

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tietotekniikka  
Tietoliikennetekniikka

Tutkintotyö

Heidi Kivekäs

## **Lyhyen kantaman anturiverkkojen radiotekniikka**

Tutkintotyö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi insinöörin  
tutkintoa varten Tampereella 24.4.2008.

Työn ohjaaja  
Tampere 2008

Lehtori Ari Rantala

Tutkintotyön tekijä	Heidi Kivekäs
Tutkintotyön nimi	Lyhyen kantaman anturiverkkojen radiotekniikka
Päivämäärä	24.4.2008
Sivumäärä	44 sivua ja 3 liitettä
Hakusanat	Anturiverkko, mesh-verkko, ANT-protokolla
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikennetekniikka
Työn ohjaaja	Lehtori Ari Rantala
<p>Lyhyen kantaman anturiverkkojen toiminta perustuu yksinkertaistetusti esineen tai ympäristön mittaamiseen, tämän mittaustiedon välittämiseen muun verkon saataville ja mahdollisesti myös mittaustuloksen pohjalta valittavan, ennalta asetetun, toiminnan suorittamiseen. Anturiverkkojen mahdollisia sovelluskohteita on lukemattomasti, ja kuhunkin kohteeseen on toteutuksesta riippuen valittavissa sopivin useista eri radiotekniikoista. Langattomat anturiverkot mahdollistavat topologiaaltaan hyvin monimuotoisten verkkototeutusten käytön, joista mielenkiintoisimpana lienee mesh-verkkoajattelun mukainen verkotus. Tämän työn tarkoituksena oli esitellä paitsi langattomien anturiverkkojen toimintaa yleisesti ja tutustua niiden mahdollisiin sovelluskohteisiin, myös perehtyä markkinoilla oleviin tekniikoihin ja niiden toteutukseen. Näistä tekniikoista keskeisimpänä on kerrottu ANT:n kehittämästä ANT-protokollasta, jota tutkittiin käytännössä Nordic Semiconductorin ja ANT:n yhteistyössä valmistamaa ANTDKT3-kehityspakettia käyttäen siten, että rakennettiin yksinkertainen tutkimusverkko. Rakennettua verkkoa ja erityisesti sen viestinvälitystä tarkasteltiin PC-ympäristössä kehityspaketin mukana toimitettujen konfigurointi- ja kontrollointisovellusten avulla. Tämän perusteella todettiin, että ANT-protokollalla anturiverkon pystytys oli suhteellisen vaivatonta ja protokolla tarjoaa mahdollisuuksia verkon soveltamiseen useisiin eri sovelluskohteisiin ja -ympäristöihin. Tutkimusverkko luo peruspohjan myöhempään jatkokehitykseen ja -tutkimiseen, mihin tarkoitukseen työssä on esitelty myös verkon kehitysideoita ja mahdollisia tutkimuskohteita.</p>	

Author	Heidi Kivekäs
Engineering thesis	Radio engineering in short distance wireless sensor networks
Date	24 <sup>th</sup> of April, 2008
Number of pages	44 pages and 3 appendices
Keywords	Sensor network, mesh network, ANT protocol
Degree Programme	Computer Systems Engineering
Specialisation	Telecommunications Engineering
Thesis supervisor	Senior lecturer Ari Rantala
<p>In a simplified manner, the operation of short distance wireless sensor network is based on the measurement of an object or environment and sending this data accessible to others in the network. Also, performing of predetermined operations based on this measurement may be taken. There are numerous many possible targets of application of sensor networks and depending of the realisation of each target, the most suitable from several different radio techniques may be chosen. The wireless sensor networks enable the network realisation with very multiform topology, as probably the most interesting is mesh network. The purpose of this thesis was to show generally the operation of wireless sensor networks and to become acquainted with their targets of application by studying the techniques on the market and their realisation. In this thesis, the most important of these techniques is ANT protocol which was studied in practice by building a simple study network with the help of ANTDKT3 development kit, engineered by ANT and Nordic Semiconductor. The built network, especially its media transmission, was examined in the PC environment with the help of the control applications which were delivered with the development kit. On the basis of this, it was stated that on the ANT protocol the assembling of the sensor network was relatively easy and that the protocol provides opportunities for fitting the network to several different targets of application and application environments. The study network provides the basis to a later development and further studies to which development ideas of the network and possible research subjects have also been presented in the thesis.</p>	

## ALKUSANAT

Anturiverkkotekniikoiden ajankohtaisuus, niiden mahdollistamien sovelluskohteiden laajuus sekä tulevaisuuden kehitysnäkymät antoivat tälle Tampereen Ammattikorkeakoulun toimesta tehdylle tutkintotyölle hyvät lähtökohdat ja loivat tarpeen tutkimukseen.

Työ on toteutettu yhteistyössä MeshWorks Wireless Oy:n kanssa, joka tarjosi tutkimukseen vertailumateriaalia ja näkökantoja verkon topologioihin sekä sovelluskohdemahdollisuuksiin.

Työ on julkinen (ei salainen).

Tampereella 24.4.2008

Heidi Kivekäs

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	i
ABSTRACT .....	ii
ALKUSANAT.....	iii
SISÄLLYSLUETTELO .....	iv
LYHENNELUETTELO .....	v
1 Johdanto.....	1
2 Anturiverkon toiminta .....	2
2.1 Esimerkkejä sovelluskohteista.....	2
2.2 Topologia.....	4
2.3 RF-lohko.....	6
2.3.1 Taajuusalue.....	7
2.3.2 Toimintatekniikka.....	8
2.3.3 Teho, kantama ja siirtokapasiteetti .....	9
3 Markkinoilla olevia tekniikoita .....	13
3.1 ZigBee .....	13
3.2 MiWi, Z-Wave ja SmartMesh .....	14
3.3 VersaMESH.....	15
3.4 RFID, WLAN, Wi-Fi ja Bluetooth.....	16
3.5 Wibree ja Wavenis .....	17
4 ANTDKT3-kehityspaketti.....	18
4.1 Tekniset tiedot .....	18
4.1.1 AP1-moduuli .....	20
4.1.2 SensRcore™-moduuli .....	21
4.1.3 Muut moduulit .....	22
4.2 ANT-protokolla .....	23
4.2.1 Topologia.....	24
4.2.2 OSI-malli .....	25
4.2.3 Kanavat.....	25
4.2.4 Viestityypit .....	27
4.3 Verkon rakentaminen .....	29
4.3.1 ANTware RF Control .....	29
4.3.2 SensRware .....	30
4.3.3 Tutkimusverkko.....	31
5 Päätelmät ja kehitysideoita .....	35
LÄHTEET .....	37
LIITTEET	
1 Pienen lähetystehon radiotekniikoiden vertailutaulukko	
2 ANTware RF Control -sovelluksen käyttöliittymä kommentteineen	
3 SensRware-sovelluksen käyttöliittymä kommentteineen	

## LYHENNELUETTELO

ASH	Amplifier-Sequenced Hybrid radio technology Vahvistinsarjana toteutettu hybriditekniikka
BPSK	Binary Phase Shift Keying Binäärinen vaiheavainnus
CDMA	Code Division Multiple Access Koodijakoinen monikäyttö
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum Suorasaantilevitys
EIRP	Equivalent isotropically radiated power Efektiivinen säteilyteho isotrooppisille antenneille
ERP	Effective Radiated Power Radiolähteen efektiivinen säteilyteho
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum Taajuushyppelyyn perustuva hajaspektritekniikka
FSK	Frequency Shift Keying Digitaalinen taajuusmodulaatio
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying Gaussisella suotimella toteutettu FSK-taajuusmodulaatio
ISM	Industrial, Scientific and Medical Teollisuuden, tutkimuksen ja lääketieteen käyttöön tarkoitettu taajuusalue
ITU-R	International Telecommunication Union – Radiocommunication Kansainvälinen telealan standardoimisjärjestö – radiokommunikointi
MANET	Mobile ad-hoc network Mobiili ad-hoc (tiettyyn käyttöön tarkoitettu) -verkko
MIMO	Multiple Input, Multiple Output Antennien yhteiskäyttö TX- ja RX-suunnissa
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Diskreettiin Fourier-käanteismuunnokseen perustuva taajuusjakoinen multipleksointi
P2P	Peer-to-peer Verkkotopologia, jossa ei ole eritelty asiakkaita ja palvelimia
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying Nelivaiheinen vaiheavainnus

RFID	Radio Frequency Identification Radiotaajuinen etätunnistus
TDMA	Time Division Multiple Access Aikajakoinen monikäyttö
TSMP	Time Synchronized Mesh Protocol Aikasynkronoitu mesh-verkko protokolla
WLAN	Wireless Local Area Network Langaton lähiverkko

## 1 Johdanto

Lyhyen kantaman energiatehokkaiden anturiverkkojen markkinoille tulo on herättänyt kasvavan kiinnostuksen niiden sovellusmahdollisuuksien tutkimiseen ja laajentamiseen. Uusien toimintatapojen, kuten mesh-verkko-ratkaisun, toteuttamisen mahdollistaa radiotekniikan kehittyminen ja uusien standardien luominen. Tällä hetkellä nopea ryntäys markkinoille on synnyttänyt useita kilpailevia tekniikoita ja toteutuksia, joilla kullakin on omat etunsa. Yleisesti käytössä olevan standardin puuttuminen ja suhteellisen uudet sovellusnäkömöt antavat käyttäjälle laajan mahdollisuuden valita sopivin tekniikka kuhunkin sovellukseen.

Tässä työssä tutustutaan ensin anturiverkkojen sovellusmahdollisuuksiin, yleisiin periaatteisiin ja radiotekniikkaan, minkä jälkeen esitellään muutamia suurimpia markkinoilla tällä hetkellä olevia tekniikoita sekä pohditaan niiden tulevaisuuden kehitysnäkymiä. Näistä tekniikoista nostetaan esiin Nordic Semiconductorin ja ANTin yhteistyössä kehittämä nRF24AP1- ja nRF24L01-radiopiireihin sekä ANT-protokollaan perustuva toteutus, jota tutkitaan näiden yritysten julkaiseman kehityspaketin, ANTDKT3, avulla rakentamalla testaukseen ja tutkimiseen soveltuva tutkimusverkko.

Työn lopuksi esitellään ANTDKT3-kehityspaketin avulla uuden anturisolmun suunnitteluun, toteutukseen ja testaukseen ideoita sekä pohditaan rakennetun verkon mahdollisia kehitys- ja tutkimusmahdollisuuksia.

## 2 Anturiverkon toiminta

Anturiverkkojen tärkeimpänä peruspiirteenä on niiden toiminnan mittauslähtöisyys. Verkon kussakin pisteessä eli solmussa on RF-lohkon lisäksi anturi, joka mittaa fyysisen kohteen tai ympäristön tilaa ja tämän mittauksen perusteella suorittaa sarjan ennalta asetettuja toimia. Anturisolmujen liittyminen toisiinsa ja viestien reititys näiden välillä mahdollistuu *peer-to-peer*-toimintaa (P2P) soveltamalla.

Anturisolmuja suunniteltaessa RF-lohkojen tehonkulutukseen kiinnitetään erityistä huomiota. Kulutuksen pienentäminen korostuu esimerkiksi paristokäyttöisissä anturipisteissä, jollaisia usein anturiverkkojen etäsolmut ovat. Lyhyen kantaman mahdollistaman pienen lähetystehon lisäksi tämä saavutetaan usein RF-lohkon yleisesti melko vaatimattomalla määrittelyllä ja ohjausdatan pienentämisellä /1, s. 41/.

### 2.1 Esimerkkejä sovelluskohteista

Anturiverkon toimintaa ja periaatteita lienee helpoin lähestyä käytännön sovellusesimerkkien avulla. Kuvitellaan, että vastavalmistuneeseen asuinkerrostaloon on kuhunkin asuntoon rakennettu pieni anturiverkko, jonka anturit mittaavat esimerkiksi seuraavia asioita:

- uunin, liedon ja kahvinkeitin tilaa
- valaisinkytkimien asentoa
- eri vesipisteiden veden juoksutusta (painetta verkossa)
- ihmisten määrää huoneistossa (esim. liike- tai lämpötunnistuksen avulla)
- palo- ja murtohälyttimien merkinantoja.

Näiden mittaustietojen perusteella anturiverkko voisi esimerkiksi katkaista virran uunista, liedestä, kahvinkeitimestä ja sammuttaa valaistuksen, kun huoneisto on ollut tyhjänä kymmenen minuuttia. Vesivahinkojen aiheuttamia tuhoja voitaisiin minimoida veden juoksutusta ja putkiston painetta tarkkailemalla, anturiverkkoon ohjelmoitujen varotoimien avulla. Lisäksi, jos asuntokohtaiseen anturiverkkoon

luotaisiin puhelinyhteysmahdollisuus, kotia valvova verkko voisi lähettää asunnon haltijalle tilannetietoja tai muistutuksia. Esimerkiksi anturiverkon lähettämä listaus jääkaapin sen hetkisestä sisällöstä avustaisi osaltaan viikonlopun ruokaostosten tekoa.

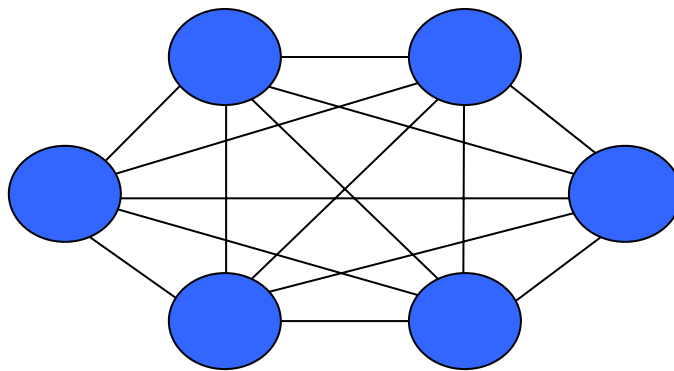
Tehdasympäristössä erilaisten antureiden käyttö mittauspisteissä on jo arkipäivää. Näiden paikallisten mittausten muuttaminen osaksi anturiverkkoa kuitenkin mahdollistaisi automaatioasteen kasvattamisen ja mittaustulosten kokonaisvaltaisen hyödyntämisen. Esimerkiksi, jos putkessa kulkevan tuotteen virtausta mittaava anturi saavuttaisi sille asetetun hälytysrajan, anturiverkon välityksellä ohjattaisiin käsky putken tulosuunnan venttiilin säätöön sekä lähetettäisiin tilanteesta hälytysilmoitus käyttöhenkilökunnalle, joka voisi arvioida, tarvitaanko heidän läsnäoloon vai riittävätkö automaattisesti tehtävät korjaukset. Monissa tehdasautomaatiokohteissa vastaavaa toimintaa on jo nykyisellään mutta ei juurikaan langattomana toteutuksena.

Alueellisen anturiverkon liittäminen valtakunnalliseen puhelinverkkoon avaa mahdollisuuksia laajempiin sovelluskokonaisuuksiin ja niiden etäkäyttöön. Esimerkiksi kaupunkialueelle rakennetun anturiverkon avulla voisi näkörajoitteinen henkilö kotona suunnitella kaupungin ruuhka- tai esimerkiksi säätilanteen mukaan päivän kulkureittinsä, ladata sen mukaansa matkapuhelimeen ja saada tähän liitettyjen korvakuulokkeiden kautta reitistä, kulkusuunnasta ja matkalla olevista esteistä tai hidasteista opastavia sekä varoittavia ääniviestejä. Näkörajoitteisen henkilön julkisten kulkuvälineiden käyttö helpottuisi, kun korvakuulokkeista kuuluisi, milloin mikäkin kulkuneuvo olisi pysäkin kohdalla. Tässä esimerkkisovelluksessa nimenomaan anturiverkkojen ympäristön havainnointi ja tiettyjen verkkoprotokollien mahdollistama sijainninmääritys ovat elintärkeitä, ja muilla tunnetuilla tekniikoilla vastaavaa palvelua tuskin pystyttäisiin toteuttamaan.

Edelliset esimerkit havainnollistavat paitsi anturiverkkojen loputtomia sovellusmahdollisuuksia myös niiden tärkeintä toimintaperiaatetta: mitataan kohdetta, välitetään mittaustulos muun verkon ja päätelaitteen saataville sekä lopuksi toimitaan ennalta ohjelmoidulla tavalla.

## 2.2 Topologia

Anturiverkkojen toiminta rakentuu niiden käyttämien topologioiden ympärille. *Peer-to-peer*-toiminnan mukaisesti kaikki verkon solmut ovat yhteydessä toinen toisiinsa ja kukin niistä toimii osaltaan verkossa kulkevien pakettien välittäjänä. Puhdasta *peer-to-peer*-toimintaa havainnollistaa kuvassa 1 esitetty topologia. Tämä toiminta edelleen yhdistyy *mobile ad-hoc network* eli MANET-verkko-periaatteeseen, jonka mukaisesti kukin verkko rakentuu tiettyyn tarpeeseen ja verkon solmut ovat mobiileja, itsenäisesti konfiguroituvia reitittämiä /2/.



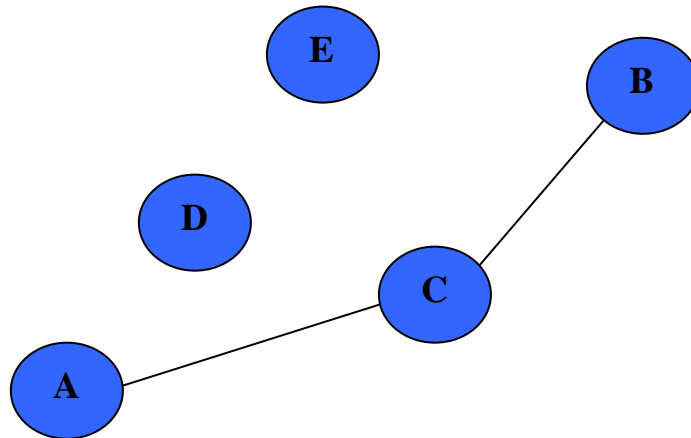
Kuva 1. *Peer-to-peer*-verkossa kaikki verkon päätteet liittyvät toisiinsa suoraan. Verkon päätepiisteet voivat luonnollisesti sijaita toisiinsa nähden mielivaltaisella tavalla.

Langaton mesh-verkko on staattinen *multi-hop peer-to-peer* -verkko eli nimensä mukaisesti verkon solmut toimivat useina hyppyinä paketin reitityksessä ja erotuksena MANET-verkkoihin, sen solmut ovat staattisia /3/ ja keskittyvät anturiverkoissa erilaisiin monitorointitehtäviin pelkän kommunikoinnin lisäksi /4/.

Mesh-verkko-topologia mahdollistaa verkon skaalautuvuuden ja ympäristöön soveltumisen. Sen kaikki solmut toimivat yhdessä datan siirtämiseksi, minkä seurauksena naapurit tunnistavat toisensa, jolloin verkko jatkaa toimintaansa, vaikka jokin solmu otetaan pois tai se lakkaa muuten toimimasta /1, s. 41/.

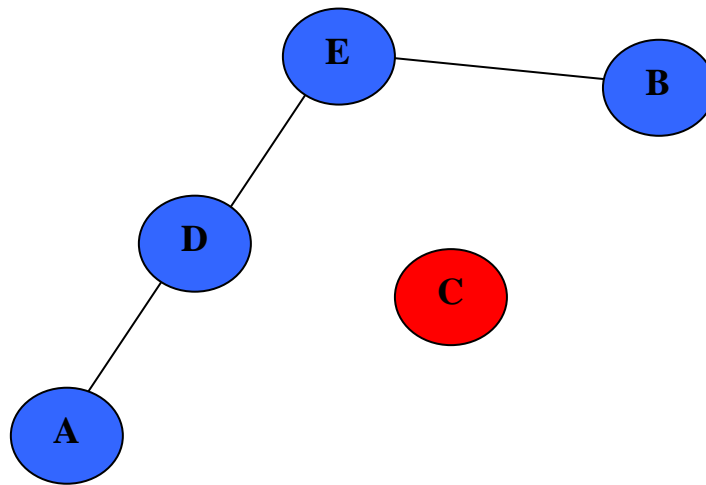
Seuraavassa esitetään kuvasarja mesh-verkon uudelleen organisoitumisen havainnollistamiseksi. Huomattavaa on, että mesh-verkko kokonaisuudessaan noudattaa kuvassa 1 esitettyä *peer-to-peer*-verkon topologiaa, mutta toiminnan esittämiseksi kuvissa 2.1 ja 2.2 esitetään yhteys ainoastaan yhden tiedonsiirtotien osalta. Verkon topologiassa näissä kuvissa päätepisteet sijaitsevat toisiinsa nähden mielivaltaisella tavalla.

Alkutilanteessa, kuvassa 2.1, verkko on muodostunut siten, että päätteet A ja B ovat muodostaneet välilleen yhteyden solmun C kautta.



Kuva 2.1. Alkutilanne, jossa A ja B ovat valinneet tiedonsiirtoon ensisijaisen reitin solmun C kautta, sillä A ja B ovat liian kaukana toisistaan muodostaakseen välilleen suoran siirtoyhteyden.

Oletetaan, että päätteessä C ilmenee pitkäkestoinen häiriötila, jonka vuoksi se ei pysty toimimaan viestinvälittäjänä ja joutuu katkaisemaan yhteydenpidon sekä A-että B-pääteeseen. Tällöin mesh-verkko organisoituu uudestaan esimerkiksi kuvassa 2.2 esitetyn mukaiseksi ja tiedonsiirto päätteiden A ja B välillä voi jatkua päätteiden D ja E kautta.



Kuva 2.2. Uudelleen organisoitunut siirtoyhteys päätteiden A ja B välillä.

Mesh-verkko-ajattelun mukaisesti verkko voi toimia jopa ilman isäntää, koska sen solmuilla on kyky tehdä yhteistyötä. Muutamissa anturiverkkojen toteutuksissa tosin isäntäsolmu eli koordinaattori on tarpeellinen. Tällainen koordinaattorilohko toimii usein samalla myös mahdollisena liityntäpisteenä internetiin esimerkiksi muita lohkoja kantavamman radiotekniikan avulla /4/. Koordinaattorin kanssa tai ilman, mesh-verkko osaa kuitenkin konfiguroida itsensä, mikä luonnollisesti vähentää hallinnan ja ylläpidon tarvetta /1, s. 41/.

Huomattavaa mesh-verkon käytössä langattomien anturiverkkojen tapauksessa on, että verkon helppo pystytys ja hallinnointi mahdollistuvat nimenomaan, kun toimivaa koodia kirjoitetaan käytännön toteutuksen päälle. Sopivan protokollan valinta langattoman anturiverkon toteutukseen näyttelee siis suurta roolia.

### 2.3 RF-lohko

Kuten edellä on todettu, lyhyen kantaman langattomien anturiverkkojen yksi tärkeimmistä käyttöön valittavan standardin ominaisuuksista on solmun tehonkulutuksen hallinta. Monet anturiverkkojen sovelluksista vaativat solmun sijoittamista fyysisesti etäiseen tai muutoin hankalasti käsiteltävään paikkaan, jolloin solmun eliniän määrää sen virtalähteen (usein paristo) kesto /4/.

Tehonkulutusta säädeltäessä on otettava huomioon muun muassa laitteen toiminta-  
taajuusalue, modulaatiovalinta ja kantamavaatimus. Myös verkon topologian keve-  
ys alentaa tehontarvetta, kun ohjausdatan määrä pienenee. Yleisesti ottaen yksin-  
kertaisin ja vähemmän monimutkainen piiriratkaisu mahdollistaa toiminnan mah-  
dollisimman pienellä teholla.

Monissa anturiverkkojen päätelaitteissa on tehonkulutusta säätelemään rakennettu  
akun tilaa ja latausta seuraavia varotoimenpiteitä. Tämän lisäksi useat laitteet osaa-  
vat asettaa itsensä tehoa säästävään, niin sanottuun nukkuvaan tilaan, radioliiken-  
teen kannalta toimeettomiksi hetkiksi. Tästä ”unesta” laitteet heräävät nopeasti ja  
nostavat tehotasojaan, kun niitä tarvitaan lähettämään tai vastaanottamaan viestejä.

Seuraavissa luvuissa esitellään anturiverkkojen tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia,  
joiden perusteella myöhemmin luvussa 3 tehtävä tekniikoiden vertailu on helpom-  
paa.

### 2.3.1 Taajuusalue

Lyhyen kantaman anturiverkkojen radiotekniikat toimivat ISM eli *Industrial, Sci-  
entific and Medical* -taajuuksilla, jotka ovat lisenssivapaita, nimensä mukaisesti te-  
ollisuus-, lääketiede- ja tutkimuskäyttöön tarkoitettuja, ITU-R:n (*International Te-  
lecommunication Union – Radiocommunication*) määrittelemiä taajuusalueita. Nä-  
mä on esitetty taulukossa 1.

On otettava huomioon, että kansalliset radiotaajuudet saattavat osittain poiketa  
kansainvälisesti määräytyistä ISM-taajuuksista. Kansalliset määräykset eivät kuiten-  
kaan saa rajoittaa kansainvälisiä määräyksiä /11/. Tässä tarkastelussa ISM-  
taajuuksia käsitellään kansainvälisten määräyksien mukaisesti.

Taulukko 1. ITU-R:n määrittelemät ISM-taajuusalueet ja keskitaajuudet /5/.

Taajuusalue	Keskitaajuus	Huomioita
6,765–6,795 MHz	6,780 MHz	
13,553–13,567 kHz	13,560 MHz	
26,957–27,283 MHz	27,120 MHz	
40,66–40,70 MHz	40,68 MHz	
433,05–434,79 MHz	433,92 MHz	Aluerajoituksin
902–928 MHz	915 MHz	Aluerajoituksin
2,4–2,5 GHz	2,45 GHz	
5,725–5,875 GHz	5,8 GHz	
24,0–24,25 GHz	24,125 GHz	
61,0–61,5 GHz	61,25 GHz	
122,0–123,0 GHz	122,5 GHz	
244,0–246,0 GHz	245,0 GHz	

Kuten myöhemmin, luvussa 3, tullaan huomaamaan, suurin osa anturiverkkojen tekniikoista toimii myös esimerkiksi alemmalla WLANin käyttämällä taajuudella, joka on 2,4 GHz. Tämän alueen suosion ja siitä seuraavan ruuhkautuneisuuden lisäksi myös matalampia taajuuksia, kuten 915 MHz käytetään anturiverkkojen toteutuksissa.

### 2.3.2 Toimintatekniikka

Kukin anturiverkkotoimija on yhden yhteisen standardin puuttuessa kehittänyt omia toimintatekniikoitaan, joista löytyy toki yhteneväisyyksiäkin. Seuraavassa esitetään pääpiirteittäin muutamia anturiverkoissa eniten käytössä olevia toimintatapoja ja niiden tekniikoita.

TDMA (*Time Division Multiple Access*) eli aikajakoinen monikäyttö ja CDMA (*Code Division Multiple Access*) eli koodijakoinen monikäyttö ovat yleiset anturiverkoissa käytössä olevat radiopääsytekniikat, joissa taajuuskaistaa jaetaan käyttäjille aikaväleinä tai sovittuun koodiin perustuen. Näiden tueksi osa valmistajista

käyttää FHSSia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) eli taajuushyppelyyn perustuvaa hajaspektritekniikkaa ja DSSS:ää (*Direct Sequence Spread Spectrum*) eli suorasaantilevitystä ja pyrkivät näin parantamaan anturiverkon häiriönsietoisuutta ja koodauksen vahvuutta /1, s. 43/.

Informaation siirtämiseksi radiokanavassa anturiverkoissa on käytössä eri tekniikoihin erilaisia modulaatiomenetelmiä. FSK (*Frequency Shift Keying*) on digitaalinen taajuusmodulaatio, jolla saavutetaan vakioamplitudisuus ja sallitaan epälineaaristen RF-vahvistimien (C-luokka) käyttö. GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) taas on yksi versio tästä. Näiden erona on se, että ennen FSK-modulaatiota signaali suodatetaan gaussisella suotimella, jolloin muutoin leveää spektriä saadaan kapeammaksi. Vaihemodulaationa taas esimerkiksi ZigBee-tekniikassa (luku 3) käytetään ylimmillä taajuuksilla QPSK:ta (*Quadrature Phase Shift Keying*), joka on lineaarisempi kuin vastaavat muut modulaatiot ja näin ollen taajuuden suhteen tehokkaampi verrattuna aiemmin esiteltyihin ja alemmilla taajuuksilla BPSK:ta (*Binary Phase Shift Keying*), jossa kantoaallon vaihe kertoo, onko signaalin tila yksi vai nolla.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) hyödyntää taajuusjakoista multiplexointia siten että kantoaallon lähellä ortogonaalisesti toisiinsa nähden sijaitsevat kapeakaistaiset aallot kuljettavat yhdessä informaation. Multiplexointiin liittyen esimerkiksi WLAN-tekniikka (luku 3), joka on myös lyhyen kantaman ja pienen lähetystehon radiotekniikka, käyttää niin sanottua MIMO-tekniikkaa (*Multiple Input, Multiple Output*), jossa useiden antennien avulla vastaanotetaan ja lähetetään dataa pienissä osissa. Tätä kutsutaan tarkemmin tilariippuvaiseksi multiplexoinniksi (*spatial multiplexing*), ja sen spektrin hyödyntäminen on hyvin tehokasta /6/.

### 2.3.3 Teho, kantama ja siirtokapasiteetti

Määrittelynsä mukaisesti anturiverkot ovat lyhyen kantaman langattomia verkkoja, joiden kantama on siis maksimissaan muutamia satoja metrejä. Useimmissa tapa-

uksissa vain muutamia kymmeniä metrejä /1, s. 43/, mikä riittää varsin hyvin sovel-  
luskohteet huomioon ottaen. Lyhyt kantama myös mahdollistaa osaltaan lähettimen  
tehonkulutuksen pienentämistä, mistä on hyötyä solmun elinikää pidentävänä teki-  
jänä.

Huomion arvoista on, että Suomessa Viestintävirasto on määritellyt ISM-kaistoilla  
toimiville laitteille suurimman sallitun säteilytehon, joka ilmoitetaan pääsääntöises-  
ti efektiivisenä säteilyteho eli ERP-tehona (*Effective Radiated Power*). Tämä  
saadaan käytännössä kertomalla anteeniin syötetty teho antennin vahvistuksella ja  
jakamalla tämä puolen aallonpituuden mittaisen dipoliantennin vahvistuksella.  
Kaava 1 havainnollistaa ERP-tehon laskentaa.

$$\text{ERP [dBm]} = \frac{P_{\text{TX}} \cdot G_{\text{TX}}}{G_{\text{A}}} \quad (1)$$

missä  $P_{\text{TX}}$  on anteeniin syötetty teho,  $G_{\text{TX}}$  antennin vahvistus ja  $G_{\text{A}}$  dipoliantennin  
vahvistus.

Säteilyteho voidaan ilmaista myös EIRP-tehona (*Equivalent isotropically radiated  
power*), joka määritellään kertomalla anteeniin syötetty teho antennin vahvistusel-  
la suhteessa ideaalisesti ympärisäteilevään anteeniin. Käytännössä EIRP lasketaan  
vähentämällä lähettimen tehosta kaapelivaimennus ja lisäämällä tähän antennin  
vahvistus, kuten kaava 2 osoittaa.

$$\text{EIRP [dBm]} = P_{\text{TX}} - L_{\text{C}} + G_{\text{A}} \quad (2)$$

missä  $P_{\text{TX}}$  on anteeniin syötetty teho,  $L_{\text{C}}$  kaapelivaimennus ja  $G_{\text{A}}$  antennin vahvis-  
tus.

Huomattavaa on, että EIRP on nimensä mukaisesti määritelty isotrooppisille anten-  
neille ja ERP määritelmänsä mukaan puolen aallonpituuden dipoliantenneille. Näi-  
den kahden välillä vallitsee kuitenkin määritelty yhteys (*ITU-R SM.329-8 ANNEX  
1*), jonka mukaan ERP-teho on täsmälleen 2,15 dB pienempi kuin EIRP-teho, kuten  
kaava 3 esittää.

$$\text{ERP [dBm]} = \text{EIRP [dBm]} - 2,15 \text{ dB} \quad (3)$$

Taulukossa 2 on esitetty Viestintäviraston määrittelemät Suomessa sallitut maksimisäteilytehot ISM-kaistoilla. Nämä tehot on ilmoitettu yksiköllä mW, joten niiden muunto dBm:eksi (kaava 4) on useimmiten tarpeellista.

$$P [\text{dBm}] = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}} \quad (4)$$

Taulukko 2. ISM-kaistojen sallitut maksimisäteilytehot Suomessa /11/.

Taajuusalue	Teho	Huomioita
6,765–6,795 MHz	≤ 500 mW (ERP)	vrt. Amerikassa ≤ 4W (ERP)
13,553–13,567 kHz	≤ 500 mW (ERP)	
26,957–27,283 MHz	≤ 500 mW (ERP)	ERC: ≤ 10 mW (ERP) Suomessa audiosovellukset ≤ 10 mW (ERP)
40,66–40,70 MHz	≤ 500 mW (ERP)	ERC: ≤ 10 mW (ERP)
433,05–434,79 MHz	≤ 25 mW (ERP)	≤ 10 mW (ERP) ilman toiminta- suhderajoituksia
902–928 MHz	≤ 500 mW (ERP)	≤ 5 mW (ERP) ilman toiminta- suhderajoituksia
2,4–2,5 GHz	≤ 10 mW (EIRP)	laajakaistaisille sovelluksille ≤ 100 mW (EIRP)
5,725–5,875 GHz	≤ 25 mW (EIRP)	
24,0–24,25 GHz	≤ 100 mW (EIRP)	
61,0–61,5 GHz	≤ 100 mW (EIRP)	
122,0–123,0 GHz	≤ 100 mW (EIRP)	
244,0–246,0 GHz	≤ 100 mW (EIRP)	

Jos tarkastellaan esimerkin vuoksi 2,4 GHz:n kaistalla toimivan lähettimen sallittua maksimisäteilytehoa, joka on 10 mW, voidaan se kaavan 4 mukaisesti muuntaa dBm:eiksi seuraavasti:

$$P[\text{dBm}] = 10 \log \frac{10 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} = 10 \text{ dBm} .$$

Tämä säteilyteho on taulukon 2 mukaan määritelty nimenomaan isotrooppiselle antennille (EIRP-teho) ja se voidaan edelleen kaavan 3 perusteella muuntaa ERP-tehoksi seuraavasti:

$$\text{ERP} [\text{dBm}] = 10 \text{ dBm} - 2,15 \text{ dB} = 7,85 \text{ dBm}.$$

Kuten kaavasta voidaan havaita, sallitut maksimitehot ovat taajuusalueerippuvaisia ja anturiverkkotekniikoissa näin suuria tehoja harvoin käytetään. Suurin osa käyttää maksimilähetystehoa 0 dBm (1 mW). kun taas esimerkiksi Bluetooth saattaa parhaimmillaan toimia jopa +20 dBm (100 mW) tehotasolla.

Osa anturiverkkotekniikoista osaa myös säätää lähetystehoa viereisen naapurin etäisyyden perusteella, mikä entisestään alentaa syöttötehon tarvetta.

Anturiverkkojen siirtokapasiteetti on suurimmassa osassa markkinoilla olevista tekniikoista maksimissaan muutamia satoja kilobittejä sekunnissa /1, s. 43/. Anturiverkoissa siirrettävän datan luonne ei vaadi suurempia nopeuksia, sillä verkon kapasiteetti käytetään pienten tilatietojen välitykseen.

### 3 Markkinoilla olevia tekniikoita

Koska yhteistä standardia ei ole, markkinoilla on tällä hetkellä useita kilpailevia tekniikoita, joista löytynee kuhunkin sovelluskohteeseen paras toteutus. Tekniikoihin tutustuttaessa on hyvä ottaa huomioon muutamia ad-hoc- tyyppisten anturi-verkkojen vaatimuksia:

- **Skaalautuvuus** eli käytettävien anturisolmujen suuri määrä takaa usein tulevaisuuden kehityskohteiden helpomman onnistumisen.
- **Energiatehokkuus** mahdollistaa anturisolmujen sijoittamisen fyysisesti hankalasti käsiteltäviinkin kohteisiin.
- **Itseorganisointuvuus** tekee verkosta häiriöttömämmän ja vähemmän valvontaa sekä hallintaa vaativan.
- **Joustavuus** saavutetaan anturisolmun kykyä käsitellä useita signaaleja samanaikaisesti.
- **Liikennevirran minimointi** saavutetaan tehokkaimmin anturisolmun kyvyllä suodattaa keräämäänsä mittaustietoa eli toimintapäätöksen tulee sijaita mahdollisimman lähellä varsinaista mittausta. /4/

Seuraavassa tarkastellaan markkinoilla olevista tekniikoista tunnetuimpia ja vertailun tueksi esitetään niiden ominaisuuksista yhteen koottu taulukko (liite 1). Tämän tutkintotyön kannalta oleellisimpaan eli ANT-protokollaan perehdytään syvällisesti myöhemmin luvussa 4.

#### 3.1 ZigBee

ZigBee on tunnetuin ja ehkäpä standardisointinsa vuoksi yleisimmin käytössä oleva anturi-verkkojen tekniikka, joka lanseerattiin alun perin yksinkertaisesti toteutettavana, vähän tehoa kuluttavana radiotekniikkana. Sen uusin versio, muun muassa verkko-osoitteiden satunnaisen jakelun sisältävä parannus, julkaistiin vuoden 2006 lopulla ja seuraava versio – ZigBee Pro – on tekeillä /1, s. 42/. Standardi mahdollistaa verkon toteutuksen niin mesh-topologiaa hyödyntäen kuin *cluster tree*

-ratkaisuna, ja siihen liitettävien solmujen maksimimäärä on suurimpia (65 536 solmua) markkinoilla olevista tekniikoista. Näitä solmuja koordinoidaan yhden verkkoisännän toimesta. Käytettävänä taajuuksina on paitsi suosittu 2,4 GHz:n alue, myös matalammat 868 MHz:n ja 915 MHz:n alueet, joilla kullakin luonnollisesti saavutetaan eri maksimisiirtonopeudet – enimmillään 250 kb/s, jota tosin voidaan pitää myös riittämättömänä joihinkin sovelluskohteisiin. ZigBeen taajuusspektrin tehokas käyttö saavutetaan muun muassa yhdistämällä QPSK-modulaatio DSSS-suorasaantilevitykseen, ja alhaisella tehonkulutuksella mahdollistetaan laitteen toiminta yhdellä paristolla jopa kahden vuoden ajan.

ZigBeen sovelluskohteita ovatkin nimenomaan perinteisessä merkityksessään anturiverkkojen sovelluskohteet eli erilaiset seuranta- ja ohjaustoimet /7/.

ZigBeen pohjautuminen IEEE 802.15.4 -radioon, joka määrittelee käytettävien taajuuksien lisäksi laitteen fyysisen ja MAC-kerroksen, on tuonut markkinoille useita tämän avoimen standardin kehittäjiä, ja osittain tämän seurauksena alun perin kevyenä pidetty ZigBee on kasvanut protokollaltaan melko raskaaksi. Näin ollen muutamat valmistajat ovat alkaneet tehdä omia toteutuksiaan 802.15.4-radioon perustuen. Tällaisia tekniikoita ovat muun muassa seuraavassa esiteltävät MiWi ja SmartMesh.

### ***3.2 MiWi, Z-Wave ja SmartMesh***

MiWi on hyvin samanlainen tekniikka kuin esikuvansa ZigBee, ainoastaan kevyempi protokollaltaan ja myös sitä edullisempi. MiWi kehitettiin sovelluksiin, joissa reilun tuhannen solmun maksimimäärä riitti ja osa ZigBeen toiminnallisuudesta voitiin jättää pois. MiWin etuna on sen keveyden lisäksi protokollan ilmaisuus toisin kuin ZigBeessä, joka vaatii laitteen sertifiointin /1, s. 42/. MiWi hyödyntää 802.15.4-radion ylintä taajuusalueetta (2,4 GHz) ja mahdollistaa ZigBeen kanssa samat tiedonsiirtonopeudet. MiWi-päätelaitteet ovat yhteensopivia ZigBee-protokollan kanssa, mikä kertoo hyvin tekniikoiden samankaltaisuudesta.

Z-wave on avoin standardi, kuten ZigBeekin ja sitä voidaan pitää eräänä johtavana kotiautomaatiotekniikkana. Se toimii alemmilla 802.15.4-taajuuksilla, ja ZigBeetä kevyempänä tekniikkana se tarjoaa maksimissaan 40 kb/s siirtonopeudeksi, 30 metriä kantamaksi ja mahdollisuuden hieman yli kahden sadan päätesolmun käyttöön.

Edelleen, jos ZigBeen tarjoamat toiminnallisuudet eivät sovelluskohteeseen riitä, voi ratkaisu olla varmistetun mesh-verkon rakentava SmartMesh, joka käyttää 802.15.4-radion lisäksi aikasykronoitua TSMP-tekniikkaa (*Time Synchronized Mesh Protocol*). Erona normaaliin taajuushyppivään TDMA-toimintaan verrattuna TSMP ei varaa kehyksen alkuun tehoa kuluttavaa synkronoinnin majakkasignaalia vaan verkon sisäistä, yhteistä aikakäsitystä ylläpidetään vaihtamalla offset-tietoa viereisten naapureiden kanssa, jotka siirretään normaalien ACK-viestien mukana /1, s. 43/.

### **3.3 VersaMESH**

RFM Systemsin kehittämä VersaMESH toimii vähemmän ruuhkaisella 915 MHz:n kaistalla ja siinä jokainen solmu voi toimia verkossa reitittimen tapaan. Poiketen siis valtaosasta muita vastaavia tekniikoita viestien välittämiseen ei tarvita erikseen määriteltyä verkkoisäntää tai koordinaattoria. Päätelaitteiden tekniikka perustuu yhtiön patentoimaan ASH-arkkitehtuuriin (*Amplifier-Sequenced Hybrid*) /10/.

Suurinta verkkoon liitettyjen solmujen määrää ei ole määritelty mutta se lienee useita tuhansia. Suuren osoitehallinnan myötä verkon anturikapasiteetin suuruus saadaan kasvamaan. Tämä yhdistettynä verkkoisännättömyyteen selittää, miksi VersaMESH soveltuu hyvin erityisesti teollisuuden tarpeisiin. VersaMESH mahdollistaa siirtokantamaksi yhden anturiverkkotekniikoiden suurimmista (600 m avoimessa tilassa) /10/.

### **3.4 RFID, WLAN, Wi-Fi ja Bluetooth**

Joissakin sovelluskohteissa voidaan joutua pohtimaan vaihtoehtoja anturiverkkoratkaisujen ja muiden pientehoisten radiotekniikoiden välillä. Tällaisia kilpailevia tekniikoita ovat muun muassa RFID-, WLAN- ja Bluetooth-tekniikat.

RFID-tekniikan (*Radio Frequency Identification*) pääasiallinen käyttö on ainakin toistaiseksi laitteiden ja esineiden tunnistamisessa. Sille on ennustettu pitkään menestystä EAN-koodien syrjäyttäjänä. Järjestelmä koostuu päätelaitteesta eli RFID-tagista ja lukijasta, jolloin tekniikan sovelluskohteet ovat melko rajallisia verrattuna muihin pientehoiisiin anturiverkkojen radiotekniikoihin. RFID-tagista luetaan lukijalla sinne varastoidut tiedot tai sinne kirjoitetaan dataa. Koska RFID:n radioyhteys muodostuu vain kahden laitteen välille ja kyseessä ei ole varsinainen monipäätteen verkko, ei yhteyden siirtokapasiteetin määrittäminen ole kovin mielekästä. Varsin huomionarvoinen RFID:n ominaisuus taas on passiivinen päätelaitemalli, jossa laite itsessään ei sisällä lainkaan teholähdettä.

WLAN (*Wireless Local Area Network*) on perinteinen lähiverkko toteutettuna langattomasti. Sen etuina ovat suuri tiedonsiirtonopeus ja suhteellisen pitkä kantama. Myöskään WLAN-tekniikassa ei ole varsinaisesti kyse lyhyen kantaman energiatehokkaasta anturiverkosta, vaikka sen toiminta voidaan tällaiseen soveltaa. Sen optimaalisimmat sovelluskohteet ovat TCP/IP-protokollaa vaativien tiedonsiirtopalvelujen tarjoaminen.

WLAN-toimintaa parantamaan on kehitetty langaton LAN-verkon jatke eli Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), joka perustuu WLANin kanssa samaan standardiin. Sen sovelluskohteina ovat WLANin tavoin verkkoliitännän mahdollistaminen erilaisille käyttöelektronikkalaitteille. Verrattuna WLANiin, Wi-Fin tiedonsiirtokapasiteetti on pienempi, mutta sen kantama on vastaavasti pidempi ja verkkotopologia mahdollistaa solmupistetoiminnan.

Standardoitu Bluetooth-tekniikka taas sallii tavallisiin anturiverkkoihin verrattuna suuremman siirtonopeuden (2,1 Mb/s) kantaman jäädessä maksimissaan kymme-

neen metriin. Myös solmujen vähäistä määrää (1 isäntä + 7 asiakasta) voidaan pitää yhtenä Bluetooth-sovelluksia rajoittavana tekijänä, ja verrattuna perinteisesti käsiteltäviin anturiverkkojen tekniikoihin, sen tehonkulutus on huomattavasti suurempi /7/. Toisaalta Bluetoothin sovelluskohteet ovat kokonaisuudessaan enemmän tehoa vaativia, esimerkiksi audiokäyttöjä, joissa siirrettävän datan määrä on melko suuri. Alun perin Bluetoothan kehiteltiin mahdollistamaan langattomat tietokoneen oheislaitteet.

### **3.5 *Wibree ja Wavenis***

Bluetoothin modulaatiota ja taajuushyppelyä noudattavat Wibree ja Wavenis on kehitelty toimimaan Bluetoothin rinnalla. Niiden tehonkulutus on vain kymmenesosa Bluetooth-piirin vastaavasta ja niiden sovelluskohteet on optimoitu pienen tehonkäytön sulautettuihin sovelluksiin /1, s. 40/.

Wibree-sirun tiedonsiirtonopeus on jopa 1 Mb/s, mikä mahdollistaa sen käytön jopa audiosovelluksissa, mutta solmujen määrä on Bluetoothin tavoin rajoitettu hyvin pieneksi toisin kuin Wavenis-tekniikalla. Wibreen kyky valita parhaiten kuuluva kanava edesauttaa sen käyttöä tehdasympäristöön rakennetuissa sovelluksissa, kun taas toisaalta Wavenis osaa toimia myös alemmilla 802.15.4-radion taajuuksilla. Wavenis-tekniikan sovelluskohteita ovat pääosin myös teollisuusautomaatio, ja se on tehonkulutukseltaan yksi anturiverkkotekniikoiden pienimmistä – vaativimpiin sovelluskohteisiin luvataan jopa 15 vuoden käyttöikä yhdellä paristolla.

## 4 ANTDKT3-kehityspaketti

Nordic Semiconductorin ja ANTin syyskuussa 2007 julkaisema langattomien anturiverkkojen kehityspaketti ANTDKT3 mahdollistaa

- ANT-protokollan evaluoinnin käytännöllisenä ratkaisuna kyseisille anturiverkoille
- langattomien verkkojen hallinta- ja aistinsolmujen suunnittelun perustuen ANT-siruihin ja
- ANT-tuotteisiin yhdistyvän PC-ohjelmien kehityksen /12/.

Kehityspakettiin (kuva 3) kuuluu nopeasti käyttöön otettavia Nordic nRF24AP1 - ja nRF24L01 -lähetin-vastaanotin-lohkoja, liitäntäkortteja ja tarvittavat ohjelmistoversiollukset. Näiden lisäksi paketissa on runsaasti sovellusesimerkkejä ja -ohjeita.

ANTin johtajan, Brian Macdonaldin mukaan langattomien verkkojen potentiaalim ymmärtäminen ja sen kokonaisvaltainen hyödyntäminen monimutkaisia verkkoto-teutuksia rakentamalla vaatii usein erityistä ohjelmointikokemusta /12/.

ANTDKT3-kehityspaketti taas on suunniteltu siten, että verkon pystyttäminen onnistuu ilman vuosien ohjelmointikokemusta ja anturiverkon hyödyt saadaan käytettäväksi entistä nopeammin ja helpommin.

Seuraavissa luvuissa esitellään aluksi kehityspaketin sisältöä ja tarkastellaan ANT-protokollaa, jonka jälkeen kerrotaan tehdystä yksinkertaisen verkon käytännön pystytyksestä ja pohditaan verkon kehitysmahdollisuuksia.

### 4.1 Tekniset tiedot

ANTDKT3-kehityspaketti sisältää yhteensä kymmenen Nordic Semiconductorin valmistamia 2,4 GHz:n taajuudella toimivaa kehitysmoduulia (kuva 3), joissa on sisäänrakennettuna protokollaratkaisuna ANT. Näistä kaksi kappaletta on

- ANTAP1M5IB-moduuleja (AP1-moduuleja), jotka sisältävät ANT-tekniikan integroidussa *single-chip* -muodossa, Nordic Semiconductorin nRF24AP1 RX/TX -lohkon ja mahdollistavat langattoman *drop-in* -ratkaisun HOST-sovelluskontrollerille.
- ANT11TS33M5IB-moduuleja (SensRcore™-moduuleja), jotka sisältävät ANT-tekniikan *dual-chip* -toteutuksena, mahdollistavat analogisten ja digitaalisten antureiden liittämisen ANT-mikrokontrolleriin (MCU) ja eliminovat näin HOST-sovelluskontrollerin tarpeen.
- ANT-virtalähdealustoja, joihin sopii CR2032-paristo.
- ANT I/O-liityntäalustoja.
- USB-liityntäalustoja.



Kuva 3. ANTDKT3-kehityspaketti.

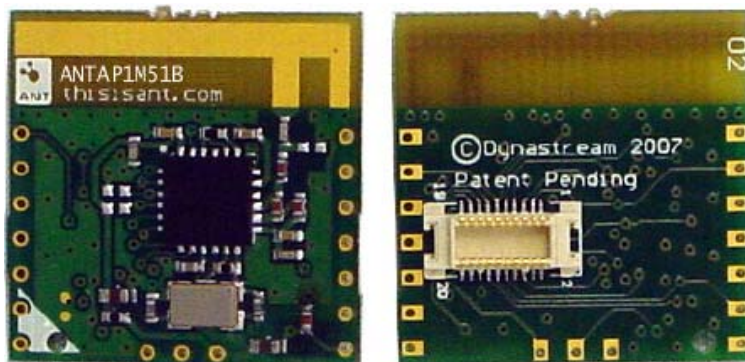
Lisäksi kehityspaketti sisältää kaksi kappaletta CR2032-paristoja teholähteiksi ja CD-levyn, jolta löytyvät

- moduulien datalehdet
- liityntä- ja ANT-protokolladokumentit
- tarvittavat ohjelmat
- sovellusesimerkkejä ohjeineen
- USB-liityntämoduulin ohjaimet.

Seuraavissa luvuissa esitellään kutakin kehityspaketin moduulia ja niissä olevaa tekniikkaa.

#### 4.1.1 AP1-moduuli

Kuvassa 4 esitetty ANTAP1M51B- eli AP1-moduuli on kooltaan 20 x 20 mm ja sen käyttölämpötila-alue on niinkin laaja kuin -40...+85 °C. Moduuli toimii siten, että ANT-protokollapino (katso luku 4.2) on tallennettu kokonaisuudessaan sirulle, josta se suoritetaan nRF24AP1:n sisäisellä MCU:lla.



Kuva 4. AP1-moduuli edestä ja takaa. /13/

AP1-lähetin-vastaanotinmoduuli sisältää täysin integroidun ANT-protokollan, taajuussyntesojan, tehovahvistimen, kideoskillaattorin (16 MHz) ja modulaattorin. Se voidaan liittää HOST-mikrokontrolleriin joko synkronisella tai asynkronisella sarjayhteydellä.

AP1:n teknisistä ominaisuuksista tärkeimpiä ovat seuraavat:

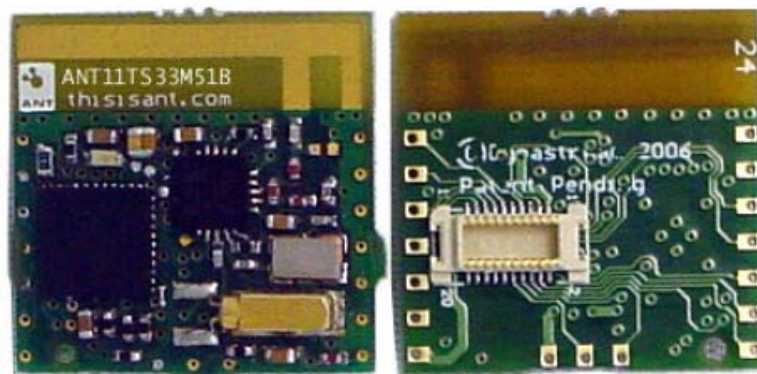
- käyttöjännite vaihtelee välillä 1,9...3,6 V ja on tyypillisimmillään 3,0 V
- toimintataajuutena on 2,4 GHz kanavavälillä 1 MHz (deviaatio  $\pm 156$  kHz)
- maksimilähetytsteho on jopa +4 dBm mutta tyypillisimmillään 0 dBm
- lähettimen herkkyys on -80 dBm
- keskimääräinen virrankulutus on 30  $\mu$ A ja huippu on mitattu 22 mA:ssa
- maksimisiirtonopeus on 1 000 kbit/s ja purskeisena 20 kbit/s

Moduuli mahdollistaa samanaikaisesti yli 65 000 yhteyden ylläpidon. Mikäli käytetään itsenäisiä kaksisuuntaisia yhteyksiä, voi niitä olla käytössä kerrallaan neljä kappaletta.

Valmistajan mukaan /13/, mitattuna kahden sekunnin lähetysintervallilla ja yhden tunnin kokonaiskäytöllä päivittäin, yhdellä CR2032-paristolla saavutetaan viiden vuoden käytettävyys.

#### 4.1.2 SensRcore<sup>TM</sup>-moduuli

Kuvassa 5 esitetty ANT11TS33M51B- eli SensRcore<sup>TM</sup>-moduuli on kooltaan 20 x 20 mm.



Kuva 5. SensRcore<sup>TM</sup>-moduuli edestä ja takaa. /13/

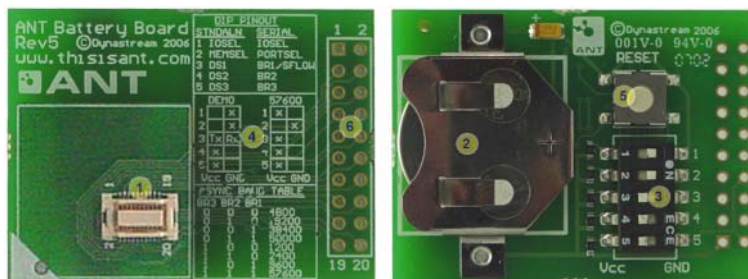
SensRcore<sup>TM</sup>-moduulissa toimiminen mahdollistaa mikrokontrolleriin (MCU) sekä analogisten että digitaalisten antureiden liittämisen. Kanavien konfiguroinnit on tal-

lennettu NVRAMiin, josta ne luetaan käynnistyksen yhteydessä. Täysi langattomuus saavutetaan yhdistämällä anturi, MCU ja radio samalle sirulle, jolloin ulkopuolisen MCU:n lähettämien mittaustulosten tarve eliminoidaan. Tämä toiminta paitsi pienentää komponenttien tarvetta myös vähentää tehonkulutusta.

SensRcore™-moduulin tekniset ominaisuudet ovat pääosin samat kuin AP1-moduulin, johtuen molemmissa käytössä olevasta nRF24AP1-sirusta. Kahdeksaa kanavaa tukevan SensRcore™-moduulin tehonkulutus saattaa kasvaa verrattuna AP1-moduulin tehonkulutukseen käytettävistä I/O-toiminnoista riippuen.

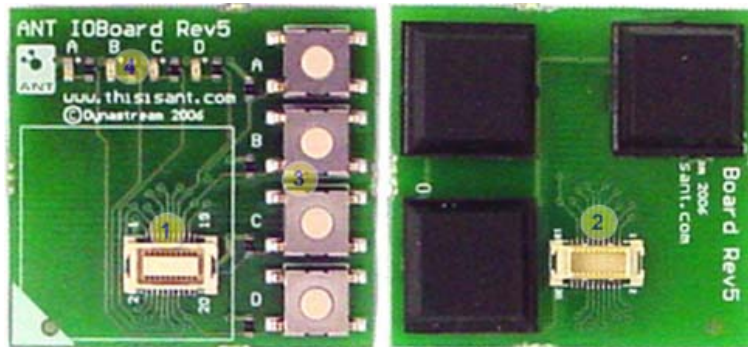
#### 4.1.3 Muut moduulit

Kuvassa 6 on esitetty ANT-paristoalusta, joka on luonnolliselta kooltaan 40 x 30 mm ja se yhdistetään aiemmin esiteltyihin AP1- tai SensRcore™-moduuleihin tai myöhemmin esiteltävään I/O-liityntäalustaan teholähteen mahdollistajaksi. Paristoalustaan integroidun reset-painikkeen avulla moduulien uudelleenkäynnistys onnistuu myös manuaalisesti.



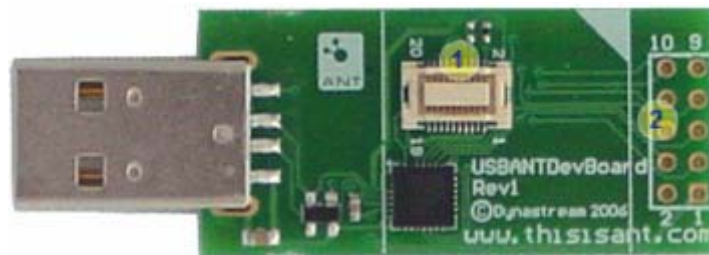
Kuva 6. ANT-paristoalusta edestä ja takaa. /13/

Kuvassa 7 on esitetty kooltaan 35 x 30 mm oleva I/O-liityntäalusta. Alustaan on integroitu neljä painokytintä ja se mahdollistaa ulkopuolisten I/O-tietojen liittämisen sekä indikoinnin sirussa olevilla LEDeillä.



Kuva 7. I/O-liityntäalusta edestä ja takaa. /13/

Kuvassa 8 on USB-liityntämoduuli, joka on luonnolliselta kooltaan 55 x 20 mm ja sen avulla tietokoneeseen saadaan liitettyä langaton lähetin ANT-protokollalla toimivan verkon osaksi.



Kuva 8. USB-liityntämoduuli. /13/

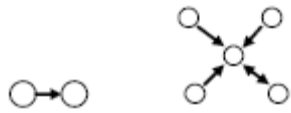
## 4.2 ANT-protokolla

ANT-protokolla on erittäin tehokkaasti optimoitu 2,4 GHz:n langaton protokolla pienen tehonkulutuksen anturiverkkojen sovelluksiin. Se hyödyntää isokronista TDMA-tyyppistä liikennöintiä useiden taajuuksien ja tiheän verkotuksen tarpeisiin ja liikennöinti on mahdollista toteuttaa kaksisuuntaisesti. Verkkosolmujen välinen raakadatanopeus on 1 Mb/s sekä purskeisena 20 kb/s.

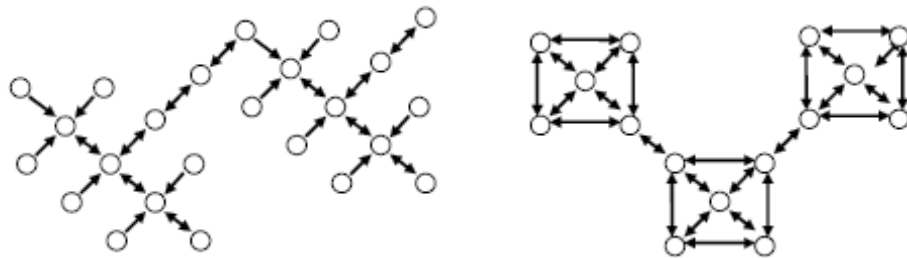
ANT-sirujen pieni koko ja alhainen tehonkulutus ovat sopivia ominaisuuksia esimerkiksi sykemonitorointiin ja rannetietokoneisiin, joihin sitä on kaupallisesti toimivasti sovellettu esimerkiksi Suunnon ja Polar Electron tuotteisiin.

### 4.2.1 Topologia

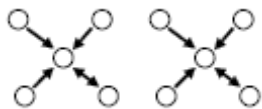
ANT-protokollan käyttö soveltuu perinteisiin *peer-to-peer*-, tähti- ja puuverkkoihin, joiden lisäksi verkkosolmut voidaan sovittaa toimimaan myös mesh-verkkomuodossa. ANT-protokollalla toteutettu verkko voi siis toimia siirtotienä vain kahden eri solmun välillä tai jopa monimutkaisissa ja muuntuvissa *point-to-multipoint*-verkoissa. Esimerkkejä ANT-protokollalla toteutettavista verkoista on havainnollistettu kuvissa 9.1–9.4.



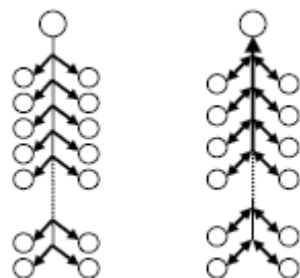
Kuva 9.1. Yksinkertaiset *point-to-point*-verkot. /13/



Kuva 9.2. Monimutkaiset *point-to-point*- ja *point-to-multipoint*-verkot. /13/



Kuva 9.3. Itsenäiset ja erilliset verkot. /13/



Kuva 9.4. Itsenäiset ja jaetut *broadcast*-verkot. /13/

#### 4.2.2 OSI-malli

ANT-protokolla määrittelee OSI-mallin alimmat neljä kerrosta, jotka ovat fyysinen-, siirtoyhteys-, verkko- ja kuljetuskerros (taulukko 3). Se suorittaa lisäksi OSI-mallin alimmilla kerroksilla toteutettavia verkkoturvallisuuden tähtäviä toimia, jotka perustavat pohjan käyttäjän määriteltävissä olevalle suojukselle, ja osaltaan vähentävät ylinten kerrosten prosessointitarvetta.

Taulukko 3. OSI-mallin ANT-protokollassa ja verkon suojuksen määrittely.



#### 4.2.3 Kanavat

ANT-protokolla on kanavaorientoitunut protokolla, mikä tarkoittaa, että eri solmujen yhdistämiseen käytetään omaa kanavaansa. Yhden siirtotien kannalta kaksi toisilleen tietoa siirtävää solmua jakautuvat master- ja slave-solmuiksi siten, että eniten dataa lähettävästä solmusta muodostuu yhteyden kannalta master ja eniten vastaanottavasta solmusta slave. Master-solmu hallitsee tiedonsiirtokanavaa ja toimii yhteyden ylläpitäjänä. Master- ja slave-osien välisiä kanavia voidaan käsitellä yksinkertaisina *point-to-point*-kanavina, vaikka ANT-protokolla mahdollistaa myös jaetun kanavan käytön. Tämä tarkoittaa, että useat solmut voivat jakaa yhden kanavan keskustellakseen keskisolmun kanssa. Keskisolmu taas voidaan asettaa toimi-

maan niin sanotussa skannaustilassa, jolloin se on jatkuvasti päällä sekä valmiina vastaanottamaan etäsolmuista tulevia viestejä ja välittämään niitä eteenpäin.

Ennen yhteyden käyttöönottoa, yhdistettävien solmujen kanavien konfiguroinnissa on määriteltävä seuraavat asiat:

- käytettävä verkko
- kanavan RF-taajuus
- lähetyksen tyyppi
- laitteen tyyppi
- kanavan tyyppi
- kanavajakso
- datan tyyppi ja muoto

Useimmissa tapauksissa kanavan konfiguroinnit pysyvät muuttumattomina koko solmun käyttöajan. ANT-protokolla kuitenkin sallii master-osan ylläpitää useita rinnakkaisia kanavia joiden konfiguroinnit saattavat poiketa alkuperäisistä parametreista ja asetuksista.

Käytettävää verkkoa määriteltäessä tulee solmuun asettaa verkon numero ja avain. ANT-protokollalla voidaan käyttää useita julkisia ja paikallisia verkkoja ja solmun kyky erottaa nämä ja niihin liittyvät toimitasäännöt perustuvat 8-bittiseen verkko-numeroon ja sitä vastaavaan 8-tavuiseen verkkoavaimen. Käyttäjä voi asettaa nämä arvot solmuun itse tai ANT-siru voi tiedustella ne olemassa olevasta verkosta. Verkkonumero ja -avain yhdessä mahdollistavat verkon monitasoisen pääsynhallinnan ja turvallisuuden.

Kanavan taajuus voidaan valita 2,4 GHz:n alueella olevista 125 eri kanavasta. Kunkin kanavan leveys on 1 MHz, jolloin ylin kanava voi sijaita taajuudella 2 524 MHz. Solmun konfiguroinnissa kanavan taajuusluku 0 vastaa taajuutta 2 400 MHz, taajuusluku 50 vastaa todellista taajuutta 2 450 MHz, taajuusluku 100 vastaa taajuutta 2 500 MHz ja niin edelleen. Johtuen ANT-protokollan TDMA-luonteesta, eri kanavia ei tarvitse sijoitella kutakin omalle taajuudelleen vaan ne voivat toimia saman taajuuden eri aikaväleissä.

Solmuun asetettava lähetyksen tyyppi on läheisesti yhteydessä laitteen tyyppiin ja nämä yhdessä kertovat solmun suhteesta muuhun verkkoon eli millaisia viestejä solmulta on odotettavissa ja kenelle niitä lähetetään.

8-bittistä kanavan tyyppitietoa käytetään määrittelemään millaista siirtoa kanavalla saa suorittaa. Esimerkiksi tyyppinä voi olla merkintä ”jaettu kaksisuuntainen vastaanottokanava”, jonka perusteella solmu tietää, että kyseistä kanavaa ei tule käyttää viestien lähettämiseen.

Kanavajakso kertoo master-solmun lähettämien datapakettien lähetysnopeuden ja se voi vaihdella välillä 0,5 Hz–200 Hz. Tehdasasetuksena luku on asetettu arvoon 4 Hz, joka on valittu optimaalisen suorituskyvyn takaamiseksi eritasoisille sovelluksille. Kanavajakson muuttaminen pienemmäksi kuin 4 Hz nopeuttaa tiedonsiirtoa mutta toisaalta rajoittaa yhtäaikaaisesti käytettävien kanavien lukumäärää.

Datan tyyppi ja muoto määrittelevät solmusta lähtevän tai solmuun tulevan datapaketin sisältämän tiedon tyyppin, joita on kolme erilaista: yleislähetys, tiedonanto ja purske.

#### 4.2.4 Viestityypit

ANT-protokolla määrittelee kaksi viestikanavatyyppiä. Ensimmäisen siirtosuunta on master-osalta slave-osalle ja sitä käytetään datan siirtoon. Tämä siirtosuunta voi olla aktiivinen koko aikavälin ajan. Toisen kanavatyyppin siirtosuunta taas on slave-osalta master-osalle. Tämän siirtosuunnan käyttö on valittavissa ja se toteutetaan kunkin aikavälin lopussa.

Molemmat siirtosuunnat tukevat kolmea perusviestityyppiä: yleislähetys (*broadcast*), tiedonanto (*acknowledgement*) ja purske (*burst*), kuten luvussa 4.2.3 on todettu.

Yleislähetysviesti on yksinkertaisin ja perustavanlaatuisin ANT-protokollaa käyttävien solmujen viestityyppi. Yleislähetysviestejä lähetetään oletusarvoisesti jokaisen kanavan yhdessä aikavälissä master-osalta slave-osalle eli ensimmäisessä siirtosuunnassa ja kertaluontoisesti kanavan yhden aikavälin lopussa slave-osalta master-osalle, mikäli *slave host* niin pyytää. Master-slave-suunnassa viestiä toistetaan jokaisessa yhteysvälin aikavälissä ja se sen sisältö ei muutu, mikäli sitä ei erikseen muuteta. Yleislähetysviesti kuluttaa kaikista viestityypeistä vähiten kaistanleveyttä ja järjestelmän tehoa. Se ei koskaan sisällä erikseen määriteltyjä tiedonantoviestejä ja näin ollen kanavan master ei saa tietää, mikäli datapaketteja on siirrossa kadonnut. Yleislähetysviestiä voidaan siis käyttää datan kuljettamiseen järjestelmissä, joissa yksittäisten pakettien häviäminen siirron aikana ei aiheuta kriittisiä virheitä.

Missä tahansa vaiheessa yhteysjaksoa, kanavan master voi lähettää yhdessä aikavälissä tiedonantoviestin, johon slave vastaa samantyyppisellä, yhden aikavälin lopussa lähetettävällä viestillä, kuitatakseen lähetyksen. Huomionarvoista on, että tiedonantoviestinä lähetettyä, tiedonsiirron aikana kadotettua pakettia, ei oletusarvoisesti lähetetä uudelleen vaan tämä toiminto tulee käyttäjän erikseen valita, mikäli sitä halutaan. Tiedonantoviestien toiminnan vuoksi, ne soveltuvat käytettäväksi järjestelmissä tai sen siirtoyhteisissä, missä luotettava tiedonsiirto tulee varmistaa. Järjestelmän suunnittelussa tulee huomioida, että mikäli tiedonantoviestejä valitaan käytettäväksi, järjestelmän kaistan- ja tehonkulutus kasvaa yleislähetysviesteihin nähden huomattavasti.

Purskemekanismi mahdollistaa master-osan lähettämien suurten datamäärien välittämisen nopeasti ja luotettavasti. Kukin purske alkaa datan tulohetkeen nähden seuraavassa aikataulun mukaisessa aikavälissä ja se jatkuu master-osan lähettämien lukuisina tiedonantoviesteinä slave-osalle. Näihin viesteihin slave vastaa kiittäuksella master-osalle ja kaikki lähetyksen aikana kadonneet paketit lähetetään automaattisesti uudelleen. Purskeen kokonaispituutta ei ole rajoitettu ja niiden prioriteetti ylittää muut edellä esitellyt viestityypit. Mikäli purskemuotoisia viestejä valitaan järjestelmässä käytettäväksi, tulee suunnittelussa huomioida tarkasti solmun käyttämät muut kaistat ja niiden viestim muodot, sillä purske huonosti suunniteltuna saattaa ylikuormittaa järjestelmää.

Yleisesti järjestelmän viestinvälitystä ja viestityyppejä valittaessa tulisi huolehtia, että kunkin kanavan master- ja slave-osat odottavat väliselle kanavalle samaa viestityyppiä ja ovat valmiina vastaamaan siihen oikean sovelluksen avulla, mikäli tarpeellista.

### 4.3 Verkon rakentaminen

Tässä luvussa kerrotaan ANTDKT3-kehityspaketilla tehdyn tutkimusverkon pysyttämistä. Aluksi esitellään kehityspaketin tarjoamat kehitysovellukset – ANTware RF Control ja SensRware – ja tämän jälkeen esitellään pystytetty tutkimusverkko.

#### 4.3.1 ANTware RF Control

Kehityspaketin ensimmäisenä käyttöönotto vaiheena tutustuttiin ANTware RF Control -PC-sovellukseen, jolla voidaan konfiguroida ANT-protokollalla toimivia lähetin-vastaanotin-siruja sekä tutkia protokollaa ja sillä toteutettavaa verkkoa tietokoneella. Myöhemmin esiteltävää tutkimusverkon rakennusta varten kahteen USB-liityntämoduuliin liitettiin SensRcore™-moduulit lähetin-vastaanotintoiminnan mahdollistamiseksi (kuva 10) ja nämä kokonaisuudet kytkettiin tietokoneen USB-porteihin. SensRcore™-moduulien tilalla voisi luonnollisesti käyttää myös API-moduuleja.



Kuva 10. SensRcore™-moduuli kytkettynä USB-liityntämoduuliin. /13/

Tämän jälkeen käynnistettiin ANTWare RF Control -sovellukset, molemmille lähetin-vastaanotin parille omansa. Konfiguroinnin aluksi valittiin oikea USB-portti kytketylle moduuliparille ja asetettiin baudinopeus sopivaksi. SensRcore™-moduulilla nopeus on 57 600 baudia sekunnissa ja AP1-moduulilla 50 000 baudia sekunnissa. Toinen moduulipareista valittiin master- ja toinen slave-osaksi, minkä jälkeen tehtiin kanavan valinnat ja asetettiin kanavan tunniste. Jo näillä asetuksilla yhteys saatettiin avata ja muuttamalla viestikentän arvoja sekä viestin tyyppiä saatiin viestin välitystä tarkastella reaaliajassa.

Edellisten perusasetusten lisäksi ANTWare RF Control -sovelluksen graafisella käyttöliittymällä (liite 2) voidaan esimerkiksi määritellä rinnakkaiset kanavat ja näillä käytettävät taajuudet sekä muuttaa lähettimen tehotasoa.

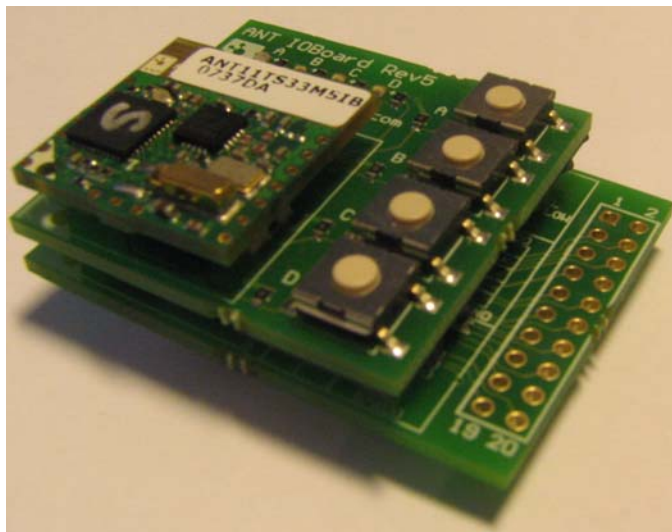
#### 4.3.2 SensRware

Kuten aiemmin on kerrottu, SensRcore™-moduulit tarjoavat yksinkertaisten analoogisten ja digitaalisten mittaustulosten lähettämisen ja välittämisen ANT-protokollalla toimivan verkon yli. Nämä toiminta-asetukset ladataan SensRcore™-moduulin flash-muistiin, josta ne ladataan moduulin käynnistyksen yhteydessä käyttömuistiin. SensRware-sovellus antaa käyttäjälle mahdollisuuden tallentaa nämä konfigurointitiedostot tekstitiedostoiksi, jotka voidaan edelleen ladata esimerkiksi USB-liityntämoduulia hyödyntäen ANTWare RF Controller -sovelluksella muihin moduuleihin.

SensRware-sovelluksen graafisen käyttöliittymän (liite 3) avulla uusia asetustiedostoja pystytään helposti luomaan ja jo olemassa olevia voidaan vaivattomasti muuttaa. Käyttäjältä ei vaadita erityisiä ohjelmointitaitoja tai edes ANT-protokollan syvällistä tuntemista. Kaikki valinnat on tehtävissä graafisesti ja käytettävä SensRcore™-moduuliin liitetty anturi saadaan asennettua verkon osaksi vaivattomasti.

### 4.3.3 Tutkimusverkko

Tutkimusverkkoa alettiin rakentaa paloittain oikean toiminnan varmistamiseksi. Tarkoituksena oli siirtää testiverkossa tieto I/O-alustan kytkinten painalluksista. Aluksi koottiin ensimmäinen etäsolmu yhdistämällä ANT-paristoalusta, I/O-liityntäalusta ja SensRcore<sup>TM</sup>-moduuli toisiinsa (kuva 11). Teholähteeksi ANT-paristoalustaan asetettiin yksi CR2032-paristo.



Kuva 11. Etäsolmu.

Etäsolmun asetustiedosto tehtiin SensRware-ohjelmalla ja se ladattiin USB-liityntämoduulia ja ANTware RF Controller -ohjelmaa käyttäen SensRcore<sup>TM</sup>-moduuliin. Konfigurointi sisälsi seuraavat parametrit:

#### **Datakanava 0**

Datan tyyppi	digitaalinen
ANT-kanava	0
Pinninumero/maski	15
Viestisuhde	1
Viestisuhteen offset	0

#### **ANT-kanava 0**

Kanavatyyppi	master
Laitenumero	49

Laitetyyppi	1
Siirtotyyppi	3
Viestijakso	4
RF-taajuus	76 (eli 2 476 MHz)

ANT-paristoalusta dipswitch-kytkimet asetettiin seuraavasti:

	VCC	GND
1		X
2	X	
3		X
4		X
5		X

Etäsolmun konfiguroinnin jälkeen USB-liityntämoduuliin yhdistettiin AP1-moduuli ja tämä kokonaisuus liitettiin tietokoneen USB-porttiin, kuten luvussa 4.3.1. Tämän jälkeen ANTware RF Controller -sovelluksella AP1-moduuli asetettiin toimimaan vastaavalla kanavalla (ANT kanava 0) yhteyden slave-osana. Käynnistettäessä yhteys etäsolmusta eli master-osasta reset-kytkintä painalla, saatiin tietokoneeseen liitettyyn yhteyden slave-osaan seuraava lokitiedosto:

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F] · n kappaletta

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][**07**]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][**0B**]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][**0D**]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][**0E**]

Recv(0): [40][00][00][00][00][00][0F][0F] · n kappaletta

Kukin vastaanotettu datapaketti on esitetty edellä omalla rivillään ja jokaisen paketin ensimmäinen tavu [40] kertoo, että kyseessä on digitaalinen data. Tätä seuraa viisi kappaletta viestitavuja, jotka ovat nyt [00], sillä lähetettävän viestin sisältöä ei ole oletusarvosta muutettu. Seuraava tavu [0F] indikoi pinninumeroa 15 heksadesimaalisena ja viimeinen tavu kertoo mitä I/O-alustan kytkintä kulloinkin on painettu. Edellä esitettyyn lokiin on selvyyden vuoksi tummennettu I/O-alustalla verkon testauksessa tehdyt kytkinten painallukset. Esimerkiksi tavu [0E] kertoo, että kytkintä A on painettu. Tavu [0D] taas vastaa kytkintä B ja mikäli A- ja B-kytkintä painettaisiin yhtä aikaa, paketin viimeinen tavu olisi [0C].

Seuraavaksi rakennettiin toinen vastaava etäsolmu, joka konfiguroitiin hieman muuttunein, seuraavassa esitetyin parametrein:

#### **Datakanava 0**

Datan tyyppi	digitaalinen
ANT-kanava	1
Pinninumero/maski	15
Viestisuhde	1
Viestisuhteen offset	0

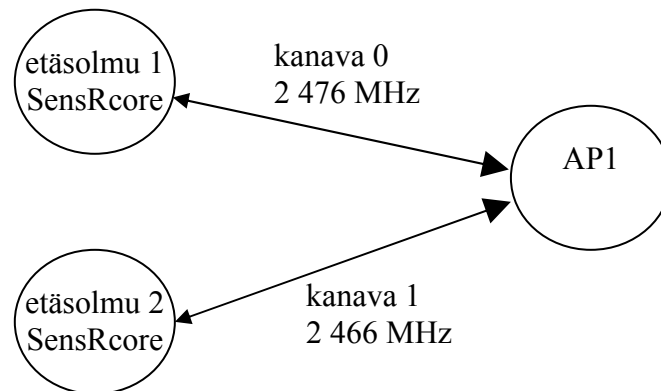
#### **ANT-kanava 1**

Kanavatyyppi	master
Laitenumero	50
Laitetyyppi	1
Siirtotyyppi	3
Viestijakso	4
RF-taajuus	66 (eli 2 466 MHz)

Aiemmin konfiguroidun AP1-moduulin asetuksia muutettiin siten, että myös sen ANT-kanava 1 otettiin käyttöön ja tämä asetettiin toimimaan jälleen yhteyden slave-osana, nyt taajuudella 2 466 MHz. Yhteys käynnistettiin toisesta etäsolmusta ja tietokoneella, ANTware RF Controller -sovelluksessa, tarkasteltiin jälleen slave-osaan saapuvaa lokitiedostoa, joka oli vastaava kuin etäsolmun 1 tapauksessa ja

I/O-alustan kytkinten painallukset välittyivät oikein. Tiedonsiirron toimivuutta testattiin myös sallimalla molemmilta etäsolmuilta yhtäaikainen lähetys ja havaittiin, että yhteyksien slave-osana toimiva solmu vastaanotti molempia ja piti ne oikein erillään.

Rakennettu verkko on esitetty lopullisessa muodossaan kuvassa 12. Huomionarvoista on, että topologisesti verkon keskipisteenä on AP1-moduuli, vaikka tiedonsiirron kannalta se toimii verkon slave-osana.



Kuva 12. Tutkimusverkon rakenne. Nuolet havainnollistavat tiedonsiirron suuntaa siten, että isompi nuoli kuvaa suurinta datavirtaa.

Rakennetussa tutkimusverkossa käytettiin saman verkon kahta eri kanavaa, joille selvyuden vuoksi osoitettiin omat taajuuksensa. Tämä ei kuitenkaan ole välttämätöntä, vaan kanavat voitaisiin asettaa toimimaan myös samalla taajuudella, milloin niiden paketit kulkisivat eri aikaväleissä.

## 5 Päätelmät ja kehitysideoita

Tutkimusverkon rakentaminen edellä esitettyyn laajuuteen onnistui suhteellisen vaivattomasti. ANT:n lupauksen mukaisesti (ks. luku 4), erityistä ohjelmointikemusta ei yksinkertaiseen toteutukseen vaadittu, vaan tutustuminen graafisiin ohjelmatyökaluihin ja alan käsitteiden sekä termien tunteminen riittivät verkon pystyttämiseksi. ANT-protokolla ja sen viestinvälitykseen perehtyminen osoitautui tärkeäksi verkon toiminnan ymmärtämisen kannalta. Huomioitavaa on, että toteutettu tutkimusverkko on paitsi ohjelmalliselta toteutukseltaan, myös topologiaaltaan hyvin yksinkertainen ja sen muuntaminen monimutkaisempia toimia aikaansaavaksi, vaatinee syvällistä perehtymistä ANT-moduuleilla käytettävien ohjelmien toteuttamiseen.

Tutkimusverkon rakentamisen ja testauksen myötä voidaan todeta, että ANT-protokollaa käyttävä verkko voidaan sovittaa laajasti erilaisiin anturiverkkojen sovelluskohteisiin. Rakennetun tutkimusverkon perustavanlaatuisuus tarjoaa tätä ajatellen paljon kehitys- ja tutkimusmahdollisuuksia.

ANTDKT3-kehityspaketin valmiista moduuleista käytettiin tutkimusverkon rakentamiseen suurin osa. Yli jääneet AP1- ja USB-liityntäalusta yhdistämällä voidaan rakentaa toinen (kuva 12, luku 4.3.3), samaan tai eri tietokoneeseen liitettävä, solmupiste. Tämä solmu voisi toimia esimerkiksi viestejä pitkän välimatkan yli välittävänä pisteenä tai erillisenä yhdyspisteenä ulkopuoliseen verkkoon. Tällaisen viestinvälitysmekanismien rakentaminen olisi yksinkertainen tapa tutkia ohjelman laatimista ja toimintaa ANT-protokolla-ympäristössä. Lisämoduulien hankinnalla verkon topologiaa saa monimutkaistettua ja varsinaista mesh-verkkotoimintaa sekä erityisesti solmujen virheistä virkoamista pääsee tutkimaan.

Tutkimusverkossa varsinainen anturitoiminta toteutettiin I/O-moduuliin valmiiksi integroitua kytkimiä painamalla. Esimerkiksi potentiometrin liittäminen I/O-moduuliin antaa helposti mahdollisuuden tutkia analogisia viestejä. Tämä antaa myös ohjelmallisia kehitysmahdollisuuksia paitsi tutkimusverkkoon myös mitattavan kohteen ohjaamiseen ja mittauksen indikointiin.

Moduulien välisten viestien, niiden sisältöjen ja lähetystyyppien tutkiminen antaisi lähtökohtia paitsi ohjelmakehitykseen myös esimerkiksi verkon viesti- ja liikennesuunnitteluun. Lähetystehojen kantamaa, esteiden vaikuttamaa vaimenemista, vääristymistä ja heijastumista sekä häiriöherkkyyttä – lähettimeen kohdistuvaa ja siitä aiheutuvaa – mittaamalla taas voisi radiorajapinnan toimintaa avata sekä toisaalta käytännön sovelluskohteiden valintaa realisoida.

Erilaisia tehtäviä toimittavien verkkosolmujen tehonkulutuksen tutkiminen ja optimoiminen lienee eräs tärkeimmistä tutkimusalueista ottaen huomioon, että anturi-verkkojen päätoimintaperiaate on tarjota verkon yli mittausaustimia mahdollisimman pienellä tehonkulutuksella.

## LÄHTEET

- 1 Hänninen, Veijo, Radioyhteyksiä moneen tarpeeseen, Prosessori 2/2007, s. 40–43
- 2 NIST. [www-sivu]. [viitattu 12.2.2008]. Saatavissa: [http://www.antd.nist.gov/wahn\\_mahn.shtml](http://www.antd.nist.gov/wahn_mahn.shtml)
- 3 ACM SIGCOMM. [www-sivu]. [viitattu 12.2.2008]. Saatavissa: <http://www.sigcomm.org/sigcomm2006/?tutorials>
- 4 NIST. [www-sivu]. [viitattu 12.2.2008]. Saatavissa: [http://www.antd.nist.gov/wahn\\_ssn.shtml](http://www.antd.nist.gov/wahn_ssn.shtml)
- 5 ITU. [www-sivu]. [viitattu 15.2.2008]. Saatavissa: <http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>
- 6 Wave Report. [www-sivu]. [viitattu 15.2.2008]. Saatavissa: <http://www.wave-report.com/tutorials/OFDM.htm>
- 7 Kyrölä, Marko, tekniikoiden vertailutaulukoita. [sähköpostiviesti]. 10.1.2008.
- 8 ANT. [www-sivu]. [viitattu 17.2.2008]. Saatavissa: <http://www.thisisant.com/index.php?section=22>
- 9 Pesonen, Nadia ja Oja, Aarne, Esineet alkavat puhua, Prosessori 12/2006, s. 55–57
- 10 Cirronet. [www-sivu]. [viitattu 17.2.2008]. Saatavissa: [http://www.cirronet.com/dm2200\\_versamesh.htm](http://www.cirronet.com/dm2200_versamesh.htm)
- 11 Viestintävirasto. [www-sivu]. [viitattu 18.2.2008]. Saatavissa: <http://www.ficora.fi/index/saadokset/maaraykset.html>
- 12 Nordic Semiconductor ASA. [www-sivu]. [viitattu 18.2.2008]. Saatavissa: <http://www.nordicsemi.com/index.cfm?obj=document&act=display&doc=339>
- 13 ANTDKT3-kit series. Versio 1.3. Dynastream Innovations Inc. 2.7.2007 [CD-ROM].

Pienen lähetystehon radiotekniikoita /1, s.41, 43; 7; 8; 9/.

	ANT	Bluetooth	MiWi	RFID	Smart-Mesh	Versa-MESH	Wavenis	Wibree	Wi-Fi	WLAN	Z-wave	ZigBee
<b>Kehittäjä</b>	Dynastera Innovations Inc.	IEEE 802.15.1	Microchip	Auto-ID Center	Dust Networks	RFM (Cirronets) Systems	Coronis	Nokia	802.11 b/g	802.11n	Zensys	802.15.4 ZigBee Alliance
<b>Taajuusalue</b>	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	125–134 kHz 13,56 MHz 868–956 MHz 2,45 GHz	915 MHz 2,4 GHz	915 (868, 434) MHz	434 868 915 MHz (2,4 GHz)	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 5 GHz	868 915 MHz	868 915 MHz 2,4 GHz
<b>Toimintatapa</b>	TDMA-tyyppinen GFSK	FHSS FSK	802.15.4 MiWi	FSK ASK OOK BPSK 4-PPM	802.15.4 TSMP	ASH OOK B/sK	FHSS GFSK	FHSS GFSK	QPSK DSSS	MIMO DSSS CCK OFDM	FSK	DSSS B/sK QPSK CSMA/CA
<b>Siirtokapasiteetti</b>	1 Mb/s	1–2,1 Mb/s	20 40 250 kb/s	–	250 kb/s	9,6 kb/s	4,8–100 kb/s	1 Mb/s	11/54 Mb/s	6–600 Mb/s	9,6–40 kb/s	20 40 250 kb/s
<b>Solmujen lkm</b>	65 000+1	1+7	1024	1	10 000	–	–	1+7	32	–	232	65 536
<b>Kantavuus</b>	30 m	5–10 m	10–75 m	0,1–10 m	200–400 m	600 m	200–1000 m	5–10 m	1–100 m	50–100 m	30 m	10–75 m

ANTware RF Control -sovelluksen käyttöliittymä kommentoituna punaisilla teksteillä.

The screenshot shows the ANTwire RF Control software interface. The title bar at the top reads "ANTware" and "Help". The main window is titled "ANT Channel 0" through "ANT Channel 7".

**Annotations:**

- Käytettävä ANT-kanava**: A red vertical text label on the left side of the interface.
- Kenttä näyttää viestiliikenteen**: A red vertical text label in the upper right area of the main window.
- Kanavan asetukset**: A red vertical text label on the left side of the "Channel Configuration" section.
- Yhteyden avaus**: A red vertical text label above the "Open" button in the "Channel Control" section.
- Kenttä näyttää moduulin tilan ja tehdyt toimenpiteet**: A red vertical text label on the left side of the "Basic Device Options" section.
- USB-liittynnän asetukset ja yhdistäminen**: A red vertical text label on the left side of the "USB Interface settings" section.
- Lähetettävän viestin asetukset**: A red vertical text label on the right side of the "Channel Operation" section.

**Interface Details:**

- Basic Device Options**: Includes "NVM Commands" (Load NVM, Dump NVM, Clear NVM, Lock NVM), "Reset Module", and "Get Device Info".
- USB Interface settings**: Shows "USB-Port No." as 0 and "ANT Baud Rate" as 57600. A "Connect Port 0" button is circled in red.
- Channel Assignment**: Includes "Channel Type" (Master, Slave, Master (Tx Only), Master Shared, Slave Shared, Scanning) and "Net # 0".
- Mandatory Channel Configuration**: Includes "Device No." (49), "Device Type" (1), "Trans. Type" (1), "Device Pairing", "Set Channel ID", and "Use Default Channel Options".
- Optional Channel Configuration**: Includes "By Freq (Hz)" (4), "By Period (Counts)" (8192), "Timeout (x2.5s)" (12), "RF Freq (MHz)" (66), "Power" (0 dBm), "Set Message Period", "Low Priority", "Hi Priority", "Set RF Freq", and "Set Tx Power".
- Channel Control**: Includes "Get Ch Status", "Get Channel ID", and "Include List" (Exclude, Device No., Dev. Type, Chan ID, Index, List Size, 0).
- Channel Operation**: Includes "Message Data" (00,00,00,00,00,00,00,00), "Send burst", "Broadcast", "Acknowledge", "Always Ackee", and "# of Burst Packets" (10).

SensRware -sovelluksen käyttöliittymä kommentoituna punaisilla teksteillä.

The screenshot shows the SensRware software interface with several red annotations:

- Käytettävä ANT-kanava**: A red text label pointing to the top navigation bar where 'ANT Channel 3' is selected.
- Kenttä näyttää käännetyin konfigurointitiedoston**: A red text label pointing to the main configuration area.
- ANT-kanavan asetukset**: A red text label pointing to the 'Mandatory Channel Configuration' and 'Optional Channel Configuration' sections.
- Datakanavan valinta ja asetukset**: A red text label pointing to the 'SensRware Data Channel Configuration' section, which is circled in red.

The interface includes various configuration panels such as 'Channel Assignment', 'Mandatory Channel Configuration', 'Optional Channel Configuration', 'SensRware Data Channel Configuration', 'Shared Address Configuration', and 'Channel Mask Configuration'. The 'SensRware Data Channel Configuration' section is circled in red and contains settings for Data Type, ANT Channel Number, Pin Enable Mask, Message Ratio, and Message Ratio Offset.