haluan kiittää vielä kaikkia Rauman tutkimusyksikön työntekijöitä työn aikana saamistani neuvoista ja viihtyisän työilmapiirin luomisesta.

Porissa 21.3.2010

Jari-Pekka Manninen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Sensorit ja sensoriverkot	3
	2.1 Sensori.....	3
	2.2 Sensoriverkko.....	4
	2.3 KILAVI.....	6
3	Sensorisolmun rakenne ja toteutus.....	9
	3.1 Komponentit ja niiden valinta.....	9
	3.1.1 Radiomoduuli	10
	3.1.2 Anturi	14
	3.1.3 Prosessointi	15
	3.2 Suunnittelu ja toteutus.....	17
4	Sensoriverkon toiminta	24
	4.1 Verkon laitteet.....	24
	4.1.1 Laitekohtaiset tiedot ja toiminnot	25
	4.1.2 Sanomarakenne.....	25
	4.1.3 Lähetys ja vastaanotto.....	27
	4.2 Protokollan toiminnallisuus	28
	4.2.1 Virheistä toipuminen	28
	4.2.2 Liikennöinti.....	32
	4.2.3 Sanomien käsittely.....	35
	4.2.4 Runko.....	37
5	Mittaukset ja toiminnan testaus.....	39
	5.1 Laitteisto ja toiminnan aika.....	40
	5.2 Ohjelmisto	43
6	Tulokset.....	45
	6.1 Laitteisto.....	45
	6.2 Ohjelmisto.....	49
7	Tulosten analysointi	51
	7.1 Laitteisto.....	51
	7.2 Ohjelmisto	55
8	Johtopäätökset ja jatkokehitys	56
	Lähteet.....	58
	Liite 1: Sensorisolmun piirikaavio.....	59
	Liite 2: Sensorisolmun prototyypin valmistuksessa käytetyt maskit ja stensiili.....	62

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ACK	<i>Acknowledgement</i> Kuittaus onnistuneesta tiedonsiirrosta.
AM	<i>Address Match</i> nRF905-radiopiirin signaali, joka kertoo onko tuleva sanoma tarkoitettu sille.
AVR	Atmelin mikrokontrolleriperhe.
Bluetooth	Avoin standardi laitteiden väliseen langattomaan radiokommunikointiin lähietäisyydellä.
CD	<i>Carrier Detect</i> nRF905-radiopiirin signaali, joka kertoo siirtotiellä olevasta kanta-aallosta.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> Virheentarkastusmenetelmä.
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance.</i> Siirtotien varausmenetelmä, jolla useat lähettäjät jakavat samaa siirtotietä. Törmäykset estetään lähettämällä siirtotien varaava signaali ennen varsinaista dataa.
CTS	<i>Clear To Send</i> Lähetysluvasta kertova sanoma.
DR	<i>Data Ready</i> nRF905-radiopiirin signaali, joka kertoo lähetyksen tai vastaanoton päättymisestä.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> Kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> Kansainvälinen televiestintäliitto on YK:n alainen televiestintäverkkoja ja -palveluja kansainvälisesti koordinoiva järjestö.

ISM	<i>Industrial-Scientific-Medical</i> Kansainvälisesti teollisuuden, lääketieteen ja tieteen ei- kaupalliseen käyttöön varattu radiotaajuuksien joukko.
ISO	<i>International Standard Organization.</i> Kansainvälinen standardointiorganisaatio.
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i> IEEE 1149.1 standardi.
JTAGICE mkII	Atmelin kehitystyökalu AVR-tuoteperheelle.
KILAVI	<i>Kiinteistön langaton viestintä</i> TTY Rauman tutkimusyksikössä kehitetty protokolla taloautomaation tarpeisiin.
KILAVIa	KILAVI-protokollan käyttämä vakiomittainen ohjaussanoma.
KILAVIb	KILAVI-protokollan käyttämä vaihtelevan mittainen hyötykuorman sisältävä sanoma.
KILAVI-sanoma	KILAVI-protokollan käyttämä sanoma. Muodostuu KILAVIa- ja KILAVIb-alisanomista.
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> Valoa säteilevä puolijohdekomponentti.
Master mode	<i>Master mode</i> Laitteen tila, jossa se isäntälaitteen muodossa ohjaa siihen kytkettyjä muita laitteita.
MCU	<i>Micro Controller Unit</i> Mikrokontrolleri.
MAC	<i>Message Authentication Code</i> Algoritmi, jota käytetään virheentarkistusmenetelmänä.
MISO	<i>SPI Master In Slave Out</i> SPI-väylässä siirrettävän tiedon suunta.
MOSI	<i>SPI Master Out Slave In</i> SPI-väylässä siirrettävän tiedon suunta.

NACK	<i>Not Acknowledged</i> Kuittaus hylätystä vastaanotetusta sanomasta.
nRF905	Nordic Semiconductor:in valmistama monitaajuus lähetinvastaanotin.
OSI-malli	<i>Open Systems Interconnection.</i> ISO:n määrittelemä malli verkkoprotokollien ja ohjelmistojen seitsemänkerroksisesta rakenteesta.
Prescaler	<i>Esijakaja</i> Ominaisuus, jota käytetään mikrokontrollereissa alentamaan kellotaajuutta halutulla jakajalla.
QFN	<i>Quad Flat No-Lead</i> Pintaliitettävä mikropiirikotelo.
RTS	<i>Request To Send</i> Lähetyslupa. Sanoma, jolla pyydetään lähetyslupaa.
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> Synkronoitu sarjaliikenneväylä.
SO	<i>Small Outline</i> Pintaliitettävä mikropiirikotelo.
Timer/Counter2	<i>Ajastin/laskuri2</i> Atmelin mikrokontrollerissa käytössä oleva 8-bittinen laskuri moduli, joka mahdollistaa ulkoisen kiteen käytön.
TQFP	<i>Thin Quad Flat Pack</i> Pintaliitettävä mikropiirikotelo.
TTY	<i>Tampereen teknillinen yliopisto.</i>
TWI	<i>Two-Wire Interface</i> Muun muassa Atmelin mikrokontrollereissa käytetty kommunikaatio liitäntä, joka käyttää kahta signaalia kommunikointiin.
WABS	<i>Wireless Automated Building Systems</i>

Langattomat automatisoidut rakennusjärjestelmät -
tutkimusryhmä.

WLAN

Wireless Local Area Network.

IEEE 802.11 -standardin mukainen langaton lähiverkko.

1 JOHDANTO

Langattomat sensoriverkot ovat nopeasti kasvava ja jännittävä tutkimuskohde, joka on saanut paljon huomiota viime vuosina. Automaattinen havainnointi, sulautettu laskenta ja langattomat verkot eivät ole uusia ideoita. Viime vuosien kehitys on mahdollistanut halpojen, vähävirtaisten ja monipuolisten sensorilaitteiden valmistamisen. Sensori on elektroninen laite, joka pystyy havainnoimaan ympäristön olosuhteita, kuten kemikaaleja ja ääniä. Itsenäisenä laitteena se omaa integroidut havainnointi-, prosessointi- ja kommunikointikyvyt. Yhtenä esimerkkinä tällaisesta laitteesta voidaan pitää lämpömittaria. Sensoreita käytetään muun muassa talon automatisoinnissa, jolloin ympäristön tietoa käytetään elinolosuhteiden parantamiseen. Taloautomaatiossa yksittäiset sensorit muodostavat verkon, jonka toimintatavasta vastaa protokolla. Perinteisiin taloautomaatiota varten luotuihin protokolleihin kuuluu BACnet (*Building Automation and Control Networks*). BACnet on standardinmukainen, ja se on luotu käyttämään langallista siirtotietä. Johtojen käyttö laitteiden välillä on kömpelöä ja usein vaivalloista. Ei olekaan ihme, että teknologian kehittyessä langattoman tiedonsiirron käyttö jokapäiväisessä elämässä on lisääntynyt huomattavasti. [1; 2; 3; 4]

Talon automaatiiossa langattomat sensorit parantavat huomattavasti elinolosuhteita luomalla ympäristön, joka osaa optimoida energiankulutuksen ja mukavuuden eri tilanteiden mukaan. Valaistuksen säädössä käytettävät sensorit voisivat pitää huoneiston valoisuuden tasaisena päivänvalon muuttuessa. Vähentämällä valaistuksen turhaa käyttöä voidaan saada säästöjä ja lisätä mukavuutta. Taloautomaation tarpeisiin soveltuvien verkkoratkaisujen kehittäminen on lupaava ja nopeasti kasvava tutkimus- ja tuotekehitysalue. Zigbee ja Z-Wave ovat esimerkkejä mesh-tyyppisistä verkkoratkaisuista, jotka ominaisuuksiensa puolesta soveltuvat langattomaan talokontrolliin. Molempien teknologioiden lähtökohtana on yksinkertaisuus, mikä on ehdoton edellytys taloautomaation yleistymiselle. [5; 6; 7]

Toimivien järjestelmien luomisessa on vielä monia haasteita. Talon automaatiiossa sensorien on pystyttävä toimimaan luotettavasti ja tehokkaasti osana suurempaa kokonaisuutta. Yksittäisillä sensoreilla ei ole näkemystä kokonaiskuvasta, minkä takia niiden tekemät päätökset voivat olla ristiriidassa keskenään. Tämän takia nousee esille keskitetyn kontrollin tarve. Keskuslaitteen avulla pystytään yksittäisten sensorien lähettämät tiedot keräämään yhteen ja tekemään päätöksiä, joissa otetaan eri näkökulmat huomioon. Tämä mahdollistaa myös sensorien rakenteen yksinkertaistamisen tiedon prosessoinnin ja käyttöliittymän siirtyessä keskuslaitteelle. Yksinkertainen rakenne on tärkeä myös virrankulutuksen ja esteettisyyden kannalta. Sensorien pitää sulautua huomaamattomasti ympäristöön, ja niiden tulisi toimia ilman

huoltoa ja paristojen vaihtoa useita vuosia. Ohjelmiston monimutkaisuus vaikuttaa myös osaltaan virrankulutukseen. Talon automaatiossa tarvittava viestintä on hyvin vähäistä, ja toiminnan takaamiseksi riittääkin ajoittain lähetetyt tietopurskeet. [2; 6]

Tampereen teknillisen yliopiston Rauman tutkimusyksikössä on aiemmin kehitetty juuri taloautomaatioon soveltuvaa KILAVI-protokollaa. Se on suunniteltu energiatehokkaaksi, mutta samalla tarpeeksi monipuoliseksi takaamaan luotettavan ja turvallisen tiedonsiirron. Tämä diplomityö on tehty osana ECOMfort living (Energy efficient and comfort living) -projektia. Tavoitteena on luoda toimiva ja luotettava alusta, jonka päällä KILAVI-protokollaa aletaan toteuttaa. Työ keskittyy verkon solmujen ja perustoimintojen toteuttamiseen. Sensorien tulee kyetä liikennöimään toistensa kanssa itsenäisesti ja luotettavasti oikeassa ympäristössä. Tiedonkulun pitää olla nopeaa, ja virhetilanteista on toivuttava. Monet sensoriverkkojen tärkeät piirteet, kuten energiaystävällisyys, otetaan huomioon, mutta ne eivät ole varsinaisesti osa työtä.

Tutkimusta varten Rauman yksikössä on laitteet radioliikennöinnin analysoimiseen, laitteiston ja ohjelmiston suunnitteluun sekä toteuttamiseen. Työn rakenne on jaettu seuraavanlaisesti. Kappaleessa 2 tutustutaan yleisesti työn pohjana olevan KILAVI-protokollan historiaan ja periaatteisiin, selvennetään sensori- ja sensoriverkko-käsitteitä sekä niiden merkitystä työssä. Kappaleessa 3 käydään läpi sensoriverkon laitteiden rakenteeseen ja valmistukseen liittyviä päätöksiä ja vaiheita. Kappaleessa 4 selvitetään protokollan toiminnan toteutusta. Kappaleessa 5 kerrotaan tehdyistä mittausjärjestelyistä ja kappaleessa 6 mittausten tuloksista. Kappaleessa 7 analysoidaan saatuja tuloksia, ja kappaleessa 8 pohditaan työn aikaansaannoksia sekä niiden jatkokehitystä.

2 SENSORIT JA SENSORIVERKOT

Tässä kappaleessa selvennetään teoriaa ja taustoja, joiden perusteella ratkaisuja on tehty. Lisäksi tarkastellaan lähtökohtia, jotka ovat ohjanneet työn kulkua. Teoria-osuus on päätetty jakaa kolmeen kokonaisuuteen. Sensori-osuudessa selvennetään yksittäisen sensorilaitteen käsitettä. Sensoriverkko-osuudessa kerrotaan erillisten sensorilaitteiden merkityksestä osana verkkoa ja niiden vaatimuksista. KILAVI-osuus käsittelee sensoriverkossa tarvittavaa protokollaa sekä luodun KILAVI-protokollan keskeisimpiä asioita työn kannalta.

2.1 Sensori

Sensoreita kuten myös niiden määritelmiä löytyy lukematon määrä. Yhtenä esimerkkinä sensorista voidaan pitää monille tuttua lämpömittaria, joka mittaa ulkoilman lämpötilaa. Joissain yhteyksissä, varsinkin käänöksissä, sensorin synonyymiksi mielletään käsite anturi. Tämän työn osalta näiden kahden käsitteen välillä on kuitenkin suuri ero. Nykyään anturilla tarkoitetaan yleensä laitetta, joka mittaa jotain tiettyä fyysistä suuretta. Sensori sen sijaan on kokonaisuus, joka prosessoi anturilta saatua tietoa ja toimii sen mukaan. Sensoreiden vaatimukset, odotukset ja määritelmät riippuvat käytettävästä sovelluksesta, jota ohjaa ajan mukana muuttuvat tarpeet ja käytössä oleva teknologia.

Sensorit ja niihin integroitu servotekniikka ovat olleet yleisessä käytössä jo puoli vuosisataa. Yhdistelmää on käytetty esimerkiksi termostaattien ja venttiilien kontrollointiin. Tavanomaiselle sensoriteknologialle oli ominaista suuret anturit, hyvin kyvykkäät prosessointialustat ja monipuoliset signaalin ja datan prosessointi ohjelmistot. Laitteet toimivat yksittäin staattisina, ja niiden tuli toimia pitkään ja tarkasti annetussa tehtävässä. Näiden sensoreiden sovelluskohteet ovat kuitenkin rajalliset. [8]

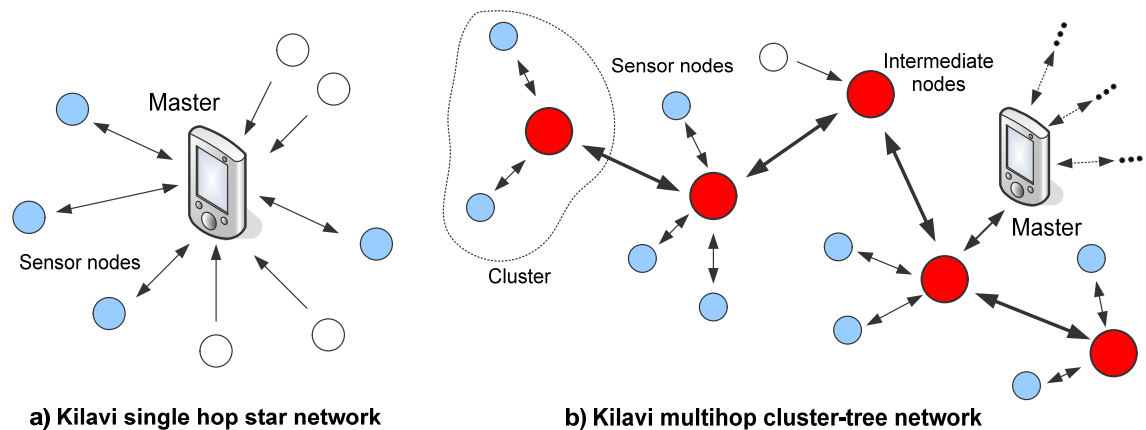
Teknologian kehittyessä ovat sensorit sekä niihin kohdistuvat vaatimukset kehittyneet. Laitteiden koko on pienentynyt ja kommunikointikyvyt ovat parantuneet huomattavasti. Tietysti edelleen valmistetaan perinteisiä lämpömittareita, mutta vaativimpien sovellusten yhteydessä sensoreiden rakenteelta vaadittavat ominaisuudet ovat toista luokkaa. Sensoriverkkojen yhteydessä on myös tullut tarve luokitella sensoreita eri tyyppeihin. Sensorit voidaan esimerkiksi jakaa yksinkertaisiin sensoreihin ja virtuaalisensoreihin. Yksinkertaisten sensoreiden tarkoitus voisi jaon mukaan olla tietyn fyysisen suureen mittaus käskyjen mukaan. Virtuaalisensori voisi puolestaan tarjota ympäristöolosuhteen epäsuoraa mittausta yhdistämällä useampia mittaustoimintoja prosessoinnin avulla. [9]

Sensoriverkkojen osana toimivien sensorilaitteiden rakennetta on pohdittu viime vuosina paljon. Joustavuus, pieni koko, vähävirtaisuus ja monet muut ominaisuudet kuvailevat laitetta, joka itsenäisesti mutta osana kokonaisuutta pystyy mukautumaan vallitseviin olosuhteisiin ja suorittamaan tarpeen vaatimia toimintoja yhteisen hyvän kannalta vähäisin resurssein [8]. Nämä tarpeet tulevat esille esimerkiksi palvelutaloissa, joissa esimerkiksi ilmastoinnin ja lämpötilan reaaliaikainen monitorointi ja muuttaminen ei ole kannattavaa tai edes mahdollista ihmisen toimesta. Pitkän huoltovapaan eliniän takaamiseksi ei välttämättä, tai ainakaan pelkästään riitä laitteen virrankulutuksen minimointi. Tässä yhteydessä tulee esille energian sieppaaminen ympäristöstä. Energian sieppaamisen avulla on mahdollista muun muassa vähentää asennuskustannuksia ja tehdä laitteiden sijoituksesta joustavaa. Energialähteen toistuvasta vaihtamisesta johtuvia huoltokustannuksia saadaan myös vähennettyä. Energiaa voidaan siepata yleisimmin valosta, lämmöstä, liike-energiasta, radioaalloista tai ilmavirrasta. [10; 12]

Tässä työssä käytettävällä termillä sensori tarkoitetaan yksittäistä laitetta, joka ominaisuuksiensa puolesta täyttää taloautomaation yhteydessä vaadittavat määreet. Näihin ominaisuuksiin kuuluu muun muassa toimiminen osana suurempaa kokonaisuutta, sensoriverkkoa, josta kerrotaan enemmän seuraavassa kappaleessa.

2.2 Sensoriverkko

Yleisen määritelmän mukaan verkko on mikä tahansa toisiinsa yhteydessä olevien elementtien järjestely [11]. Langattomat sensoriverkot ovat langattomien verkkosovellusten osajoukko, jonka kiinnittäminen on mahdollista ilman johtoja tai toimilaitteita. Sensoriverkon tarve tulee esille tilanteissa, joissa yksittäiset sensorisolmut eivät enää pysty tai niiden ei kannata suorittaa annettuja tehtäviä yksin. Erään vapaasti käännetyn määritelmän mukaan sensoriverkko on toistensa kanssa vuorovaikutuksessa olevien solmujen monimutkainen ja dynaaminen kokonaisuus, joka yhdistettyjen resurssien avulla muokkaa ja monitoroi ympäröivää maailmaa annettujen ohjeiden mukaan [8]. Sensoriverkkojen tarkoituksena on siis yhdistää yksittäisiä sensorisolmuja ja käyttää niitä hyväksi parhaalla mahdollisella tavalla tehtävien suorittamisessa. Kuvassa 2.1. on esitetty esimerkki sensoriverkon mahdollisista rakenteista.



a) Kilavi single hop star network **b) Kilavi multihop cluster-tree network**
Kuva 2.1. Kilavi-verkko topologioita: a) single hop -verkko ja b) multihop-verkko [13].

Kuvassa 2.1. esitetystä *single hop* -verkossa sanomat välitetään suoraan kohteeseen ilman välikäsiä. Tämän tyyppisessä verkossa laitteiden tulee olla lähellä toisiaan. *Multihop*-verkoissa sen sijaan keskustelevien solmujen ei tarvitse olla toistensa kuuluvuusalueella, sillä muita verkon laitteita voi käyttää sanomien välittämiseen. Sensoriverkko koostuu yksittäisistä sensorisolmuista, joista muodostuu erilaisia verkon rakenteita, topologioita. Rakenteen pitää olla dynaaminen ja uusien laitteiden liittäminen kokonaisuuteen helppoa. Joustava rakenne tarkoittaa kuitenkin myös sitä, että käytettävien verkkoprotokollien ja algoritmien täytyy omata itseorganisoitumisen kyky. [14]

Sensoriverkon ydin on käytettävä protokolla, joka määrää säännöt toiminnalle. Protokollasta kerrotaan enemmän seuraavassa luvussa. Sensoriverkon vaatimukset riippuvat pitkälti käytettävästä sovelluksesta ja viime aikoina suunnittelussa on keskitytty ohjausverkostoihin, jotka ovat vähävirtaisia ja tiedonsiirtokyvyltään pieniä. Nämä ominaisuudet kuvastavat myös tässä työssä kehitettävää langatonta taloautomaatioverkkoa.

Omakotitalojen automatisoinnissa käytetyn sensoriverkon pääominaisuuksia on arvioitu taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Tyypillisiä sensoriverkkoparametreja omakotitalokontrollissa [13].

PARAMETERS	VALUES
Amount of nodes	~10 to 100
Communication interval	~0,01 to 10 packets per minute
Packet size	~100 bits
Delay	~100 to 1000 ms
Data rate	~10 kilobits per second (kbps)

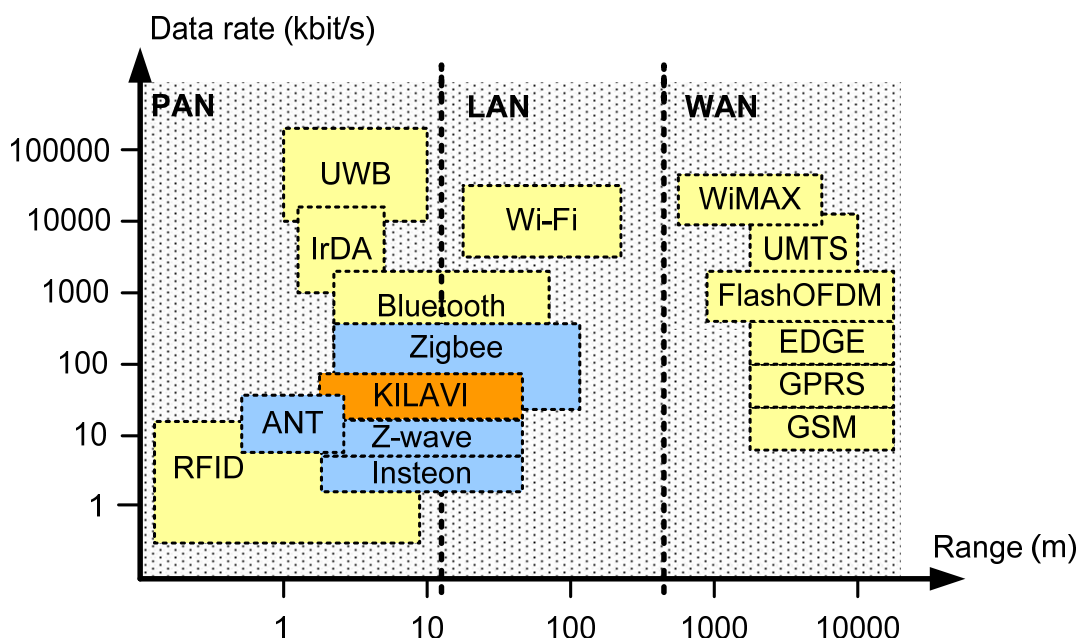
Kuten taulukosta 2.1. nähdään, kotitalouksien yhteydessä käytettävät sensoriverkot sisältävät vain vähän solmuja ja niiden tiedonsiirto on hidasta. Tarvittavaan kommunikointiin riittävät ajoittaiset tietopurskeet, ja hitaasti muuttuvassa ympäristössä sensorisolmujen toiminnallinen aika onkin vain murto-osa sen eliniästä.

Sensoriverkossa yksittäisten sensorisolmujen toimintasäteen ei tarvitse olla kovinkaan suuri, ja sitä pyritäänkin rajoittamaan. Syinä ovat yksittäisten sensorisolmujen aiheuttama mahdollinen häiriö verkossa ja energian säästäminen.

2.3 KILAVI

Ennen kuin yksittäiset sensorit voivat toimia sujuvasti osana verkkoa, tarvitaan protokolla. Yleisen määritelmän mukaan viestintäprotokolla on joukko sääntöjä tavasta, jolla tietynlaisia viestejä vaihdetaan [15]. Tämä pätee myös sensoriverkkojen yhteydessä, jossa protokolla vastaa sensorien toimintatavasta: kuinka sanomia lähetetään ja miten toimia eri tilanteissa. Protokollan avulla laitteiden toiminta saadaan myös yleistettyä, jolloin niistä saadaan valmistajasta riippumattomia.

Erilaisia ja eri tarkoituksiin tehtyjä protokollia löytyy lukemattomia määriä. Esimerkkeinä mainittakoon laajalti käytössä olevat WLAN (*Wireless Local Area Network*) ja Bluetooth. Monien muiden protokollien tapaan niiden päätarkoituksena on kyvykäs tiedonsiirto, mikä tekee niistä liian raskaita ja monimutkaisia käytettäväksi omilla paristoilla toimivissa vähävirtaisissa sensoreissa. Sensoriverkkoja varten tehtyjä protokollia on jo olemassa, ja niiden kehittäminen on lupaava ja nopeasti kasvava tutkimus- ja tuotekehitysalue. Zigbee on yksi esimerkki langattomasta verkkoteknologiasta, joka on suunniteltu vastaamaan markkinoiden tarvetta luotettavuuden, turvallisuuden, vähäisen virrankäytön ja hinnan osalta. [16] Kuvassa 2.2. on esitetty joitain jo käytössä olevia viestintä standardeja.

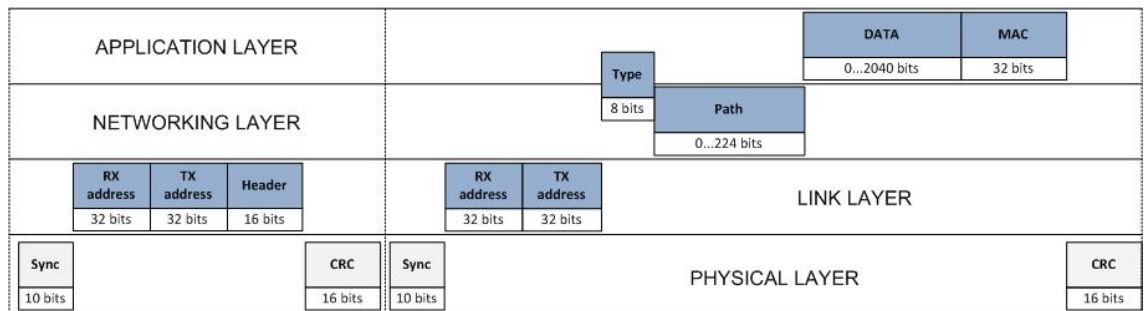


Kuva 2.2. Joitain yleisiä langattomia verkkoteknologioita [13].

Sensoriverkot ovat pitkälti tehtäväsuuntautuneita, ja niiden käyttämät protokollat on tehty juuri tietyille sovellusalueelle. TTY Rauman tutkimusyksikössä kehitetty KILAVI-

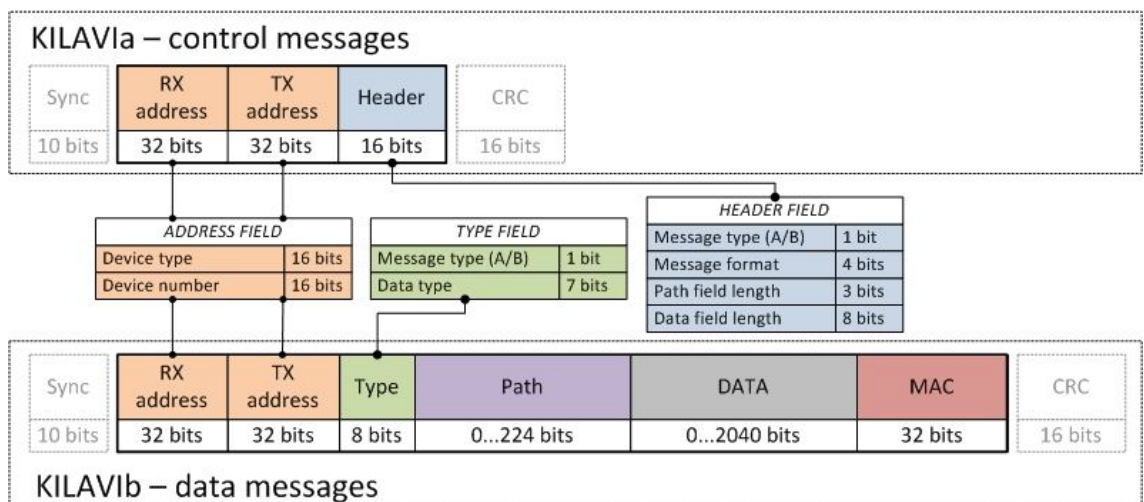
protokolla on suunniteltu taloautomaation tarpeisiin. Kuten kuvasta 2.2. nähdään, KILAVI sijoittuu LAN (*Local Area Network*) -verkon ja PAN (*Personal Area Network*) -verkon välille kuten Bluetooth, mutta se omaa pienemmän tiedonsiirtokapasiteetin. Langattomassa taloautomaatiossa käytettävien sensorisolmujen tulee toimia pitkään ilman huoltoa ja paristojen vaihtoa. KILAVI-alustan perustoiminnallisuuteen kuuluvat kevyen protokollan verkko, kompaktit sanomat, hybriditulvitus, vähäinen viestintä, keskitetty hallinta ja *ad hoc* -monihyppyyviestintä [13].

KILAVI-protokollan kerrosarkkitehtuuri perustuu ISO-OSI-mallin kerrosrakenteeseen. KILAVIa-sanoma koskee vain fyysistä kerrosta ja siirtoyhteyskerrosta. Reittikenttä ja sovelluskohtainen informaatio puolestaan välitetään aina KILAVIb-sanomassa. [17] Kuvassa 2.3. on esitetty KILAVI-protokollan kerrosarkkitehtuuri.



Kuva 2.3. KILAVI-protokollan kerrosarkkitehtuuri.

Vakioittaisten KILAVIa-kontrollisanomien ja hyötykuorman sisältävien vaihtelevan mittaisten KILAVIb-sanomien sisältö on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. KILAVI-protokollan sanomamalli.

KILAVI-sanomien jaon perusteena on saada käytettävästä protokollasta mahdollisimman energiatehokas ja joustava. KILAVIa-sanomien tarkoituksena on varata siirtotie liikennöintiä varten, ja se lähetetään aina ennen varsinaista

hyötykuormasanomaa. Näin vastaanottava solmu osaa varautua oikeantyyppiseen ja -pituisen sanomaan. KILAVIb-sanomilla lähetetään sovelluskohtaista tietoa sekä reittikentän tieto.

Verkon toimijoina käytettäviä sensorisolmuja on KILAVI:n mukaan kolmentyyppisiä: isäntäsolmuja, kaksisuuntaisia solmuja ja yksisuuntaisia solmuja. Isäntäsolmujen tarkoituksena on muun muassa kerätä tietoa ja ohjata sekä valvoa verkon toimintaa. Isäntälaitteen vaatima logiikka on paljon monimutkaisempi kuin muiden sensorisolmutyyppien, ja se eroakin huomattavasti muista verkon laitteista. Toisin kuin muut verkon laitteet, isäntäsolmun tarkoituksena ei ole sulautua ympäristöön vaan tarjota käyttöliittymä muiden solmujen hallintaan. Kaksisuuntaisia solmuja voivat olla anturi- ja välittäjäsolmut. Anturisolmujen tarkoituksena on tiedon kerääminen ympäröivästä maailmasta ja sen lähettäminen isäntälaitteen analysoitavaksi. Joidenkin anturisolmujen tehtävänä voi olla esimerkiksi lämpötilan mittaus tietyin aikavälein. Anturisolmua voidaan kuitenkin käyttää myös esimerkiksi liiketunnistimena julkisessa rakennuksessa. Anturisolmut ovat pääsääntöisesti tarkoitettu omalla virtalähteellä toimiviksi. Välittäjäsolmujen tarkoitus on nimensä mukaan sanomien välittäminen. Ne viettävät suuren osan eliniästään monitoroiden verkon liikennettä. Tämä lisää huomattavasti virrankulutusta langattoman rajapinnan jatkuvan käytön takia. Kotitalouksien yhteydessä välittäjäsolmuja ei välttämättä tarvita, mikäli rakennuksen koko on riittävän pieni. Isäntälaitteen hyvän sijoituksen johdosta sen toimialue saattaa monissa tapauksissa sisältää koko rakennuksen. Yksisuuntaiset sensorisolmut ainoastaan lähettävät tietoa, eivätkä pysty vastaanottamaan sanomia verkosta. Niiden virrankulutus on muita sensorityyppejä vähäisempi. Koska yksisuuntaiset solmut eivät sisällä vastaanotinta, ne eivät myöskään kuule verkon liikennöintiä. Tämä vähentää luotettavuutta perille pääsevien sanomien osalta. Yksisuuntaisten sensorisolmujen tarkoituksena on toimia anturisolmuina. [17]

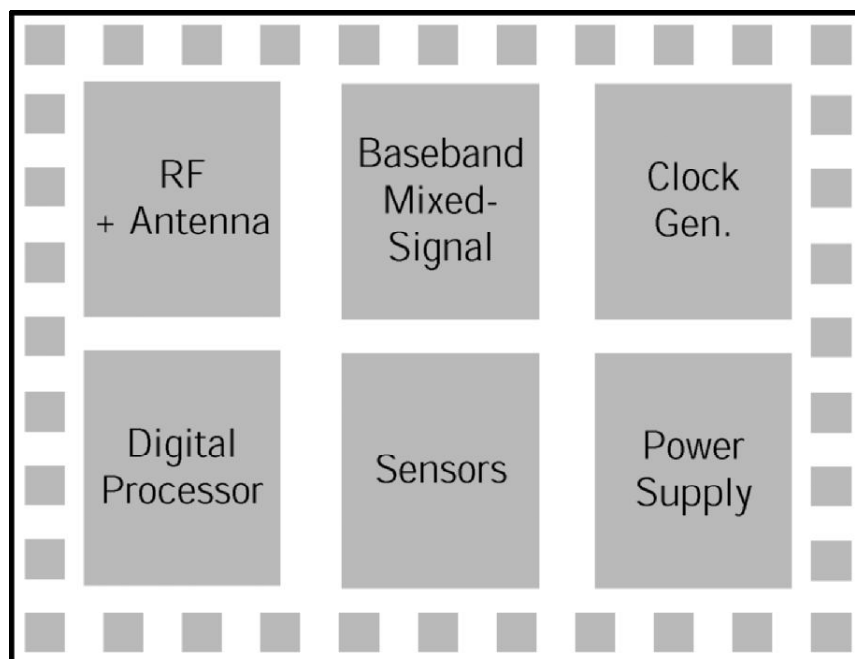
3 SENSORISOLMUN RAKENNE JA TOTEUTUS

Sensorisolmun fyysisen rakenteen suunnittelun lähtökohtana oli KILAVI:n luomat periaatteet ja rajaviivat. Tarkoituksena oli luoda prototyyppi, jonka avulla pystytään kehittämään aiemmin luotua verkkoprotokollaa ja helpottamaan tulevaa kehitystyötä. Sensoriin pyrittiin suunnittelemaan mahdollisimman yksinkertainen rakenne, jota tarvittaessa voitaisiin kuitenkin laajentaa. Toimivan prototyypin avulla pystytään paremmin selvittämään sensoriverkossa toimivien solmujen tarpeita, joita suunnittelupöydällä ei välttämättä pystytä ennakoimaan.

Tämän kappaleen tarkoituksena on selvittää toteutukseen liittyviä ratkaisuja ja sen vaiheita. Prosessi aloitettiin tutkimalla aiempia tuloksia, joiden perusteella hahmoteltiin tarvittavia osakokonaisuuksia sekä niiden sisältöä. Hahmotelmien toteutus ja kehitys tapahtui Rauman yksikössä käytössä olevan CadSoftin Eagle layout -editorin avulla. Suunnittelua seurasivat prototyyppien valmistus, testaus sekä lopullisen version kehitys ja toteutus.

3.1 Komponentit ja niiden valinta

Komponenttien valintaa varten hahmoteltiin aluksi sensoriverkossa toimivan sensorisolmun osakokonaisuuksia aiemmin tehtyjen määritelmien perusteella. Jokaiselle osakokonaisuudelle voitiin asettaa omat vaatimuksensa, joiden perusteella saatiin parempi kuva tarvittavista yksittäisistä komponenteista. Sensorisolmujen sisältämistä osakokonaisuuksista haettiin esimerkkejä myös kirjallisuudesta. Otis ja Rabaey [11, s. 2] havainnollistavat sensorisolmun tarvitsemia osakokonaisuuksia kuvan 3.1. mukaisesti.



Kuva 3.1. Sensorisolmun sisältämiä osakokonaisuuksia [11, s. 2].

Kuvan 3.1. esittämät kokonaisuudet ovat yksi näkökulma sensorisolmun tarpeista. Jatkuvasti kehittyvä teknologia mahdollistaa yhä suuremman integraatioasteen, ja yksi komponentti saattaa sisältää monia sensorisolmun tarvitsemia ominaisuuksia. Aiemmin esitettyjen määritelmien mukaan sensorisolmujen on kyettävä kommunikoimaan muiden kanssa sekä keräämään ja prosessoimaan tietoa. Laitteistossa pitää myös olla rajapinta ohjelmistoa varten, jota tarvitaan osaltaan tiedon prosessoinnissa. Tämän perusteella solmujen välistä viestintää varten tarvitaan kommunikointimoduuli ja ympäröivän maailman tutkimiseen anturi. Tiedon prosessointiin ja ohjelmiston rajapinnaksi sopii hyvin mikrokontrolleri.

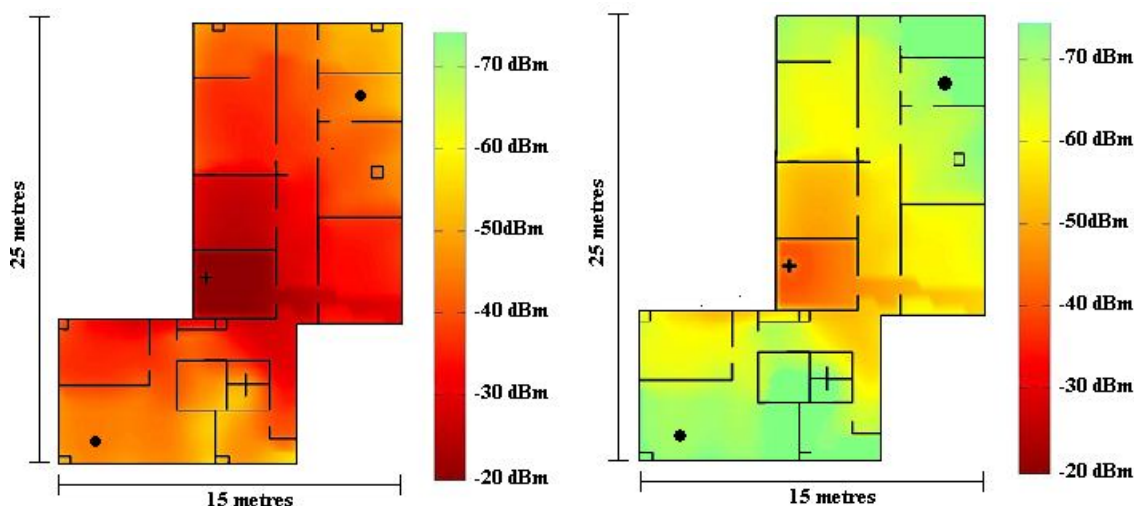
Komponenttien valinnassa tukeuduttiin osaltaan aiempiin TTY Rauman yksikön suorittamiin sensoriverkko-tutkimuksiin. Valintaprosessiin pitää kuitenkin kiinnittää huomiota, sillä valittavat komponentit vaikuttavat työn kulkuun ja myöhemmin tehtäviin päätöksiin. Lisäksi komponenttien ominaisuudet kehittyvät koko ajan ja vanhojen mallien saatavuus saattaa heiketä. Pääkomponenttien ympärille tulevat passiivikomponentit ovat pitkälti määrätty datalehdissä, ja niille on annettu omat raja-arvonsa.

3.1.1 Radiomoduuli

Yksi sensorisolmun pääedellytys sensoriverkossa on sen kyky lähettää ja vastaanottaa tietoa. Erilaisia ja eri tarkoituksiin sopivien lähetin-vastaanottimien ja antennien rakennusohjeita on paljon saatavilla sekä kirjallisuudesta että Internetistä. Työn kannalta oli kuitenkin järkevämpää käyttää valmiita lähetin-vastaanotin- ja antennikomponentteja. Oman radiomoduulin rakentaminen alusta loppuun ei toisi

lisäarvoa työlle, ja asiaan perehtyminen sekä valmistus veisi aikaa tärkeimmiltä osa-alueilta.

Aiemmin TTY Rauman yksikössä saatujen tulosten perusteella valittiin lähetin-vastaanottimeksi Nordic Semiconductorin nRF905 monitaajuus lähetin-vastaanotin. Kyseinen radiopiiri on suunniteltu käytettäväksi 433/868/915 MHz ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) -taajuusalueilla, joiden käyttö ei vaadi erillistä lupaa [18]. Näistä käyttöön valittiin 433 MHz:n taajuusalue, joka on aiemmin Rauman yksikössä todettu sopivan parhaiten KILAVI:n mukaiseen sensoriverkkoon. Euroopassa 433 MHz:n taajuuskaista on käytössä välillä 433,05 – 434,79MHz ja sen suurin sallittu lähetysteho on +10 dBm eli 10 mW [19]. Etuna 433 MHz:n taajuuden käytössä muihin verrattuna on muun muassa aineen läpäisykyky. Taajuuden pienentyessä aallonpituus kasvaa, minkä seurauksena radioaaltojen läpäisykyky aineessa paranee. Tämä on erityisen tärkeää juuri kiinteistöympäristössä, joka sisältää paljon esteitä. Korkeampien taajuuksien etuna on muun muassa tehokkaampi tiedonsiirtokyky, joka ei ole tärkeää verkossa jossa siirretään vain lyhyitä tietopurskeita. Kuvassa 3.2. on esitetty simuloitu tilanne, jossa on tutkittu eri taajuuksien radioaaltojen etenemistä toimistoympäristössä.



Kuva 3.2. RF-signaalin leviäminen toimisto ympäristössä taajuuksilla 433 MHz (vasemmalla) ja 2,4 GHz (oikealla) [20].

Kuten kuvasta nähdään, matalamman taajuuden signaali etenee paremmin toimistoympäristössä. Tehdystä simulaatiosta ja radioaaltojen ominaisuuksista voi lukea tarkemmin lähteestä [20].

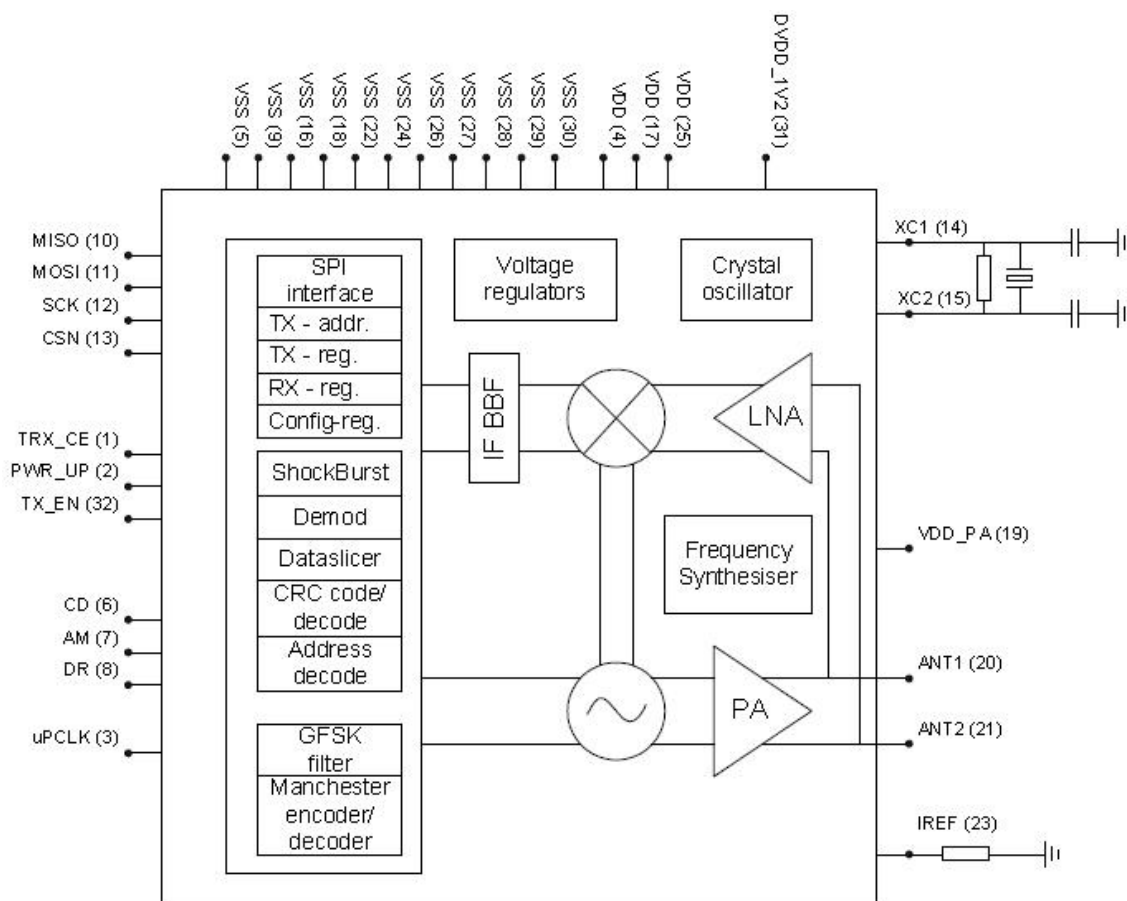
Antenniksi valittiin 433 MHz taajuudelle optimoitu 50 ohmin Rainsunin pintaliitettävä AN1603-433. Valmistaja ilmoittaa antennin tärkeiksi ominaisuuksiksi muun muassa pienen painon ja matalan profiilin. Ulkoisilta mitoiltaan AN1603-433 on 16,0 mm (L) x 3,0 mm (W) x 1,7 mm (H). Muita antennin ominaisuuksia on listattu taulukossa 3.1. [21]

Taulukko 3.1. AN1603-433 antennin ominaisuuksia [21].

Item	Specification
Center Frequency	433 MHz
Bandwidth (typ.)	8 MHz
Peak Gain (typ.)	0.5 dBi
VSWR	2.0 (max)
Polarization	Linear
Pattern	Omni-directional
Impedance	50 Ω

Radiopiirin tuotetiedoissa on annettu esimerkkikytkentä 433 MHz taajuudella toimiville sovelluksille. Kyseisellä taajuudella radiopiirin antama kuormaimpedanssi antenniporttien välillä on 300 ohmia. Annetun kytkennän avulla sovitetaan kuormaimpedanssi 50 ohmin antenna varten. RF-puolen suunnittelussa pitää ottaa monia eri asioita huomioon, sillä pienetkin virheet saattavat vaikuttaa suuresti liikennöintiin. Esimerkiksi maadoitusten huono suunnittelu saattaa aiheuttaa häiriötä juotospisteiden välille [22]. Valmista kytkentää päätettiin käyttää, koska se oli aiemmin todettu toimivaksi. Tuotetiedoissa annettuun esimerkkikytkentään kuuluvat sovitusosan passiivikomponenttien lisäksi myös käyttöjännitteen suodatuksessa käytetyt kondensaattorit sekä kide ja sen kaksi kondensaattoria ja vastus. [23]

Toiminnaltaan radiopiiri on pyritty tekemään mahdollisimman helppokäyttöiseksi. Tiedonsiirrossa käytetään SPI-liitäntää (*Serial Peripheral Interface*), jonka kautta pystytään muuttamaan ja lukemaan eri rekistereiden sisältöä. Toimintatiloja radiopiirillä on neljä: kaksi aktiivista ja kaksi lepotilaa. Aktiivisia toimintatiloja ovat lähetys ja vastaanotto, ja lepotiloja ovat virransäästö ja valmiustila. Näiden tilojen välillä siirtymiseen käytetään kolmea ohjaussignaalia: PWR_UP (*Power up chip*), TRX_CE (*Tranceiver Enable*) ja TX_EN (*Transmit Enable*). Ohjaussignaalien lisäksi radiopiiri käyttää kolmea signaalia informoimaan eri tapahtumista, kuten onnistuneesta lähetyksestä ja vastaanotosta. Nämä signaalit ovat AM (*Address Match*), DR (*Data Ready*) ja CD (*Carrier Detect*). Kuvassa 3.3. on nRF905 lohkokaaavio. [24]



Kuva 3.3. nRF905 lohkokaavio [24].

Fyysiseltä kooltaan nRF905-radiopiirin QFN kotelo on 5 x 5 mm, ja siinä on 32 pinniä tasaisesti jakautuneena neljälle sivulle. Muita huomioitavia ominaisuuksia on kerätty taulukkoon 3.2. Tarkempia tietoja nRF905-radiopiiristä löytyy valmistajan sivuilla olevista tuotetiedoista [24].

Taulukko 3.2. nRF905-radiopiirin ominaisuuksia [24].

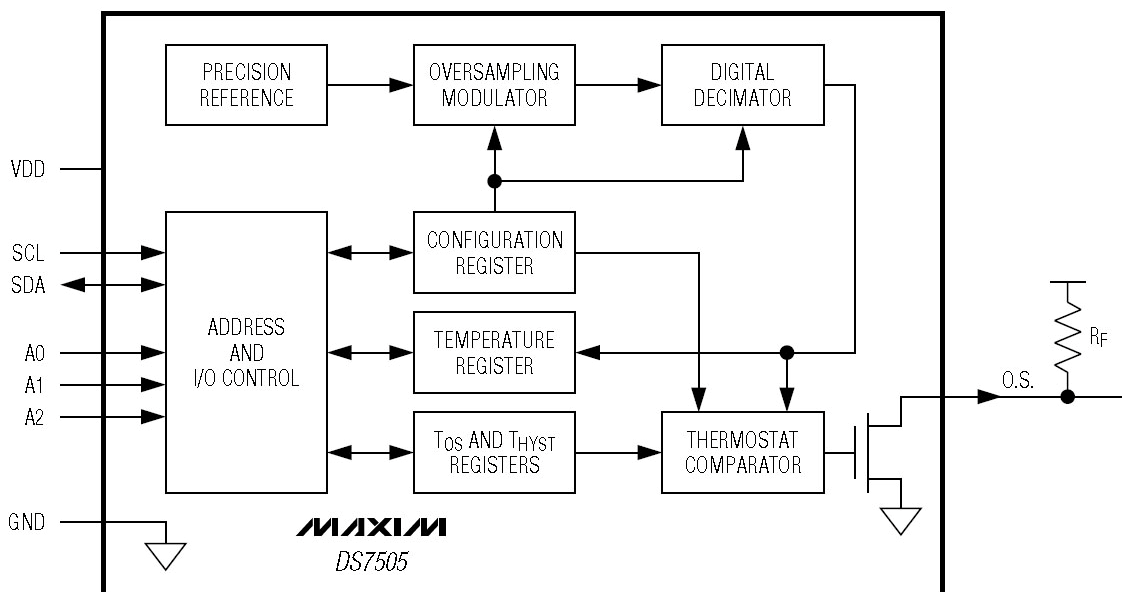
Parametri	Arvo	Yksikkö
Käyttöjännite	1.9 – 3.6	V
Lähetysteho	-10 – 10	dBm
Tiedonsiirtonopeus	50	kbps
Virrankulutus		
Tx @ -10dBm	9	mA
Reduced Rx	10.5	mA
Power down	2.5	µA
Standby	32	µA

Sensorin regulaattori syöttää piirille 2,5 voltin käyttöjännitteen [25]. Lähetystehona on -10 dBm eli 0,1 mW, ja vastaanotossa käytetään virrankulutusta vähentävää asetusta (*reduced RX*). Virrankulutus on sidoksissa käytetyn kiteen taajuuteen. Valmistaja antaa taulukon 3.2. mukaiset virrankulutuservat, kun käytössä on 16 MHz:n ulkoinen kide.

3.1.2 Anturi

Anturia käytetään sensorissa mittaamassa tietoa ympäröivästä maailmasta, kuten lämpötilasta. Kerätyn tiedon avulla voidaan tehdä päätöksiä tarvittavista toimenpiteistä. Kyseinen ominaisuus ei sinänsä ollut välttämätön työn kannalta. Anturi päätettiin kuitenkin lisätä sensoriin, sillä se ei aiheuttanut suurta lisätyötä ja kerätyn tiedon käyttäminen tutkimuksessa teki työstä paljon mielekkäämmän.

Prototyypin rakenne haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena ongelmien minimoimiseksi, minkä takia pyrittiin välttämään monimutkaisia ratkaisuja myös anturin osalta. Lyhyen kartoituksen jälkeen päädyttiin käyttämään MAXIM:in DS7505 digitaalista lämpötila-anturia. Sen pieni koko ja ulkoisten liitännöiden määrä sopivat erinomaisesti työhön. DS7505 käyttää mikrokontrollerin kanssa kommunikointiin 2-wire sarjaliitännää. Lämpötilatietojen keräämiseen tarvitaan ainoastaan maa- ja jänniteliitännät sekä TWI (*Two-Wire serial Interface*) -liitosta varten kaksi signaali kytkentää. Jännitehäiriöiden suodattamista varten lisättiin anturiin myös maa- ja jännitepinnien väliin suotokondensaattori. DS7505-lämpötila-anturin lohkokaavio on esitetty kuvassa 3.4. [26]



Kuva 3.4. DS7505-lämpötila-anturin lohkokaavio [26].

Kuvassa 3.4. näkyvät A0, A1 ja A2 mahdollistavat useamman lämpöanturin liittämisen yhden kautta. O.S.-liitännää käytetään ainoastaan termostaattiominaisuuden yhteydessä, mikä mahdollistaa reagoimisen lämpötilamuutoksiin. DS7505-lämpötila-anturin kotelo on kahdeksan pinninen SO (*Small Outline*), ja sen koko on 4 x 5 mm. Muita perustietoja on kerätty taulukkoon 3.3. [26]

Taulukko 3.3. DS7505-lämpötila-anturin ominaisuuksia [26].

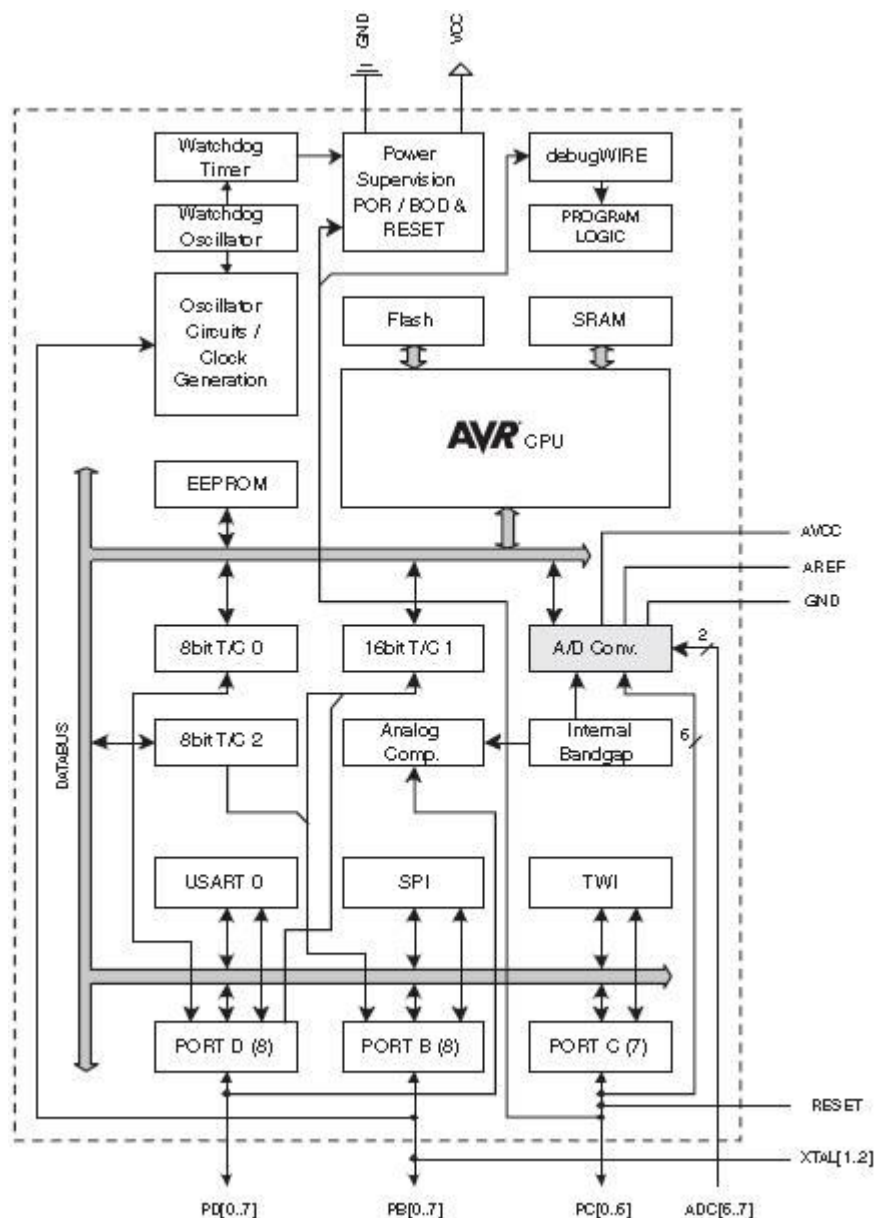
Parametri	Arvo	Yksikkö
Käyttöjännite	1.7 – 3.7	V
Lämpötilan mittausväli	-55 - +125	°C
Lämpötilan muunnosaika	25 (max)	ms
Virrankulutus		
Lepotila	2	μA
Lämpötila muunnos	750	μA
Kommunikointi	100	μA

Taulukossa 3.3. lämpötilan muunnosaika on muunnettaessa yhdeksän bitin lämpötila-arvoa. Yhdeksän bitin arvoa käytettäessä lämpötila saadaan 0,5 asteen tarkkuudella. [26]

3.1.3 Prosessointi

Kolmantena tarkasteltavana vaatimuksena sensorissa on sen kyky käsitellä tietoa. Tähän tarkoitukseen sopii hyvin mikrokontrolleri. Mikrokontrollerien valmistajia löytyy jonkin verran, ja pienen pohdinnan jälkeen päädyttiin käyttämään Atmelin AVR mikrokontrollereita. Atmelin tuotteisiin päädyttiin, koska niiden käytöstä oli aiempaa kokemusta ja ne sopivat ominaisuuksiensa puolesta hyvin käytettävään sovellukseen. Lisäksi tähän mennessä tehdyt AVR mikrokontrollerit kaikki omaavat saman prosessori- ja muistarakenteen. Suurimpana erona mallien välillä on toimintojen ja ulkoisten liitäntöjen määrä sekä muisti. Näin ollen ohjelmakoodi on helposti siirrettävissä eri mallien välillä, kun otetaan huomioon rekisterien nimet sekä käytössä olevat ominaisuudet.

Työn aikana käytössä oli kaksi erilaista mikrokontrolleria: ATMega644P ja ATMega168V. Kehityksen alussa päätettiin ottaa käyttöön läpiladottava ATMega644P. Suuri muistin määrä, helppo vaihdettavuus sekä suuri koko tekivät kyseisestä mikrokontrollerista oivan vaihtoehdon. Myöhemmässä vaiheessa, kun muistin määrä ja tarvittavat liitännät olivat paremmin tiedossa, siirryttiin pintaliitettävään ATMega168V malliin. Kuvassa 3.5. on esitetty ATMega168V-mikrokontrollerin lohkokaaevio.



Kuva 3.5. ATmega168V mikrokontrollerin lohkoakaavio [27].

ATmega168V mikrokontrolleri on ominaisuuksiltaan monipuolinen, ja useat sen toiminnoista ovat tärkeitä työn kannalta. Tässä luvussa on esitetty valitun mikrokontrollerin pääominaisuuksia. Seuraavassa luvussa kerrotaan joitain mikrokontrollerin ominaisuuksia, jotka ohjelmakoodissa tehtyjen ratkaisujen ymmärtämisen kannalta on hyvä selvittää.

ATmega168-mikrokontrollerin kotelomalliksi valittiin 32-pinninen TQFP (*Thin Quad Flat Pack*), joka on fyysiseltä kooltaan 9 x 9 mm. Taulukossa 3.4. on esitetty ATmega168V-mikrokontrollerin ominaisuuksia.

Taulukko 3.4. *ATMega168V-mikrokontrollerin ominaisuuksia [27].*

Parametri	Arvo	Yksikkö
Käyttöjännite	1.8 – 5.5	V
Virrankulutus		
Lepotila	15	μA
Aktiivitila	0.55	mA
Flash	16	kB
EEPROM	512	B
SRAM	1024	B

Mikrokontrollerin virrankulutus riippuu muun muassa sisään syötetystä käyttöjännitteestä sekä käytettävistä ominaisuuksista. Taulukossa 3.4. annetut virrankulutusarvot ovat suuntaa antavia, ei ehdottomia.

Mikrokontrollerin ohjelmointia varten TTY Rauman yksikössä oli käytössä AVR JTAGICE mkII. Ohjelmointi suoritettiin SPI-liitännän kautta, mitä varten sensoriin sisällytettiin piikkirima.

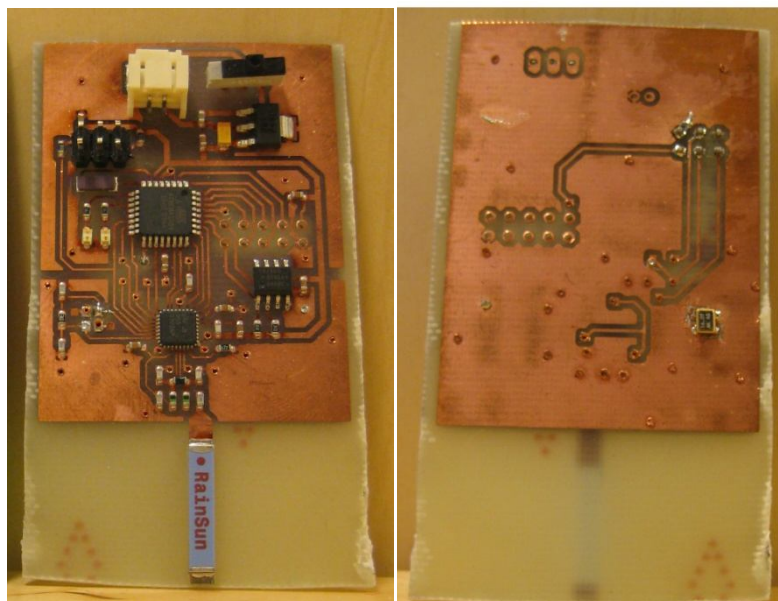
3.2 Suunnittelu ja toteutus

Osakokonaisuuksien ja komponenttien alustavan valinnan jälkeen alettiin muodostaa laitteen fyysistä kokonaisuutta. Aiemmin valitut osakokonaisuudet lisättiin piirikaavioon, ja niiden välille tehtiin tarvittavat liitokset. Ensimmäistä prototyyppiä varten päätettiin kokonaisuudesta erottaa radiomoduuli. Tämä tehtiin, koska radiomoduulin valmistaminen käsityönä ei tulisi olemaan helppoa radiopiirin pienen koon takia. Aiemmin oli päätetty, että tuotetiedoista saatua esimerkkikytkentää ei muuteta, jolloin sen teoreettisesta toimivuudesta voitiin olla varmoja. Sen sijaan sensorin muiden osien toimivuudesta tai niihin myöhemmin tehtävistä muutoksista ei voitu olla varmoja. Näin ollen vaikeasti asennettavan radiopiirin kanssa ei tarvitse käyttää paljoa aikaa mahdollisten eri versioiden kanssa. Lisäksi tehtyä radiomoduulia voitaisiin myös myöhemmässä vaiheessa käyttää eri projekteissa. Radiomoduulin ja päälevyn välillä olevasta liitännästä tehtiin samanlainen kuin radiopiirin testauskitissä. Näin ollen rakennetun radiomoduulin toimivuus pystytään helposti toteamaan.

KILAVI-protokollan solmutyypeistä päätettiin toteuttaa kaksi: anturi- ja välittäjäsolmu. Laitteiden rakenne ja ohjelmakoodi eivät eroa toisistaan. Muuttamalla sensorin laitetyyppiä ohjelmakoodista, muuttuu sen toimintatapa. Solmujen rakenne päätettiin pitää samanlaisena, koska käytännössä ne olisivat eronneet toisistaan vain lämpötila-anturien osalta. Näin ollen voidaan solmun tyyppiä vaihtaa verkon tarpeiden mukaan helposti.

Ensimmäisessä versiossa keskityttiin enemmänkin kokonaisuuden hahmottamiseen kuin valmiin version luomiseen. Piirikaaviossa komponenteille ja osakokonaisuuksille lisättiin niiden vaatimat peruskomponentit, kuten mikrokontrollerin ylösvetovastus reset-linjaan ja suotokondensaattorit jännitettä varten. Komponenttien sijoittelu tehtiin väljäksi helpon toteutuksen takaamiseksi. Prototyypin tarkoituksena oli tarkastaa

todellisen sensorin toimivuus ja mahdolliset virheet komponenttien arvojen laskuissa. Kuvassa 3.6. on yksi TTY Porin yksikössä tehty sensorialusta.

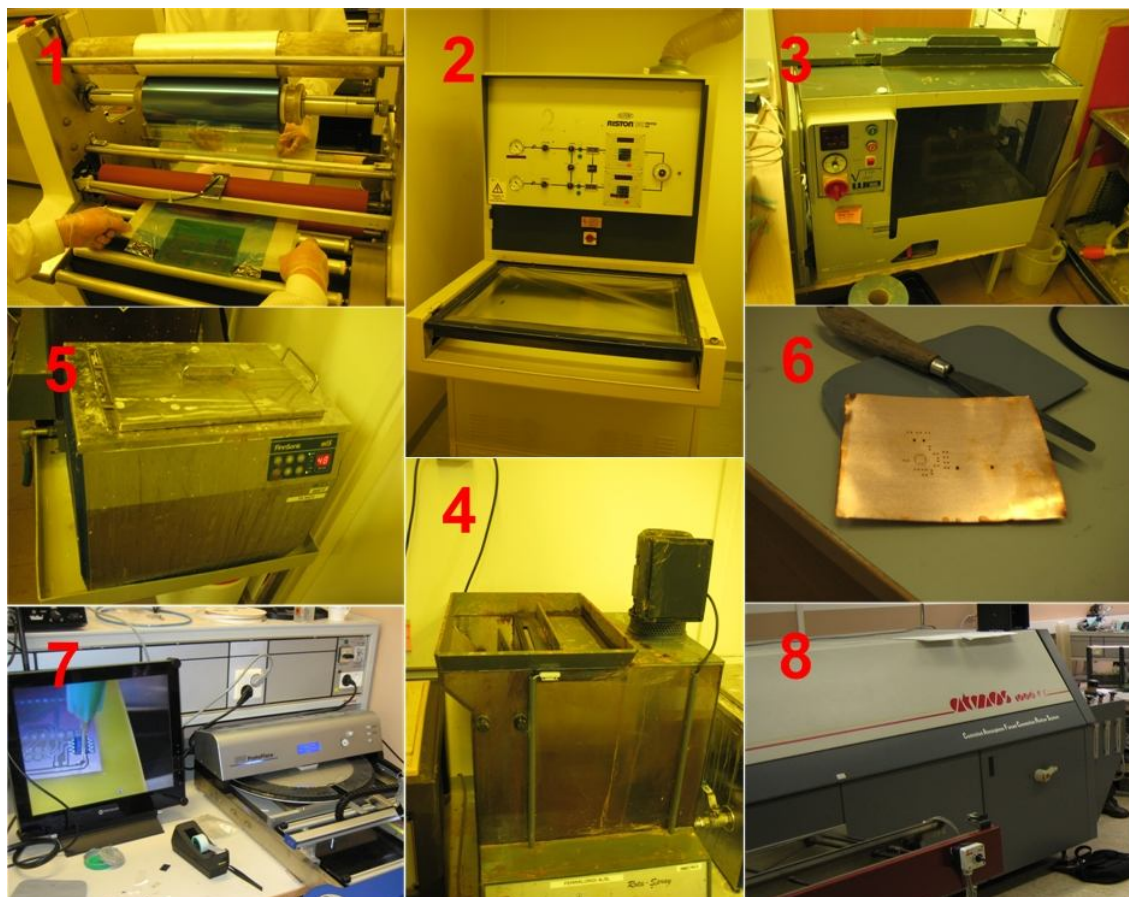


Kuva 3.6. Sensorialustan prototyyppi.

Kuvassa 3.6. esitetyn prototyyppilevyn suunnittelussa oli epähuomiossa piirretty kiteen komponenttikuva peilikuvana. Näin ollen kide juotettiin levyn vastakkaiselle puolelle. Liitteissä 1 ja 2 on esitelty prototyyppilevyn piirikaavio sekä valmistuksessa käytetyt levykuvat ja maski.

Kuten aiemmin oli ennustettu, oli radiopiirin juottamisessa ongelmia. TTY Rauman yksikössä olevien työkalujen avulla levyn tekeminen olisi kestänyt tarpeettoman kauan, joten levyjen valmistus päätettiin suorittaa TTY Porin yksikössä, jossa oli paremmat puitteet piirilevyjen valmistamiseen.

Piirilevyn valmistaminen aloitettiin valotusmaskin luomisella. Käytännössä tämä tarkoitti Eaglella luodun layoutin tulostamista kalvolle. Käytössä olevien tulostimien laatu ei yltänyt tarvittavaan tarkkuuteen, sillä radiopiirin jalkojen väli oli ainoastaan 0.2 mm. Tarkasteltaessa tulosteen laatua mikroskoopilla huomattiin jäljen olevan suttuista. Kuten myöhemmin havaittiin, oli filmikalvon tulostus yksi tärkeimmistä vaiheista prosessissa. Valotuksessa resistin pintaan muodostuu täsmälleen samanlainen kuva kuin kalvossakin on. Näin ollen, jos kalvon kuvassa on roiskeita, muodostuvat samat roiskeet levyn pintaan myös valotusvaiheessa. Tästä johtuen valotusmaskit teetettiin painotuotteisiin erikoistuneessa yrityksessä. Levyjen teossa käytettyjä laitteita ja välineitä on esitetty kuvassa 3.7.



Kuva 3.7. Levyjen teossa käytettyjä laitteita sekä välineitä.

Levyn teko aloitettiin laminoimalla esikäsitellyn kuparilevyn pintaan valoherkkä resisti (kuva 3.7. kohta 1), joka valotettiin teetetyin maskin kanssa UV-valolla (kuva 3.7. kohta 2). Tämän jälkeen levy kehitettiin noin 40 asteisessa natriumkarbonaatissa (kuva 3.7. kohta 3). Tässä vaiheessa resistin alla suojassa on ainoastaan halutut kuparialueet ja muu osa etsattiin pois ferri(III)kloridilla (kuva 3.7. kohta 4). Etsaus-vaiheessa piti olla tarkkana, sillä kuparin syöymistä piti itse tarkkailla kunnes haluttu tulos oli saatu aikaan. Etsauksen jälkeen kuparialueen päällä oleva resisti poistettiin ultraäänipesurissa natriumhydroksidilla (kuva 3.7. kohta 5).

Tässä vaiheessa oli syövytetty haluttu piirikuvio kuparilevyn pintaan. Vielä oli jäljellä komponenttien juottaminen paikoilleen. Juottamista varten tehtiin edellä mainitun prosessin avulla ohuesta kuparilevystä stensiili pastan painamista varten. Pasta painettiin pöytään teipatun levyn päälle kumisen raakkelin avulla. Kuvassa 3.7. kohdassa 6 on esitetty tehty stensiili, raakkeli sekä pastan annostelussa käytetty lasta. Pintaliitoskomponentit asetettiin yksi kerrallaan manipulaattorin (kuva 3.7. kohta 7) avulla, ja saatu kokonaisuus viimeisteltiin uunituksella (kuva 3.7. kohta 8). Loppuja komponentteja varten porattiin reiät pylväsporakoneella ja juottaminen tehtiin kolvilla.

Levyjen valmistaminen kaikessa yksinkertaisuudessaan ei kuitenkaan onnistunut aina ensimmäisellä kerralla, sillä esimerkiksi stensiilin kohdistaminen levyyn tapahtui

silmämääräisesti. Myöskään pöytään teipatun stensiilin poisto levyn päältä ei aina toteutunut halutulla tavalla.

Ensimmäisen prototyypin kokonaisuus oli toimiva ja yksinkertainen. Sen rakenteesta oli vaikea karsia mitään pois, joten seuraavaa levyä varten päätettiin radiomoduuli laittaa samaan kokonaisuuteen. Samalla päätettiin vaihtaa kontrolleri pintaliitos-malliin. Ohjelmakoodia oli kehitetty sensorin ohella, minkä ansiosta sekä muistista että liitännöiden tarpeesta tiedettiin paremmin. Myöhempiä kehitysvaiheita varten lisättiin sensoriin piikkirima, johon mikrokontrollerin käyttämättömät pinnit yhdistettiin. Näin ollen sensoriin voidaan halutessa helposti lisätä uusia ominaisuuksia.

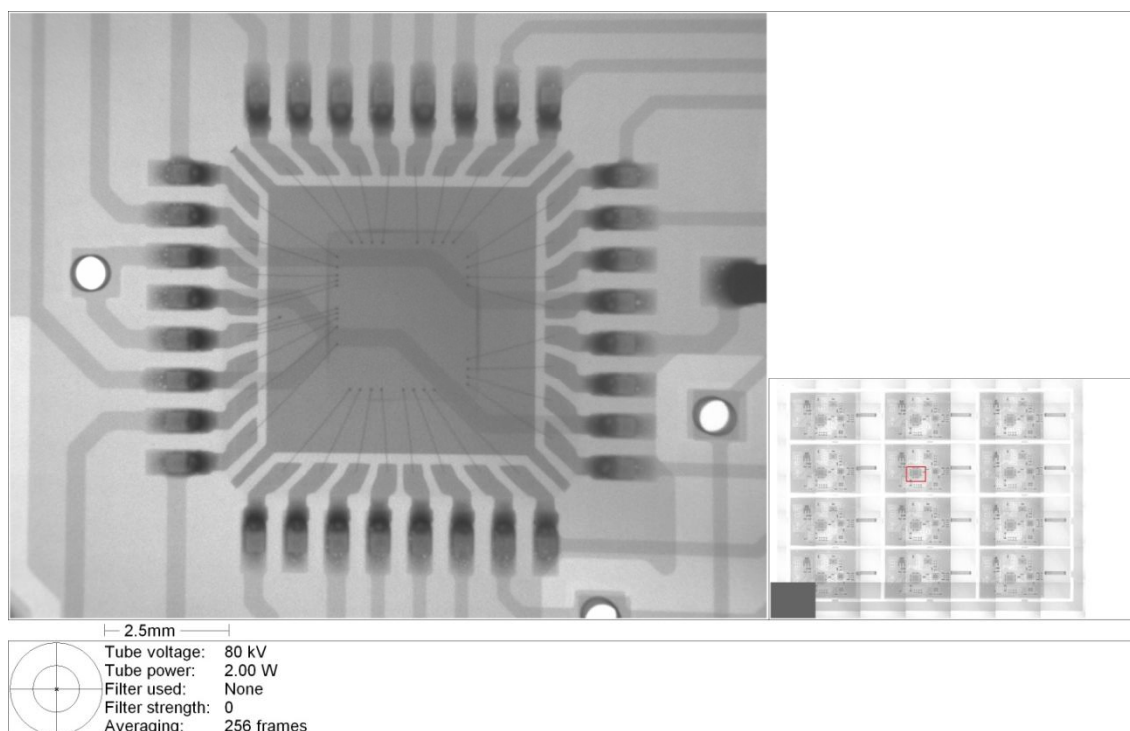
Testien ja valmistuksen yhteydessä esiin tuli joitain suunnitteluvirheitä, kuten aiemmin mainittu komponentin asettelu. Tästä johtuen sensorin layouttia jouduttiin hienosäätämään. Koska tarkoituksena oli rakentaa toimiva verkko, joka sisältää useampia solmuja, ei levyjä ollut järkevää alkaa itse valmistaa aikaa vievän ja vaikean valmistusprosessin takia. Lopullinen versio testattiin toiminnan takaamiseksi, minkä jälkeen levyt ja levyjen kalustus teetettiin. Levyjen valmistuksessa tarvittava stensiili teetettiin tehdyn levykuvan perusteella, ja se toimitettiin TTY Rauman yksikköön. Levyjen valmistusta varten Elprint Oy:llä oli ohjelmisto, johon suunniteltu levy pystyttiin lataamaan ja tilaus tekemään. Sensorisolmujen piirilevyt valmistettiin paneeleina, jotka sisälsivät kukin 12 sensorisolmua. Levyt kalustettiin Raumalla Innova Eleprossa ja kalustukseen päästiin itse osallistumaan. Kuvassa 3.8. on esitetty levyn kalustuksessa käytettyjä laitteita sekä stensiili.



Kuva 3.8. Sensoriverkkoalustan valmistamisessa käytettyjä laitteita sekä stensiili.

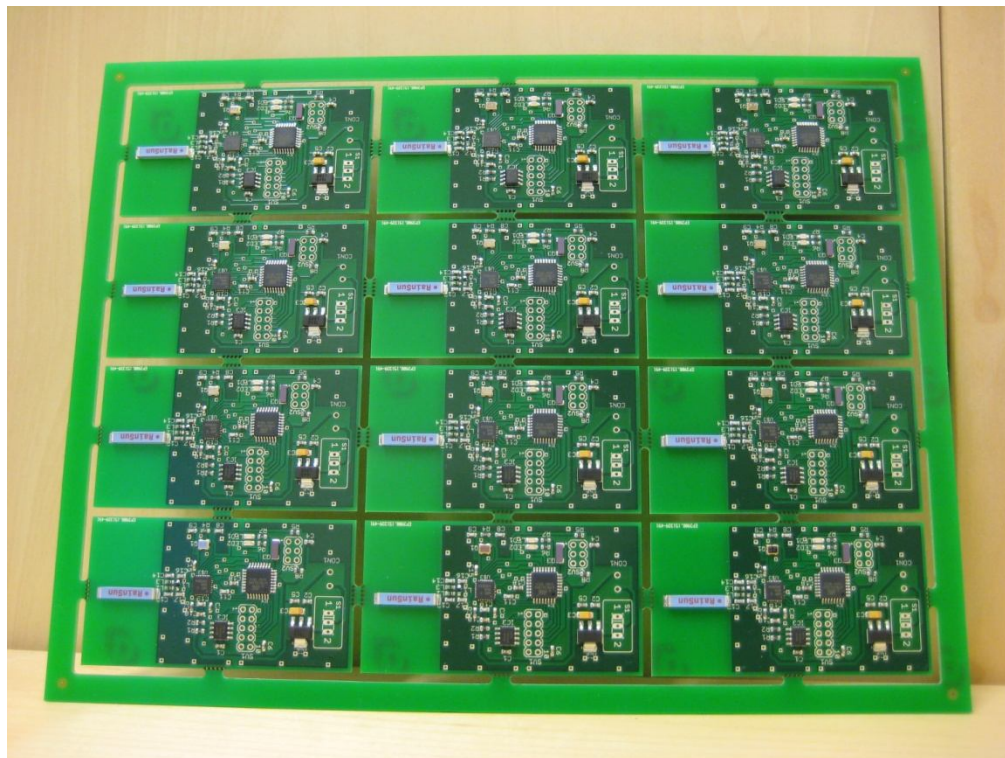
Levyjen kalustamista varten komponenttikirjasto ja muut tarvittavat tiedot ladattiin tietokoneille etukäteen. Kuvassa 3.8. vasemman puolen edustalla olevaa ladontakonetta varten asetettiin nauhassa olevat komponentit keloihin ja loput omiin astioihin. Linjaston ensimmäisenä vaiheena oli pastan paino, jota varten kuvassa 3.8. oikealla esitetty stensiili teetettiin. Pastan painon jälkeen tarkistettiin jokaisen paneelin kohdalla,

osuiko pasta levyllä oleviin kuvioihin. Tässä tapauksessa ensimmäisen yrityksen jälkeen jouduttiin kohdistusta hienosäätämään. Seuraavana vuorossa oli komponenttien ladonta. Ensimmäisen levyn kohdalla komponenttien ladonta ei onnistunut toivotulla tavalla. Jotkin komponentit olivat asettuneet väärinpäin, ja tilanne piti korjata ladontaohjelmaan. Onnistuneen ladonnan jälkeen oli vuorossa paneelin uunitus, ja lopuksi tarkastettiin vielä kalustetun levyn laatu läpivalaisulla. Kuvassa 3.9. näkyy tarkastusvaihetta varten otettu läpivalaisu.



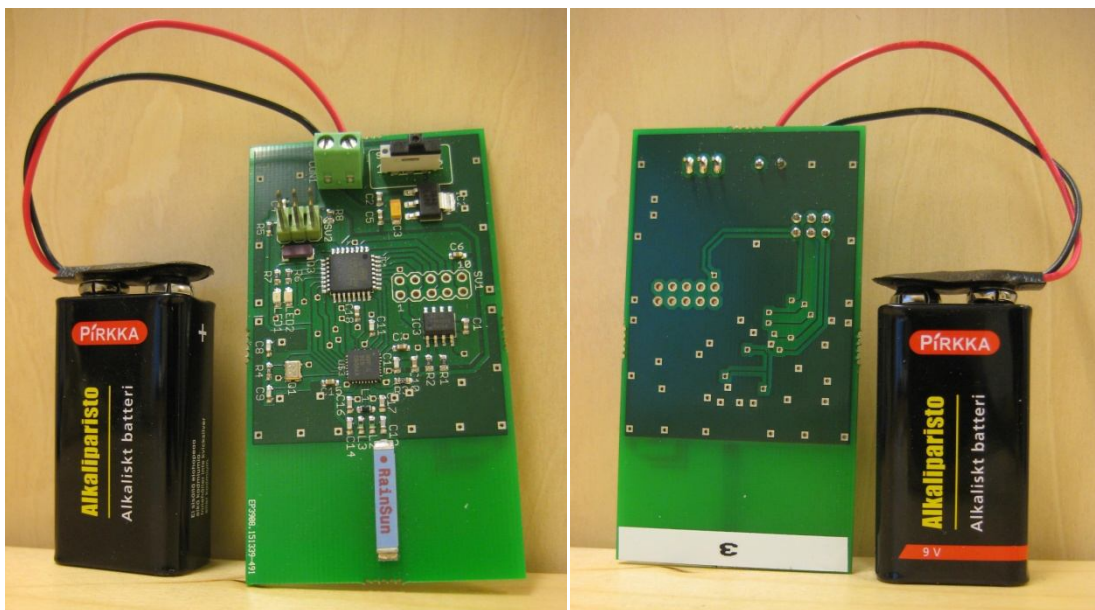
Kuva 3.9. Läpivalaistu nRF905 radiopiiri.

Kuvassa 3.9. näkyvän läpivalaisun tarkoituksena oli tarkistaa, aiheuttiko käytetty uuniprofiili vauriota komponentissa tai ongelmia juottumisessa. Läpivalaisun avulla nähtiin myös mahdolliset oikosulut jalkojen tai vetojen välillä. Kuvassa näkyy nRF905-radiopiiri, ja tummemmalla olevat alueet ovat sen 32 pinniä levyyn juotettuna. Kuvassa 3.10. on esitetty valmis paneeli.



Kuva 3.10. Kalustettu sensoripaneeli.

Teetetyissä sensorialustoissa ei kalustuksen yhteydessä juotettu läpilotettavia komponentteja lainkaan, kuten kuvasta 3.10. nähdään. Sensorisolmut oli hyvä pitää kiinni paneeleissa jo pelkästään paremman säilytyksen takia. Jokaisen sensorisolmun viimeistely olisi myös vienyt paljon aikaa. Käyttöön otettaessa tarvittavat sensorisolmut leikattiin irti paneelista ja läpilotettavia komponentteja juotettiin tarpeen mukaan TTY Rauman tutkimusyksikössä. Valmiiden sensorisolmujen kohdalla tehtiin vielä mittauksia ja testejä ohjelmakoodin avulla, jotta niiden toimivuudesta voitiin olla varmoja. Virtalähteenä sensoreissa käytettiin paristoja. Kuvassa 3.11. on esitetty yksittäinen sensorialusta läpilotettujen komponenttien kanssa.



Kuva 3.11. Lopullinen versio sensorista.

Kuvassa 3.11. näkyy lopullinen sensorisolmu edestä ja takaa. Kyseiseen alustaan ei vielä tässä vaiheessa juotettu ylimääräistä piikkirimaa. Jokainen alusta numeroitiin, jotta ne erotettaisiin toisistaan.

4 SENSORIVERKON TOIMINTA

Sensoriverkon toiminnan toteutus on jatkuva prosessi. Tarpeiden ja olosuhteiden muuttuessa muuttuvat myös vaatimukset. Perusrakenteiden ja toimintojen luominen helpottavat huomattavasti verkon toimintojen lisäämistä, muuttamista sekä hienosäätämistä. Ohjelmakoodin luomista varten tutustuttiin käytettyjen mikropiirien datalehtiin ja selattiin Internetissä olevia esimerkkikoodeja, mikäli niitä oli tarjolla. Työn aikana tulleiden ongelmien ratkaisemisessa saatiin apua myös muilta TTY Rauman tutkimusyksikössä työskenteleviltä henkilöiltä.

Kuten aiemmin mainittiin, sensoriverkkoa varten tehtiin vain yksi yleiskattava ohjelmakoodi. Muuttamalla laitetyyppiä muuttuu solmun toimintatapa. Saman ohjelmakoodin käyttöä voi perustella jo pelkästään verkon joustavuuden kannalta. Käytännössä suurin osa tehdystä ohjelmakoodista sisältää protokollan vaatimat perustoiminnot ja eri solmutyyppien erikoistoiminnot vaativat vain vähän tilaa. KILAVI:n määrittämistä laitetyypeistä toteutettiin ainoastaan kaksisuuntaisiin solmuihin kuuluvien anturi- ja välittäjäsolmujen toimintoja. Yksisuuntaista solmua varten voidaan helposti karsia ohjelmakoodista kokonaisuuksia vastaamaan sen tarpeita. Isäntäsolmun vaatiman logiikan toteutus ei kuulunut tämän työn kokonaisuuteen.

Ohjelmakoodin kokonaisuus on jaettu pienempiin osiin, lähdetiedostoihin, jotka kääntäjä kokoaa ja linkittää lopuksi yhdeksi hexa-tiedostoiksi. Jokainen lähdetiedosto on oma toiminnallinen kokonaisuus, joka on helppo liittää perusrunkoon. Erillisten kokonaisuuksien luominen helpotti laitteiston testausta sekä tarvittaessa ohjelmakoodin muokkausta.

Sensoriverkon ohjelmiston rakenne voidaan jakaa yksittäisten solmujen vaatimiin toimintoihin sekä koko verkon kattaviin protokollan mukaisiin toimintoihin. Näiden kokonaisuuksien sisältöä on selvitetty seuraavaksi.

4.1 Verkon laitteet

Ennen kuin yksittäinen sensorisolmu voi toimia osana verkkoa, pitää sille luoda perustoiminnallisuudet. Käytettävät mikropiirit pitää alustaa ja protokollan toimintaa varten luoda tarvittavat kehysrakenteet. Ensimmäistä testiversiota varten eri sensoriverkon toiminnot olivat yhdessä aliohjelmassa. Tässä vaiheessa liikennöinti ei vielä ollut KILAVI-protokollan mukaista, mutta tehty koodi auttoi hahmottamaan tarvittavia osakokonaisuuksia, joihin ohjelmakoodi myöhemmin jaettiin. Tehdyllä ohjelmakoodilla saatiin myös testattua alustan erillisten osioiden toiminta.

4.1.1 Laitekohtaiset tiedot ja toiminnot

Verkon toimijoita ovat yksittäiset sensorisolmut. KILAVI:n mukaan jokaisella sensorilla on yksilöllisiä tietoja, joiden mukaan ne toimivat verkossa. Näiden tietojen voidaan katsoa muodostavan sensorin identiteetin. Sensorin identiteettiä varten luotiin oma aliohjelma, jonka tarkoituksena on ylläpitää voimassaolevia tietoja. Näihin kuuluvat esimerkiksi laitetunnus ja reittitieto. Kaikki identiteettiin liittyvä tieto haetaan ja tallennetaan kyseisen aliohjelman muuttujiin. Tässä kehitysvaiheessa tiedot ovat valmiiksi kirjattuna, mutta myöhemmässä vaiheessa ne saadaan isäntälaitteelta rekisteröinnin yhteydessä. Osa tiedoista, kuten laitetyyppi, määräytyy kuitenkin laitteen rakenteen mukaan, johon isäntälaitte ei pysty vaikuttamaan.

KILAVI-verkkoon voi liittää monentyypisiä laitteita. Niiden toimintoihin voi kuulua esimerkiksi valon kirkkauden säätö tai oven lukitseminen. Laitteen tarkoitus määritellään laitetunnuksen mukaan, joka on osa sensorin identiteettiä. Tarkoituksen täyttämistä varten laitteet tarvitsevat erilaisia toimintoja tai niiden yhdistelmiä. Näitä toimintoja varten luotujen aliohjelmien kokonaisuuksia kutsutaan erikoistoinnoiksi.

Tässä työssä esimerkkinä toteutettu anturisolmu mittaa lämpötilaa kymmenen minuutin välein ja on loput ajasta vähävirtaisessa unitilassa. Käytettävä lämpötila-anturi pystyy liikennöimään 400 kHz:n taajuudella, mutta mikrokontrollerin osalta maksiminopeus virheettömän tiedon varmistamiseksi on kymmenesosa systeemikellon taajuudesta eli 100 kHz. Lämpötilan mittaauksessa käytetään hyväksi lämpötila-anturissa olevaa *Software Por* -ominaisuutta. Kyseisellä komennolla anturi herää, mittaa ja muuntaa yhden lämpötila-arvon, minkä jälkeen sammuttaa itsensä. Tallennettu arvo voidaan tämän jälkeen lukea rekisteristä. Datalehden mukaan anturi tarvitsee mitatun arvon muuntamiseen maksimissaan 25 ms, joka on yli puolet suurempi aika, joka tarvitaan sensorin muiden toimintojen suorittamiseen. Näin ollen lämpötilan mittaaminen päätettiin tehdä unitilan aikana. Ajan mittaamisessa käytetään ulkoista 32,768 kHz:n kidettä. [21; 22]

Pääsääntöisesti erikoistoinintoja KILAVI-verkossa suorittavat muut paitsi välittäjäsolmut. Nimensä mukaisesti niiden toimintoihin kuuluvat ainoastaan sanomien vastaanotto, käsittely ja lähettäminen.

4.1.2 Sanomarakenne

KILAVI-verkossa tapahtuva liikennöinti käydään ennalta määritetyn kehysrakenteen mukaan. Kuvassa 2.4. esiintyvien KILAVIa- ja KILAVIb-pakettien sisältämät tahdistusbitit sekä tarkistussumma muodostetaan automaattisesti nRF905-radiopiirin toimesta lähetyksen yhteydessä. Tahdistuksessa käytettävien bittien määrään ei voida vaikuttaa, mutta käytettävän CRC (*Cyclic Redundancy Check*) -kentän pituudeksi voidaan valita joko 8-bittiä tai 16-bittiä. KILAVI:n määritelmien mukaan valitaan tarkistussumman pituudeksi 16-bittiä. [17; 24]

Tahdistusta seuraavat neljän tavun pituiset lähetys- ja vastaanotto-osoitteet. Osoitteet muodostetaan yksilöllisestä osoitteesta (2-tavua) sekä laitetyypistä (2-tavua).

Laitetyyppi kertoo sensorin tarkoituksen. Yksi esimerkki laitetypistä on lämpömittari. Radiopiirin ominaisuuksiin kuuluvat tahdistuksen ja tarkistussumman luomisen lisäksi automaattinen lähetysosoitteen lisääminen kehysrakenteeseen, jota se käyttää yhdessä *address match* -ominaisuuden kanssa hylätäkseen sille kuulumattomia viestejä. Tämä aiheuttaa pienen ongelman KILAVI:n ja nRF905-radiopiirin välillä. KILAVI:n määritelmien mukaan verkon isäntälaitteen on pystyttävä lähettämään samanaikaisesti tietoa kaikille verkon laitteille yhteislähetysten muodossa. Käytettävään radiopiiriin voidaan kuitenkin ohjelmoida vain yksi yksilöllinen vastaanotto-osoite. *Address match* -ominaisuus hylkää tulevan viestin, mikäli osoite ei ole oikea. Tästä johtuen kaikkiin sensorisolmujen radiopiireihin ohjelmoitiin sama vastaanotto-osoite. Kyseinen vastaanotto-osoite asetetaan radiopiireihin vakiona muuttujan sijaan, ja sitä ei kuljeteta KILAVI-kehysten sisällä. Erillisen kehysrakenteeseen lisättävän vastaanotto-osoitteen perusteella mikrokontrolleri päättää sanoman hyväksymisestä ja hylkäämisestä radiopiirin sijaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että radiopiiri viipyy vastaanottotilassa hieman pidempään kuin *address match* -ominaisuutta käytettäessä, koska lähetettävän tiedon määrä on suurempi ja sensorisolmun on vastaanotettava koko sanoma. Tämä ei ole ongelma sillä *address match* on nRF905-radiopiirin ominaisuus, jota ei ole välttämättä muissa radiopiireissä.

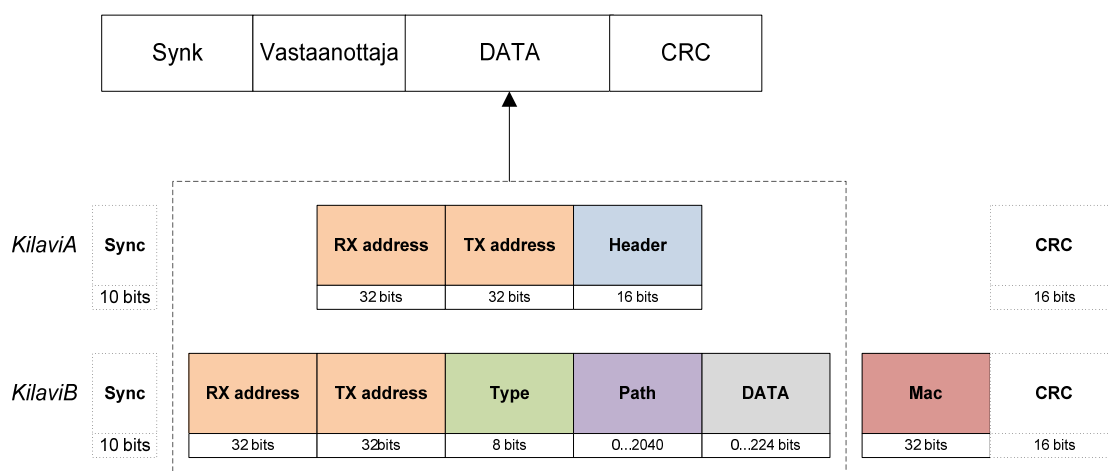
KILAVIa-kehysten kaksitavuisen otsikkokentän muodostaa sanomatyypistä (1-bitti), sanomamuoto (4-bittiä), datakentän pituus (8-bittiä) sekä reitin pituus (3-bittiä). Sanomatyypistä käy ilmi onko kyseessä kontrolli- vai hyötykuorman sanoma. Sanomamuodosta käy ilmi käytettävän sanoman rakenne, tarkoitus ja turvallisuustaso. Datakentän pituus kertoo KILAVIb-sanoman kuljettaman datan suuruuden. Reitin pituuden perusteella tiedetään välittävien solmujen määrä. KILAVIb-kehysten tyyppikenttä muodostuu sanomatyypistä (1-bitti) sekä datatyypistä (7-bittiä). Yksi esimerkki datatyypistä on solmun lähettämä kuittaus merkiksi onnistuneesta avaintenvaihdosta. Radiopiirin ja mikrokontrollerin välinen tiedonsiirto tapahtuu SPI-väylän kautta, missä tietoa siirretään tavu kerrallaan. Kehysten muodostaminen on sitä helpompaa ja tehokkaampaa mitä vähemmän niiden sisältöä pitää käsitellä ennen siirtoa.

KILAVIb-kehyksessä käytetään 32-bittistä MAC (*Message Authentication Code*) -tunnistusta. Tätä ominaisuutta ei kuitenkaan vielä tämän työn aikana toteutettu. Tietoturvallisuus on kuitenkin tärkeä osa protokollaa, varsinkin sensoriverkoissa, jossa jokainen solmu on mahdollinen hyökkäyksen kohde. Tämän lisäksi verkko on mahdollisesti levittänyt laajalle alueelle, mikä edelleen helpottaa tietomurtoa [28]. Reittikenttä ja datakenttä sisältävät nimensä mukaisesti ennalta määritetyn reitin sanoman kohteeseen sekä hyötykuorman.

Hyötykuorman maksimipituudeksi on KILAVI:ssa määritelty 255 tavua. Käytettäessä nRF905-radiopiiriä voidaan tietoa siirtää maksimissaan 32 tavua kerrallaan. Synkronointia ja CRC-kenttää lukuun ottamatta kyseiseen tilaan pitää mahtua kaikki KILAVIb-sanoman tiedot. Tässä kehitysvaiheessa MAC-kenttä ei ole vielä käytössä, joten KILAVIb-sanoman hyötykuorman maksimikoko on 27 tavua

reittikentän ollessa tyhjä. Tämä ei kuitenkaan muodostu ongelmaksi, mikäli KILAVI-verkkoa käytetään suunnitellun mukaisesti ainoastaan lyhyiden ohjaus-sanomien lähettämiseen. [17; 24]

Käytettäessä nRF905-radiopiiriä lisätään muodostetut KILAVI-kehukset radiopiirin muodostaman kehysten hyötykuorma-kenttään. Koska tahdistus sekä tarkistussumma muodostetaan radiopiirin toimesta, jätetään ne muodostettavista KILAVI-kehyksistä pois. Kyseiset ominaisuudet voidaan lisätä ohjelmakoodiin myöhemmässä vaiheessa, mikäli tarve sitä vaatii. Kuvassa 4.2. on esitetty tässä kehitysvaiheessa toteutetut KILAVI-sanomien ominaisuudet sekä niiden sijoittuminen nRF905-radiopiirin kehysrakenteeseen.



Kuva 4.2. KILAVI-protokollan sanomamalli sekä nRF905-radiopiirin TX-kehysrakente.

Kuvassa 4.2. katkoviivalla rajattu alue sisältää työn aikana toteutetut ominaisuudet, jotka kirjoitetaan sanomia lähetettäessä radiopiirin hyötykuorma-kenttään. KILAVI-kehysten sisältämää vastaanottaja-kenttää käytetään tarkistamaan, onko sanoma tarkoitettu sensorisolmulle. Kuten kuvasta nähdään, langattoman rajapinnan yli lähetettävä tieto on 32-bittia suurempi kuin KILAVI-kehys johtuen ylimääräisestä vastaanottaja-kentästä.

4.1.3 Lähetys ja vastaanotto

Ensimmäisiä vaiheita sensorisolmun toiminnallisuuden luomisessa olivat lähetys ja vastaanotto. Onnistuneen lähetys- ja vastaanottotilanteen luomisella varmistettiin tehdyn alustan toimivuus radiopiirin osalta. Kuten aiemmin mainittiin, nRF905 on pyritty tekemään mahdollisimman helppokäyttöiseksi. Radiopiiri hoitaa suurimman osan radioliikennöinnin vaatimasta logiikasta. Lähetystä varten nRF905-radiopiirissä on käytössä *ShockBurst™ TX* ja vastaanottoa varten *ShockBurst™ RX*. Ennen liikennöinnin aloittamista pitää radiopiirin rekisterit kuitenkin alustaa KILAVI:n määritelmien mukaisiksi.

Radiopiirin kanssa kommunikointia varten muutettiin mikrokontrollerin SPI-väylä *master mode* -tilaan. Kyseisessä tilassa väylän toiminta datalehden mukaan taataan

ainoastaan nopeuden ollessa maksimissaan puolet systeemikellon taajuudesta. Näin ollen SPI-väylän nopeudeksi asetettiin 500 kHz. Radiopiirin SPI-rajapinta sisältää viisi rekisteriä: *Status-*, *RF configuration-*, *TX address-*, *TX payload-*, sekä *RX payload-* rekisterit. Kommunikointi rekistereiden kanssa aloitetaan CSN (Chip Select Not) -signaalin tason siirtämisellä ylhäältä alas, jolloin liitäntä odottaa käskyä. Annettava käsky määrää toimenpiteen ja sen kohteen. SPI-väylään kirjoitetaan tavu kerrallaan ja kirjoittaminen aloitetaan ensimmäisestä bitistä. Sama pätee myös rekisteristä luettaessa. CSN-signaalin tilaa ei tarvitse muuttaa jokaisen tavun kohdalla, vaan tavujen kirjoitus rekisteriin jatkuu kunnes CSN palautetaan ylös. Muutettaessa *RF configuration* -rekisterin sisältöä, pitää tehdyt muutokset suorittaa neljään kertaan. Kyseinen ohjesääntö on saatu valmistajalta ja sillä varmistetaan, että tehdyt muutokset onnistuvat. [24; 27]

Lähetystä varten kirjoitetaan haluttu tieto lähetysohjeeseen (*TX-payload*) sekä muutetaan radiopiiri ohjaussignaalien avulla *ShockBurst™ TX* -tilaan. Radiopiiri hoitaa tämän jälkeen automaattisesti lähetyksen tahdistuksen sekä tarkistussumman laskemisen. Lähetyksen loppumisesta kertoo DR (Data Ready) -signaali.

Viestien vastaanottoa varten radiopiiri siirretään ohjaussignaalien avulla *ShockBurst™ RX* -tilaan. Käytetyllä taajuudella tapahtuvasta liikenteestä radiopiiri ilmoittaa CD (Carrier Detect) -signaalilla. Radiopiiri hylkää tulevan viestin, mikäli vastaanottajan osoite ei vastaa sen omaa. Saapunut data on luettavissa vasta, kun nRF905 on todennut viestin oikeellisuuden CRC:n avulla. Tällöin DR-signaali muuttuu aktiiviseksi. Tarkempi selostus KILAVI:n mukaisesta liikennöinnistä esitetään myöhemmin.

4.2 Protokollan toiminnallisuus

Yksittäisten sensorisolmujen välinen kommunikointi vaatii protokollan toiminnallisuuksien luomista. Kaikkia KILAVI:n määrittämiä verkon toimintoja ei tämän työn aikana tehty, eikä se ollut tarkoituksaan. Työ keskittyi luomaan KILAVI-verkon perusliikennöinnin tarpeita, joihin kuuluvat muun muassa siirtotien varaus, virhetilanteista toipuminen ja tiedonsiirron varmistus. Näiden eri toimintojen toteutuksesta on kerrottu seuraavaksi.

4.2.1 Virheistä toipuminen

Ennen liikennöintisääntöjen luomista pitää olla tietoinen niihin vaikuttavista tekijöistä. Yksi tärkeä osa liikennöintiä on virheistä toipuminen. KILAVI:ssa virheellisten sanomien tarkistamisesta vastaa laskettu CRC-summa, jonka nRF905-radiopiiri hoitaa automaattisesti. CRC:n pääperiaatteena on laskea tarkistussumma tietyn algoritmin mukaan lähetettävästä sanomasta, ja mikäli vastaanottaja päätyy eri tulokseen, on sanoma virheellinen. KILAVI:n mukaan korruptoituneen sanoman saapuessa pyydetään sanoman uudelleenlähetyksestä NACK (*Not Acknowledged*) -sanoman muodossa. Tämä ratkaisu saattaa toimia kuitenkin vain joissain tapauksissa. Mikäli vastaanotettu sanoma

on korruptoitunut, ei sen perusteella pystytä sanomaan mikä sanoman on lähettänyt, eikä näin ollen uudelleenlähetys pyyntöä voida lähettää. Näin voi käydä esimerkiksi tilanteessa, jossa välittäjäsolmun kuuluvuusalueella on useampi anturisolmu. Sanoman lähettäjältä ei voida myöskään olla täysin varmoja edes siinä tapauksessa, että sensorisolmu odottaa sanomaa, koska jokin muu verkon solmu saattaa päästä liikennöinnin väliin. Virheellisistä sanomista johtuvat toimenpiteet täytyy toimia kaikissa tilanteissa, minkä takia NACK-sanoma päätettiin jättää pois tämän kehitysvaiheen ohjelmakoodista. Näin ollen tilalle piti luoda vaihtoehtoinen ratkaisu.

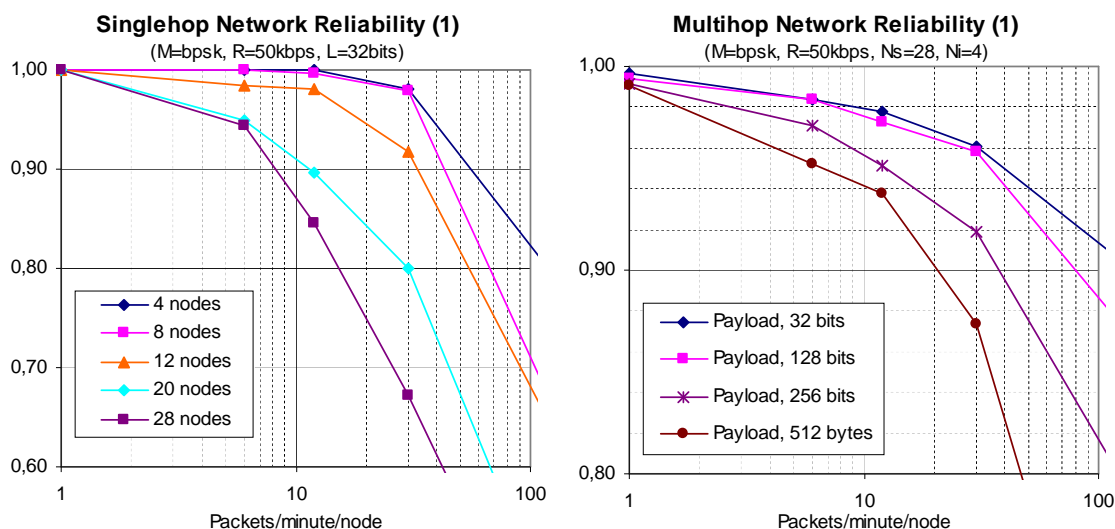
Jotta virheistä voidaan toipua parhaalla mahdollisella tavalla, täytyy ongelmatilanteita aiheuttavat syyt selvittää sekä arvioida niiden todennäköisyyttä. Mitä todennäköisempi tapahtuma on, sitä paremmin siihen pitää varautua. Kaikkia verkon toiminnassa tapahtuvia virheitä ei tietenkään voida ennakoida, mutta jatkuvan kehityksen avulla toiminnan luotettavuutta saadaan parannettua.

KILAVI:n mukaisen toiminnan luotettavuudesta on aikaisemmin tehty tutkimusta, joten tarkempaa analyysiä ei tämän työn kohdalla tarvinnut tehdä. Tutkimuksen luotettavuusarvot on saatu simulaatioiden pohjalta käyttäen taulukossa 4.1. käytettyjä parametreja.

Taulukko 4.1. KILAVI-verkon luotettavuus simulaatioiden parametreja [29].

PARAMETERS	VALUES
Network type	Multi- and single-hop
Data payload size	0, 4, 8, 16, 32, 64 bytes
Modulation method	BPSK, FSK (Frequency Shift Keying), GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)
Data transmission frequency	1, 6, 12, 30, 60, 120 pkts/min
Data rate	10, 25, 50, 100, 200 kbps
Hop count	1, 2, 3, 4, 5
Network size	5 to 129 nodes
Traffic type	Poisson
Carrier frequency	433MHz
Transmission power	1mW (0dBm)

Kuvassa 4.3. esitetään simulaatioiden pohjalta saatuja luotettavuusarvoja eri verkkorakenteille. Luotettavuuden mittana on verkossa lähetettyjen sanomien perille pääsy ja esimerkkitilanteina *point-to-point* -verkko sekä monihyppy-verkko.



Kuva 4.3. Sensoriverkko luotettavuus: solmujen määrän vaikutus yhden hypyn verkossa (vasen) ja datakentän pituuden vaikutus monihyppyverkossa (oikea) [29].

Väitöskirjassaan Soini [13, s37] pohtii simulaatioiden merkitystä. Hän toteaa esimerkin avulla, että jos lähetystiheys on vähemmän kuin kuusi pakettia minuutissa, pakettien lähetyksessä saavutetaan 95%:n luotettavuus vaikka käytössä on 28 sensorisolmua. Soini jatkaa todeten, että tämän tason luotettavuus pakettien lähetyksessä on riittävä monissa talotehtävissä, mutta joissain talokontrolli tai hälytys tehtävissä takuuvarma lähetys on elintärkeää. Soini ehdottaa KILAVI:n tapauksessa asian ratkaisuksi uudelleenlähetyksiä ja kuittausten (ACK, *Acknowledgement*) käyttämistä. [13]

KILAVI-verkon tapauksessa solmujen määrä on vähäinen kuten myös lähetettävien pakettien. Tämän työn kohdalla kuvan 4.3. perusteella voidaan KILAVI:n mukaisen verkon toiminnan todeta olevan luotettavaa, minkä takia tarvittavien varatoimenpiteiden ei tarvitse olla kovinkaan monimutkaisia. Eri virhetilanteet saattavat tarvita eri toimenpiteitä, minkä takia verkon toimintaa häiritsevien tekijöiden syytä oli syytä pohtia tarkemmin. Asiaa alettiin selvittää neljältä kantilta: laitteiston, ohjelmakoodin, siirtotien sekä muiden tekijöiden osalta.

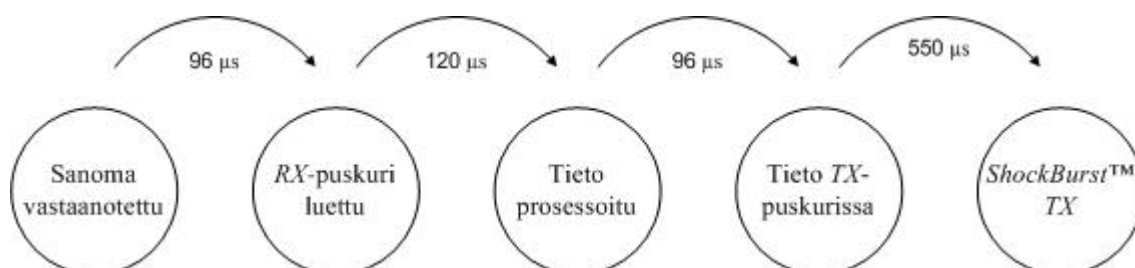
Laiterikosta aiheutuvat häiriöt verkon toiminnalle ovat arvaamattomia. Hyvällä laitesuunnittelulla mahdollisia rikkoontumisia saadaan vähennettyä, mutta ei täysin poistettua. KILAVI:n määrittelyssä verkon rakenteen muutokset ovat aina odotettavissa. Esimerkiksi välittäjäsolmun paristojen ollessa vähissä, lähettää se isäntälaitteelle sanoman välitysominaisuuden muuttamisesta anturisolmuksi. Isäntälaitte tämän jälkeen päivittää verkon rakenteen. Rekisteröinnin yhteydessä anturisolmuille määritellään KILAVI:n mukaisesti ainoastaan paras mahdollinen reitti isäntälaitteelle. Laiterikon sattuessa välittävälle solmulle, jää anturisolmu näin ollen verkon ulkopuolelle. Isäntälaitte päivittää verkon rakennetta tietyin aikaväleihin, mutta joissain tapauksissa sanoman lähettämistä ei voida odottaa. Ongelma tulee esille myös aiemmin mainitussa tilanteessa, jossa verkon rakennetta päivitetään. Anturisolmut heräävät ainoastaan tietyin aikaväleihin aktiivitilaan. Mikäli välittävä solmu on lepotilan aikana muuttunut

anturisolmuksi, ei reittiä isäntälaitteelle enää ole. Ratkaisuna ongelmaan on joko vaihtoehtoinen reitti tai uuden reitin pyytäminen yleislähetyksellä rekisteröinnin tapaan. Näistä ensimmäinen on tässä kehitysvaiheessa helpompi toteuttaa, sillä kuten aiemmin mainittiin, annetaan tarvittavat reittitiedot tällä hetkellä suoraan sensorisolmuille.

Ohjelmakoodista aiheutuvat pahimmat ongelmat tulevat yleensä nopeasti esille. Pitämällä ohjelmakoodi mahdollisimman yksinkertaisena sekä suorittamalla testauksia ja tarkastuksia, saadaan virheiden määrää vähennettyä. KILAVI-verkon toiminnot ovat yksinkertaisia, minkä takia odottamattomiin tilanteisiin on helppo varautua. Ohjelman kaatumista varten voidaan lisätä aikaan perustuva laitteen uudelleenkäynnistys.

Siirtotiellä ongelmia saattavat aiheuttaa muun muassa rakenteista johtuvat signaalien heijastumat, sähkölaitteet ja muu radioliikenne. Hyvä verkon laitteiden sijoittelu ja ympäristön tunteminen auttavat ongelmien vähentämisessä. Samalla lähetystaajuudella käytävän liikennöinnin voidaan katsoa olevan merkittävä tekijä verkon luotettavuudessa. Kuvan 4.3. perusteella päätettiin ongelman ratkaisuksi riittävän sanomien uudelleenlähetyksellä satunnaisella viiveellä. Satunnaisen viiveen avulla pyritään estämään uusi törmäys samojen sensorisolmujen välillä. Aikaan perustuvan uudelleenlähetyksen avulla verkon luotettavuutta saadaan parannettua, eikä aiemmin hylättyä NACK-sanomaa enää tarvita. Aikaan perustuvassa uudelleenlähetyksessä pitää olla tietoinen eri toimenpiteisiin kuluva ajasta. Viiveen pitää olla suurempi kuin vastauksen lähettämiseen kuluva aika.

KILAVI-verkossa lähetettävien ja vastaanotettavien sanomien pituudesta pyritään aina olemaan tietoisia. Käytettävän radiomoduulin ja mikrokontrollerin perusteella tiedetään myös liikennöintiä nopeus ja muiden toimintojen viemä aika, kuten SPI-liikennöinti. Näiden tietojen perusteella pystytään arvioimaan aika, mihin mennessä lähetettyyn sanomaan pitäisi saada vastaus. Kuvassa 4.4. on esitetty tapahtumaketju, joka seuraa viestin vastaanottoa sekä karkeat arviot tapahtumien kestosta. Esimerkkitapauksena on käytetty KILAVIa-sanoman vastaanottamista. Arviot ajankulusta on tehty datalehdistä saatujen tietojen perusteella sekä ohjelmakoodin simuloimisella. Myöhemmin tehtävissä mittauksissa saadaan parempi kuva ajan kulusta.



Kuva 4.4. Vastaanottoa seuraavat toiminnot sekä arviot niiden suorittamiseen kuluva ajasta.

Lähetetty sanoma on luettavissa vastaanottopäässä lähestulkoon samalla hetkellä kun lähetys päättyy. Ensimmäisessä vaiheessa saapunut sanoma luetaan SPI-väylän kautta. KILAVIa-sanoman tapauksessa tietoa luetaan kuusi tavua, mihin 500 kHz:n väylänopeudella kuluu aikaa noin 96 μ s. Luettu tieto prosessoidaan tämän jälkeen.

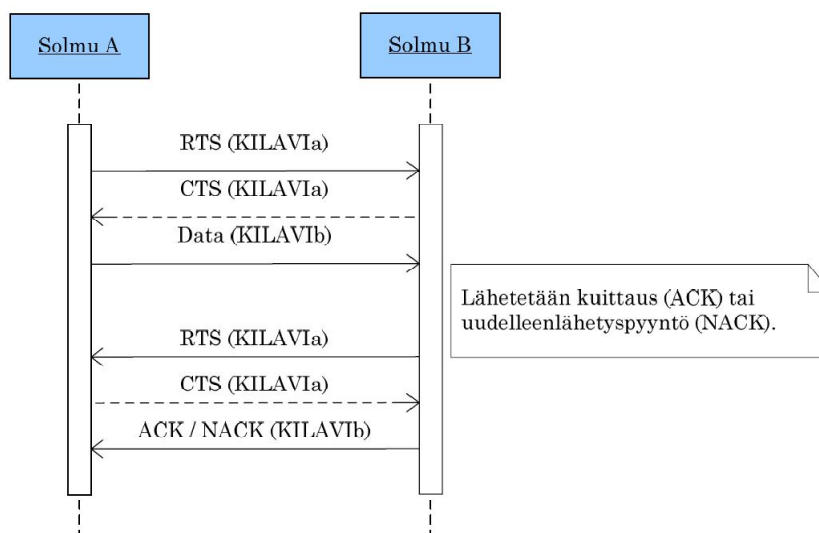
Systeemikellon taajuuden ollessa 1 MHz arvioitiin simulaation avulla mikrokontrollerin tarvitsevan noin 120 μ s aikaa SPI-väylän luku- ja kirjoitusvaiheiden välillä. Tämän jälkeen kirjoitetaan KILAVIa-sanoma SPI-väylän kautta lähetyspuskuriin ja siirrytään *ShockBurst™ TX -tilaan*, joka kestää noin 550 μ s. Näin vastaus lähetettyyn sanomaan voi aikaisintaan tulla 862 μ s jälkeen. KILAVIa-paketti tulisi näin ollen lähettää kuvatus esimerkin perusteella uudelleen aikaisintaan silloin, jos vastausta ei kuulu 1 ms aikana. Samalla perusteella voidaan arvioida muuhun liikennöintiin kuluva aikaa. Mikäli verkossa tarvitaan välittäjäsolmuja tiedonsiirrossa, lisääntyy lähetettyjen hyötykuormasanomien määrä kuten myös yhteentörmäysten todennäköisyys. Kyseinen esimerkki toimii ajatusleikkinä viiveiden laskemisessa kyseisillä komponenteilla. Tuloksena ei saada tarkkaa lukua vaan suuruusluokka, joka tässä tapauksessa on millisekunnin luokkaa. Tätä tietoa voidaan käyttää hyväksi pohdittaessa eri sensorisolmujen uudelleenlähetystarpeita. Joidenkin solmujen lähettämä tieto voi olla tärkeämpää saada nopeasti perille kuin toisten.

Muita tekijöitä verkon toiminnan vikatilanteisiin voivat olla esimerkiksi tahallinen sabotaasi tai tiedon kaappaus. Näihin tilanteisiin voidaan varautua tietoturvatoinenpiteillä. Niiden kehittäminen ei kuitenkaan vielä ole ajankohtaista.

Tämän hetkisellem verkon toiminnalle katsottiin riittävän aikaan perustuva uudelleenlähetys sekä laiterikon varalle vaihtoehtoinen reitti. Laiterikko todetaan, mikäli vastausta lähetettyyn sanomaan ei saada kolmannen uudelleenlähetysten jälkeen. Tämä ei tietenkään päde anturisolmujen tapauksessa, jotka viettävät suuren osan eliniästään lepotilassa ja näin ollen tavoittamattomissa. Anturisolmujen tapauksessa isäntälaitte tietää, milloin niiden on tarkoitus herätä unitilasta. Mikäli anturisolmu ei sovittuna aikana ilmoita itsestään, tiedetään jonkin olevan vialla.

4.2.2 Liikennöinti

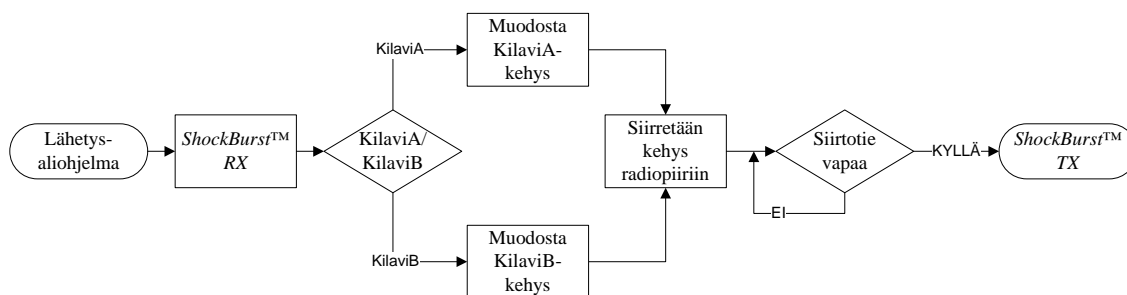
Ennen varsinaisen hyötytiedon lähettämistä varataan siirtotie kommunikointia varten. KILAVI:ssa tämä tapahtuu CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) -siirtotienvarausmenetelmällä. CSMA-CA-periaatteen mukaan ennen siirtotien varaavan sanoman lähettämistä kuunnellaan, onko käytetyllä kanavalla liikennettä. Siirtotie varataan RTS (*Request To Send*) -kontrollisanomalla ja siihen saadaan vastaukseksi joko lähetyslupaa merkitsevä CTS (*Clear To Send*) -sanoma tai uudelleenlähetyspyyntö NACK. Kuten aiemmin mainittiin, päätettiin NACK-sanomasta luopua. Kuvassa 4.5. on esitetty esimerkki KILAVI:n mukaisesta liikennöinnistä.



Kuva 4.5. KILAVI-verkon liikennöintiä [17].

Kuvan 4.5. tapauksessa solmu A lähettää tietoa solmulle B. Ennen tiedon lähettämistä tarvitaan lähetyksluva, jota pyydetään RTS-sanomalla. Lähetyksluva myönnetään CTS-sanomalla, ja vastaanotettu sanoma kuitataan ACK-sanomalla. Kuvan 4.5. tapauksessa yhden datapaketin lähettäminen aiheuttaa kokonaisuudessaan kuuden paketin siirtymisen langattoman rajapinnan yli.

KILAVI:n mukaisen liikennöinnin vaatimat toiminnot on sisällytetty lähetyksstä ja vastaanottoa varten tehtyihin aliohjelmiin. Lähetyksstä varten tarvittavat toiminnot on esitetty kuvassa 4.6.

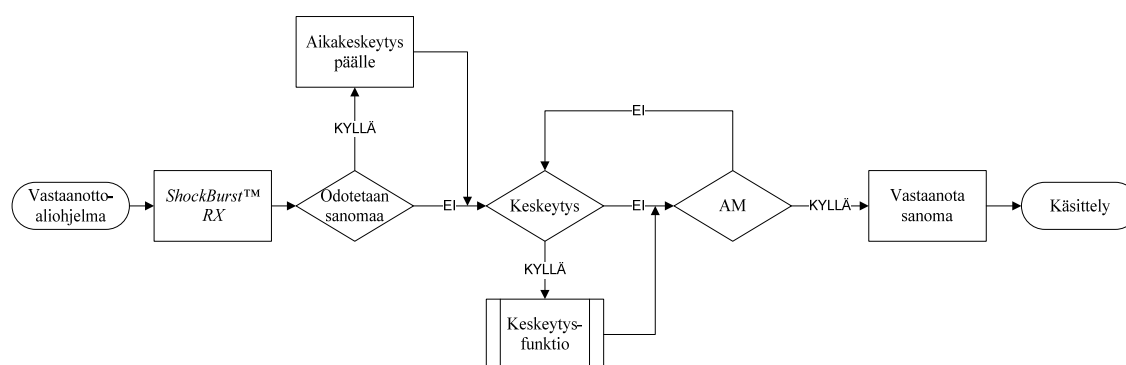


Kuva 4.6. KILAVI-kehyyksen lähetyksessä käytetyt toimenpiteet.

Ennen sanoman lähetyksstä pitää varmistaa, että siirtotie on vapaa. Radiopiiriin siirtyminen vastaanottotilaan vie enemmän aikaa kuin muut toiminnot yhteensä, joten siirtyminen *ShockBurst™ RX* -tilaan kannattaa tehdä heti alussa. KILAVIa- ja KILAVIb-kehyykset ovat rakenteeltaan erilaisia, joten myös niiden muodostaminen eroaa toisistaan. Toisin kuin KILAVIa-kehyyks, KILAVIb-kehyyksen pituus riippuu sekä reittikentän että datakentän suuruudesta. Tarvittavat tiedot kehyyksiin saadaan sensorin identiteettiä varten luodusta aliohjelmasta. Lähetyksstä varten muodostettu kehyks siirretään radiopiiriin lähetykspuskuriin SPI-väylän kautta. Mikäli siirtotie todetaan vapaaksi lähetyksstä varten, siirrytään *ShockBurst™ TX* -tilaan. Ennen paketin siirtymistä

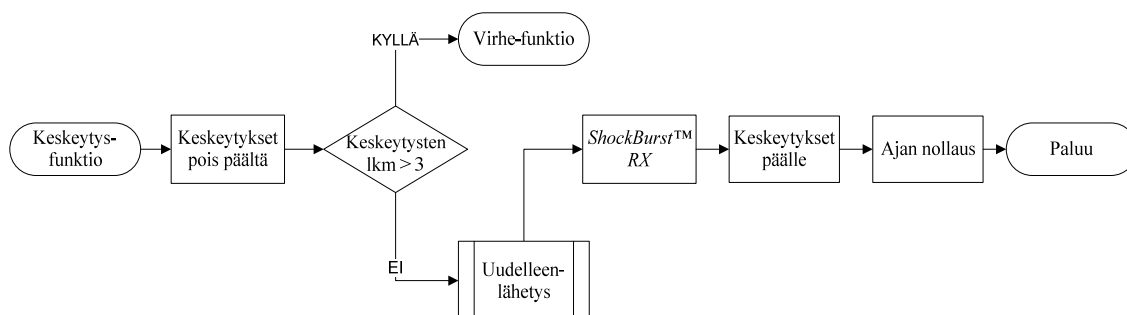
siirtotielle radiopiiri muodostaa automaattisesti liikennöinnissä tarvittavat tahdistuksen sekä tarkastussumman.

Käytettävä radiopiiri voi joko vastaanottaa tai lähettää tietoa, ei molempia samaan aikaan. Mikäli sensorisolmu odottaa vastausta lähettämälleen sanomalle, siirrytään välittömästi vastaanottoa varten tehtyyn aliohjelmaan. Radiopiirin vaatima siirtymisaika *ShockBurst™ TX-* ja *ShockBurst™ RX* -tilan välillä kestää datalehden mukaan yhtä kauan, maksimissaan 550 μ s. Vastaanottava osapuoli käsittelee saamansa tiedon ennen mahdollista vastausta, minkä takia lähettävä osapuoli ehtii *ShockBurst™ RX* -tilaan ennen vastauksen saapumista. Viivettä aiheuttaa myös tiedon siirtyminen langattoman rajapinnan yli. Vastaanottoa varten tehdyn aliohjelman periaate on esitetty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7. Vastaanottoaliohjelman toiminnot.

Vastaanottoa varten siirretään radiopiiri ensin *ShockBurst™ RX* -tilaan. Siirtymän aikana ei sanomia vielä pystytä vastaanottamaan. Välittäjäsolmut viettävät suuren osan ajastaan vastaanottotilassa odottamatta mitään tiettyä sanomaa. Sanomaa odotetaan pääsääntöisesti vasta vastauksena lähetetylle sanomalle. KILAVI:n määritelmien mukaan liikennöinti aloitetaan aina kontrollisanomalla, jonka pituus ja näin ollen lähetykseen kuuluva teoreettinen aika tunnetaan. Lähetettyjen ja vastaanotettujen sanomien perusteella tiedetään myös liikennöinnin myöhemmässä vaiheessa kuuluva teoreettinen aika. Mikäli sensorisolmu odottaa jotain tiettyä sanomaa, mutta vastausta ei tule määräajassa tai vastaanotettu sanoma on korruptoitunut, tiedetään että jotain on vialla. Sanomaa odottaessa asetetaan aikaan perustuva keskeytys päälle ja siirrytään tarkkailemaan siirtotien liikenteestä omaa osoitetta. Mikäli mitään tiettyä sanomaa ei odoteta, siirrytään suoraan tarkkailemaan omaa osoitetta liikenteen seasta. Keskeytyksen ollessa päällä sanomaa odotetaan ainoastaan ennalta määritetty aika. Ajan loppuessa siirrytään keskeytys-funktioon. Kyseisen funktion toiminnot on esitetty kuvassa 4.8.



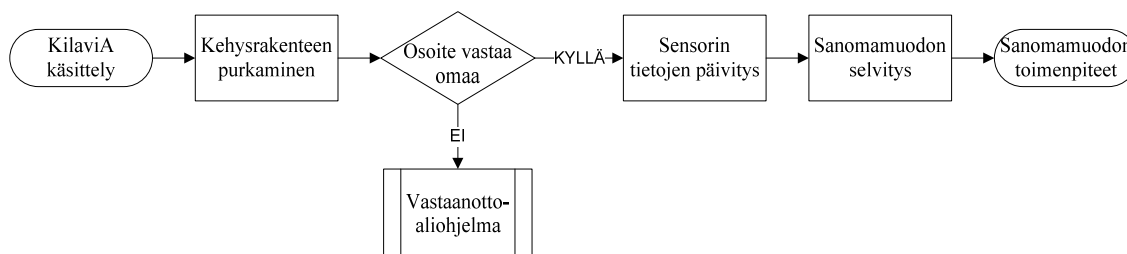
Kuva 4.8. Keskeytys-funktion toimintoja esittävä vuokaavio.

Keskeytys-funktioon siirryttäessä kytketään aluksi keskeytykset pois päältä. Näin ollen funktion toimenpiteet saadaan suoritettua rauhassa. Keskeytysten lukumäärästä pidetään kirjaa, ja mikäli funktioon saavutaan neljättä kertaa, oletetaan, että sensorisolmun lähettämät sanomat eivät pääse perille. Tämä johtaa virhe-funktioon, jota ei vielä tämän työn aikana toteutettu. Muussa tapauksessa aiemmin lähetetty sanoma lähetetään uudestaan omassa aliohjelmassaan. Lähetysten jälkeen siirrytään *ShockBurst™ RX* -tilaan, asetetaan keskeytykset takaisin päälle, nollataan laskuri ja palataan takaisin kohtaan, jossa keskeytys tapahtui.

Mikäli sensorisolmu kuulee kuvan 4.7. tapauksessa oman osoitteensa siirtotiellä, vastaanotetaan kyseinen paketti ja siirrytään sanoman käsittelyyn.

4.2.3 Sanomien käsittely

KILAVI-verkossa liikkuvat sanomat ovat joko vakiomittaisia kontrollisanomia tai vaihtelevan pituisia hyötykuormasanomia. Kontrollisanomia käytetään ainoastaan kahden solmun välisessä kommunikoinnissa, eikä niitä koskaan välitetä eteenpäin. Hyötykuormasanomia sen sijaan käytetään isäntälaitteen kanssa kommunikoidessa. Sanoma voi sisältää esimerkiksi mitatun lämpötila-arvon tai isäntälaitteen lähettämän kuittauksen. Molempien kehyksien käsittelyä varten tehtiin omat aliohjelmat tarvittavien toimenpiteiden takia. KILAVIa-sanoman käsittelytoimenpiteet on esitetty kuvassa 4.9.

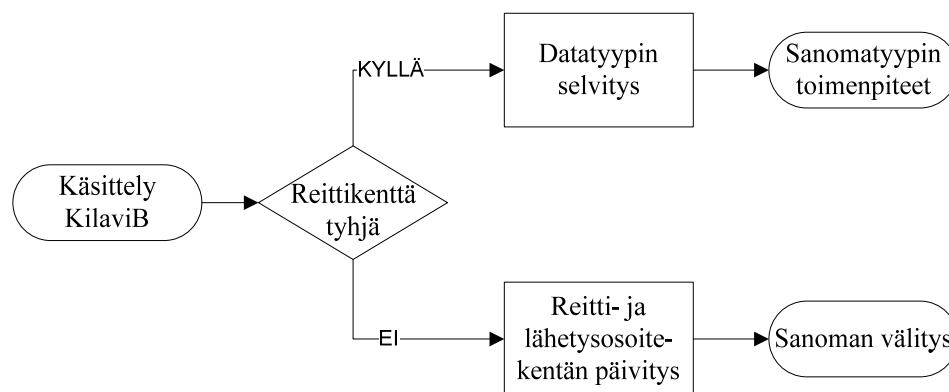


Kuva 4.9. KILAVIa-sanoman käsittelyä varten tehdyn aliohjelman toimenpiteet.

Ensimmäisenä vaiheena vastaanotetun sanoman käsittelyssä on kehyksen sisältämien tietojen erittely omiin muuttujiin. Vastaanottaja-kentästä saatua osoitetta verrataan omaan osoitteeseen ja mikäli sanoma on tarkoitettu sensorisolmulle,

päivitetään tarvittavat tiedot saadusta kehyksestä sensorin tietoihin. Sanomamuodon perusteella selvitetään lähetetyn sanoman tarkoitus ja suoritetaan sen edellyttämät toimenpiteet. Sanomamuoto voi esimerkiksi olla RTS, jolla varataan siirtotie hyötykuorman lähettämistä varten. Mikäli vastaanotettu sanoma ei ole tarkoitettu sensorisolmulle, palataan vastaanotto-aliohjelmaan odottamaan uutta sanomaa.

KILAVIb-sanomia varten tehdyn aliohjelman toimenpiteet on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10. KILAVIb-sanoman käsittelyä varten tehdyn aliohjelman toimenpiteet.

Ensimmäisenä vaiheena KILAVIb-sanoman käsittelyssä on reittikentän koon tarkastus. Reittikentän koko saadaan siirtotien varaavasta kontrollisanomasta, josta se päivitetään sensorin tietoihin. Tämän perusteella tiedetään, onko sanoma tarkoitettu välitettäväksi eteenpäin vai sisältääkö se sensorille tarkoitettua tietoa.

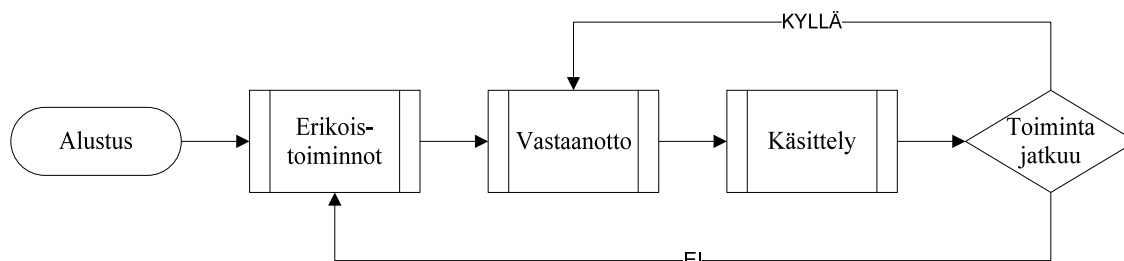
Sanomien välittäjinä toimivien sensorisolmujen ei tarvitse tietää kehyksen tarkempaa sisältöä, sillä kyseinen tieto on tarkoitettu ainoastaan sanoman lopulliselle vastaanottajalle. Välitystä varten lähetysoite korvataan reittikentän ensimmäisellä osoitteella ja uusi reittikentän koko päivitetään sensorin tietoihin. Näin ollen välitettävän sanoman koko pienenee joka hypyllä kaksi tavua. Päivitetty kehys lähetetään tämän jälkeen seuraavaan osoitteeseen protokollan mukaisesti.

Jokainen sensorisolmu saa rekisteröinnin yhteydessä parhaan mahdollisen reitin isäntälaitteelle. KILAVI:n mukaan kaikki hyötykuormasanomat välitetään isäntälaitteen kautta. KILAVIb-paketin sisältämään reittikenttään ei näin ollen tarvitse lisätä koko reittiä, jos sanoman määränpäänä on isäntälaitte. Kyseinen asia voidaan huomioida, kun verkon toimintaa kehitetään. Tässä työssä reittitauluja käytettiin kuitenkin vielä molempiin suuntiin.

Reitin pituudesta kertovan kentän ollessa tyhjä on kontrollisanomaa seuraava hyötykuormasanoma tarkoitettu sensorisolmulle. Tyyppikentän sisällön perusteella tiedetään tarvittavat jatkotoimenpiteet. Sanomatyypinä voi esimerkiksi olla isäntälaitteen lähettämä lämpötilakysely (*Temperature Query*) lämpöanturille.

4.2.4 Runko

Ohjelmakoodissa tarvitaan pääohjelma, josta tarvittavia osakokonaisuuksia voidaan kutsua tehtävän suorittamista varten. Ohjelmakoodin versiota varten luotiin kuvan 4.11. mukainen kokonaisuus.



Kuva 4.11. Sensorin runkotoiminnot.

Sensorisolmun käynnistyessä ensimmäistä kertaa suoritetaan alustukset. Alustuksen aikana sensorisolmu saa muun muassa tarvittavat tiedot toimintaansa varten. Alustuksen jälkeen siirrytään laitetyypin mukaisten erikoistoimintojen suorittamiseen. Lämpötilaa mittaavan anturisolmun tapauksessa tämä tarkoittaa lämpötilan mittausta ja lähetystä. Runkotoimintoihin ei sisällytetty lähetystä varten tehtyä aliohjelmia, vaan sitä kutsutaan tarpeen mukaan joko erikoistoimintojen tai käsittelyn yhteydessä. Erikoistoimintojen jälkeen siirrytään vastaanottoa varten tehtyyn aliohjelmaan. Tämä johtuu siitä, että tässä kehitysvaiheessa kaikki sensorisolmut käyttävät langatonta rajapintaa aktiivitilan aikana. Sanoman vastaanottoa seuraa sanoman käsittely ja tarvittavien toimenpiteiden suorittaminen. Käsittelyn jälkeen runko-ohjelma hyppää takaisin alkuun. Mikäli sensorisolmu odottaa sanomaa verkosta, hypätään erikoistoimintojen yli vastaanottoon. Muussa tapauksessa kierros alkaa alusta erikoistoimintojen kohdalta.

Tässä luvussa esitettyjen toimintojen lisäksi ohjelmakoodiin sisällytettiin paljon valmiita ja itse tehtyjä *header*-tiedostoja. *Header*-tiedostojen avulla esimerkiksi saadaan ohjelmakoodia pienennettyä nimeämällä usein käytettyjä aliprosesseja [30]. Seuraavaksi on esitetty pieni pätkä TWI liikennöintiä varten tehdystä *header*-tiedostosta.

```
#define DS7505_ADD    (0x90)
                    //DS7505 osoite
#define TWI_READ     (0x01)
//osoitteen yhteydessä käytetty READ bitti
#define TWI_WRITE    (0xFE)
//osoitteen yhteydessä käytetty WRITE bitti
#define LIPPU        (0x80)
                    //TWCR rekisterin yhteydessä käytetty maski jonka avulla tarkistetaan TWINTin
                    tila

#define TWI_STATUS   (TWSR & 0xF8)
//Vertailu kohde TWSR status koodeille. 0xF8 on status maski
#define TWINT_FLAG2  ((TWCR |0xC4)&0xCD)
//TWCR rekisterin yhteydessä käytetty maski
```

Ohjelma 4.1. TWI liikennöintiä varten tehdyn header-tiedoston osa.

Määrittämällä esimerkiksi lämpötila-anturin käyttämä osoite DS7505_ADD muotoon, tulee ohjelmakoodista paljon selvempi, kun myöhemmin ei tarvitse miettiä mitä hexa muodossa oleva numero tarkoittaa.

5 MITTAUKSET JA TOIMINNAN TESTAUS

Mittausten avulla haluttiin varmistaa laitteiston ja ohjelmiston toimivuus toimistoympäristössä. Sensoriverkkojen kohdalla voidaan tehdä monia mittauksia, varsinkin RF-puolella. Näihin kuuluvat muun muassa signaalin häiriötaso, voimakkuus ja vaimeneminen sekä energiankulutus bittiä kohden. Mittausten avulla sensorisolmujen energiankulutusta pystytään analysoimaan. Eri laitetyyppien kohdalla vaatimukset voivat kuitenkin olla hyvinkin erilaisia. Tämän työn keskeisenä tavoitteena oli luoda toimiva sensori ja kehittää KILAVI:n mukaista ohjelmakoodia. Näin ollen mittaukset keskittyivät laitteiston toimivuuden varmistamiseen ja ohjelmakoodin kehittämisessä tarvittavien tietojen keräämiseen. Laitteiston toiminnasta ja rajoitteista on tietenkin hyvä saada tietoa jatkokehitystä ajatellen.

RF-puolen tarkempaa toiminnan testausta ei tehty, koska radiomoduuli valmistettiin datalehdessä annettujen ohjeiden perusteella. Laitteen RF-puolen toimivuuden testaamiseksi katsottiin riittävän toimistoympäristössä tehdyt verkkotestaukset. Mittauksissa toimistoympäristönä toimi TTY Rauman yksikkö, jossa myös kaikki muut mittaukset ja testit tehtiin.

Sensorin toimivuutta testattiin sekä laitteiston että ohjelmiston osalta. Laitteiston kohdalla mitattiin virrankulutusta, toiminnan aikaisia signaalitasoja sekä erillisten komponenttien ja kokonaisuuden toimivuutta ohjelmakoodin avulla. Ohjelmistoa testattiin tarkastelemalla sen kykyä suorittaa halutut tehtävät sekä verkonmukaista toimintaa. Laitteiston ja ohjelmakoodin yhteistoiminnan osalta mitattiin myös eri toimintoihin kuluva aikaa, jota tarvitaan osaltaan virrankulutuksen laskemisessa.

Diplomityön aikana KILAVI-protokollan sanomamalli päivitettiin uudempaan. Kuvassa 5.1. esitetään vanha sanomamalli, jonka mukaan mittaukset suoritettiin.

Field	Sync	RX address device type device number forward capab.	TX address device type device number forward capab.	Header message format data length path length	CRC
Length	10bits	16bits	16bits	16bits	16bits

Field	Sync	RX address device type device number forward capab.	TX address device type device number forward capab.	Path forwarding node addresses	Type message type	DATA	Security message authentication code	CRC
Length	10bits	16bits	16bits	0-112bits	8bits	0-504bits	32bits	16bits

Kuva 5.1. KILAVI-protokollan vanha sanomamalli.

Kuten kuvasta 5.1. nähdään, vanhassa sanomamallissa KILAVIa- ja KILAVIb-paketit ovat pienempiä. Sensorien virrankulutus on sidoksissa siirtotiellä käytävään kommunikointiin, ja pienempi paketti tarkoittaa pienempää virrankulutusta.

5.1 Laitteisto ja toiminnan aika

Laitteiston toimivuutta voidaan osaltaan testata virrankulutuksen avulla. Mikäli datalehdissä annetut arvot eroavat suuresti mitatuista arvoista, tiedetään, että laitteisto ei toimi toivotulla tavalla. Virrankulutuksen avulla saadaan myös parempi kuva laitteiden eliniästä ja näin ollen niiden sopivuudesta pitkäaikaiseen käyttöön. Sensorien virrankulutus on riippuvainen monesta eri asiasta. Virrankulutukseen vaikuttavat muun muassa sensorisolmujen lähetysteho, käytetyt komponentit ja käyttösuhte. Kuten Otis ja Rabaey [11, s. 5] kertovat, langaton rajapinta on sensoriverkkojen hallitseva virrankulutuksen lähde. Vaikka havainnointiin ja digitaaliseen prosessointiin käytettyjen komponenttien vaatimuksia ei voida sivuttaa, niiden käyttösuhte on tyypillisesti hyvin matala. Kehittyneen unitilan, viransäästötilan ja vuotovirranvähennystekniikoiden yhdistelmällä on mahdollista vähentää niiden keskimääräinen virrankulutus erittäin pieneksi [12].

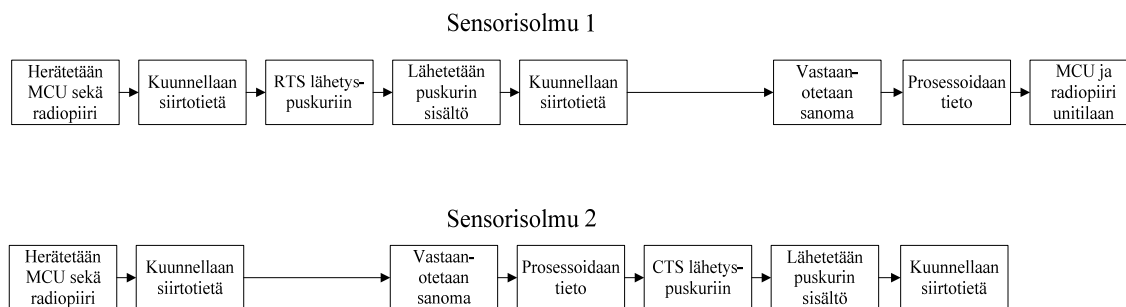
Sensorin toimintaan ja virrankulutukseen vaikuttavat radiopiirissä käytetyt asetukset. Mittausten aikana radiopiirin asetuksia ei muutettu. Käytettyjä asetuksia on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. nRF905-radiopiirissä käytettyjä asetuksia.

Asetus	Valinta	Yksikkö
Taajuuskaista	433	MHz
Lähetysteho	-10	dBm
Osoitekentän koko	2	tavua
Kiteen taajuus	16	MHz

Taulukossa 5.1. esitettyjen asetusten lisäksi käytettiin radiopiirissä olevaa ominaisuutta, joka vähensi vastaanoton herkkyyttä ja samalla piirin virrankulutusta.

KILAVI:n mukaisessa sensoriverkossa anturisolmut heräävät ennalta määritetyin aikavälein keräämään tietoa ja kommunikoimaan. Välittäjäsolmujen tapauksessa sensori ei mene unitilaan, vaan jää odottamaan siirtotieltä sanomia. Tarkastelemalla sensorin virrankulutusta lepo-, kommunikointi- ja vastaanottotilassa saadaan virrankulutuksen suuruusluokasta parempi kuva. Kommunikoinnin aikaisen virrankulutuksen sekä eri toimintoihin kuluvan ajan arvioimiseksi päätettiin oskilloskoopilla mitata kuvan 5.2. esittämä tapahtumaketju.



Kuva 5.2. Virrankulutuksen arvioinnissa käytetyn tapahtumaketjun tilakaavio.

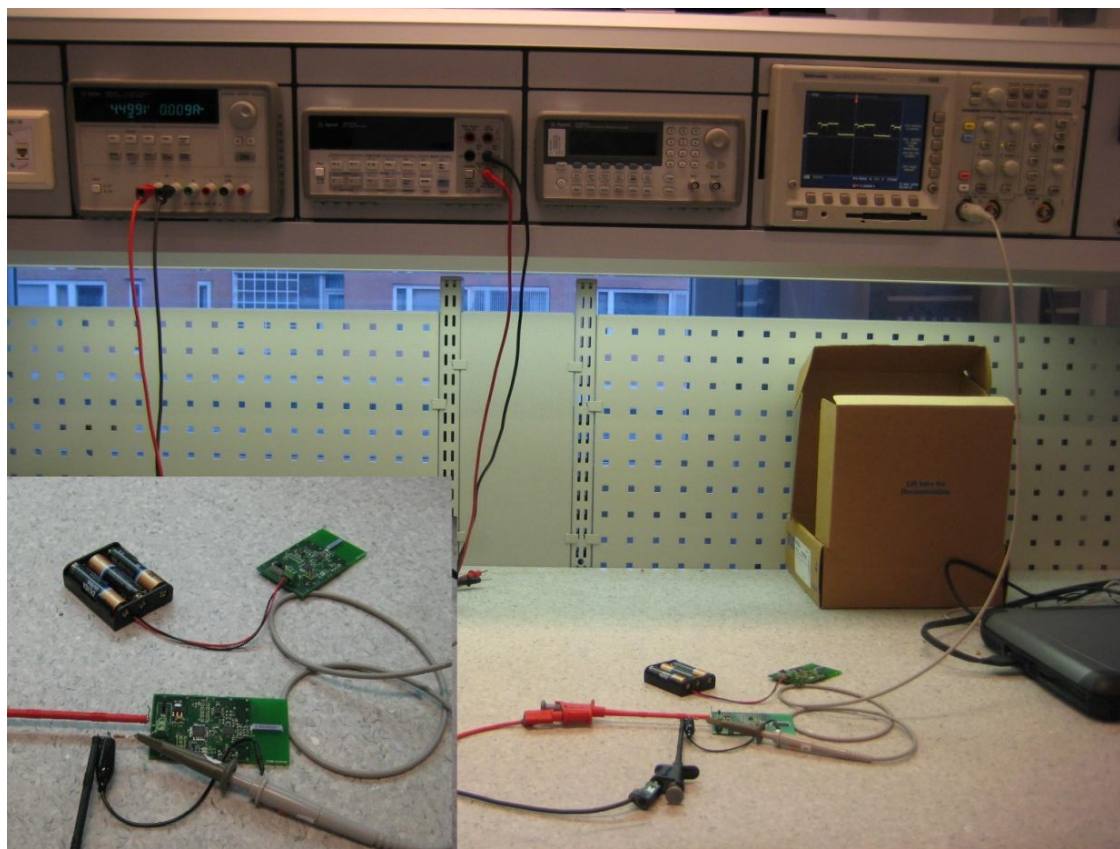
Kuvan 5.2. tapahtumaketju valittiin mittauksen kohteeksi, sillä se sisältää KILAVI:n mukaisen kommunikoinnin aloittamisessa vaadittavat toimenpiteet. Testausta varten ei tehty erillistä ohjelmakoodia, vaan annettiin tapahtumien kulkea normaalin toiminnan mukaisesti. Mittauksen aikana käytettiin kahta sensorisolmua. Sensorisolmu 1:n tarkoituksena on simuloida anturisolmua, joka herää unitilasta suorittamaan toimintojaan. Vastakappaleena toimiva sensorisolmu 2 simuloi välittäjäsolmua, joka odotti vastaanotettavaa sanomaa. Virrankulutusta mitattiin sensorisolmu 1 tapauksessa.

Tapahtuma alkaa, kun sensorisolmut ja radiopiirit herätetään unitilasta. Sensorisolmu 1 kirjoittaa lähetyslupaa vastaavan sanoman radiopiiriin, ja samalla sensorisolmu 2 siirtyy vastaanottotilaan. Sensorisolmu 1 varmistaa, ettei siirtotiellä ole liikennettä, lähettää sanoman siirtotielle ja siirtyy vastaanottotilaan odottamaan vastausta. Sensorisolmu 2 vastaanottaa lähetetyn sanoman, tarkistaa sen sisällön ja vastaa asianmukaisella sanomalla, tässä tapauksessa CTS-sanomalla. Sensorisolmu 1 vastaanottaa CTS-sanoman, tarkistaa sen sisällön ja siirtyy unitilaan. Sensorisolmu 2 jää kuuntelemaan siirtotietä. Siirtotielle lähetettävä sanoma on kokonaisuudessaan 90 bitin kokoinen sisältäen kontrollisanoman kenttien lisäksi radiopiirin automaattisesti lisäämän vastaanottajan osoitteen.

Kommunikoinnin lisäksi mitattiin sensorin virrankulutusta sen ollessa lepotilassa. Lepotilan aikana radiomoduuli ei ole käytössä, minkä takia sensorisolmun hetkellinen virrankulutus on huomattavasti pienempi. Lisäksi tarkasteltiin erikseen anturin virrankulutusta. Datalehdessä saatujen tietojen mukaan käytetty lämpötila-anturi vaatii 9-bittisen lämpötila-arvon muuntamiseen maksimissaan 25 ms:a. Tapahtuman pituuden vuoksi on järkevämpää suorittaa lämpötila-arvon päivitys anturissa ennen varsinaista unitilasta heräämistä. Näin ollen päivitetty lämpötila-arvo on suoraan käytettävissä sensorisolmun herätessä. Lämpötila-anturin käyttämän virrankulutuksen arvioimiseksi käytettiin aiemmin luotua ohjelmakoodia. Lämpötila-anturia käskytettiin mittaamaan uusi lämpötila-arvo, jonka se muutti 9-bittiseksi arvoksi, ja tallentamaan se muistiin. Mittauksen jälkeen anturi siirtyi takaisin lepotilaan.

Kuvassa 5.3. on esitetty mittausrjestely, jota käytettiin muun muassa kuvan 5.2. tapahtumaketjun mittauksessa. Oskilloskoopilla pystytään tarkastelemaan jännitetason muutoksia. Mittausta varten sensorisolmuun kytkettiin 51 ohmin vastus sarjaan jännitelähteen kanssa, jolloin virrankulutus pystyttiin myöhemmin laskemaan saaduista

tuloksista. Käyttöjännite sensoriin otettiin Agilent E3631A säädettävästä virtalähteestä, ja oskilloskooppina toimi Tektronix TDS 3032.



Kuva 5.3. Virrankulutuksen mittaus oskilloskoopilla.

Kuvan 5.3. vasemmassa alareunassa on suurennettuna mittauksessa käytetyt sensorit. Säädettävässä virtalähteessä kiinni oleva sensorisolmu suorittaa aiemmin kuvassa 5.2. esitetyn sensorisolmu 1:n toiminnot, ja paristoilla toimiva sensorisolmu toimii vastakappaleena.

Virrankulutuksen laskemisessa tarvitaan informaatiota sensorin eri toimintojen käyttämästä ajasta eri tilanteissa. Liikennöintiajan perusteella saadaan parempi kuva verkon toiminnasta ja tarvittavista toimenpiteistä. Optimoimalla toiminnot ajan suhteen saadaan säästöjä energiankulutuksessa ja vähennetään verkon liikennöinnissä tapahtuvien mahdollisten yhteentörmäysten todennäköisyyttä. Oskilloskoopilla saadaan parhaiten mitattua eri toimintojen ajankäyttöä. Tarvittavat tiedot saadaankin samalla virrankulutusmittausten yhteydessä tarkkailemalla toiminnan aikaisia signaalitasoja. Työn aikana käytettyjä mittalaitteita on listattu taulukkoon 5.2.

Taulukko 5.2. Mittausten aikana käytettyjä laitteita.

Laite	Tarkoitus
GW GDM 393A	Yleismittari
Agilent 34401A	Yleismittari
Tektronix TDS3032	Oskilloskooppi
Agilent 54622D	Oskilloskooppi
Agilent E3631A	Virtalähde

Komponenttien toimivuus saadaan suurelta osin todettua niitä varten tehdyn ohjelmakoodin avulla. Mikäli lämpötila-anturi antaa kysyttäessä järkevän tuloksen, voidaan todeta sen toimivan. Anturia, kuten myös muita komponentteja, tarkasteltiin ohjelmakoodin lisäksi yleismittarin sekä oskilloskoopin avulla.

5.2 Ohjelmisto

Ohjelmiston testaus voidaan jakaa kolmeen osaan: kehitysympäristön testaukseen, toiminnan testaukseen ja verkon testaukseen. AVR Studion liittäneenä käytetty avr-gcc mahdollistaa kirjoitetun koodin oikeapaisuuden tarkastuksen ohjelmaa käännettäessä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että ohjelma tekee sen mitä sen on tarkoitus, ainoastaan sen että ohjelma on c-koodin kieliopin mukaista. Monesti ohjelmakoodia kirjoitettaessa jäi osakokonaisuuksia poistettaessa joitain kohtia epähuomiossa tuhoamatta. Ylimääräiset koodiin jääneet osat saattoivat näin antaa virhetilanteen koodia käännettäessä. Joissain tapauksissa koodissa olevat virheet eivät kuitenkaan olleet c-koodin kieliopin vastaisia. Näissä tilanteissa ongelmaa etsittiin ohjelmakoodin simuloimisella. Simuloinnissa koodia käytiin läpi käsky käskyltä ja ohjelman tekemiä muutoksia rekistereissä pystyttiin seuraamaan. Mikäli ohjelmakoodi eteni suunnitelmien vastaisesti, saatiin poikkeaman kohta selville.

Toiminnan testauksella tarkoitetaan ohjelmakoodin ja laitteiston yhteistoimintaa. Mikäli laitteisto käyttäytyy odotetulla tavalla ohjelmakoodin käskyjen mukaan, voidaan toimivuus todeta. Käskyjen kulkua piirilevyssä pystyttiin esimerkiksi tarkastelemaan oskilloskoopin avulla. Mikrokontrollerin lähettäessä 8-bittisiä SPI-väylän kautta voidaan oskilloskoopin avulla seurata johtimessa tapahtuvia jännitemuutoksia. Testien yhteydessä tapahtumien onnistumisesta kertoivat suurimmaksi osaksi alustassa olevat LED (*Light-Emitting Diode*) -valot. Esimerkiksi anturin toimintaa testatessa mitattu lämpötila-arvo saatiin selville ennalta määritetyin valosignaalein. Kyseinen tapa saattaa kuulostaa karkealta, mutta se osoittautui erittäin tehokkaaksi tavaksi monissa tilanteissa. Varsinaisten testien lisäksi ohjelmakoodin toimivuutta testattiin aika ajoin uusien kokonaisuuksien toiminnan varmistamiseksi. Kaikkia tehtyjä testejä ei kuitenkaan listata. Esimerkkinä testeistä toiminee seuraava tilanne. Virheistä toipumista varten tehtyä koodin osuutta testattiin pakottamalla virhetilanne. Kyseisessä testissä sensorisolmu yritti lähettää sanoman, mutta vastakappale oli sammutettuna. Uudelleenlähetyksen väliä kasvatettiin testin ajaksi. Uudelleenlähetyksen välissä

vastakappale laitettiin päälle, ja mikäli sanoma saatiin vastaanotettua, voitiin sensorisolmun todeta osaavan reagoida kyseiseen tilanteeseen.

Verkon testauksessa tarkastellaan ohjelmakoodin ja laitteiston KILAVI:n mukaista toimivuutta pidemmällä aikavälillä. Testauksessa käytettiin kolmea sensorisolmua, joille jokaiselle annettiin omat tehtävänsä. Yksi sensorisolmuista mittasi kahden minuutin välein uuden lämpötila-arvon ja lähetti sen eteenpäin. Toinen sensorisolmuista toimi välittäjänä, jonka tarkoituksena oli vastaanottaa mitattu lämpötila-arvo ja lähettää se eteenpäin. Kolmas sensorisolmu toimi päätepisteenä. Päätepisteen tehtäviin kuuluivat vastaanotetun lämpötila-arvon tarkastaminen sekä kuittauksen lähettäminen välittäjäsolmun kautta anturisolmulle. Sensorit asetettiin eri puolille TTY Rauman tutkimusyksikköä ja annettiin pyöriä omillaan 16 tuntia. Testin avulla haluttiin varmistaa, että pidempiaikainen toiminta ei jumita laitteistoa ohjelmakoodin tai laitteiston takia.

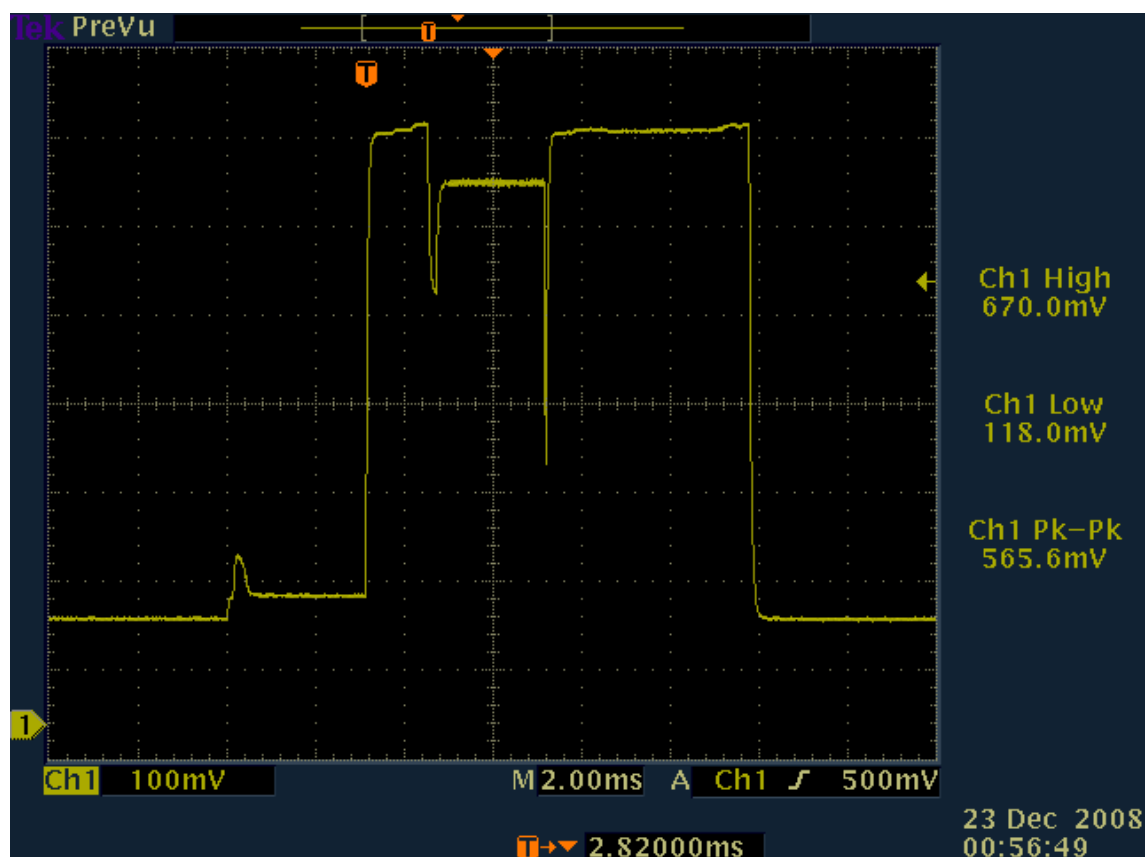
6 TULOKSET

6.1 Laitteisto

Virrankulutus on tärkeä osa sensorien toimintaa. Suuri virrankulutus lisää paristojen vaihtojen määrää ja näin ollen vähentää käyttömukavuutta. Paristojen tiheä vaihtaminen lisää myös kustannuksia. Sensorien elinaikana virrankulutukseen vaikuttavat muun muassa käytetyt komponentit ja niiden käytösuhde. Datalehtien perusteella voidaan arvioida virrankulutusta, mutta annettujen yksittäisten arvojen perusteella ei aina pystytä saamaan todellista kuvaa koko tapahtuman virrankulutuksesta. Mittauksissa kiinnostuksen kohteena olivat enemmän kokonaistapahtumat kuin yksittäisten komponenttien virrankulutus. Komponenttien virrankulutusta on tietysti hyvä mitata ja verrata valmistajien antamiin arvoihin.

KILAVI:n mukaisten sensorisolmujen kommunikointiin kuuluu yleensä vähintään yksi lähetys- ja vastaanotto-tapahtuma. Poikkeuksena ovat yksisuuntaiset sensorisolmut, jotka on tarkoitettu ainoastaan lähettämään keräämäänsä tietoa. Mittaamalla kuvan 5.2. mukainen tapahtuma, saadaan tietoa muun muassa eri tilasiirtymistä, kommunikoinnin aloittamisesta ja lopettamisesta sekä ohjelmakoodin kulusta. Kerättyjen tietojen perusteella pystytään paremmin arvioimaan sensorisolmujen kokonaisvirrankulutusta ja eri tapahtumien pituutta.

Mittauksissa oskilloskoopin ruudulla nähdään vastuksen yli mitatut arvot jännitetasoina ajan suhteen. Kuvassa 6.1. on esitelty yksi oskilloskoopilla tallennettu tilanne, jossa mitattiin 51 ohmin vastuksen yli vaikuttavaa jännitettä kuvan 5.2. mukaisessa tilanteessa.



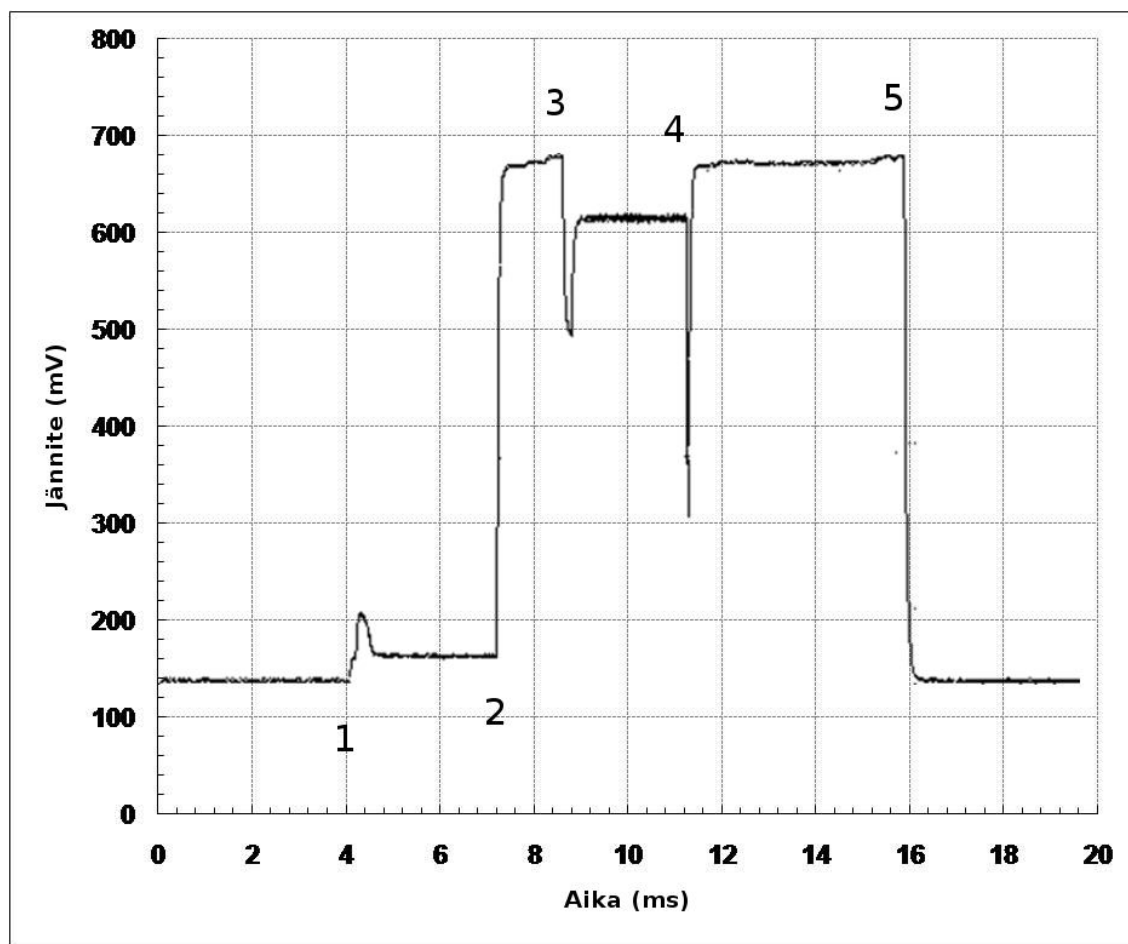
Kuva 6.1. Sensorisolmun virran- ja ajankulutus järjestetyssä tilanteessa.

Kuva 6.1. on yksi monista mittausten aikana tallennetuista kuvista. Käytetyllä oskilloskoopilla pystytään mittaamaan ruudulla näkyviä jännitetasoja asettamalla rajapisteet halutuille kohdille. Oskilloskooppi näyttää myös halutessa esimerkiksi jännitetason maksimikohdan.

Ohmin lain mukaan vastuksen päiden välillä syntyvä jännitehäviö on verrannollinen vastuksen läpi kulkevaan virtaan. Näin ollen virrankulutus saadaan laskettua jakamalla jännitehäviö vastuksen resistanssilla eli kaavalla:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

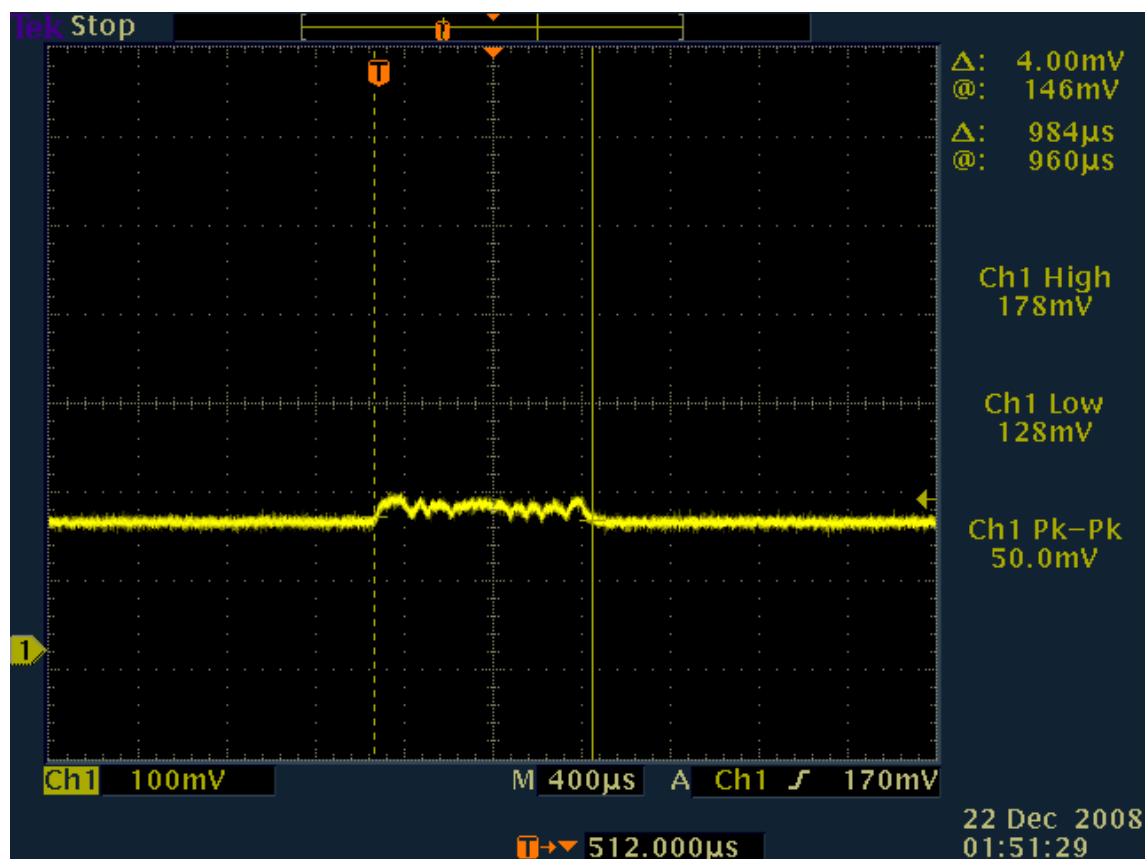
Kaavassa (1) U:lla tarkoitetaan tässä tapauksessa vastusten päiden välistä jännitehäviötä, R tarkoittaa vastuksen resistanssia ja I vastuksen läpi kulkevaa virtaa. Kuvassa 6.1. jännite nähdään pystyakselilla ja aika vaaka-akselilla. Yksi pystyakselin väli vastaa 100 millivoltia eli noin 1,96 milliampeeria ja yksi vaaka-akselin väli on 2,00 millisekuntia. Jotta saatiin parempi kuva mittaustulosten ja tapahtumien välisestä yhteydestä, muokattiin aiemmin esitettyä oskilloskoopin kuvankaappausta kuvan 6.2. mukaiseksi.



Kuva 6.2. Kuva 6.1. muokattuna.

Kuvassa 6.2. kohdassa 1 herätetään mikrokontrolleri ja radiopiiri virransäästötilasta kommunikointia varten. Heräämisen jälkeinen piikki, kuten myös ajoittain muualla näkyvät pienet jännitetason muutokset, ovat osaltaan mikrokontrollerista johtuvia sen siirtyessä jouto- ja aktiivitilan välillä. Datalehdessä on annettu radiopiirin maksimijat eri tilasiirtymiin. Tässä esimerkissä radiopiirin siirtyminen virransäästötilasta valmiustilaan varmistetaan 3 ms:n odotusajalla, joka kuvassa sijoittuu kohtien 1 ja 2 välille. Radiopiiri siirretään kuuntelutilaan kohdassa 2, jolloin virrankulutus nousee huomattavasti. Radiopiirin siirtyminen kuuntelutilaan varmistetaan 1 ms:n odotusajalla ja se sijoittuu kuvassa kohtien 2 ja 3 välille. Ohjelmakoodin mukaisesti siirtotielle lähetettävä tieto kirjoitetaan lähetyspuskuriin juuri ennen lähetystä. Siirtyminen lähetystilaan tapahtuu kohdassa 3. Käytetyillä asetuksilla vastaanottotilan virrankulutus on odotetusti hieman suurempi verrattuna lähetystilaan. Sanoman lähetyksen jälkeen siirrytään suoraan takaisin kuuntelutilaan kohdassa 4 odottamaan vastausta. Sanoman vastaanoton jälkeen siirretään radiopiiri virransäästötilaan kohdassa 5, prosessoidaan tieto ja siirretään mikrokontrolleri unitilaan.

Anturin vaatima aika 9-bitin lämpötila-arvon muuntamiseen on datalehden mukaan maksimissaan 25 ms:a, minkä lisäksi tiedon hakuun rekisteristä menee oma aikansa. Näin ollen anturin virrankulutusta varten tehtiin oma mittaus. Kuvassa 6.3. on esitetty yksi oskilloskoopilla tallennetuista kuvista anturin virrankulutusta mitattaessa.



Kuva 6.3. Anturin virrankulutusta mitattaessa otettu oskilloskoopin kuvankaappaus.

Anturin virrankulutusta mitattaessa mikrokontrolleri pidettiin koko ajan aktiivivilassa. Näin ollen kuvassa 6.3. nähtävä poikkeama on anturin käytöstä johtuva. Oskilloskoopin asetuksia muuttamalla havaittiin, että ainoa poikkeama lämpötilaa mitattaessa oli kuvassa 6.3. nähtävä noin 960µs suuruinen alue. Oskilloskooppi ilmoittaa jännitetasojen eroksi 50 mV eli noin 0,98 mA, mikä on odotettavissa. Datalehdystä saatujen tietojen perusteella odotettiin jännitetaso muutoksen olevan kuitenkin pidempiaikainen.

Mittausten aikana kerätyjä virrankulutusarvoja on esitetty taulukossa 6.1. Tulosten tarkempi analysointi suoritetaan seuraavassa luvussa.

Taulukko 6.1. Mittausten aikana kerätyjä tuloksia verrattuna teoreettisiin arvoihin.

Toiminta	Teoreettinen	Mitattu	Yksikkö
Unitila	2,0095	2,2941	mA
Valmiustila	2,4340	2,6862	mA
Vastaanotto	12,9020	13,1373	mA
Lähetys	11,4020	11,9608	mA
Lämpötilan mittaus	0,7500	0,9804	mA

Taulukossa 6.1. on esitetty joitain huomioitavia mittaustuloksia. Arvot on esitetty neljän desimaalin tarkkuudella, jolloin teoreettisia arvoja ei pyöristetty. Eri toimintojen

teoreettisia arvoja laskettiin datalehdistä löytyvien aktiivi-, lepo- ja virransäästötilojen perusteella. Mitattujen arvojen tulos muodostuu sensorin toiminnasta kokonaisuudessaan, jolloin virrankulutusta lisää esimerkiksi laitteen vuotovirta. Kokonaisuudessaan esimerkkinä mitatun tapahtuman keskiarvoinen virrankulutus on 9,5 mA ja kesto 12 ms. Virrankulutuksen lisäksi päätettiin laskea myös energiankulutus kuvan 6.1. tapauksessa, jolloin saadaan kattavampi kuva sensorin toiminnasta. Energiankulutus saadaan laskettua kaavan (2) avulla.

$$E = P \times t = U \times I \times t \quad (2)$$

Kuten kaavasta (2) nähdään, energiankulutus riippuu tehosta P sekä ajasta t. Teho lasketaan jännitteen U ja virran I avulla. Energiankulutuksen yksikkönä käytetään tässä työssä joulea. Esimerkkinä mitatun tapahtuman energiankulutukseksi saadaan kaavaa (2) käyttämällä 0,29 mJ.

Mittauksien tarkkuuteen virrankulutuksen kohdalla vaikuttavat muun muassa mittauksissa käytetyn vastuksen arvon mittaus, käytetyt mittalaitteet, kytkennät sekä omat arviot oskilloskoopin näytöllä näkyvistä jännitetasoista. Virrankulutusta mitattaessa virheiden vaikutus sensorisolmujen elinikään kasvaa tarkasteltavan ajanjakson pituuden mukaan. Sensorisolmujen elinikää ei kuitenkaan pystytä tarkkaan arvioimaan lyhyellä aikavälillä edes tarkoilla mittauksilla. Sensoriverkon toiminta esimerkiksi voi olla arvaamatonta, topologiassa saattaa tapahtua muutoksia ja erityyppisten solmujen virrankulutus on erilainen. Oskilloskoopin avulla saadut arvot eri toimintoihin kuluneesta ajasta ovat virrankulutusta tarkemmat.

6.2 Ohjelmisto

Ohjelmakoodin toimivuuden varmistamiseksi tehtiin koodin eri osilla useita testejä. Eri testausmenetelmistä kerrottiin edellisessä luvussa. Ohjelmakoodin toimivuutta testattaessa toivottu tulos saatiin harvoin ensimmäisellä kerralla. Ohjelmakoodin oikeaoppisuudessa tuli usein virheitä, mutta koodia käännettäessä virheiden syy saatiin usein selvitettyä. Joitain tilanteita ei kuitenkaan pystytty ratkaisemaan pelkästään ohjelmakoodin tarkastuksilla tai simuloinneilla. Näitä tilanteita on esimerkiksi ulkoisiin ärsykkeisiin reagoiminen. Näissä tapauksissa ohjelmakoodia piti testata sensorisolmun avulla. Radiopiiri ilmoittaa *data ready* -ominaisuuden avulla, kun vastaanotettu sanoma on luettavissa vastaanottopuskurista. Kyseisestä tapahtumasta aiheutuu tilanmuutos radiopiirin vastaavassa pinnissä. Mikrokontrolleri voidaan asettaa reagoimaan tähän muutokseen esimerkiksi keskeytyksen avulla. Kyseisen tapahtuman ongelmatilanteita ei välttämättä voida ratkaista ilman laitteistoa. Testien avulla eteen tulleet ongelmat saatiin ratkaistua, ja ohjelmakoodin toimivuudesta kertoo esimerkiksi kommunikoinnin aikana oskilloskoopilta otetut kuvankaappaukset.

Edellisessä luvussa kerrottiin ohjelmakoodin ja laitteiston pidempiaikaisen käytön testaamisessa käytetyistä järjestelyistä. Ennen monimutkaisempia kokeita päätettiin

toimivuutta testata nollatoleranssilla. Virhetilanteita varten luotu uudelleenlähetys poistettiin käytöstä ja sensorit asetettiin toimimaan aiemmin kerrotulla tavalla. Sanomien vastaanotosta ja lähetyksestä signaloi alustassa olevat LED-valot. Mikäli jossain testin vaiheessa tapahtuu virhetilanne, jumittuu koko systeemi. Näin tapahtuu esimerkiksi tilanteessa, jossa välittäjäsolmu ei saa lähetettyä lämpötila-arvoa. Tällöin anturisolmu ei saa kuittausta lähetetylle sanomalle ja isäntälaitte ei saa mitattua arvoa. Näin ollen anturisolmu ja isäntäsolmu jäävät vastaanottotilaan ja vastaava LED-valo jää palamaan. Testin jälkeen systeemi jatkoi vielä toimintaansa, mikä tarkoitti sitä, että lähetyksissä ei kadonnut yhtään sanomaa. Testi toistettiin vielä lyhyemmällä ajalla, jolloin lähetysten sykliä nopeutettiin. Myöskään tässä tapauksessa ei tapahtunut systeemin jumittumista. Pidemmällä aikavälillä tapahtuu varmasti joitain sanomien katoamisia, mutta tätä varten koodissa on uudelleenlähetys. Testin avulla saatiin todettua, että liikennöinti on lyhyellä aikavälillä kyseisessä tilanteessa luotettavaa ja että käytetty ohjelmakoodi ei pidemmällä aikavälillä jumita mikrokontrolleria.

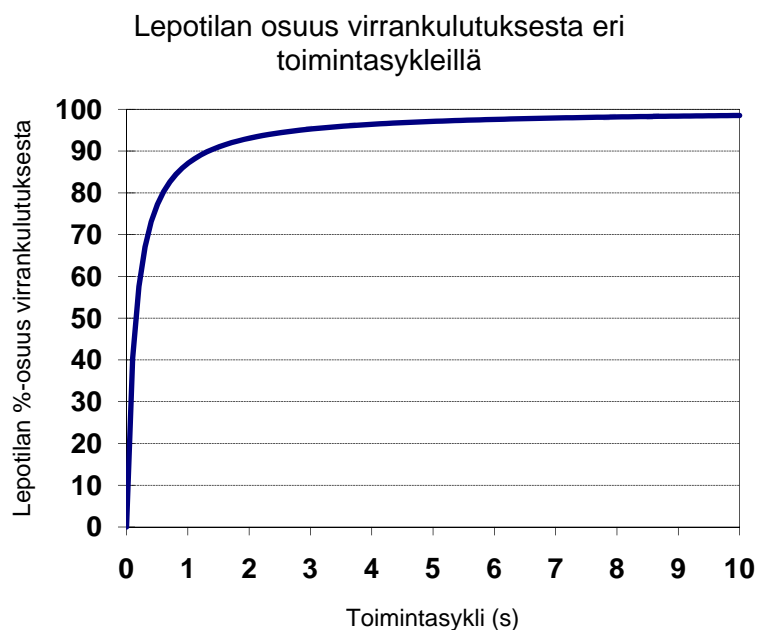
7 TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä kappaleessa analysoidaan tarkemmin Tampereen teknillinen yliopisto Rauman yksikössä tehtyjen mittausten ja testien tuloksia. Tulosten perusteella todettiin sensorisolmujen toimivan odotetulla tavalla, mutta kerättyjen tietojen merkitystä sensoriverkon osalta on syytä tarkastella hieman enemmän. Tarkemman analyysin perusteella saadaan esille jatkokehitystä auttavia seikkoja.

7.1 Laitteisto

Laitteistolle tehty mittaukset kertovat hetkellisiä ja lyhyen aikavälin tuloksia. Tehdyn laitteiston pidempiaikaista toimintaa voidaan arvioida soveltamalla saatuja tuloksia KILAVI:n mukaisen toiminnan esimerkkeihin. On hyvä muistaa kuitenkin, että arviot ovat tapauskohtaisia. Eri laitetyyppien käyttötarkoitus vaikuttaa niiden virrankulutukseen, lähetettävän tiedon määrään ja prioriteettiin sekä prosessointi tarpeeseen. Eri laitetyypeissä vakiona säilyy todennäköisesti radiomoduuli, sillä langattoman rajapinnan toiminta pitää olla KILAVI:n mukaista.

KILAVI:n mukaisessa toiminnassa osa sensorisolmuista ei ole jatkuvassa yhteydessä verkkoon. Yhteyden palautuessa sensorisolmu kysyy ensin välittävältä solmulta sille kuuluvia sanomia. Tämän lisäksi niiden pitää lähettää keräämänsä tieto eteenpäin isäntälaitteelle. Kuvassa 7.1. on esitetty KILAVI-verkossa tapahtuvaa perusliikennöinnin tapahtumia, kun kyseessä on esimerkiksi lämpötilaa mittaava anturisolmu.



Kuva 7.2. Lepotilan osuus virrankulutuksesta eri toimintasykleillä.

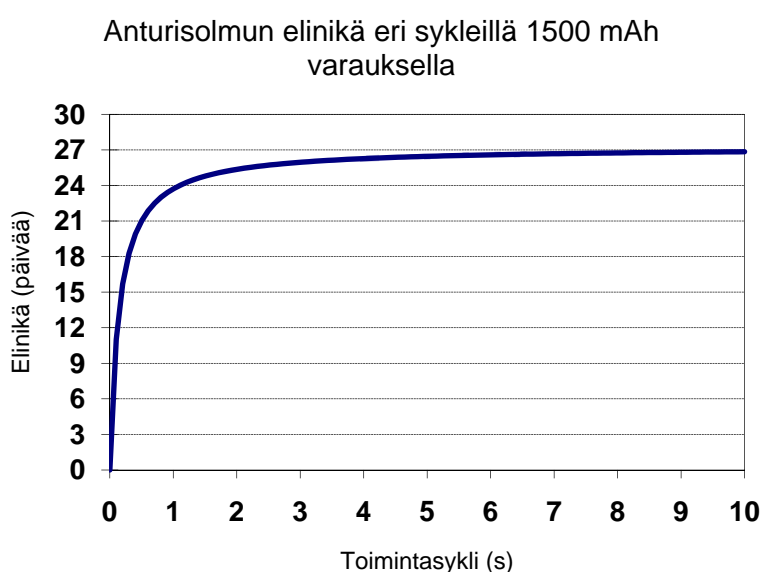
Kuten kuvasta 7.2. nähdään, lepotilan osuus keskimääräisestä virrankulutuksesta kasvaa nopeasti jo lyhyillä sykleillä. Tämä ei ole ihme, sillä toimintasyklin kasvattaminen kasvattaa vain lepotilan pituutta aktiivitilan pysyessä vakiona. Syklin ollessa 15 sekuntia aktiivitilan vaikutus on enää alle prosentin luokkaa. Virrankulutuksen puolesta ei ole juurikaan merkitystä, onko anturisolmun toimintasykli minuutin tai tunnin luokkaa edes vuositasolla. Toimintasyklin lyhentäminen sen sijaan lisää sanomien törmäysten todennäköisyyttä. Törmäykset lisäävät virrankulutusta uudelleenlähetysten muodossa.

KILAVI-verkossa paristokäyttöisiksi laitteiksi ovat tarkoitettu ainoastaan anturisolmut ja yksisuuntaiset solmut. Välittäjäsolmujen tarkoituksena on verkon jatkuva monitorointi. Välittäjäsolmujen tapauksessa joutoajan kasvaessa keskimääräinen virrankulutus lähenee vastaanottotilan virrankulutusta. Näin ollen pidemmällä aikavälillä tämän työn aikana tehtyjen välittäjäsolmujen keskimääräinen virrankulutus lähenee 13,14 mA käytetyillä asetuksilla.

Saatujen tulosten perusteella unitilassa paljon aikaa viettävien sensorisolmujen keskimääräisen virrankulutuksen voidaan katsoa olevan yhtä suuri kuin unitilan virrankulutus. Toiminnan aikana kulutus saattaa hetkellisesti kasvaa esimerkiksi uudelleenlähetysten takia. Pidemmällä aikavälillä poikkeusten vaikutus sensorin elinikään on kuitenkin mitätön. Tämä pätee tietysti myös muihin sensorisolmutyyppeihin. Virrankulutuksen kannalta tärkein suunnittelun kohde anturisolmujen kohdalla on lepotilan kulutuksen minimointi, kun taas välittäjäsolmun kohdalla pitää kiinnittää erityistä huomiota langattoman rajapinnan suunnitteluun. Anturisolmun näkökulmasta työn suunnitteluvaiheessa ei huomioitu tarpeeksi virtapuolen komponentteja. Huomiota veivät enemmän sensorisolmun muut osakokonaisuudet ja niiden suunnittelu. Prototyypin valmistuksessa ongelmia aiheutti radiopiirin

kiinnittäminen alustaan. Kyseisen työvaiheen virtamittauksissa pyrittiin enemmänkin havaitsemaan radiopiirin aiheuttamia oikosulkuja kuin analysoimaan eri osakokonaisuuksien virrankulutuksen merkitystä sensoriverkon kannalta. Prototyyppien toimissa huomio siirtyi ohjelmakoodin testaukseen.

Pidempiaikaisessa käytössä tehdyn sensorisolmun lepotilan virrankulutus osoittautui anturisolmun kannalta heikoksi lenkiksi. Kuvassa 7.3. on esitetty esimerkkinä anturisolmun elinikä aiemmin kuvassa 7.1. esitetyn toiminnan jatkuessa pidempään. Elinikä on laskettu tilanteessa, jossa sensorisolmulla on käytettävissä 1500 mAh:n varaus. Kyseistä määrää ja yksikköä päätettiin käyttää, sillä sen katsotaan parhaiten havainnollistavan kulutusta. Kyseistä suuretta käytetään paljon esimerkiksi monille tutussa sormiparistossa.



Kuva 7.3. Anturisolmun elinikä eri toimintasykleillä, kun käytössä on 1500 mAh:n varaus.

Kuten kuvasta 7.3. nähdään, ei tehty laite sovellu pidempiaikaiseen käyttöön tavanomaisilla paristoilla. Pidempiaikainen käyttö vaatisi joko tehokkaan akun tai itselatautuvan tehonlähteen. Käytetyn regulaattorin vaikutus lepotilan virrankulutuksessa on noin 99,5 prosenttia. Paremmalla regulaattorin valinnalla edellä mainitussa tilanteessa anturisolmun elinikä saadaan helposti nostettua yli kahden vuoden. Välittäjäsolmun näkökulmasta vaikutus ei kuitenkaan ole läheskään yhtä merkitsevä. Langattoman talojärjestelmän kehittämisen kannalta alustassa havaittu heikkous ei tuota juurikaan ongelmia, sillä muilta osilta alusta toimii toivotulla tavalla. Tarvittaessa alustassa oleva virtapuoli voidaan korvata toisella kiinnittämällä vaihtoehtoinen tehomodula sensoriin

Mikäli sensorisolmun virrankulutus nousee käytettävän sovelluksen takia suureksi, kannattaa kyseisen tapauksen kohdalla miettiä ratkaisuja erikseen. Lämpötilan monitoroinnin lisäksi anturisolmun tehtäviin saattaa esimerkiksi kuulua

ilmastointilaitteen tuuletustehon muuttaminen. Kyseisessä tapauksessa anturisolmu voi ottaa käyttöjännitteensä suoraan ilmastointilaitteesta. Anturisolmut voidaan jakaa niiden mittaaman suureen käyttötarkoituksen mukaan eri luokkiin. Joidenkin anturisolmujen tarkoituksena voi olla esimerkiksi huoneen lämpötilan mittaaminen, jolloin reaaliaikaisen datan saaminen ei välttämättä ole tärkeää. Joidenkin tarkoituksena saattaa olla sen sijaan savun havaitseminen kotitaloudessa, jolloin tarvitaan nopeasti päivitettyä tietoa. Mikäli anturisolmun tarkoituksena on myös säätää lämpötilaa, voidaan se liittää ilmastointilaitteeseen.

7.2 Ohjelmisto

Työn aikana eteen tulleet ongelmat saatiin ratkaistua käytössä olevilla työkaluilla ja Rauman tutkimusyksikössä työskennelleiden henkilöiden avulla. Työn lopussa sensorisolmut toimivat ohjelmakoodin käskyjen mukaan toivotulla tavalla, ja viimeisempien testien perusteella voidaan todeta työn esittelyvaiheessa ilmoitettujen tavoitteiden täyttyneen.

Ohjelmakoodin osalta KILAVI-protokollan toiminnallisuuksien toteuttamisessa on vielä paljon tekemistä. Tehty koodi on kuitenkin hyvä pohja kehitykselle. Ohjelmakoodin jakaminen erillisiin lähde- ja *header*-tiedostoihin selkeyttää koodia huomattavasti ja tekee muokkaamisesta helpompaa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYS

Tämän diplomityön tarkoituksena oli jatkaa Tampereen teknillinen yliopisto, Rauman tutkimusyksikössä kiinteistöympäristöön soveltuvan langattoman automaatiojärjestelmän kehittämistä. Tämän työn kokonaisuuteen kuuluivat langattoman sensorin suunnittelu ja rakentaminen sekä KILAVI-protokollan mukaisten perustoiminnallisuuksien ohjelmointi. Kuten aiemmissa luvuissa esitetään, päästiin näihin tavoitteisiin. Työn lopussa sensorit pystyivät itsenäisesti keräämään lämpötilatietoa ympäristöstä, lähettämään kerätyn tiedon KILAVI:n periaatteiden mukaisesti verkkoon, välittämään tietoa ja prosessoimaan vastaanotettua tietoa.

Tällä hetkellä ohjelmakoodi sisältää pääasiallisesti vain verkon liikennöintiin tarvittavat perustoiminnot. Koodi on kuitenkin hyvä pohja, kun jatketaan KILAVI-protokollan muiden toimintojen luomista. Jatkossa kehitys vaatii isäntälaitteen toimintojen luomista. Esimerkiksi tällä hetkellä verkon laitteisiin ohjelmoidaan suoraan sensorisolmujen tarvitsemat tiedot, kuten reittitieto. KILAVI:n periaatteiden mukaan isäntälaitte laskee parhaan mahdollisen reitin sensorisolmuille. Reitin laskeminen ja muu isäntälaitteen vaatima logiikka ovat huomattavasti monimutkaisempia kuin verkon muiden solmujen. Monet KILAVI-protokollan toiminnot vaativat kuitenkin vain pieniä lisäyksiä tehtyyn ohjelmakoodiin.

Tehtyjen testien perusteella voidaan todeta tämän hetkisen KILAVI-verkon toimintojen olevan luotettavia. Sanomien perille pääsyä vaikeuttavat ympäristö sekä siirtotiellä tapahtuva liikennöinti. Monilta osin tavallisessa kotitaloudessa ympäristön aiheuttama häiriö on vähäistä, kuten myös liikennöinti. Verkon toiminta on sitä luotettavampaa, mitä vähemmän solmuja ja liikennettä siinä on. Suuremmissa verkoissa tai epäsuotuisissa ympäristöissä saattaa olla tarvetta priorisoida laitteita. Esimerkiksi ilmastointilaitteen säätösanomien perillepääsy ei välttämättä ole yhtä tärkeää kuin palohälyttimestä lähetetty hätäsanoma. Laitteen prioriteetti voidaan muun muassa ottaa huomioon laskettaessa sanoman uudelleenlähetyksen viivettä. Joissain tilanteissa sanomien perillepääsy saattaa olla ratkaiseva tekijä elämän ja kuoleman välillä. Näitä tilanteita varten on syytä tehdä omat ratkaisut. Yksi vaihtoehto on useamman liikennöintikanavan käyttö. Isäntälaitte sisältää paljon suuremman prosessointikyvyn kuin tavalliset sensorisolmut, minkä takia siihen voidaan helposti lisätä useampi radiomoduuli. Tämä mahdollistaa usean samanaikaisen liikennöintikanavan käytön eri verkon osia varten. Näin ollen elintärkeät verkon toiminnot voidaan eriyttää omalle taajuudelleen, niin sanotulle hätäkanavalle. Tämä ei sinänsä haittaa verkon laitteiden välistä kommunikointia, sillä kaikki sanomat kulkevat joka tapauksessa isäntälaitteen kautta.

Kiinteistöympäristöön soveltuvan langattoman järjestelmän luomisessa on vielä monia vaiheita ohjelmakoodin lisäksi. Tällä hetkellä aihetta tutkitaan paljon, ja omia tuloksia voi verrata muiden tekemiin tutkimuksiin.

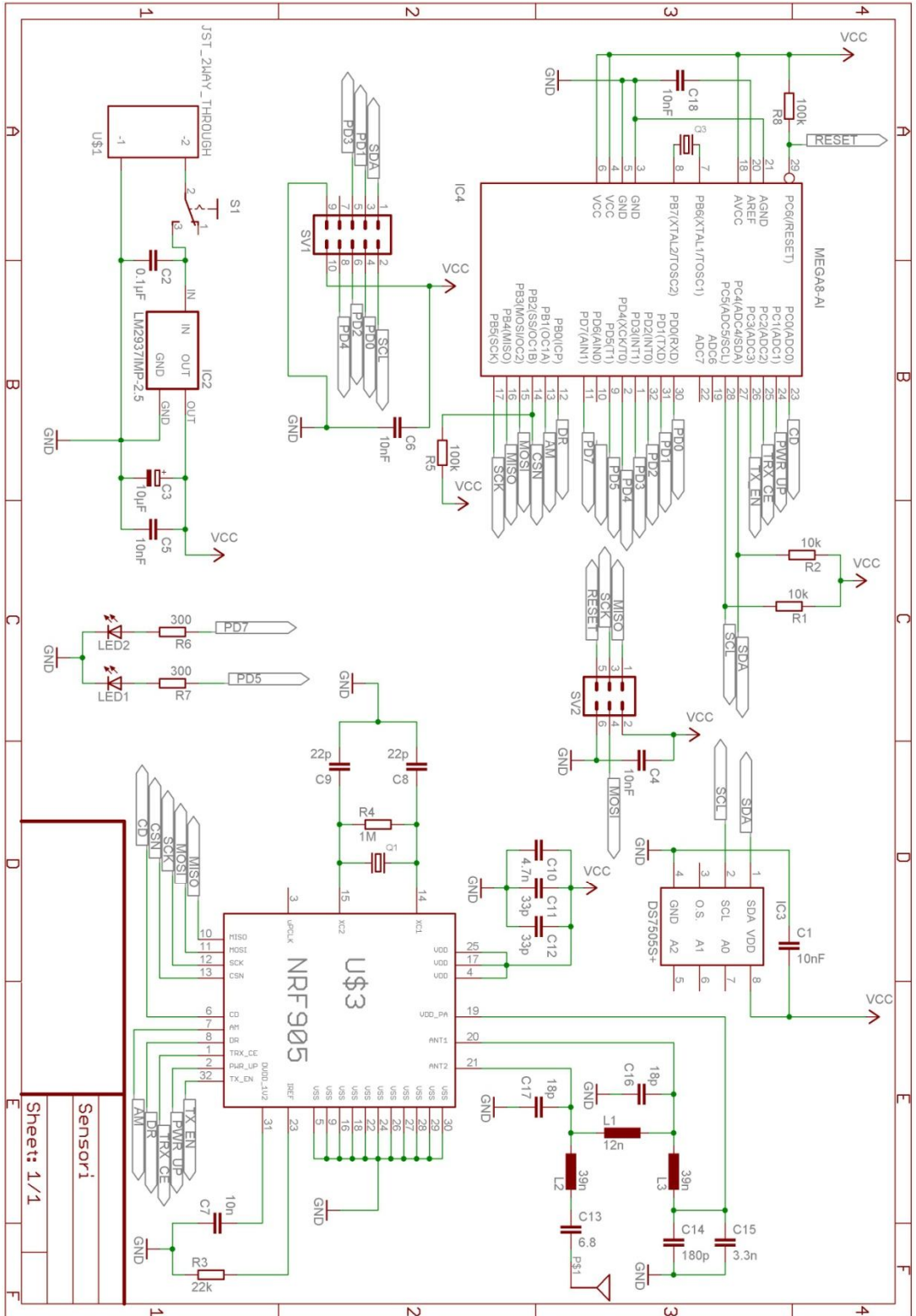
LÄHTEET

- [1] Elsenpeter, Robert C., Velte, Toby J. Building your own smart home, 1st edition. United States 2003, McGraw-Hill Osborne Media. 256 p.
- [2] Himanen, M. The Intelligence of Intelligent Buildings. The feasibility of the Intelligent Building Concept in Office Buildings. Espoo 2003. VTT. 497 p.
- [3] Wilson, John S. Sensor Technology Handbook. United States 2004. Newnes. 704 p.
- [4] Merz, H., Hansemann, T., Hübner, C. Building Automation: Communication systems with EIB/KNX, LON and BACnet, 1st edition. Germany 2009, Springer, 282 p.
- [5] Gratton, Dean A. Developing Practical Wireless Applications, 1st edition. United States 2007, Elsevier Science Ltd, 259 p.
- [6] Stojmenovic, Ivan. Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures, 1st edition. United States 2005, John Wiley & Sons. 552 p.
- [7] Gislason, D. Zigbee Wireless Networking. United States 2008, Newnes. 448 p.
- [8] Phoha, Shashi, La Porta, Thomas F., Griffin, Christopher. Sensor Network Operations. United States 2006, John Wiley & Sons. 724 p.
- [9] Marco Sgroi, Adam Wolisz, Alberto Sangiovanni-Vincentelli, Jan M. Rabaey. November 2003. A Service-Based Universal Application Interface for Ad-hoc Wireless Sensor Networks. University of California Berkeley, Technical University of Berlin. 37 p.
- [10] Vierikko, Jaakko. Energian sieppaaminen langattomiin sensoreihin. Diplomityö. Rauma 2007. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 69 p.

- [11] Brian Otis, Jan Rabaey. Ultra-Low Power Wireless Technologies for Sensor Networks. United States 2007, Springer. 192 p.
- [12] Nordic Semiconductor. Introduction to wireless networks. September 2004. Viitattu 3.3.2009.
http://www.nordicsemi.com/files/Product/white_paper/Introduction_to_wireless_network.pdf
- [13] Soini, Mikael. Studies towards Developing Wireless Control and Monitoring Reliability and Usability in a Building Environment. Väitöskirja Tampere 2007.
- [14] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci. A Survey on Sensor Networks. Georgia Institute of Technology. 13 s.
- [15] Javvin Technologies, Inc. Network Protocols Handbook, 4th edition. 2007, Javvin Press. 380 p.
- [16] William C. Craig. Zigbee: "Wireless Control That Simply Works" Program Manager Wireless Communications ZMD America, Inc. 7 s.
- [17] Sikkilä, Hannu. Kiinteistön langaton viestintä. Diplomityö. Rauma 2007. Tampereen teknillinen yliopisto. Tietotekniikan koulutusohjelma. 70 s
- [18] ITU:n ISM suositukset. Viitattu 1.2.2010.
<http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>
- [19] ERC/REC 70-03. Viitattu 1.2.2010.
<http://www.eroocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/REC7003E.PDF>
- [20] Ali-Rantala, P., Sydänheimo, L., Keskilampi, M. & Kivikoski, M. Indoor propagation comparison between 2.45 GHz and 433 MHz transmissions. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE Volume 1, 16-21 June 2002 s. 240-243 vol.1.
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7931/21870/01016293.pdf>
- [21] RainSun. AN1603-433 datasheet. Jun 2006. Viitattu 3.3.2010.
<http://www.rainsun.com/web-download/ANT-950626/RainSun%20AN1603-433%20Spec..pdf>
- [22] Nordic Semiconductor. Design-in with RF circuits. 11.12.2002. Viitattu 12.3.2009.

- http://www.nordicsemi.com/files/Product/white_paper/RF-design-in.pdf
- [23] Nordic Semiconductor. nRF905 RF and antenna layout. Revision 2.1 June 2006. Viitattu 11.4.2009.
http://www.nordicsemi.com/files/Product/applications/nAN900-04-nRF905_RF_and_antenna_layout_rev2_1.pdf
- [24] Nordic Semiconductor. nRF905 datasheet. Revision 1.5, April 2008. Viitattu 10.3.2009.
http://www.nordicsemi.com/files/Product/data_sheet/Product_Specificatio_n_nRF905_v1.5.pdf
- [25] National Semiconductor. LM2937-2.5 datasheet. August 2005. Viitattu 17.4.2009. <http://www.national.com/ds/LM/LM2937-2.5.pdf>
- [26] Maxim, DS7505 Datasheet. Revision 1, March 2008. Viitattu 10.3.2009.
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS7505.pdf>
- [27] Atmel, ATMega168P Datasheet. Revision F, August 2008. Viitattu 10.3.2009.
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8025.pdf
- [28] Haowen Chan and Adrian Perrig, Security and Privacy in Sensor Networks. Carnegie Mellon University. 3 p.
- [29] M. Soini, L. Sydanheimo, M. Kivikoski, Reliability and Scalability of the Kilavi Building Control Platform, Proc. IEEE International Symposium on Consumer Electronics, June 2007.
- [30] Michael Barr, Anthony Massa. 2006. Programming Embedded Systems, 2nd edition. O'Reilly. 301 p.

LIITE 1: SENSORISOLMUN PIIRIKAAVIO



Sensor1
Sheet: 1/1

LIITE 2: SENSORISOLMUN PROTOTYYPIN VALMISTUKSESSA KÄYTETYT MASKIT JA STENSIILI

