

Juho Vesanen

PSOC LANGATTOMAN  
ANTURIVERKON MIKRO-OHJAIMENA

Tietotekniikan pro gradu –tutkielma  
Mobiilijärjestelmien linja  
31.1.2013



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
TIETOTEKNIIKAN LAITOS  
2013

**Tekijä:** Juho Vesanen

**Yhteystiedot:** juho.vesanen@gmail.com

**Työn nimi:** PSoC langattoman anturiverkon mikro-ohjaimena

**Title in English:** PSoC microcontroller in a wireless sensor network

**Työ:** Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

**Sivumäärä:** 116 + 1

**Linja:** Mobiilijärjestelmät

**Avainsanat:** anturiverkko, langaton anturiverkko, mikro-ohjain, noodi, PSoC

**Keywords:** wireless sensor network, WSN, node, microcontroller, PSoC

**Tiivistelmä:** Tämä tutkielma selvittää Cypress Semiconductorin PSoC-mikro-ohjaimen soveltuvuutta käytettäväksi langattomissa anturiverkoissa, ja sitä millaisia etuja tällä voidaan saavuttaa muihin mikro-ohjaimiin verrattuna. Uuden anturinoodin toteutus ja näistä kootun verkon toiminta esitellään kattavasti. Verrattaessa toteutettua noodia muihin moderneihin, vuosina 2006...2012 julkaistuihin, laitealustoihin havaitaan, että PSoC on vartenotettava vaihtoehto anturiverkkoihin. Lisäksi käsitellään PSoC:n käyttöä normaalisti ulkoisia komponentteja käyttävissä mittausjärjestelmissä. Tuloksena on, että tietyissä tilanteissa ja sovelluksissa PSoC:ta käyttävä järjestelmä voi olla muita energiatehokkaampi, sillä voidaan saavuttaa säästöjä komponenttien kustannuksissa ja tätä käyttäen toteutettu anturinoodi voi olla fyysiseltä kooltaan muita toteutuksia pienempi. Tarkempi soveltuvuusanalyysi tulisi kuitenkin tehdä jokaista sovellusta varten erikseen.

**Abstract:** This thesis studies the suitability of PSoC microcontroller by Cypress Semiconductor to be used in wireless sensor networks and the benefit this might have over traditional microcontrollers. The design and operation of a new, PSoC-based sensor node and sensor network is presented. When the PSoC based node is compared to the other modern platforms released in between 2007...2012, it can be observed, that the PSoC is a notable micro-controller for wireless sensor networks. Using PSoC in measurement systems, that usually utilize external components, is also addressed. The conclusion is that in certain situations and applications the node based on the PSoC may have higher overall energy efficiency than other nodes. Also, the PSoC may bring savings in component costs and in required surface area. However, a feasibility study should be conducted separately for each application.

## Käsitteet ja termit

$\mu\text{C}$	Microcontroller. Mikro-ohjain
1-Wire	Dallasin kehittämä yhden signaalijohtimen asynkroninen sarjaväylä digitaalisille antureille
6/SOT23	Elektroniikkakomponenttien kuusijalkainen kotelointityyppi, kotelon koko 2,7 mm x 2,9 mm
AD-muunnin	Analogia-digitaalimuunnin. Laite, joka mittaa jännitteen ja kuvaa tämän arvon digitaalisesti
ad hoc	Latinaa, "tätä varten"
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector. Proaktiivinen reititysprotokolla ad hoc -verkkoihin
AVR	Atmelin 8-bittinen mikro-ohjainperhe
Boost-regulaattori	Kelaa käyttävä jänniteregulaattori, jonka lähtöjännite on tulojännitettä korkeampi
CCA	Clear Channel Assessment. Tapahtuma, jossa tarkistetaan ennen lähetystä, että siirtotiellä ei ole muita lähetteitä
CMRR	Common Mode Rejection Ratio. Suure, joka kuvaa yhteismuotoisen häiriön torjuntaa

CRC	Cyclic Redundancy Check. Tiivistealgoritmi, jota käytetään virheentarkastuksessa
DA-muunnin	Digitaali-analogiamuunnin. Laite, joka tuottaa jännitteen digitaalisen ohjaussignaalin perusteella
dBm	Tehon määrä suhteessa yhden milliwatin tehoon. 0 dBm = 1 mW
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector Routing. Reaktiivinen reititysprotokolla ad hoc -verkkoihin
DSSS	Direct-sequence spread spectrum. Suorasekvenssi hajaspektritekniikka
EEG	Electroencephalography. Aivojen toiminnan sähköinen mittaus sekä tästä saatava käyrä
EEPROM	Electronically eraseable and programmable read only memory. Haihtumaton muistityyppi, jota käytetään pienten datamäärien tallennukseen
EIA	Electronic Industries Alliance. Yhdysvaltalainen kauppaja- ja standardointijärjestö
EKG	Elektrokardiogrammi, sydämen toiminnan sähköinen mittaus sekä tästä saatava käyrä
Flash-muisti	Haihtumaton muistityyppi, jota käytetään suurten datamäärien tallennukseen

FSK	Frequency Shift Keying. Lähetelaji, jossa informaatio koodataan taajuuden muutokseen
GAIN	Vahvistimen jännitteenvahvistuskerroin
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying. Lähetelaji, jossa informaatio koodataan taajuuden muutokseen, jota on pehmennetty Gaussin suodattimella.
GPIO	General Purpose Input Output. Yleiskäyttöinen (tulo tai lähtö) digitaalinen liitäntä mikro-ohjaimissa
GPRS	General Packet Radio Service. Matkapuhelinverkoissa käytetty tiedonsiirtotekniikka, nopeus alle 114 kbps
Harvard-arkkitehtuuri	Tietokonearkkitehtuuri, jossa käskyjä ja dataa varten on erilliset signaalitiet ja muistit
I/O	Input/Output. Liitäntä, jota voidaan käyttää tulona tai lähtönä
I2C	Inter-integrated circuit. Philipsin kehittämä kahden johtimen synkroninen sarjaväylä.
IEC	International Electrotechnical Commission. Kansainvälinen standardointiorganisaatio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kansainvälinen standardointiorganisaatio

IEEE 802.15.4	IEEE:n standardi lyhyen kantaman radioverkkoprotokollista. Kattaa OSI-mallin kaksi alinta kerrosta
ISM	Industrial Scientific Medical. Nimitys useille lupavapaille radiotaajuusalueille. Tähän sisältyy mm. 433 MHz ja 2.45 GHz -taajuudet
ISO	International Standardization Organization. Kansainvälinen standardointijärjestö
LPL	Low-Power Listening. Radiolaitteissa vähän energiaa kuluttava tila, jossa vastaanotin on päällä vain jaksottain
LR6	IEC:n määritelmä <i>alkaliparistolle</i> , joka yleiskielessä tunnetaan nimellä AA-paristo
MAC	Medium access control. Kanavaan pääsyn hallinta, ISO:n OSI-mallin toisen kerroksen alempi alakerros
MANET	Mobile Ad hoc Network. Yläkäsite tiettyä tarkoitusta varten tehdyille langattomille verkoille, jossa yksittäiset laitteet voivat liikkua toistensa suhteen
MIPS	Million instructions per second. Mikroprosessorien laskentatehon kuvaamiseen ja vertailuun käytetty yksikkö; miljoonaa laskutoimitusta sekunnissa

MSP430	Texas Instrumentsin 16-bittinen mikro-ohjainperhe
Notch-suodin	Kaistanestosuodin, jossa estokaistan leveys on huomattavan kapea
OSI-malli	Open Systems Interconnection. ISO:n esittämä malli pakettiperustaisen informaation siirtoon liittyvistä tapahtumista ja näiden välisistä rajapinnoista
PGA	Programmable Gain Amplifier. Vahvistin, jossa vahvistuskerroin on säädettävissä
PIC	Microchipin pääasiassa 8-bittinen mikro-ohjainperhe
PSoC	Programmable system on chip. Cypress Semiconductorin valmistama mikro-ohjainperhe
PSRR	Power Supply Rejection Ratio. Suure, joka kuvaa jännitelähteestä aiheutuvan kohinan torjuntaa
PWM	Pulse-width modulation. Pulssinleveysmodulaatio. Käytössä joko tehon ohjauksessa tai lähetelajina
RAM	Random Access Memory, käyttömuisti
RC	Resistor Capacitor. Vastuksen ja kondensaattorin muodostama kytkentä. RC-oskillaattorissa taajuuden määrää kytkennän aikavakio
RISC	Reduced Instruction Set Computer. Prosessorien suunnittelufilosofia: käskyjen määrän minimointi



RSSI	Received Signal Strength Indicator. Vastaanotetun signaalin tason ilmaisu
SC	Switched Capacitor. Kytkentä, joka käyttää kytkettyä kondensaattoria
SPF	Shorted Path First. Algoritmi, jolla lasketaan lyhin reitti tiettyyn kohteeseen
SPI	Serial peripheral interface. Nopea, kolmen johtimen synkroninen sarjaväylä lyhyille etäisyyksille
TDMA	Time Division Multiple Access. Aikajakoinen kanavanvaraustekniikka
TTL (logiikka tai jännite)	Transistor-Transistor Logic. Logiikkapiiriperhe, jossa 0-tasoa vastaa 0 V - 0,8 V ja 1-tasoa 2 V - 5 V. Yleisesti TTL-taso viittaa 0 V ja 5 V jännitteiden käyttöön
TTL (kenttä)	Time-to-Live. Tietoverkossa kulkevassa paketissa oleva tieto, joka määrää koska paketti poistetaan
UHF	Ultra-high frequency. Taajuusalue kattaen taajuudet välillä 300 MHz - 3 GHz
USART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Asynkroninen sarjaliikennelaite, jolla voidaan toteuttaa esim. EIA-232 tai EIA-485 -sarjaväylä
VHF	Very High Frequencies. Taajuusalue kattaen taajuudet välillä 30 MHz - 300 MHz

Watchdog	Ajastin, joka automaattisesti käynnistää laitteen uudelleen sen toiminnan pysähtyessä odottamattomasti
WWVB	Yhdysvaltalainen kellojen synkronointijärjestelmä, joka käyttää 60 kHz radiotaajuutta
ZigBee	Energiatehokas lyhyen kantaman (10-100m) radioverkkoprotokolla, joka käyttää IEEE 802.15.4 -protokollaa

## Taulukot

Taulukko 1 - Modernit anturinoodit ja näiden mikro-ohjaimet, radiopiirit ja käyttökohteet.....	19
Taulukko 2 - Anturinoodien energiankulutus.....	20
Taulukko 3 - Eri radiopiirien keskeiset ominaisuudet .....	29
Taulukko 4 - Eri radiopiirien energian- ja virrankulutus eri tiloissa. ....	30
Taulukko 5 - PSoC:n ja luvun 3.2 mikro-ohjainten ominaisuuksien vertailu .....	55
Taulukko 6 - Toteutetun anturinoodin mitattu virrankulutus.....	66
Taulukko 7 - ProSpeckzin ja toteutetun anturinoodin energiankulutus eri tiloissa	81
Taulukko 8 - Modernien ja toteutetun noodin energiankulutus ja laskennallinen toiminta-aika.....	82
Taulukko 9 - PSoC sekä alaluvun 3.1 anturinoodien mikro-ohjaimet, näiden laskentateho ja muistien määrät .....	83
Taulukko 10 - Instrumentointivahvistinten ominaisuuksien vertailu .....	87
Taulukko 11 - Puolijohdesuodinpiirejä ja PSoC:n energiatehokkain sekä laadukkain suodin .....	90
Taulukko 12 - Anturinoodeissa ja mittauskytkennöissä käytettävien komponenttien yksikköhinnat ja niiden vaatimat pinta-alat .....	93

## Kuvat

Kuva 1 - Langaton anturiverkko ja sen eri osat.....	4
Kuva 2 – Beutelin ehdottama diagrammi kahdesta kuvitteellisesta noodista.....	15
Kuva 3 - Tyypillisen anturinoodin lohkokaavio .....	17
Kuva 4 - X-MAC protokollan tyypillinen toiminta ajan funktiona .....	42
Kuva 5 - SpeckMAC-B ja -D -protokollien toiminta ajan funktiona.....	43
Kuva 6 - CY3271-kehitysalustasta koottu anturinoodi.....	60
Kuva 7 - Toteutettu anturinoodi.....	64
Kuva 8 – Enhanced ShockBurst-pakettiformaatti .....	67
Kuva 9 - MAC-protokollan käyttämä kehysformaatti .....	72
Kuva 10 - Tulvahakua käyttävän reititysprotokollan pakettiformaatti.....	74
Kuva 11 - Toteutetun anturiverkon rakenne .....	75
Kuva 12 - Anturiverkon WWW-käyttöliittymän etusivu .....	76
Kuva 13 - Kuvitteellinen mittausjärjestelmä.....	86

## Kuvaajat

Kuvaaja 1 - Uusien anturinoodien määrä eri vuosina.....	18
Kuvaaja 2 - Anturinoodien kokonaisvirrankulutus eri vahvistinpiirein.....	88
Kuvaaja 3 - Anturinoodien virrankulutus eri suodinpiirein.....	91

# Sisällysluettelo

Käsitteet ja termit .....	III
Taulukot .....	X
Kuvat.....	XI
Kuvaajat.....	XI
1 Johdanto .....	1
2 Langattomat anturiverkot.....	4
2.1 Langattomat anturiverkot yleisesti.....	4
2.2 Käyttökohteet.....	6
2.3 Haasteet .....	10
2.4 Anturinodeiden mitattavat suureet ja vertailu .....	13
3 Anturinodeiden tekniikka .....	17
3.1 Laitealustat .....	18
3.1.1 ENS-alusta.....	20
3.1.2 TUTWSN Temperature Node .....	21
3.1.3 KMOTE.....	22
3.1.4 FireFly.....	22
3.1.5 TinyNode .....	23
3.1.6 SENTIO.....	24
3.2 Mikro-ohjaimet .....	25
3.2.1 ATmega-sarja.....	25
3.2.2 PIC.....	27
3.2.3 MSP430 .....	27

3.3	Radiolaitteet .....	28
3.3.1	CC2420.....	30
3.3.2	nRF2401A .....	31
3.3.3	XE1205 .....	32
3.4	Käytettävät anturit ja niiden rajapinnat.....	33
3.5	Yhteenveto modernien anturinooidien laitetekniikasta .....	35
4	Langattomien anturiverkkojen protokollat.....	37
4.1	MAC-protokollat .....	37
4.1.1	MAC-protokollien luokittelu ja toimintaperiaatteet.....	39
4.1.2	X-MAC.....	41
4.1.3	SpeckMAC .....	43
4.1.4	TRAMA .....	45
4.2	Reititysprotokollat.....	46
4.2.1	Eri protokollatyypit .....	47
4.2.2	Reititysprotokollien resurssivaatimukset.....	50
5	Anturinoodi PSoC-mikro-ohjaimella .....	53
5.1	PSoC-mikro-ohjain.....	53
5.2	PSoC:ta käyttävät sovellukset anturiverkoissa.....	57
5.2.1	ProSpeckz.....	57
5.2.2	Mittausverkko rannikkoalueille .....	58
5.2.3	PNet .....	59
5.2.4	Cypress Semiconductorin CyFi -verkot.....	59
5.2.5	Eri rajapintojen toteutus erilaisissa järjestelmissä.....	61
5.2.6	Yhteenveto PSoC:n eri anturiverkkosovelluksista.....	63
5.3	Toteutettu anturinoodi PSoC-mikro-ohjaimella.....	64
5.3.1	Teholähde ja energiankulutus.....	65
5.3.2	Radiolähetin-vastaanotin.....	66

5.3.3	Noodin anturit.....	68
5.3.4	Toteutetun noodin ohjelmisto.....	69
5.3.5	Toteutetun noodin MAC-protokolla.....	71
5.3.6	Toteutetun noodin reititysprotokolla.....	73
5.3.7	Ohjelmisto mittausdatan keräykseen, visualisointiin ja verkon hallintaan.....	74
5.4	Anturinoodin rajoitteista ja mahdollisista parannuksista.....	77
5.5	Toteutetun anturinoodin ja –verkon toiminta sekä vertailu muihin laitteisiin .....	79
5.5.1	Anturiverkon toiminta .....	79
5.5.2	Toteutetun anturinoodin vertailu ProSpeckz-noodiin.....	80
5.5.3	Toteutetun anturinoodin vertailu muihin anturinoodeihin.....	82
5.6	PSoC:lla saavutettavat edut käytännön mittausjärjestelmissä .....	85
5.6.1	Signaalinparannusjärjestelmän vaikutus energiankulutukseen.....	85
5.6.2	Signaalinparannusjärjestelmän vaikutus laitteen hintaan ja kokoon..	92
5.7	Noodin toteutuksesta, vertailusta muihin noodeihin, PSoC:n käytöllä saatavista eduista ja sen soveltuvuudesta .....	94
5.8	Jatkotutkimus.....	97
6	Yhteenveto .....	98
	Lähteet .....	100
	Liitteet.....	117
	Liite 1 - toteutetun anturinoodin kytkentäkaavio.....	117

# 1 Johdanto

Langattomia anturiverkkoja on käytetty eri sovelluksissa ja tutkimuskäytössä yli kymmenen vuoden ajan. Näiden verkkojen laitteissa esiintyvien teknisten, protokolla- ja ohjelmistoratkaisujen kirjo on huomattavan laaja. Kuitenkin viimeisen viiden vuoden (2007...2012) aikana uusien anturiverkkojen laitteiden, eli anturinooidien, kehitystyö on ollut vähäistä akateemisen tutkimuksen painopisteen siirtyessä käsittelemään yhä enemmän verkkojen protokollia. Anturiverkon laitteissa, eli anturinoodeissa käytettävä laitetekniikka – mikroprosessorit, -ohjaimet sekä radiopiirit – kehittyi kuitenkin jatkuvasti eri valmistajien tuodessa markkinoille uusia anturiverkkoihin soveltuvia laiteratkaisuja. Alan yleisen kehityksen kannalta on olennaista selvittää uusista eri laiteratkaisuista niiden soveltuvuus anturiverkkoihin ja näistä mahdollisesti saatavat hyödyt.

Cypress Semiconductorin valmistamaa PSoC-mikro-ohjainta on käytetty useissa eri sovelluskohteissa anturiverkoissa ja niiden ulkopuolella. Kuitenkin sen käyttö anturiverkon noodia ohjaavana laitteena on ollut huomattavan vähäistä, eikä tällä mikro-ohjaimella ole toteutettu kuin vain muutama tyypillinen, lyhyen kantaman anturinoodi. Lisäksi yhtä näistä toteutuksista on käytetty esimerkkinä PSoC:n *soveltumattomuudesta* kyseiseen sovelluskohteeseen. Kuitenkin PSoC:n muiden käyttö- ja sovelluskohteiden laajuus antaa ymmärtää, että se soveltuisi myös langattomien anturiverkkojen nooidien mikro-ohjaimeksi.

PSoC poikkeaa tavanomaisista mikro-ohjaimista siten, että tässä on sisäänrakennettuna useita nk. analogisia ja digitaalisia lohkoja. Näillä on mahdollista toteuttaa suuri määrä eri oheislaitteita piirin sisälle ilman ulkoisten komponenttien käyttöä. Käytännössä näillä lohkoilla on mahdollista toteuttaa



mm. erilaisia AD- ja DA-muuntimia, analogisia suotimia, komparaattoreita, I2C- ja SPI-ohjaimia, PWM-modulaattoreita ja ajastimia. PSoC:n olennainen ero muihin mikro-ohjaimiin verrattuna on se, että tässä on poikkeavan suuri määrä analogisia toimintoja. Lisäksi PSoC:n eri lohkojen ominaisuuksia on mahdollista vaihtaa käytön aikana. Koska anturiverkoissa noodit mittaavat suureita ympäristöstään voidaan olettaa, että PSoC:n käytöllä voidaan saada merkittäviä etuja juuri eri analogisten antureiden liittämässä.

Tämä tutkielma selvittää, onko PSoC-mikro-ohjain soveltuva langattoman anturiverkon mikro-ohjaimiksi ja mitä hyötyjä tällä voidaan saavuttaa. Tämän selvittämiseksi ensin kartoitetaan modernien anturinooidien laitetekniikkaa ja käytettäviä protokollia. Tämän jälkeen konstruktivistisesta tutkimuksesta varten suunnitellaan ja toteutetaan yksinkertainen muihin moderneihin anturinoodeihin verrattavissa oleva anturinoodi sekä -verkko käyttäen PSoC-mikro-ohjainta. Anturiverkossa käytettävät protokollat valitaan sillä perusteella, että anturinoodin toiminta ja mikro-ohjaimen soveltuvuus voidaan selkeästi arvioida, mutta itse protokollien esim. energiatehokkuuteen ei kiinnitetä huomiota. Toteutetusta noodista ja näillä toteutetusta verkosta selvitetään, kuinka noodin eri ominaisuudet vertautuvat muihin moderneihin anturinoodeihin. Lisäksi käsitellään PSoC:n käyttöä mittausjärjestelmissä, jotka muutoin vaatisivat ulkoisten komponenttien käyttöä.

### **Työn tarkempi sisältö**

Tämän työn toinen luku käsittelee langattomia anturiverkkoja yleisesti. Luvussa esitellään langattomat anturiverkot, niiden käyttökohteet ja näihin liittyvät haasteet. Lisäksi luku käsittelee anturinooidien vertailua. Luku kolme käsittelee

langattomien anturiverkkojen laitetekniikkaa. Luvussa esitellään muutamia tyypillisiä moderneja anturinoodeja, tarkastellaan näissä käytettäviä mikro-ohjaimia sekä radiopiirejä ja käsitellään anturinoodeissa käytettäviä antureita sekä näillä mitattavia suureita.

Luku neljä käsittelee anturiverkkojen protokollia. Luvussa käsitellään anturiverkoissa käytettävien MAC-protokollien erityispiirteitä, niiden luokittelua ja toimintaperiaatteita, sekä esitellään muutamia toisistaan poikkeavia protokollia. Lisäksi luvussa käsitellään anturiverkkoihin soveltua reititysprotokollia, niiden eroavaisuuksia IP-verkoissa käytettyihin protokolliin, toimintaperiaatteita, luokittelua ja resurssivaatimuksia.

Luvussa viisi käsitellään anturinoodin toteutusta PSoC-mikro-ohjaimella. Luku esittelee PSoC-mikro-ohjaimen ja tämän erityispiirteet, useita eri anturiverkkojen sovelluksia, joissa PSoC:ta on aiemmin käytetty sekä näistä saatuja kokemuksia. Luvussa käsitellään toteutetun anturinoodin teknisiä ratkaisuja ja tässä käytettyjä protokollia sekä niiden tarkkoja toimintaperiaatteita. Lisäksi luvussa esitellään toteutetusta anturinoodista ja -verkosta saadut mittaustulokset ja verkon toimivuus. Saatuja tuloksia myös verrataan muihin moderneihin anturinoodeihin. Luvussa myös käsitellään PSoC-mikro-ohjaimen soveltuvuutta todellisiin mittausjärjestelmiin sekä sitä, millaisia hyötyjä tällä voidaan saavuttaa muihin mikro-ohjaimiin verrattuna. Lisäksi luku sisältää yhteenvedon PSoC-mikro-ohjaimen soveltuvuudesta ja esittelee olennaisia tutkimuskohteita jatkotutkimusta ajatellen.

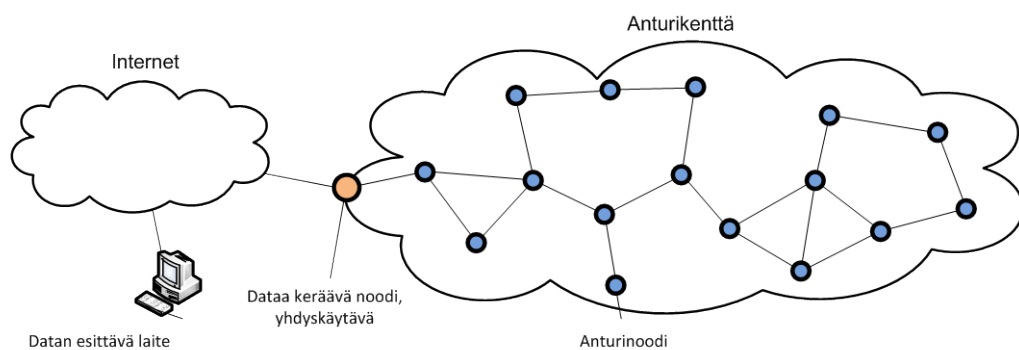
Luku kuusi on tutkielman yhteenveto. Lisäksi työssä on yksi liite, joka on toteutetun anturinoodin kytkentäkaavio.

## 2 Langattomat anturiverkot

Tämä pääluku käsittelee langattomia anturiverkkoja yleisesti sekä niiden luokittelu, käyttökohteita, niihin liittyviä haasteita ja anturinooidien vertailua.

### 2.1 Langattomat anturiverkot yleisesti

Langaton anturiverkko [1][2, s. 7] on kokonaisuus, joka koostuu suuresta määrästä yksittäisiä anturinoodeja jotka yhdessä muodostavat verkon tai anturikentän. Noodit mittaavat ympäristöstään eri suureita ja lähettävät tämän tiedon langattomasti dataa keräävälle noodille, joka mahdollistaa datan tarkemman analysoinnin, visualisoinnin ja edelleenvälityksen esimerkiksi Internetin kautta. Olennaista noodien välisessä tiedonsiirrossa on, että yksittäiset laitteet välittävät edelleen myös muiden noodien liikennettä. Noodien sijainnin ei langattomassa anturiverkossa tarvitse olla ennalta suunniteltu, määritelty tai edes pysyvä, sillä noodit sopeutuvat verkon topologian muutoksiin automaattisesti. Yleensä verkkojen langattomuutta ei mainita erikseen. Tyypillinen anturiverkko on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1 - Langaton anturiverkko ja sen eri osat [1]

Langattomat anturiverkot voidaan luokitella esimerkiksi niiden toimintaympäristön perusteella. Tyypillisesti anturiverkkoja käsiteltäessä tarkoitetaan maanpäällisiä verkkoja [1], jotka viestivät radioyhteydellä yksittäisen radiolinkin kantaman ollessa lyhyt. Myös optisen tiedonsiirron käyttö on mahdollista. Tällaisessa maanpäällisessä verkossa noodeja saattaa olla satoja tai jopa tuhansia sijoiteltuna joko suunnitellusti tai satunnaisesti. Maanalaisissa langattomissa anturiverkoissa [3] noodit on haudattu maan sisään tai sijoitettu esimerkiksi kaivoksiin, josta aiheutuu uusia haasteita. Esimerkiksi radioyhteyden käyttö noodien väliseen viestintään on selkeästi haastavampaa jo pelkästään sen takia, että radiotien arviointi vaikeutuu huomattavasti [4]. Lisäksi noodien huolto tai energiavaraston täydennys voi olla mahdotonta anturiverkon käytön aikana. Vedenalaiset langattomat anturiverkot [5] käyttävät pääasiassa radioyhteyden sijaan akustiikkaa, jolla voidaan saavuttaa jopa kymmenien kilometrien viestintäetäisyyksiä. Lisäksi muita anturiverkkotyyppisiä edustavat esimerkiksi liikkuvat anturiverkot [6], jotka käsittävät noodeja, joilla on kyky liikkua paikasta toiseen sekä multimedia-anturiverkot [7][8], jotka voivat välittää kuvia, videota ja ääntä.

Tyypillistä tavanomaisille, maanpäällisille anturiverkoille on rajoitukset energian varastoinnissa, radiolähtetimen lähetystehossa ja noodin laskentatehossa. Pienet lähetystehot johtavat yksittäisten noodien lyhyeen kantomatkaan. Verkon topologiamuutokset ovat tavallisia mm. radiotien häipymän ja ympäristön olosuhteiden muutosten johdosta. [9, s. 1-5] Lisäksi huomioitavaa on noodien pitkä toiminta-aika: ne voivat olla käytössä yhtäjaksoisesti jopa vuosia ilman erillistä huoltoa [1].

MANET-verkot (engl. Mobile Ad Hoc Network) ovat yläkäsite kaikille järjestelmille, joissa yksittäiset laitteet muodostavat yhteydet toisiinsa verkon

laitteisiin automaattisesti ja ilman erillisiä määrittelyitä, ja joissa laitteiden sijainti voi vaihtua. Langattomat anturiverkot jakavat muitakin piirteitä näiden kanssa; kiinteätä verkkoinfrastruktuuria ei tarvita, noodien resurssit ovat vähäisiä ja liikennöinti tapahtuu langattomasti. Kuitenkin verkoissa on muutamia olennaisia eroavaisuuksia: vaikka langattoman anturiverkon noodit voivatkin olla liikkuvia, on liikkuvuus huomattavasti tavallisempaa MANET-verkoissa; anturiverkoissa noodien resurssit (esim. laskentataho, akuston energiasisältö ja muistin määrä) ovat *huomattavasti* rajoittuneempia, kuin MANET-verkkojen; lisäksi noodien kokonaismäärä anturiverkoissa voi olla useita kertaluokkia suurempi [10 s. 28][11 s. 8-9][12 s. 9-11].

## 2.2 Käyttökohteet

Langattomilla anturiverkoilla on huomattavan monia käyttökohteita useilla eri sovellusalueilla. Näissä verkoille ja yksittäisille anturinoodeille asetettavat vaatimukset poikkeavat toisistaan yhdessä tarvittavien antureiden, toiminta-ajan, antureiden tiheyden ja verkossa välitettävän datan määrän osalta. Lisäksi eri sovelluskohteissa vaatimukset mm. verkon ja sieltä saatavan datan luotettavuudesta voivat vaihdella suurestikin. Käyttökohdealueina voidaan tunnistaa ja erottaa toisistaan esimerkiksi terveydenhuollon sovellukset, sotilassovellukset, ympäristömittaus ja maanviljelys, rakennustekniikka ja kiinteistöautomaatio sekä muut yleiset mittaussovellukset. [1][9 s. 2-4] Seuraavassa on esitelty nämä luokat ja näissä esiintyviä sovelluksia.

## **Maanviljelys ja ympäristön mittaus**

Maanviljelyksessä käytetyillä anturiverkoilla voidaan esimerkiksi pelloilta mitata ja analysoida eri suureita, joiden perusteella voidaan tehdä päätöksiä mm. kastelun, lannoituksen, kylvämisen ja sadonkorjuun suhteen. Näin menetellen saadaan tarkkaa tietoa, eikä tarvitse tukeutua pelkästään viljelijän kokemukseen, peltojen visuaaliseen tarkasteluun ja intuitioon päätöksiä tehdessä. Karjankasvatuksessa osa eläimistä on mahdollista anturoida, jolloin saadaan tarkkaa tietoa näiden käyttäytymisestä. [13] Kasvihuoneympäristöissä on mahdollista mitata tarkasti olosuhteita kasvihuoneen eri osista ja ulkoilmasta. Tätä tietoa voidaan käyttää mm. kasvihuoneen lämmityksen ja kastelun ohjaukseen optimaalisen lopputuloksen saavuttamiseksi. [14]

Anturiverkot soveltuvat myös erilaisten luonnollisten uhkien arviointiin ja mittaukseen. Laajoja anturikenttiä on käytetty mm. metsäpalojen [15] ja tulivuorten purkausten [16] seurantaan, sekä varoitukseen nopeasti etenevistä tulvista [17]. Antureina näissä järjestelmissä on käytetty mm. lämpötila-antureita, matalille äänille soveltuvia mikrofoneja, kosteusantureita, pinnankorkeusantureita ja paineantureita. Ympäristömittaus voi käsittää myös esimerkiksi ilmanlaadun analysointia. Ilmansaasteiden mittausjärjestelmä [18] on laajahkolla kaupunkialueelle levitetty anturiverkko, jonka noodit analysoivat ilmasta saasteiden määrää mitaten mm. pienhiukkasten, otsonin ja hiilimonoksidin pitoisuuksia. Verkosta saatava data voidaan esittää karttapohjalla ongelmakohtien tunnistamiseksi.

## **Teollisuus-, koti- ja kiinteistöautomaatio**

Teollisuusympäristöissä anturiverkkoja voidaan käyttää mm. eri mittalaitteilta ja kentällä käytettäviltä instrumenteilta saatavan tiedon langattomaan siirtoon. Anturiverkot myös nopeuttavat väliaikaisten asennusten toteutusta, koska eri mitta- ja ohjauslaitteet eivät tarvitse erillistä kaapelointia. Käytännössä teollisuudessa voidaan käyttää mitä erilaisimpia mittausjärjestelmiä. Näiden pääasiallisena tarkoituksena on kustannusten minimointi eri prosesseja tehostamalla. [9 luku 10][19]

Kotiautomaation [20] ohjatessa useita kodin järjestelmiä automaattisesti voidaan puhua älykodista. Tällaisessa ympäristössä eri anturinoodien mitatessa esim. veden, sähkön ja kaasun kulutusta jopa yksittäisen laitteen tarkkuudella voi kuluttaja käyttää tätä tietoa kodin eri asioiden seurantaan. Myös esimerkiksi paloilmaisimet muodostavat sovelluskohteen anturiverkoille: yksittäiset paloilmaisimet voivat muodostaa verkon, joka tarvittaessa välittää tiedon palosta aina viranomaisille asti. Kiinteistö- ja taloautomaatiossa [21] tyypilliset käyttökohteet liittyvät valaistuksen, lämmityksen ja muiden laitteiden ja järjestelmien ohjaukseen. Lisäksi mm. valon määrää, liikettä, ympäristön tilaa (mm. lämpötila ja eri kaasujen konsentraatio) ja läsnäoloa on mahdollista mitata. Koska kiinteistöissä esimerkiksi lämmitys ja ilmastointi ovat suuria kuluja aiheuttavia, voidaan anturiverkoilla optimoida näiden toimintaa ja siten alentaa kustannuksia.

## **Terveydenhuolto ja lääketieteelliset sovellukset**

Terveydenhuollon piirissä on suuri määrä anturiverkkojen sovelluksia. Suurin osa käyttökohteista keskittyy potilaiden valvontaan ja tehtäviin mittauksiin. Anturiverkkojen avulla voidaan potilaista mitata eri suureita, kuten esimerkiksi syke, veren hapetus ja virtausnopeus, hengitystiheys ja hapen kulutus, lihasten aktiiviteetti ja kehon liike [2 s. 30-32][22 s. 34-39]. Anturiverkoilla toteutettu potilaiden seuranta ja valvonta voidaan tehdä mahdollisimman vähän rajoittavaksi tai häiritseväksi, jolloin on mahdollista suorittaa pitkienkin ajanjaksojen mittaussarjoja. Informaation kulku aina potilastietoihin asti voidaan tehdä myös reaaliaikaiseksi ja tarvittaessa hälytys potilaan tilan muuttuessa on myös mahdollista automatisoida. [23] Esimerkkejä potilaisiin liittyvistä järjestelmistä on useita. Esimerkiksi EKG-signaalin jatkuva mittaus [24], hermoston toiminnan tallennus ja stimulointi [25] ja EEG-signaalien luokittelu [26] on mahdollista toteuttaa anturinoodein. Noodit langattomassa terveydenvalvontaverkossa [27] voivat mitata potilaasta eri suureita, välittää datan palvelimille, josta tätä voi tarkastella esim. PDA-laittein. Lisäksi järjestelmä voi tehdä automaattisen hälytyksen lääkärille tiettyjen raja-arvojen ylittyessä.

Myös sairaalaympäristöissä yleistä turvallisuutta voidaan valvoa ja kehittää anturiverkoin. Henkilöstö voi esim. lähettää hälytyksiä uhkaavista tilanteista, kuitata saapuneita viestejä, tehdä erityyppisiä mittauksia ja ohjata valikoituja toimilaitteita. Lisäksi anturiverkon avulla on mahdollista paikantaa yksittäisiä noodeja kantavat henkilöt huoneen tarkkuudella. Tällaisia järjestelmiä on pilotoitu Suomessa hyvin kokemuksiin. [28] Terveydenhuollon järjestelmissä tulee kuitenkin aina ottaa huomioon, että näissä elektroniikalle on asetettu tiettyjä vaatimuksia mm. laitteiden turvallisuuden ja luotettavuuden suhteen [29].



## **Sotilassovellukset**

Sotilassovellukset ovat useasti tunnistettu käyttökohde anturiverkoille näille ominaisten piirteiden (mm. vikasietoisuus, itseorganisoituvuus) johdosta. Niissä anturiverkkoja on mahdollista käyttää useissa eri tehtävissä: näillä voidaan esimerkiksi seurata materiaali-, tavara- ja henkilövirtoja. Lisäksi voidaan valvoa taistelukentällä tai muilla alueilla havaittavaa liikettä, voidaan kerätä tiedustelutietoa vihollisesta ja seurata esim. biologisia aseita käytettäessä kemikaalien leviämistä. [1][9]

## **Muut yleiset mittausovellukset**

Anturiverkoilla voidaan toteuttaa myös edellisten sovellusalueiden ulkopuolisia järjestelmiä. Esimerkkinä ns. älypysäköinti [30]. Tässä anturinoodit asennetaan jokaiseen pysäköintiruutuun. Ne välittävät tietoa pysäköintiruudun tilasta langattomasti verkon läpi tietoa keräävälle laitteelle. Tämän avulla on mahdollista saada selville todellinen pysäköintiaika tai sen ylitys. Tietoa on mahdollista käyttää myös laskutuksessa, tai se voidaan välittää saapuville autoilijoille. Virransäästöominaisuuksien johdosta anturinoodit voivat olla täysin langattomia.

## **2.3 Haasteet**

Langattomat anturiverkot poikkeavat perinteisistä tietoverkoista monin eri tavoin. Noodien suuri määrä anturikentällä, rajoitukset energian varastoinnissa ja vaatimukset pitkälle toiminta-ajalle sekä protokollien luotettavalle toimivuudelle asettavat haasteita käytettäville laitteille ja niiden toteutukselle [1][2 s. 9-13].

Tunnistettavia haasteita on mm. seuraavissa, osittain päällekkäisissäkin, aihepiireissä.

- Energiavarasto ja sen rajallisuus

Tyypillinen kaupallisesti saatavilla oleva anturinoodi käyttää esim. kahta LR6-paristoa tai yhtä litiumioniakkua energiavarastona <sup>1</sup>. Monissa sovelluksissa energiavaraston ennenaikainen täydennys on vaikeaa tai mahdotonta. Tästä johtuen yksi tärkeimmistä anturinoodien ominaisuuksista on energian säästäminen. Eri suureiden mittaamisen, datan käsittelyn ja radioliikenteen energiankulutuksen optimoinnin tavoitteena on pidentää laitteen toiminta-aika riittävän pitkäksi käyttötarkoitusta tai laskettua huoltoväliä varten. Energiansäästöä suunniteltaessa tulisi järjestelmää käsitellä kokonaisvaltaisesti ottaen huomioon mm. ohjelmisto, käytettävät protokollat, verkkoarkkitehtuuri ja itse fyysinen laitteisto. [2 s. 9-13][11 s. 29-31][34]

- Toiminta-ajan saavuttaminen, energian säästö

Tavoiteltaessa pitkää toiminta-aikaa, on sen saavuttamiseen useita keinoja. Noodien akuston tai pariston energiasisällön koolla voidaan vaikuttaa laitteiden toiminta-aikaan. Tämä ei välttämättä ole kaikissa olosuhteissa kuitenkaan täysin suoraviivaista tai vaikutuksiltaan ennalta arvioitavissa [35]. Täydentääkseen energiavarastoa voivat noodit esimerkiksi kerätä energiaa ympäristöstään aurinkopaneeleihin [36]. Tärkeimmät tekijät ovat kuitenkin pääasiassa kolmella eri tavalla toteutettava ohjelmallinen virransäästö [11 s. 6-7]: 1) verkon noodit voivat käsitellä dataa jo verkossa

---

<sup>1</sup> Tyypillisen LR6 pariston nimellisjännite on 1,5 V. Kapasiteetti voi vaihdella esim. 1,1 Ah ja 2,8 Ah välillä [31][32]. Litiumioniakkujen nimellisjännite on 3,7 V. Kapasiteetti voi vaihdella muutamasta kymmenestä milliampeeritunnista aina kymmeneen ampeeritunteihin [33].

näin vähentäen sen kokonaismäärää ja laitteiden tiedonsiirtoon kuluttamaa energiaa; 2) noodeissa voidaan käyttää lyhyen kantaman heikkotehoisia radiolähettäimiä, joilla yksittäisen noodin virrankulutus saadaan alhaisemmaksi; 3) käytettäessä alhaista toiminta-aikasuhdetta noodit viettävät suurimman osan ajasta merkittävän vähän energiaa kuluttavassa lepotilassa josta ne aktivoituvat vain suorittamaan verkon toiminnan kannalta olennaisia tehtäviä.

- Laskentakapasiteetin rajallisuus

Vähävirtaisissa anturiverkoissa käytettävien mikro-ohjainten laskentateho on huomattavan alhainen verrattuna moderneihin mikroprosessoreihin [37]. Rajallinen laskentakapasiteetti asettaa rajoituksia datan käsittelylle noodissa ja käytettävien verkkoprotokollien vaatimalle laskentateholle [34]. Näin ollen kaikkia tavanomaisissa tietoverkoissa tai datankeruujärjestelmissä käytettyjä algoritmeja tai protokollia ei voida suoraan käyttää langattomissa anturiverkoissa niiden energiankulutuksen johdosta.

- Langattomuus

Noodien viestinnän ollessa langatonta, seuraa tästä useita eri tyyppisiä haasteita. Käytettäessä etenkin radiotietä siirtokanavana voivat kanavan ominaisuudet muuttua käytön aikana [11 s. 94-100]. Tämä voi johtaa mm. topologian toistuviin ja nopeisiin muutoksiin yksittäisten noodien välisten yhteyksien katketessa ja muodostuessa. Piilotetun päätteen ongelmassa [38] kaksi noodia lähettää samanaikaisesti dataa kolmannelle toisistaan tietämättä, jolloin liikenteen törmätessä kummankin lähetys epäonnistuu. Myös kahden noodin välisessä kommunikaatiossa törmäysten välttämiseksi, eli datan lähetyksellä eriaikaisesti, on suuri merkitys eri protokollien kehitystyössä [39].

- Verkon viipeen sieto

Langattomien anturiverkon noodien ollessa laitteistoltaan huomattavan rajoittuneita, eivät nämä yleensä voi toimia reaaliaikaisesti, vaan aiheuttavat verkkoon viivettä. Tästä johtuen verkon sovellukset, protokollat ja koko toiminta tulee suunnitella viivettä sietäväksi. [1]

- Tietoturva

Langattomat anturiverkot ja niiden noodit ovat alttiita useille eri uhille: noodien välisen viestinnän ollessa langatonta, on sen kaappaaminen tai häiritseminen helppoa. Palvelunestohyökkäyksellä [2 s. 270] on mahdollista hyökätä järjestelmää kohten niin, että verkon tai sen osan toiminta estyy. Lisäksi uhkana on väärennetyn tai muutoin virheellisen datan syöttäminen verkkoon [40]. Anturiverkon noodien ollessa paikoissa, joissa niihin on ulkopuolisilla lähes esteetön pääsy, on myös ongelmana fyysinen uhka: noodit on mahdollista esimerkiksi kaapata. Tällöin on mahdollista analysoida yksittäisen laitteen toimintaa ja esimerkiksi saada haltuun verkossa käytettyjä salausavaimia tai muita tietoja verkon toiminnasta [41].

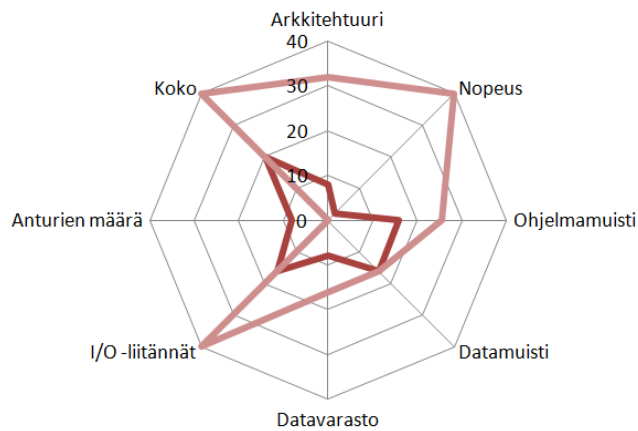
## **2.4 Anturinoodien mitattavat suureet ja vertailu**

Eri anturinoodien luokittelu tiettyihin käyttötarkoituksiin sopiviksi tai sopimattomiksi on hyvin ongelmallista. Niiden numeerisesti ilmaistavia ominaisuuksia on helppo vertailla, mutta kaikki parametrit eivät laitteiden monimutkaisuuden johdosta ole suoraan verrattavissa. Ominaisuuksien vertailussa tulisikin ottaa huomioon laite kokonaisuutena. Anturinoodien

koostuessa selkeästi rajattavista eri osa-alueista on myös usein käytännöllistä erottaa ne toisistaan noodeja arvioitaessa ja verratessa. [42]

Kirjallisuudessa on ehdotettu useita eri vertailutapoja. Esimerkiksi lähteessä [11 s. 80-84] ehdotetaan, että noodien luokittelussa tulisi erottaa toisistaan laitteen fyysinen koko, mahdollisuus liikkuvuuteen, virtalähde, prosessorin teho ja muistin määrä, anturien tyyppi ja käytettävien protokollien luokittelu. Nämä tulisi ilmaista dimensiottomin numeroin. Vaikka kullakin parametrilla olisikin esim. vain kolme vaihtoehtoista arvoa (esimerkiksi virtalähde: 1 – itse energiansa keräävä, 2 – toiminta-aika viikkoja, 3 – toiminta-aika kuukausia) saadaan silti peräti  $3^6 = 729$  laiteluokkaa. Tämä ei kuitenkaan ole anturinooidien suhteellisen vähäisen kokonaismäärän [22] valossa soveltuva lähestymistapa.

Beutel [42] ehdottaa anturinooidien laitealustojen vertailuun uudentyyppistä, graafista mittaria, koska laitealustojen vertailu vain yksittäisiä parametreja käyttäen on vaikeaa. Menetelmässä laitteen ytimeistä ja radiolaitteesta sekä näiden ominaisuuksista muodostetaan kaksi ns. tutkadiagrammia. Järjestelmän ytimeistä arvioidaan noodin osoite- ja dataväylien leveys, laskentateho, ohjelma- ja datamuistien koot, datavaraston koko, I/O-liitäntöjen sekä anturien määrä ja laitteen fyysinen koko. Anturinooidin radiojärjestelmästä puolestaan kuvataan taajuus, datanopeus, käynnistymisaika, lähetysteho, vastaanottimen herkkyys, saavutettava kantomatka ja yksittäisten kanavien lukumäärä. Esimerkki kahden kuvitteellisen noodin ytimen kaavioista on kuvassa 1. Toinen kuvitteellisista noodeista on suurehko, 32-bittinen, nopea ja suurella ohjelmamuistilla ja liitäntöjen määrällä varustettu noodin, jonka ensisijaisena käyttökohteena voisi olla datan käsittely ja laskenta. Toinen kuvitteellinen noodin on pääasiassa mittauskäyttöön tehty fyysisesti pieni ja ominaisuuksiltaan vaatimaton edelliseen verrattuna.



Kuva 2 – Beutelin [42] ehdottama diagrammi kahdesta kuvitteellisesta noodista. Vaaleanpunaisella esitetty resurssiltaan suuri, ja tummanpunaisella vaatimaton 8-bittinen noodi.

Beutelin [42] mukaan ehdotetun nooidien kuvaustavan perusteella anturinoodia tiettyyn tehtävään valittaessa nähdään selkeästi eri noodeista, kuinka niiden ominaisuudet ovat painottuneet. Kuitenkin hän toteaa, että menetelmän soveltaminen esim. virrankulutuksen kuvaamiseen on hyvin vaikeaa, eivätkä eri noodeista saadut tulokset ole välttämättä vertailukelpoisia. Lisäksi voidaan todeta, että tämä menetelmä ei ota huomioon esim. anturinoodin eri osien energiatehokkuutta tai saavutettavissa olevia toiminta-aikoja. Näin ollen tämä menetelmä soveltuukin enintään nooiden pintapuoliseen vertailuun.

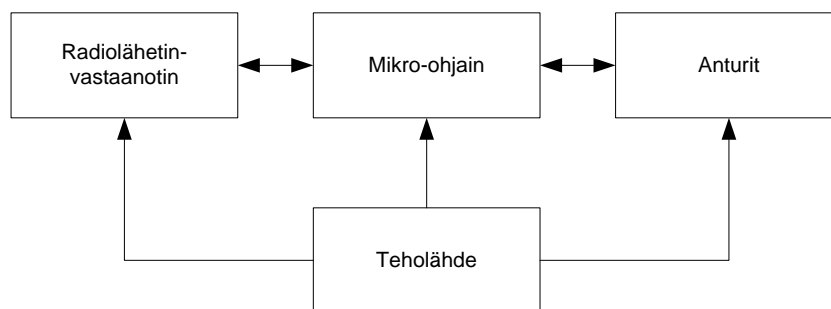
### **Anturinooidien eri osien olennaiset osat ja vertailu käytännössä**

Noodin ytimenä on mikro-ohjain. Suorassa näiden välisessä vertailussa arvioinnin kohteena on yleensä mikro-ohjaimen laskentateho, muistin koko ja liitännät mm. eri antureille ja mittalaitteille [22 s. 16-24]. Tämän lisäksi voidaan verrata eri

mikro-ohjainten energiankulutusta, joka vaaditaan tietyn laskentatehon saavuttamiseksi ja myös energiankulutusta lepotilassa [40 s. 26]. Anturinoodin radiolaitteen olennaisia parametreja ovat liikennöinnin nopeus, radioyhteyden kantomatka, käytettävissä olevien radiokanavien määrä ja radiolaitteen sisäisiin tilanvaihtoihin kuluva aika. Myös radiolaitteen liitännärajoilla ja radiolaitteen muilla ominaisuuksilla on merkitystä. [22 s. 25-29] Lisäksi tärkeänä mitattavana parametrina on energiankulutus lepo-, lähetys- ja vastaanottotiloissa. Yksi käytetty mittari on energiankulutus yhtä lähetettyä tai vastaanotettua bittiä kohden. [40 s. 25-26] Mikäli anturinoodin eri komponenttien energiankulutus tunnetaan eri tiloissa, voidaan tästä laatia arvioita mm. anturinoodilla saavutettavista toiminta-ajoista, mikäli anturinoodin käyttämien protokollien käyttäytyminen on tunnettu.

### 3 Anturinooidien tekniikka

Langattoman anturiverkon noodi voidaan jakaa neljään eri toiminnalliseen lohkokon tai alijärjestelmään. Noodit sisältävät soveltuvia antureita, teholähteen, radiolaitteen ja noodin ohjauksesta vastaavan mikroprosessorin tai -ohjaimen [1][8]. Teholähde sisältää energiavaraston, jänniteregulaattorin ja mahdollisen energiankeräysjärjestelmän. Anturilohko voi käsittää analogisten ja digitaalisten antureiden lisäksi myös toimilaitteita [40 s. 27][44], jolloin verkosta tosin käytettäisiin esimerkiksi nimitystä langaton *aktuaattoriverkko*. Tyypillisen langattoman anturiverkon noodin lohkokaavio on esitetty kuvassa 2.



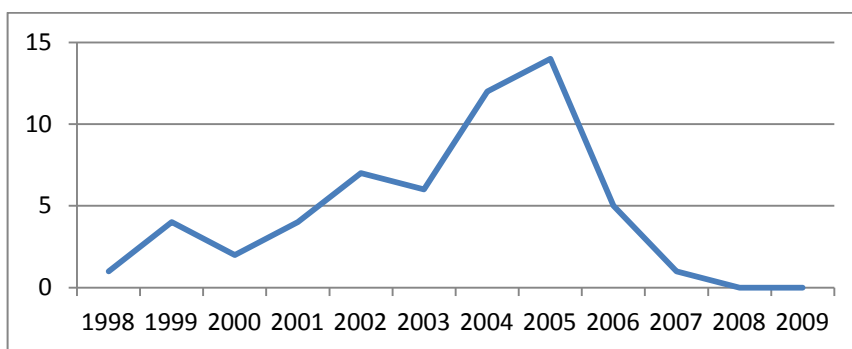
Kuva 3 - Tyypillisen anturinooidin lohkokaavio [8][40 s. 24]

Tässä luvussa kartoitetaan modernien anturiverkkojen laitealustat sekä selvitetään niissä käytettävien radiolaitteiden ja mikro-ohjainten tärkeimmät ominaispiirteet ja muut olennaiset ominaisuudet. Tässä modernilla tarkoitetaan laitealustaa tai anturinoodia, joka on julkaistu vuonna 2006 tai sen jälkeen ja on dokumentoitu jossakin tieteellisessä julkaisussa. Lisäksi tarkastellaan noodeissa käytettäviä antureita ja niiden liitännärajapintoja.



### 3.1 Laitealustat

Vuoteen 2012 mennessä on toteutettu yli 50 erilaista anturiverkon noodia [22 s. 16-24][43][45][46]. Teknisesti noodit eroavat toisistaan mm. mikro-ohjainten ja radiopiirien osalta. Suurin osa näistä laitealustoista on 2000-luvun alkupuoliskolta ja vuosikymmen lopulla uusien noodien kehitys on ollut varsin vähäistä. Voidaan arvella, että yhtenä syynä noodien viimeaikaisen kehityksen vähyyteen on tutkimuksen painopisteen siirtyminen laitetekniikasta protokollien tutkimukseen. Kuvaaja 1 kuvaa toteutettujen anturinoodien määrän eri vuosina kirjan [22] mukaan.



Kuvaaja 1 - Uusien anturinoodien määrä eri vuosina kirjan [22 s. 16-24] mukaan

Tämän työn käsitellessä moderneja anturinoodeja, taulukkoon 1 on koottu vuonna 2006 tai sen jälkeen julkaistut laitealustat, jotka on esitelty tieteellisissä julkaisuissa. Taulukon 1 TUTWSN Temperature Node [47] on kuitenkin julkaistu vuonna 2005, mutta tämä valittiin, koska vuotta uudemmassa TUTWSN Universal Nodesta [43] ei ole saatavilla tietoja sen energiankulutuksesta, mutta joka kuitenkin vastaa TUTWSN Nodea mm. mikro-ohjain- ja radiopiiriperheen osalta.

Nimi	Mikro-ohjain	Radiopiiri	Muistin määrä	Käyttökohde
ENS Platform [36]	MSP430F2410	CC2420	4 kt / 56 kt	Energiankeräyksen tutkimus
FireFly [48]	ATmega32L	CC2420	2 kt / 32 kt	Eri mittauskohteet
KMOTE [49]	MSP430F1611	CC2420	2 kt / 60 kt	Tutkimus, opetus
SENTIO [50]	Atmega-perhe	CC2420	1-8 kt / 16 - 256 kt	Eri sovellusten ripeä kehitys
TinyNode [51]	MSP430F1611	XE1205	10 kt / 48 kt	Tutkimus, eri mittauskohteet
TUTWSN Temperature Node [47]	PIC18LF4620	nRF2401A	~4 kt / 64 kt	Lämpötilamittaus myös ulkotiloissa

Taulukko 1 - Modernit anturinoodit ja näiden mikro-ohjaimet, radiopiirit ja käyttökohdeet

Alaluvun 2.3 mukaan yksi tärkeimmistä noodien optimoitavista ominaisuuksista on niiden energiankulutus. Taulukkoon 2 on laskettu taulukon 1 noodien energiankulutus eri tilanteissa lukuun ottamatta SENTIO-noodia, koska tämän energiankulutusta ei ole dokumentoitu [50]. Lisäksi taulukossa on noodin laskennallinen toiminta-aika. Toiminta-ajan laskennan oletuksina on, että noodin energiavaraston koko on 8,4 Wh, joka vastaa kahta suurikapasiteettista LR6-paristoa [31] ja että noodi toimii 3 % toiminta-aikasuhteella<sup>2</sup> viettäen ajasta 1 % mikro-ohjain aktiivisena ja 1 % dataa lähettäen sekä 1 % vastaanottaen.

---

<sup>2</sup> Kolmen prosentin toiminta-aikasuhteen valinnan perusteena on käyttää uskottavia arvoja, joita on mahdollista käyttää todellisissa anturiverkoissa. Esim. eri MAC-protokollista SpeckMAC [52] ja X-MAC [53] toimivat tämän suuruusluokan toiminta-aikasuhteilla. Lisäksi käytetyistä luvuista on helppo hahmottaa eri toimintoihin käytetyt aikamäärät.

Anturinoodi	Kulutus lepotilassa	Kulutus $\mu$ C aktiivisena	Kulutus lähetettäessä	Kulutus vastaanotossa	Laskettu toiminta-aika
ENS Platform [36]	183,2 $\mu$ W	10,7 mW	72,2 mW	80,3 mW	193 vrk
FireFly [48]	50 $\mu$ W	24 mW	52,1 mW	59,1 mW	249 vrk
KMOTE[49]	20,1 $\mu$ W	4,5 mW	57,9 mW	63,3 mW	274 vrk
TinyNode [51]	15,3 $\mu$ W	5,4 mW	75 mW	47,4 mW	270 vrk
TUTWSN Temperature Node [47]	37 $\mu$ W	3,17 $\mu$ W	42,17 mW	60,17 mW	320 vrk

Taulukko 2 - Anturinooidien energiankulutus

Taulukosta 2 havaitaan, että modernit anturinoodit saavuttavat 3 % toiminta-aikasuhteella pitkiä toiminta-aikoja hajonnan kuitenkin ollessa suurta eri nooidien välillä. Vaikka energiankulutuksella lepotilassa onkin merkittävä vaikutus kokonaisenergiankulutukseen, toiminta-aikasuhde ja energiankulutus aktiivisissa tiloissa ovat ratkaisevissa roolissa laskettaessa saavutettavia toiminta-aikoja, jos lepoenergiankulutus on suhteellisen pieni. Taulukon nooiden toiminta-aikasuhteen muutos esim. 3 %  $\rightarrow$  5 % (aktiivisena 1 %, lähetyksessä ja vastaanotossa 2 % ajasta) keskimäärin lähes puolittaa saavutettavan toiminta-ajan.

### 3.1.1 ENS-alusta

ENS (Energy Neutral Speck) -alustan [36] käyttökohteena on sisätiloissa käytettävien aurinkopaneeleista virtansa saavien langattomien anturiverkkojen tutkimustyö. Laitteen suunnittelun lähtökohtina on ollut virrankulutuksen hallinta toiminta-aikasuhdetta muuttamalla, pieni akku energianlähteeksi pimeitä

ajanjaksoja varten, pieni tilavuus ja fyysinen koko, sekä yhteensopivuus olemassa olevien ProSpeckz ja ProSpeckz64 -noodien kanssa. ENS-noodien kehityksen taustalla on osittain saman tutkimusryhmän Prospeckz-noodi.

ENS-alustan noodit [36] pohjautuvat Texas Instrumentsin 16-bittiseen MSP430-mikro-ohjaimen ja CC2420-pakettiradiopiiriin, joka toimii 2,4 GHz ISM taajuudella. Ohjelmamuistia noodissa on 56 kt ja RAM-muistia 4 kt. Virtalähteenä noodissa on 50 mAh litiumpolymeeriakku ja aurinkopaneeli. Noodin virrankulutus täydessä lepotiloissa on 29,5  $\mu$ A ja 49,5  $\mu$ A. Jälkimmäisestä tilasta noodin voi herättää itsensä reaaliaikakellon avulla MAC-protokollana noodit käyttävät TDMA-tyyppistä protokollaa. Reitityksessä käytetään puumaista SPF-protokollaa, mutta myös AODV:n käyttö on mahdollista.

### 3.1.2 TUTWSN Temperature Node

TUTWSN Temperature Node [40 s. 84][47] on yksi Tampereen Teknisessä yliopistossa kehitetyistä TUTWSN-anturinoodeista. Anturinoodi on suunniteltu pohjolan ulko-olosuhteisissa (lämpötila lähes jopa -40 °C) tapahtuvaan lämpötilan mittaukseen. Sen toteutus on modulaarinen ja se koostuu mikro-ohjainkortista ja anturi-virtalähdekortista. Mikro-ohjaimena laitteessa on Microchipin PIC18LF4620 ja radiopiirinä Nordic Semiconductorin nRF2401A, joka toimii 2,4 GHz ISM-taajuusalueella. Ohjelmamuistia mikro-ohjaimessa on 64 kt, RAM-muistia ~4 kt ja EEPROM-muistia 1 kt. Teholähteenä käytössä on litiumparisto, mutta myös aurinkopaneelien käyttö on mahdollista. Anturinoodin energiankulutus vähän virtaa kuluttavassa lepotilassa on 37  $\mu$ W, mikro-ohjain aktiivisena 3,17 mW, lähettäessä täydellä 0 dBm teholla 42,17 mW ja vastaanottotilassa 60,17 mW.

### 3.1.3 KMOTE

KMOTE [49] on Intian teknillisessä instituutissa kehitetty anturinoodi, jonka suunnittelun lähtökohtina ovat olleet pienet yksikkökustannukset ja noodin energiatehokkuus. Suunniteltuna käyttökohteena tällä noodilla on anturiverkkoihin liittyvä tutkimus- ja opetustyö. Teknisesti KMOTE pohjautuu Texas Instrumentsin MSP430-mikro-ohjaimen ja saman valmistajan CC2420-radiopiiriin, joka toimii 2,4 GHz ISM-taajuusalueella. Ohjelmamuistia noodissa on 48 kt, RAM-muistia 10 kt ja lisäksi noodissa on erillinen 8 Mt flash-muisti mittaustulosten väliaikaiseen säilytykseen. Kiinteänä anturina noodissa on analoginen lämpötila-anturi. Noodin ensisijaisena teholähteenä on USB-portin kautta saatava 5 V jännite. Lisäksi noodia voi käyttää kahdella LR6-paristolla. Lepotilassa noodin virrankulutus on  $6,7 \mu\text{A}$  tilassa, josta se voi herätä ajastimen avulla sekä 19,3 mA ja 21,1 lähetys- ja vastaanottotiloissa. KMOTE-noodia ei ole suunniteltu käytettäväksi minkään tietyn MAC- tai reititysprotokollan kanssa.

### 3.1.4 FireFly

FireFly [48] on Carnegie Mellon -yliopistossa kehitetty laitealusta reaaliaikaisiin aikasynkronoituihin anturiverkkoihin. Teknisesti se perustuu Atmelin Atmega32L-mikro-ohjaimen ja Texas Instrumentsin CC2420-radiopiiriin, joka toimii 2,4 GHz ISM-taajuusalueella. Laitteessa on 2 kt RAM-muistia ja 32 kt ohjelmamuistia. Teholähteenä noodissa on kaksi LR6-paristoa ja pinta-alaltaan anturinoodi on käytännössä samankokoinen kahden LR6-pariston pidikkeen kanssa. Noodin energiankulutus lepotilassa on  $50 \mu\text{W}$ , lähetys- ja vastaanottotiloissa 52,1 mW ja 59,1 mW. Aikasynkronointiin FireFly voi käyttää

esim. WWVB-synkronointisignaalia [54] jota välitetään Yhdysvalloissa 60 kHz taajuudella. Anturinoodeilla on toteutettu aikasykronointi koko anturiverkkoon jopa 20  $\mu$ S tarkkuudella. FireFly-laitealustalla on toteutettu onnistuneesti mm. puheen ja äänen kuljetus langattoman anturiverkon läpi [55], energiatehokas kellosynkronointi joka pohjautuu verkkojännitteisistä kaapeleista säteilevään matalataajuisiin radioaaltoihin [56] ja mittausverkkoja, joilla kerätään tietoa rakennusten eri laitteiden ja järjestelmien energiankulutuksesta [57].

### 3.1.5 TinyNode

TinyNode [51] on kaupallisen Shockfish SA:n kehittämä monipuolinen ja modulaarinen anturinoodialusta erilaisiin mittauskohteisiin ja tutkimuskäyttöön. Noodin ydin pohjautuu korttiin, jossa on vain mikro-ohjain ja radiopiiri. Muut tarvittavat komponentit voidaan liittää erillisen liitäntäväylän kautta. TinyNoden prosessorikortti pohjautuu Texas Instrumentsin MSP430-mikro-ohjaimeen ja Semtechin XE1205-radiopiiriin, joka toimii 433, 868 ja 915 MHz:n ISM-taajuusalueilla. Noodissa on 48 kt ohjelmamuistia ja 10 kt RAM-muistia. Lisäksi datan väliaikaiseen säilytykseen noodissa on 512 kt flash-muistia. Teholähteenä TinyNode voi käyttää AA-paristoja, superkondensaattoreita, aurinkopaneelia, Ni-Mh-, litiumioni- tai litiumpolymeeriakkuja tai näiden yhdistelmää. Noodin lepovirrankulutus reaaliaikakellon käydessä on 5,1  $\mu$ A. Käyttöjärjestelmänä laitteessa on TinyOS [54 s. 115-119], joka mahdollistaa eri protokollien käytön.

Poiketen lyhyen kantaman noodeista, TinyNoden [51] käyttämällä radiopiirillä ja antennilla on mahdollista saavuttaa jopa 1,8 km yhteysvälejä alhaisilla liikennöintinopeuksilla. Suuremmalla, esimerkiksi 76,8 kbps nopeudella

saavutetaan 600 m yhteysväli. TinyNodea on käytetty onnistuneesti esimerkiksi maatalouden mittausjärjestelmissä [59], erittäin pienen toiminta-aikasuhteen ( $\leq 0,2$  %) datankeruuprotokollien kehityksessä [60] ja kattavien ympäristömittausjärjestelmien toteutuksessa [61].

### 3.1.6 SENTIO

SENTIO-anturinoodi [50] on Keski-Ruotsin yliopistossa kehitetty modulaarinen anturinoodi langattomien anturiverkkojen eri sovellusten ripeään kehitykseen. Rakenteeltaan noodi on modulaarinen koostuen kolmesta eri moduulista. Nämä ovat prosessori-, viestintä- ja anturimoduulit. Prosessorimoduuli pohjautuu Atmelin ATmega-mikro-ohjaimiin, ja käyttökohteesta riippuen voidaan valita sopivin mikro-ohjain. Käytettävien mikro-ohjainten suurimpina eroina ovat virrankulutus ja eri muistien määrät. Suurimmillaan ohjelma- ja käyttömuistien koot ovat 256 kt ja 8 kt, mutta tällöin mikro-ohjaimen virrankulutus aktiivisena on 5 mA. Kokojen ollessa 16 kt ja 1 kt on noodin virrankulutus 3,5 mA. Viestintämoduuli käyttää Texas Instrumentsin CC2420-pakettiradiopiiriä, joka toimii 2,4 GHz ISM-taajuusalueella. Tämä on mahdollista korvata myös GSM/GPRS-moduulilla. SENTIO-noodin viestintämoduulilla on mahdollista saavuttaa luotettavia, paketteja hukkaamattomia yhteyksiä aina 50 m etäisyydelle asti. Anturimoduuleja on olemassa useisiin eri mittaus- ja sovelluskohteisiin: lämpötila-, kosteus- ja valomodulit soveltuvat kiinteistöautomaatioon; kiihtyvyy-, kulmakiihtyvyy-, GPS-, magneettikenttä- ja ultraäänietäisyysmoduulit soveltuvat paikannukseen; ja tärinäanturimoduuli esim. valvontaan.

SENTIO-noodin [50] kehityksen taustalla olevat syyt liittyvät muiden anturinooidien puutteisiin. Vaikka muut anturinooidit soveltuvatkin hyvin niihin käyttökohteisiin joihin ne on suunniteltu, ei näiden sovittaminen ja optimointi toisiin käyttötarkoituksiin välttämättä onnistu helposti tai nopeasti. Lisäksi yleiskäyttöisten anturinooidien ongelmana ovat suuri GPIO-liitäntöjen määrä ja näistä johtuen suurempi pinta-ala sekä suurempi energiankulutus. Lisäksi uusien anturien sovittaminen valmiiseen alustaan ei välttämättä onnistu laitealustan puutteiden johdosta. SENTIO-noodista ei ole olemassa tarkkoja tietoja noodin virrankulutuksesta, joten tältä osin anturinoodia ei voi verrata muihin anturinoodeihin. Lisäksi tätä käsittelevässä julkaisussa ei tarkemmin esitellä liitäntöjen vaikutusta energiankulutukseen.

## **3.2 Mikro-ohjaimet**

Luvun 3.1 anturinoodeissa on käytössä kolme eri mikro-ohjainperhettä. Yhteistä kaikille näistä on, että ne on suunniteltu käytettäväksi vähävirtaisissa laitteissa. Kuitenkin näissä on eroja mm. laskentanopeuden, energiatehokkuuden, ja sisäänrakennettujen oheislaitteiden suhteen. Tämä alaluku käsittelee näiden mikro-ohjainten ominaispiirteitä.

### **3.2.1 ATmega-sarja**

Atmelin valmistama ATmega on kahdeksanbittisen RISC-ytimen ympärille rakennettu mikro-ohjainsarja. Tyypillisiä sarjan mikro-ohjaimia ovat esimerkiksi ATmega32 [62], ATmega48 ja ATmega88 [63]. Olennaisimmat eroavaisuudet eri



tyyppien välillä ovat koteloinnissa ja sen johdosta I/O-liitäntöjen lukumäärissä, ohjelma- sekä RAM-muistien määrissä, soveltuvissa käyttöjännite- ja taajuusalueissa sekä virrankulutuksessa. ATmega-mikro-ohjaimissa on Harvard-arkkitehtuuriin pohjautuva RISC-tyyppinen AVR-ydin, jossa on 32 yleiskäyttöistä rekisteriä ja joka suorittaa suurimman osan käskyistä yhdessä kellojaksossa [64]. Ytimellä saavutetaan 1 MIPSin laskentateho 1 MHz kellotaajuudella. Sisäänrakennettuina oheislaitteina ATmega-sarjan mikro-ohjaimissa on mm. monikanavainen kymmenbittinen AD-muunnin, USART, SPI- ja I2C-väyläohjaimet, analoginen komparaattori, useita ajastimia ja PWM-modulaattoreita ja kalibroitavissa oleva sisäinen RC-oskillaattori. Ohjelmamuistin koko esim. ATmega88-mikro-ohjaimessa on 8 kt ja RAM-muistin 1 kt. I/O-liitäntöjä piirissä on 23 kpl.

Virrankulutus 3 V käyttöjännitteellä lepotilassa, josta mikro-ohjain voi herättää itsensä ajastimen avulla, on ATmega32:lla [62] alle 10  $\mu\text{A}$  sekä ATmega48:lla ja ATmega88:lla [63] 8  $\mu\text{A}$ . Virrankulutus mikro-ohjain aktiivisena 3 V käyttöjännitteellä ja 4 MHz kellotaajuudella on alle 5 mA. Suurimmat käytettävissä olevat kellotaajuudet riippuvat ATmegan tarkasta mallista ja käyttöjännitteestä. Tarvittaessa kellotaajuus voi esimerkiksi ATmega48 ja ATmega88-mikro-ohjaimilla olla jopa 20 MHz, mutta tämä vaatii 5 V käyttöjännitteen – toisaalta käyttöjännite voi olla vain 1,8 V, mutta tällöin voidaan käyttää enintään 4 MHz kellotaajuutta.

### 3.2.2 PIC

PIC [65] on Microchipin valmistama mikro-ohjainsarja, joka on rakennettu Harvard-arkkitehtuuriin pohjautuvan RISC-ytimen ympärille. Sarja kattaa mikro-ohjaimet aina fyysisesti hyvin pienistä (6/SOT-23 -koteloidut) kahdeksanbittistä aina 32-bittisiin, yli 60 MIPSin laskentatehon mikro-ohjaimiin. Yhteensä eri PIC-perheitä on yhdeksän sisältäen myös 16-bittisiä variantteja. Anturiverkoissa käytetyt PIC-mikro-ohjaimet ovat tyypillisesti PIC16- ja PIC18-perheistä [22][37][43]. Esimerkiksi PIC18LF4620 [66] sisältää ytimen lisäksi kymmenbittisen AD-muuntimen, SPI-, I2C- ja USART-väyläohjaimet, analogisen komparaattorin sekä pulssinleveysmodulaattoreita. Ohjelmamuistin koko on 64 kt, käyttömuistin n. 4 kt. Käytettävissä olevia I/O-liitäntöjä piirissä on 36 kpl.

Virrankulutus PIC18LF4620-mikro-ohjaimella [66] on lepotilassa tyypillisesti 2  $\mu$ A 3 V käyttöjännitteellä. Virrankulutus aktiivisena riippuu käytettävästä kellotaajuudesta: esim. 60  $\mu$ A 31 kHz:llä tai 3 mA 4 MHz:llä. Mikro-ohjainta voidaan käyttää enimmillään 20 MHz kellotaajuudella, jolla saavutetaan 4 MIPS laskentateho. Toinen tyypillisesti anturiverkoissa käytetty mikro-ohjain, PIC18LF8722, on hyvin samankaltainen PIC18LF4620:n [67] kanssa mm. virrankulutuksen ja oheislaitteiden osalta. Merkittävänä erona ovat muistien ja I/O-liitäntöjen suurempi määrä.

### 3.2.3 MSP430

MSP430 [68][69] on Texas Instrumentsin valmistama erittäin vähän energiaa kuluttavien 16-bittisten mikro-ohjainten perhe. Mikro-ohjainten RISC-ydin pohjautuu von Neumann arkkitehtuuriin ja siinä on 16 yleiskäyttöistä rekisteriä.

Ytimellä saavutetaan yhden MIPSin laskentateho yhden MHz kellotaajuudella. Perheessä on useita eri mikro-ohjainsarjoja, jotka poikkeavat toisistaan mm. muistien määrien, I/O liitännöiden ja oheislaitteiden osalta itse mikro-ohjaimen ytimen pysyessä kuitenkin samana. Tyypillinen anturiverkoissa käytetty MSP430-perheen mikro-ohjain [22][51] on esimerkiksi MSP430F1611 [70]. Tässä on sisäänrakennettuna 12-bittinen AD- ja DA-muunnin, sekä SPI-, I2C- ja UART-väyläohjaimet, analoginen komparaattori ja ajastimia. Ohjelmamuistia tässä on 48 kt ja RAM-muistia 10 kt. MSP430F1611 [70] kuluttaa huomattavan vähän virtaa: sammutettuna mikro-ohjain 200 nA säilyttäen samalla RAM-muistin sisällön. Lepotilassa kulutus on 1,3  $\mu$ A 2,2 V käyttöjännitteellä. Virrankulutus aktiivisena riippuu käyttöjännitteen lisäksi kellotaajuudesta. 2,2 V käyttöjännitteellä virrankulutus 4 kHz taajuudella on 2,5  $\mu$ A ja 1 MHz taajuudella 330  $\mu$ A.

### 3.3 Radiolaitteet

Kappaleessa 3.1 kuvatuissa anturinoodeissa on käytössä kolmea eri radiopiiriä: CC2420 [71], nRF2401A [72] ja XE1205 [73]. Näiden tärkeimmät ominaisuudet on esitelty taulukossa 3. Näistä kaksi ensimmäistä on 2,4 GHz ISM-alueella toimivia pakettiradioita ja viimeisin VHF- ja UHF-taajuusalueilla toimiva radiopiiri. Pakettiradio toimii siten, että mikro-ohjain siirtää lähetettävän datan radiopiirin sisäiseen puskuriin, josta radiopiiri lähetyskäskyn saadessaan lähettää koko datapaketin kerralla. Osa piireistä on myös mahdollista käyttää lähetyksessä siten, että niille syötetään asynkronista sarjadataa, jonka piiri lähettää välittömästi. Tällöin kuitenkin menetetään piirien tarjoamia ominaisuuksia, joita ovat esim. radiopiirien osoitteistus sekä pakettien automaattinen tarkistesumman laskenta ja tarkistus.

Radiopiiri	Taajuus- alue	Datanopeus	Pakettien käsittely	Datan lähetys virtana	RSSI
CC2420 [71]	2,4 GHz	250 kbps	On	Ei	On, hyvä
nRF2401A [72]	2,4 GHz	0-1 Mbps	On	On	Ei
XE1205 [73]	180 MHz – 1 GHz	1,2 kbps – 304,7 kbps	Ei	On	On

Taulukko 3 - Eri radiopiirien keskeiset ominaisuudet

Käsiteltäessä radiolaitteiden nopeuksia, tulee pakettiradioita käytettäessä huomioida pelkän ilmarajapinnan nopeuden lisäksi myös tiedon siirto mikro-ohjaimelta radiopiirille, joka hidastaa datan lähetystä olennaisesti. Käytännössä esimerkiksi nRF2401A:n seuraajalla, nRF24L01-piirillä [74] saavutetaan 670 Kbps kokonaislähetysnopeus, joka on vain noin 34 % piirin tukemasta 2 Mbps lähetysnopeudesta [75].

Alaluvun 2.3 mukaan yksi merkittävimmistä haasteista on anturinooidien energiankulutus. Tunnistettaessa radiopiirin vaikutus tähän, on taulukossa 4 esitetty kolmen eri radiopiirin virran- ja energiankulutukset eri tiloissa. Energiankulutus lähetettyä ja vastaanotettua bittiä kohden on laskettu 3,3 V käyttöjännitteellä. Taulukosta havaitaan, että piireistä nRF2401A on selkeästi vähiten energiaa kuluttava radiopiiri. Virrankulutuksen ero virransäästötilassa nRF2401A:n ja XE1205:n välillä on käytännössä täysin merkityksetön, mikäli radiopiiriä käytetään tosiasiasa datan lähetykseen ja vastaanottoon. Myös verrattuna useisiin muihin radiopiireihin, on nRF2401A näistä selkeästi energiatehokkaimpia [34 s. 30-31][40 s. 25-26].

	CC2420 [71]	nRF2401A [72]	XE1205 [73]
Energiankulutus lähettyä bittiä kohden	230 nJ/b	43 nJ/b	625 nJ/b
Energiankulutus vastaanotettua bittiä kohden	248 nJ/b	63 nJ/b	152 nJ/b
Virrankulutus virransäästötilassa	20 $\mu$ A	400 nA	200 nA
Virrankulutus toimettomana	426 $\mu$ A	12 $\mu$ A	850 $\mu$ A

Taulukko 4 - Eri radiopiirien energian- ja virrankulutus eri tiloissa.

### 3.3.1 CC2420

CC2420 [71] on Texas Instrumentsin valmistama IEEE 802.15.4 –standardin kanssa yhteensopiva radiolähetin-vastaanotinpiiri luvasta vapaalle 2,4 GHz ISM-taajuusalueelle. Piirin lähetysnopeus on 250 kbps, se tukee useita eri lähetystehoja 0 dBm:n ollessa suurin ja vastaanotossa saavuttaa -95 dBm:n herkkyyden. Radiopiirin virrankulutus lähetettäessä 0 dBm teholla on 17,4 mA ja vastaanotettaessa 18,8 mA. Toimettomana piiri kuluttaa 426  $\mu$ A sekä eri lepotiloissa 20  $\mu$ A ja 20 nA. CC2420:n liitäntä mikro-ohjaimelle on SPI-sarjaväylä jonka yli välitetään piirin ohjauskomennot ja kuljetettava data. Vaikka piiri onkin ns. pakettiradio, eli se lähettää ja vastaanottaa yksittäisiä paketteja, voidaan sitä käyttää myös datavirran välitykseen synkronisen sarjaväylän avulla. Lisäksi CC2420:ssa on mm. tuki vastaanotetun signaalin voimakkuuden mittaukselle, jopa 128 tavun lähetys- ja vastaanottopuskurit, tuki pakettien osoitteistukselle ja automaattiselle tarkistesumman laskennalle sekä tarkistukselle, tuki automaattiselle pakettien kuittaukselle ja CCA-tuki, jolla radiopiiri varmistaa kanavan olevan vapaa ennen paketin lähetystä. Lisäksi CC2420 tukee lukuisia ZigBee-protokollan ja IEEE 802.15.4 –standardin määrittelemiä ominaisuuksia.

Koska CC2420 [71] on huomattavan vapaasti konfiguroitavissa, sen lähettämät paketit voivat saada useita muotoja: osa kentistä, kuten vastaanottajan osoite ja tarkistesumma voidaan haluttaessa ottaa pois käytöstä, paketin tahdistuskentän koko on vapaasti valittavissa ja synkronointisana on mahdollista asettaa itse. Piiri ja sen toiminta on myös muutoin huomattavan vapaasti määritettävissä: esimerkiksi demodulaattorin korrelaattorin käyttämiä raja-arvoja, eri vahvistinten vahvistuksia ja sekoittajien ulostuloja on mahdollista muokata ohjelmallisesti. Lisäksi radiopiirin RSSI:n dynaaminen alue on poikkeuksellisen laaja (100 dB) ja se tukee myös yhteyden laadun mittausta. CC2420:n avulla on mahdollista arvioida tarkemmin yksittäisten radioyhteyksien laatua, eikä tarvitse tukeutua pelkkään vastaanotetun signaalin teholumemaan, joka saattaa olla virheellinen esimerkiksi häiriölähetteen johdosta. Protokollien osalta CC2420:lla on myös mahdollista toteuttaa ZigBee-tekniikkaan pohjautuvia verkkoja siten, että ZigBee-verkkopino on osin sisällytetty radiopiiriin [71].

### 3.3.2 nRF2401A

nRF24L01 [72] on Nordic Semiconductorin valmistama radiolähetin-vastaanotinpiiri luvasta vapaalle 2,4 GHz ISM-taajuusalueelle. Piirin nimellinen lähetysnopeus on vapaasti valittava välillä 0-1 Mbps, lähetysteho on enintään 0 dBm, vastaanottimen herkkyys suurimmalla nopeudella -93 dBm ja käytettynä lähetelajina on GFSK. Piiri on ns. pakettiradio, eli se lähettää ja vastaanottaa yksittäisiä paketteja paketin sisältämän datan enimmäiskoon ollessa 32 tavua. Lisäksi piirillä on mahdollista välittää asynkronista sarjadataa virtana. Liikennöintirajapinta mikro-ohjaimelle on SPI-sarjaväylä, jonka yli välitetään radiopiiriin ohjauskomennot ja kuljetettava data. Radiopiirissä on lisäksi pieni

vastaanotto- ja lähetyspuskuri, tuki pakettien osoitteistukselle, vastaanotettujen pakettien automaattiselle kuittaukselle sekä automaattiselle pakettien uudelleenlähetykselle. Suurin osa näistä piirin kehittyneimmistä pakettinhallintatoiminnoista on tarkoitettu käytettäväksi ShockBurst-siirtoyhteyskerrostekniikan <sup>3</sup> kanssa. Lähetystilassa täydellä lähetysteholla nRF2401A vie virtaa 13 mA, vastaanotossa 19 mA, eri lepotilassa 12  $\mu$ A ja täydessä virransäästötilassa 400 nA.

nRF2401A-piiriä ei valmistajan mukaan enää suositella uusiin laitteisiin [76]. Tätä korvaamaan on kehitetty nRF24L01, jota ei myöskään suositella uusiin laitteisiin [77]. Korvaava piiri on täysin yhteensopiva NRF24L01+ [78]. Olennainen ero laitteiden välillä on nRF24L01+:ssa oleva kiinteä lähetysnopeus (joko 0,25, 1 tai 2 Mbps). 250 kbps nopeudella vastaanottimen herkkyys on -94 dBm. 2 Mbps nopeudella -82 dBm. Energiankulutukseltaan piirit eivät ole täysin identtisiä, vaan nRF24L01+ on selkeästi energiatehokkaampi kuin edeltäjänsä. Uutena ominaisuutena nRF2401A:han verrattuna piireissä on tuki vastaanotetun signaalin tunnistukselle, joka osoittaa onko signaalin taso tietyn raja-arvon yläpuolella.

### 3.3.3 XE1205

XE1205 [73] on Semtechin valmistama radiopiiri UHF-taajuusalueelle kattaen taajuusalueen 180 MHz – 1 GHz. Yleisimmät käytetyt taajuudet ovat UHF-taajuuksien ISM-taajuusalueet; 433 MHz, 868 MHz ja 915 MHz. Piirin datanopeus

---

<sup>3</sup> ShockBurst on Nordic Semiconductorin kehittämä tekniikka siirtoyhteyskerrokselle, joka mahdollistaa luotettavan kommunikoinnin laitteiden välillä. Laajimmillaan verkko on tähti, jossa on seitsemän laitetta. ShockBurst tukee automaattista kuittauksia ja pakettien uudelleenlähetyksiä, jolloin yksinkertaisen verkon toteutus ei vaadi protokollan toteutusta mikro-ohjaimella. [72]

on valittavissa välillä 1,2 – 307,4 kbps sekä lähetysteho välillä 0 – 15 dBm. Käytettynä lähetelajina on FSK. Vastaanottotilassa esimerkiksi 4,8 kbps liikennöintinopeudella saavutettava herkkyys on -116 dBm. Lähetystilassa täydellä lähetysteholla (+15 dBm) piiri kuluttaa 62 mA, +5 dBm lähetysteholla 33 mA ja vastaanottotilassa 14 mA. Valmiustilassa piiri vie 850 µA ja täydessä lepotilassa tyypillisesti 200 nA. Käytännössä piirillä voidaan saavuttaa jopa kymmenien kilometrien yhteysvälejä<sup>4</sup> ympärisäteilevin antennein. XE1205 ei ole ns. pakettiradio, eikä siinä ole tähän vaadittavaa sisäistä toimintalogiikkaa. Kommunikoinnissa radiopiirin kanssa voidaan käyttää piirin sisäistä 16 tavun yhdistettyä lähetys- ja vastaanottopuskuria, jonka käsittely on mahdollista ohjaavalta mikro-ohjaimelta SPI-väylää käyttäen. Lähetettävä ja vastaanotettava data voidaan myös kuljettaa TTL-tasoisena asynkronisena bittijonona radiopiirin ja tätä ohjaavan mikro-ohjaimen välillä.

### 3.4 Käytettävät anturit ja niiden rajapinnat

Kuten alaluku 2.2 ja siellä esitellyt järjestelmät sekä teokset [1][11][22] osoittavat, anturiverkoissa käytettävien antureiden ja mittalaitteiden kirjo on todella laaja. Antureilla on mahdollista mitata fyysisiä suureita tai aineiden kemiallisia ominaisuuksia. Lisäksi bioantureilla voidaan mitata mm. entsyymien tai vasta-aineiden toimintaa. Perinteiset anturiverkoilla mitattavat suureet liittyvät ihmisten arkipäiväisen elämän suureiden analysointiin, joita ovat esimerkiksi lämpötila, kosteus, liike, valon määrä, äänenpaine, läsnäolo jne. Lääketieteen, maatalouden ja

---

<sup>4</sup> Vapaan tilan vaimennus [75 s. 127]  $L_{dB} = 92,4 + 20 \log_{10}(f_{GHz}) + 20 \log_{10}(D_{km})$

Oletuksena 433 MHz taajuus ja suurin mahdollinen vaimennus 120 dB jättäen n. 10 dB marginaalin vastaanottoon.



ympäristömittauksen sovelluksissa anturinoodein voidaan mitata lähestulkoon kaikkia tavanomaisestikin mitattavia suureita eri anturein.

Toteutukseltaan eri suureita ympäristöstään mittaavat anturit voivat olla joko aktiivisia tai passiivisia. Aktiiviset anturit tuottavat signaalin, joka voi olla esim. jännite, taajuus tai virta, ja joka riippuu mitattavasta suureesta. Toimintaansa varten nämä anturit tarvitsevat käyttöjännitteen. Passiiviset anturit puolestaan muuttavat omia sisäisiä parametrejaan - resistanssia, kapasitanssia tai induktanssia - mitattavan suureen perusteella. Koska anturista saatavan signaalin taso tai tyyppi on usein sopimaton suoraan analogia-digitaalimuunnokseen ja tätä kautta digitaaliseen käsittelyyn, on usein tarve muokata saatavaa signaalia erillisellä signaalinparannuskytkennällä. Esimerkiksi kapasitiivisia tai induktiivisia antureita ei näytteistetä suoraan, vaan näiden signaali voidaan muuntaa mm. jännitteeksi tai taajuudeksi, resistiivisiä antureita käsitellään usein ns. siltakytkennän avulla, heikkoa jännitesignaalia voidaan joutua vahvistamaan ja erittäin suuri-impedanssiset anturit voivat vaatia erillisen esivahvistimen. Signaalin käsittely voi vaatia myös sinne kuulumattomien taajuuksien suodatusta. [76 s. 16-18, 31-44][77 s. 37-71]

Aktiivisia antureita on lisäksi saatavilla liitettäväksi erilaisiin digitaalisiin sarjaväyliin. Tällaisia sarjaväyliä ovat esimerkiksi SPI [82], I2C [83] ja 1-Wire [84]. Yhteistä näille on, että väylässä välittyy vain digitaalinen signaali. SPI:n ja I2C:n tapauksessa synkroninen, 1-Wiren kohdalla asynkroninen. Väylien muina käytännön eroina ovat siirtonopeudet, väylien suurimmat etäisyydet ja tarvittavien signaalijohtimien lukumäärä. Kuhunkin näistä on saatavilla suuria määriä erilaisia aktiivisia antureita, jotka mittaavat esimerkiksi kiihtyvyyttä, painetta, lämpötilaa, kosteutta tai muita suureita [85]. Näiden antureiden antama signaali on valmiiksi näytteistetty, käsitelty ja tarvittaessa koodattu, jolloin ei

tarvita erillisiä signaalinparannuskytkentöjä, vahvistimia tai analogia-digitaalimuuntimia. Anturi voidaankin kytkeä suoraan mikro-ohjaimen, mikäli tässä vain on tuki käytetylle sarjaväylälle.

### **3.5 Yhteenveto modernien anturinooidien laitetekniikasta**

Edellä esitetyissä moderneissa anturinoodeissa käytetyt mikro-ohjaimet ovat toisiinsa verrattuina hyvin samankaltaisia. Niiden enimmäislaskentateho on 4-20 MIPSiä, ohjelma- ja RAM-muistien määrät jokseenkin yhtäläisiä, piirien sisäänrakennetut oheislaitteet (SPI-, I2C-, USART-väyläohjaimet, AD-muuntimet jne.) vastaavat toisiaan ja I/O-liitäntöjen määrät ovat samassa suuruusluokassa. Esitetyistä AVR on selkeästi tehokkain laskennassa, mutta MSP430 energiatehokkuudessa. PIC ja MSP430 soveltuvat tilanteisiin, joissa virrankulutuksen minimointi on ehdoton päätavoite, koska näiden virrankulutus aktiivisena putoaa huomattavan alas kellotaajuutta laskemalla. Tietyissä ääriolosuhteissa edellä kuvatuista mikro-ohjaimista löytyy kuitenkin selkeitä eroavaisuuksia, jotka eivät tavanomaisessa käytössä ole merkitseviä.

Esitellyissä radiopiireissä puolestaan on selkeitä eroavaisuuksia. Lähetystehojen, taajuusalueiden ja vastaanotinten herkkyyksien osalta CC2420 ja nRF2401A ovat lähes yhtenevät, eikä näillä saavutettavilla etäisyyksillä ole juuri eroa. XE1205 puolestaan selkeästi alemmilla taajuuksilla ja suuremmilla lähetystehoilla saavuttaa merkittävästi pidempiä yhteysvälejä. Eri taajuusalueilla on luonnollisesti vaikutusta myös käytettävien antennien fyysisiin kokoihin, jolloin XE1205:n käyttö vaatii suurimman tilan. Energiankulutuksen osalta nRF24L01+ on

kiistatta lähetyksessä, vastaanotossa tai muissa tiloissa vähiten energiaa kuluttava malli.

Tarkasteltaessa eri radiopiirien ominaisuuksia havaitaan selkeitä eroavaisuuksia. CC2420-piirissä on erittäin hyvä vastaanotetun signaalin tehon ilmaisu, nRF2401A:sta tämä toiminto puuttuu kokonaan, mutta sen seuraajassa, nRF24L01(+):ssa on toiminto, joka ilmoittaa onko vastaanotettu signaali tietyn tason yläpuolella. XE1205:ssa tätä toimintoa ei ole. RSSI on joidenkin MAC-protokollien toiminnan kannalta olennainen ominaisuus. CC2420:n ja nRF01A:n sekä tämän seuraajien pakettituki mahdollistaa yksinkertaisten pakettienkäsittelyyn kuuluvien toimien suorittamisen automaattisesti, joka osaltaan vähentää piiriä ohjaavan mikro-ohjaimen tehtäviä. XE1205:ssä ei ole tukea pakettien käsittelylle. Kolme esitettyä piiriä soveltuvat kaikki käytettäviksi langattomissa anturiverkoissa, mutta näiden ominaisuuksia tulisi tarkastella sovelluskohteen ja käytettävien protokollien valossa.

Anturiverkoin voidaan mitata lähestulkoon kaikkia eri suureita mitä moninaisimmissa ympäristöissä. Eri antureiden käyttö asettaa kuitenkin vaatimuksia joko itse anturinoodille tai antureiden liitoskytkennälle. Käytettävissä olevissa mikro-ohjaimissa olevia AD-muuntimia voidaan – tarkkuuden ja muiden ominaisuuksien puitteissa – käyttää, jos anturissa on jänniteulostulo. Muissa analogisten antureiden tapauksissa vaaditaan mikro-ohjaimen ulkopuolinen kytkentä. Käytettäessä digitaalisia antureita, voidaan ne kytkeä standardein sarjaväylin suoraan mikro-ohjaimeen.

## 4 Langattomien anturiverkkojen protokollat

Käytettävillä protokollilla on suuri vaikutus anturiverkon toiminnalle. Tämä luku käsittelee MAC-protokollia, niistä johtuvaa energiankulutusta, niiden luokittelua ja esittelee muutamia anturiverkoissa käytettyjä protokollia. Lisäksi tässä luvussa käsitellään reititysprotokollien luokittelua, toimintaperiaatteita ja näiden resurssivaatimuksia.

### 4.1 MAC-protokollat

MAC-kerros [86] on IEEE:n määrittelemä ISO:n OSI-mallin [87] siirtoyhteyserroksen alakerros. Tällä kerroksella toimivan protokollan tehtäviin kuuluu mm. pakettien kehystys ja näiden kehysten lähetys ja vastaanotto yksittäisten laitteiden välillä. Langattomissa anturiverkoissa käytettävällä MAC-protokollalla on tavoitteena toteuttaa siirtoyhteydet anturinoodien välille energiaa säästämällä ja samalla sietämällä noodien liikkeen toistensa suhteen sekä erilaiset vikatilanteet [1]. Koska energiankulutuksen minimointi on yksi anturiverkkojen suurimmista haasteista [alaluku 2.3], MAC-protokollia optimoidaan tämän suhteen jopa niin, että verkon latenssi, siirtonopeus tai reiluus voivat olla toissijaisessa asemassa [2 s. 125]. Näillä protokollilla on vaikutusta anturinoodien turhaan energiankulutukseen pääasiassa seuraavista eri syistä, jotka protokollan tulisi yrittää minimoida:

- Toimettomassa kuuntelussa radiovastaanotin on päällä ja noodi odottaa mahdollisesti saapuvia kehyksiä. Tällä on merkittävä vaikutus energiahävikkiin. [2 s. 125,134][11 s. 148][88][89][86 s. 23]

- Törmäyksissä kaksi noodia lähettää paketin samaan aikaan samalla alueella, eikä alueella voida vastaanottaa kumpaakaan näistä lähetysten häiritessä toisiaan. Myös törmäykset ovat merkittävä energiahävikin syy. [2 s. 125][11 s. 148][88][89][86 s. 22]
- Ylikuulumisessa noodi vastaanottaa sille kuulumattomia kehyksiä ja kuluttaa energiaa näiden vastaanottamiseen ja käsittelyyn. [11 s. 148][88][89][86 s. 23]
- Signaaliointi, ohjauskehykset sekä kehysten otsikot kuluttavat energiaa niiden lähettämisen, vastaanottamisen ja käsittelyn johdosta. [2 s. 134][11 s. 148][88][86 s. 23]
- Turha lähetys tapahtuu silloin, kun noodi lähettää kehyksen vastaanottajalle, joka ei ole vielä valmis vastaanottamaan sitä. [88]
- Käytettyjen protokollien vaatimien algoritmien monimutkaisuus aiheuttaa energiahävikkiä laskennan johdosta. [86 s. 23]

Lisäksi MAC-protokolliin ja niiden toimintaan läheisesti liittyvää energiahävikkiä aiheuttavat radiopiirin käynnistyksessä ja sammutuksessa kuluva aika [91]. Tietyissä tilanteissa energiankulutusta ei hallitse itse lähetys tai vastaanotto vaan radiopiirin toistuvissa käynnistymisissä kulutettu energia. Esimerkiksi nRF24L01+-radiopiiri 1 Mbps nopeudella lähettäessään käyttää 100 bitin kehyksen lähettämiseen vain 0,1 ms, mutta itse radiopiirin käynnistyminen lepotilasta saattaa viedä useita millisekunteja [78]. Myös järjestelmät muut tilanvaihdot voivat vaikuttaa energiankulutukseen [11, s. 148].

Seuraavassa esitellään MAC-protokollien luokittelua ja toimintaperiaatteita. Myös esitellään kolme toisistaan poikkeavaa protokollaa: kaksi kilpavarausprotokollaa ja pintapuolisesti yksi aikavälejä käyttävä. Kilpavarausprotokollien valinnan perusteena on valita kaksi yksinkertaista protokollaa, jotka jakavat samoja

piirteitä, joiden suorituskyky on LPL:ää käyttävää B-MACia [92] parempi ja joita on mahdollista verrata tähän yhteiseen edeltäjään. Tarkoituksena on osoittaa kuinka näiden toiminnassa on selkeitä yhtäläisyyksiä, mutta miten jo pienillä muutoksilla voi olla merkittävä vaikutus protokollan energiankulutukseen. Aikavälejä käyttävän protokollan valinnan perusteena on toiminnan suhteellinen yksinkertaisuus muihin aikavälejä käyttäviin protokolleihin verrattuna ja suuri energiatehokkuus. Tämän protokollan esittelyn tavoitteena on tuoda käytännössä esille se, kuinka suuresti kilpavaraus- ja ajastetut protokollat poikkeavat toisistaan.

#### **4.1.1 MAC-protokollien luokittelu ja toimintaperiaatteet**

Eri MAC-protokollien toimintaperiaatteet voivat poiketa suuresti toisistaan ja niitä voidaan luokitella usein eri tavoin. Ensimmäinen luokittelutapa jakaa protokollat sen mukaan, kuinka lähetyksen ja vastaanoton ajoitus on toteutettu. Klassinen tapa on jakaa protokollat kiinteitä aikavälejä käyttäviin ja kilpavarausprotokolleihin [1]. Lisäksi tätä jakoa mahdollista laajentaa kattamaan myös protokollat, joissa aikaväli saadaan tarvittaessa [2 s. 126][11 s. 148][90]. Toinen variantti samasta luokittelutavasta on jakaa protokollat ajastettuihin, kilpavaraus- ja hybridiprotokolleihin [89 s. 32]. Aikavälejä käyttävissä ja ajastetuissa tai protokollissa eri laitteilla on selkeät aikavälit, jolloin näiden tulee lähettää ja vastaanottaa kehyksiä. Tämä ei kuitenkaan ota kantaa siihen, kuinka nämä aikavälit on määritelty. Aikavälit voivat olla kiinteitä tai nämä voidaan neuvotella tarvittaessa. Satunnaishaku- eli kilpavarausprotokollat puolestaan luottavat muihin tekniikoihin mm. kehysten törmäyksen, turhan kuuntelun sekä lähetyksen välttämiseksi. Hybridiprotokollissa yhdistyy ominaisuuksia ajastetuista ja kilpavarausprotokollista.

Aikavälejä käyttävissä, eli kilpailusta vapaissa protokollissa energiankulutusta minimoidaan sillä, että noodit voivat olla vähän virtaa kuluttavassa lepotilassa aina, paitsi silloin kun kantomatkan sisällä olevilla noodeilla on lähetysvuoro [2, s. 127]. Näin menetellen noodien ei tarvitse käyttää turhaan energiaa radiovastaanottimen pitämiseksi päällä mahdollisesti saapuvien kehysten varalta. Kilpavarausprotokollia käytettäessä joutuvat noodit puolestaan kilpailemaan radiotien käytöstä. Tunnettuja keinoja lähetettäessä kehyksiä esim. törmäysten välttämiseen on kantoaallon tunnistus (engl. Carrier Sense [94]), jolloin lähetävä noodi tarkistaa onko siirtotie vapaa muista läheteistä ennen oman kehyksensä lähetystä. Kuitenkin myös muita menetelmiä käytetään. Turhan kuuntelun vähentämistä noodit voivat toteuttaa mm. LPL:llä [92], eli vähävirtaisella kuuntelulla, jossa noodit heräävät säännöllisesti lepotilasta ja tarkistavat nopeasti onko siirtotiellä lähetettä. Mikäli lähetettä ei ole noodi siirtyy hyvin nopeasti takaisin lepotilaan.

Toinen tapa luokitella MAC-protokollia on jakaa ne kahteen eri luokkaan, *Cross Layer* ja *Solitary* -protokolliin [93], niiden sisäisen toiminnan perusteella. Jälkimmäiset protokollat toteuttavat vain ja ainoastaan ISO:n OSI-mallin [87] ja IEEE:n standardissa 802.3-2002 [86] MAC:n osalta määritellyt toiminnot ja rajapinnat. Ensin mainittuun kategoriaan kuuluvat protokollat eivät puolestaan noudata kerrosjakoa orjallisesti. Ne voivat toteuttaa osin myös ylempien kerrosten tehtäviä, kommunikoida näiden kanssa tavoin, joita OSI-malli ei määrittele, tai voivat esimerkiksi jakaa taulukoita reititysprotokollan kanssa. Jos protokolla toteuttaa MAC- ja reititysprotokollan tehtäviä, on sen toiminnan analysointi vaikeaa eri tilanteissa. Suurimpana haittapuolena on kuitenkin ”protokollan muistuttaminen spagettia”, jolloin pienten muutosten tekeminen on vaikeaa protokollan toteutuksen monimutkaisuuden johdosta.

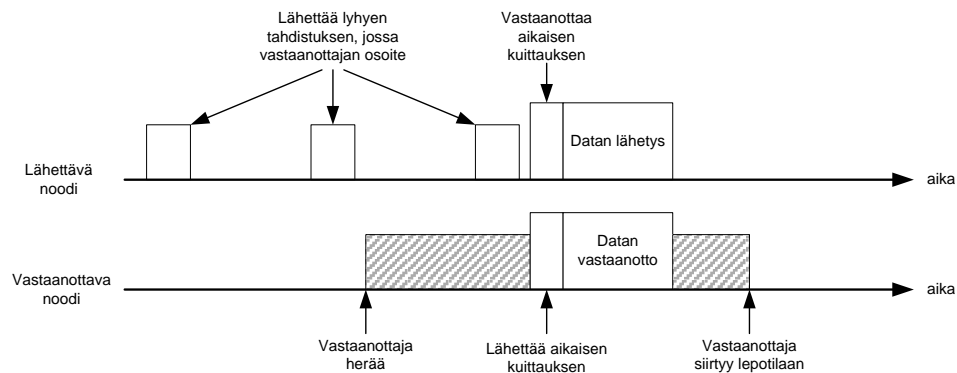
Lisäksi MAC-protokollat on mahdollista luokitella tasaisiin tai hierarkkisiin [93]. Litteitä protokollia käytettäessä kaikilla laitteilla on samat vastuut ja velvollisuudet. Hierarkkisissa MAC-protokollissa osa noodeista voi esimerkiksi muodostaa klustereita, joita ohjaa klusterin koordinaattoriksi valikoitunut noodi, jolla on verkon toiminnan kannalta suurempi vastuu. Hierarkkisten protokollien etuna on se, että suurissa verkoissa niiden käyttö ei vaadi samaa määrää resursseja kaikilta verkon laitteilta. Ainoastaan paikallisten koordinaattorien tulee kyetä viestimään kaikkien alueella olevien noodien kanssa, kun muut noodit voivat viestiä ainoastaan koordinaattorilaitteen kanssa. Näitä edellä olevissa kappaleissa kuvattuja eri luokitteluperiaatteita on mahdollista käyttää myös yhdessä, eli ne eivät ole toisensa poissulkevia.

#### 4.1.2 X-MAC

X-MAC [53] on edelleen kehitetty kilpavarausprotokolla B-MAC-protokollasta [92]. B-MAC:ia käytettäessä noodi lähettää datakehysten alussa huomattavan pitkän tahdistuksen, jonka kesto ylittää vastaanottavien noodien käyttämän LPL:n kanavannäytteistysintervallin. Vastaanotossa noodeissa on käytössä LPL, eli noodi tarkistaa säännöllisesti onko siirtotiellä lähete viettäen muuten ajan lepotilassa. Jos lähete on, siirtyy noodi vastaanottotilaan, kunnes saa datakehysten vastaanotettua. X-MAC protokollassa puolestaan datakehystä lähettävä noodi lähettää säännöllisin välein lyhyen *tahdistuskehysten*, joka sisältää ainoastaan kohdenoodin osoitteen. Näiden lähetysten välillä lähettävä noodi on vastaanottotilassa ja odottaa *aikaista kuittausta*. Kehystä vastaanottava noodi saadessaan omaan osoitteeseensa viittaavan tahdistuskehysten lähettää aikaisen kuittauksen ja siirtyy vastaanottotilaan. Tämän jälkeen lähettävä noodi voi



lähettää varsinaisen datakehysten. Etuna tässä on, että lähettävän noodin ei tarvitse kuluttaa energiaa huomattavan pitkän tahdistuksen lähetykseen, joka B-MACissa vaaditaan. Kuva 4 esittää X-MAC-protokollan toiminnan ajan funktiona kehystä lähetettäessä.

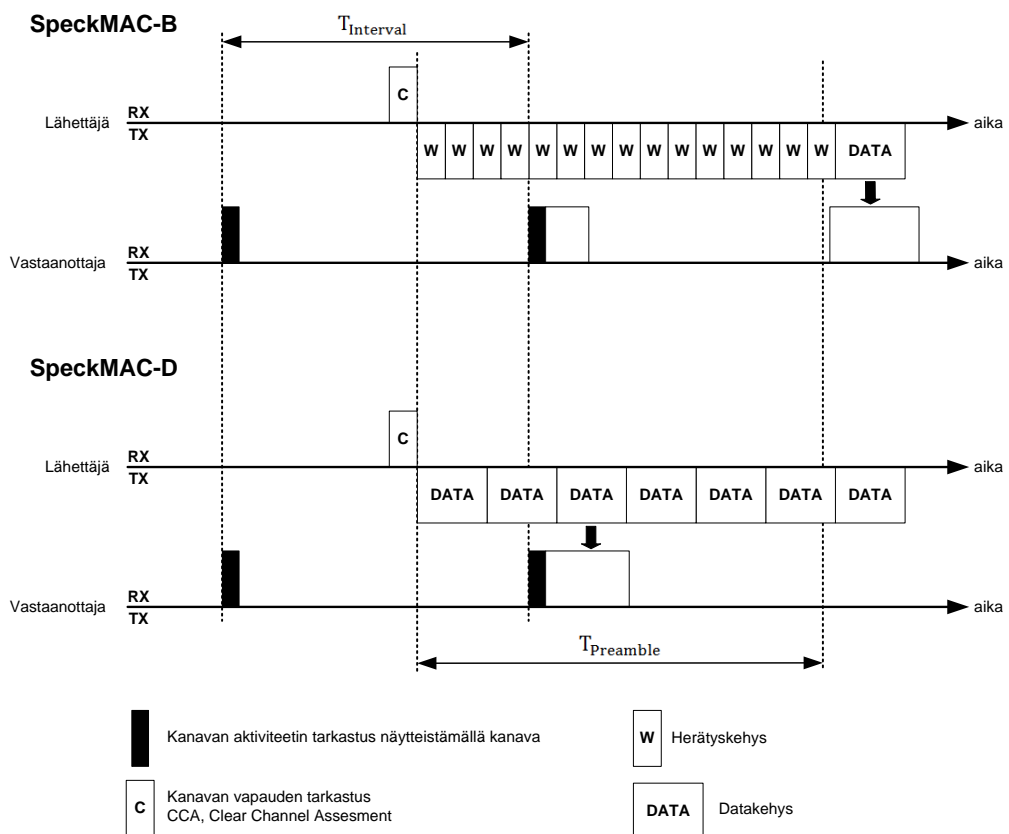


Kuva 4 - X-MAC protokollan tyypillinen toiminta ajan funktiona [53]

X-MACin [53] toiminnassa olennaista on, että vastaanottava noodi on vastaanottotilassa hyvin lyhyen ajan kerrallaan. Tämä vähentää huomattavasti turhaa kuuntelua. Myös ylikuuluminen vähenee merkittävästi koska tahdistuskehys sisältää kohdenoodin osoitteen, jolloin vastaanottajat joille paketti ei ole osoitettu voivat siirtyä hyvin nopeasti takaisin lepotilaan. Lisäksi X-MAC säättää automaattisesti mm. lyhyiden tahdistusten lähetystiheyttä ja vastaanottavissa noodeissa unijaksojen pituutta lähetettävien pakettimäärien perusteella. X-MAC on mahdollista toteuttaa lähes kaikilla eri pakettiradiopiireillä eikä vaadi esim. vastaanotetun signaalin tason mittausta tai poikkeuksellisen pitkän tahdistuksen lähetystä, toisin kuin B-MAC. X-MAC on lisäksi sen taustalla olevaa B-MAC-protokollaa energiatehokkaampi ja noodien välinen latenssi on merkittävästi pienempi.

### 4.1.3 SpeckMAC

SpeckMAC [52] on X-MACin tavoin myös kilpavarausprotokolla. Käytännössä tätä on käytetty esimerkiksi ProSpeckz-anturinoodissa. Protokollasta on olemassa kaksi toisistaan hieman poikkeavaa varianttia: SpeckMAC-B ja SpeckMAC-D. Molempien toiminta ajan funktiona kehystä lähetettäessä on esitetty kuvassa 5. Protokollien suunnittelun lähtökohtana on ollut vastaanottavan noodin turhan kuuntelun minimointi. Käytännössä D-muunnos on hieman B-muunnosta energiatehokkaampi.



Kuva 5 - SpeckMAC-B ja -D -protokollien toiminta ajan funktiona [52]

SpeckMACin [52] B-variantti toimii siten, että ensin kehystä lähettävä noodi tarkistaa, että kanava on vapaa (esitetty kuvassa 5 loholla C). Tämän jälkeen noodi alkaa lähettää toistuvasti ns. herätyskehystä (W-lohko), joka sisältää vastaanottajan osoitteen, tiedon siitä, että tälle on kehys sekä ajan, jonka kuluttua varsinainen datakehys lähetetään. Herätyskehysten lähetystoisto kestää  $T_{\text{Preamble}}$  ajan verran, jonka jälkeen lähettävä noodi lähettää varsinaisen datakehysten (DATA-lohko). Vastaanottava noodi puolestaan herää lepotilasta  $T_{\text{Interval}}$  ajan välein ja tarkistaa, onko siirtotiellä lähete (musta lohko). Jos on, noodi pitää radiovastaanottimen päällä ja vastaanottaa kehysten. Mikäli vastaanotettu kehys on herätyskehys, tästä tarkastetaan, vastaako siinä oleva osoite noodin omaa osoitetta. Jos herätyskehys on osoitettu noodille, siirtyy tämä takaisin lepotilaan, josta se herää vastaanottamaan datakehysten herätyskehysten ilmaisemana ajanhetkenä. Mikäli noodi vastaanotti jollekin toiselle noodille osoitetun herätyskehysten, siirtyy se takaisin lepotilaan välittämättä varsinaisesta datakehystä. SpeckMAC-D:ssä puolestaan lähettävä noodi varmistaa ensin, että kanava on vapaa (kuvassa 5 lohko C). Tämän jälkeen se lähettää samaa datakehystä tauotta toistaen  $T_{\text{Preamble}}$  ajan verran. Paketteja vastaanottaessa vastaanottaja herää lepotilasta  $T_{\text{Interval}}$  ajan välein ja tarkistaa, onko radiotiellä lähetettä (musta lohko). Jos on, vastaanottaja pitää radiopiirin vastaanottotilassa kunnes datakehys on vastaanotettu. SpeckMACin ajoitusten vaatimuksena on, että  $T_{\text{Interval}} < T_{\text{Preamble}}$ . Optimaalisin ja energiatehokkain ajoitus riippuu kehysten lähetystiheydestä. Käytännössä  $T_{\text{Interval}}$  ei kuitenkaan merkittävästi vaikuta energiankulutukseen vaihteluvälillä 10 ... 35 ms.

Verrattaessa SpeckMAC-D ja B-MAC protokollia havaitaan, että SpeckMAC-D on selkeästi energiatehokkaampi. Vertailun [52] taustalla on kuvitteellinen 12 noodin ns. *full mesh* -verkko, jossa kaikki noodit voivat viestiä suoraan muiden kanssa ja

lähettävät kukin yhden kehyksen sekunnissa. Kiinnostavaksi vertailun tekee se, että noodi B-MAC:lla kehystä lähettäessään on saman ajan lähetystilassa samalla  $T_{\text{Interval}}$  -parametrin arvolla, kuin SpeckMAC-D:llä. Kuitenkin protokollien kokonaisenergiankulutuksien eroa selittää se, että SpeckMAC-D:tä käytettäessä vastaanottavan noodin ei tarvitse pitää vastaanotinta päällä, kuin lyhyen datakehysten ajan. Kokonaisenergiankulutukset ovat suhteellisen suuria eikä niissä käytännössä ole eroa  $T_{\text{Interval}}$  -parametrin ollessa  $< 2$  ms, mutta tätä suuremmilla arvoilla SpeckMAC on selkeästi energiatehokkaampi: B-MAC kuluttaa vähimmillään  $\sim 10$  mW  $6,7$  ms ja SpeckMAC-D  $6,7$  mW  $\sim 15$  ms  $T_{\text{Interval}}$  -parametrin arvolla. SpeckMACin toimintaa ei ole dokumentoitu sellaisissa tilanteissa, jossa verkossa esiintyy törmäyksiä tai muita langattomalle viestinnälle tyypillisiä ongelmia.

#### 4.1.4 TRAMA

TRAMA [95] (Traffic-adaptive medium access) on esimerkki aikavälejä käyttävästä MAC-protokollasta. Sen toiminta on energiatehokasta ja datakehysten osalta täysin vapaa törmäyksistä, mutta noodi voi viettää lepotilassa enintään 87 % ajasta. Tästä johtuen sen kokonaisenergiankulutus on suurempi, kuin esim. edellisten alalukujen SpeckMAC tai B-MAC -protokollien energiankulutus pienillä pakettimäärillä. TRAMA kuitenkin skaalautuu huomattavasti suurempiin pakettimääriin ja näissä tilanteissa se on energiankulutukseen parempi. TRAMAa käytettäessä aikavälit on jaettu signaali- ja lähetysaikaväleihin. Signaali- ja lähetysaikavälien aikana noudatetaan kilpavarausta ja tällöin kaikki verkon noodit ovat aktiivisia joko lähetys- tai vastaanottotilassa. Signaaloinnin tarkoituksena on, että noodit viestivät datakehysten lähetykseen käytettävistä

aikaväleistä ja alueella olevista noodeista. Käytännössä yksi noodi tulee tietoiseksi omien naapureidensa ja myös näiden naapureiden ajoituksesta, jotta osaa itse olla käyttämättä tulevaisuudessa varattuja aikavälejä. Toimintaansa TRAMA ei tarvitse erillistä aikasynkronointia, vaan uutena verkkoon kytketty noodi liittyy vasta signalointiaikavälin aikana. Yhden lähetysaikavälin aikana vain yksi noodi lähettää ja kohdenoodi vastaanottaa muiden noodien ollessa lepotilassa. Koska TRAMAN signalointiaikavälin pituus riippuu naapurinoodien määrästä, se ei skaalaudu hyvin tiheisiin verkkoihin.

## 4.2 Reititysprotokollat

Reititysprotokollan tehtävänä on etsiä paketeille paras reitti eri kohteisiin. Kuitenkin reitin hyvyttä kuvaava mittari voi anturi- ja adhoc-verkoissa tarkoittaa useaa eri seikkaa tavoiteltavasta toiminnasta riippuen. Eri reittejä on mahdollista arvottaa esimerkiksi seuraavia suureita käyttäen [2 s. 166]:

- Hyppyjen määrä kuvastaa kuinka monen noodin kautta paketin tulee kulkea ennen kuin se saavuttaa oikean kohdenoodin. Tämänkaltainen mittari painottaa verkon latenssia ja lyhintä polkua kohteeseen.
- Käytettäessä mittarina pienintä paketin kuluttamaa energiamäärää, noodi laskee yhteen kaiken sen energian, joka paketin välittämiseen kohteelle kuluu ja pyrkii minimoimaan tämän.
- Noodien energiavarastojen tasojen pienintä varianssia painottavassa reitityksessä protokolla pyrkii laskemaan reitit siten, että paketteja välitetään tasaisesti kaikkien verkon noodien kautta, jotta yksittäisten noodien reitityksestä energiankulutus ei kasva muita suuremmaksi.

Yleisesti käytettyä IP-protokollaa tai muita perinteisiä OSI-mallin verkkokerroksen protokollia varten laadittuja reititysprotokollia ei voida käyttää sellaisenaan anturiverkoissa verkkojen erilaisesta luonteesta johtuen. Tärkeimmät eroavaisuudet ovat seuraavat:

- Perinteisissä verkoissa käytetty osoitteistus ei välttämättä sovellu anturiverkkoihin. [94 s. 143][97] [98]
- Käytännössä kaikki anturiverkon paketit voivat olla osoitettuja vain yhdelle laitteelle. [94 s. 143][98]
- Anturinoodien energiavarasto, lähetysteho, prosessointi- ja muistikapasiteetti ovat rajoitettuja, eikä tavanomaisia reititysprotokollia ole optimoitu tällaisille laitteille. [94 s. 143][97][98]
- Tavanomaiset reititysprotokollat eivät skaalaudu säännöllisten tai usein lähetettyjen mainostusten johdosta ja voivat kuluttaa liian suuren osan käytettävistä olevasta siirtotiestä [99].

Anturiverkoissa myös reitityksen suurimpina haasteina ovat noodien suuri määrä ja noodien laitteiston asettamat rajoitukset laskennallisten ja muistiresurssien suhteen [alaluku 2.3]. Seuraavat alaluvut esittelevät langattomissa anturiverkoissa käytettävien reititysprotokollien luokittelua ja resurssivaatimuksia.

#### **4.2.1 Eri protokollatyypit**

Perinteisissä tietoverkoissa protokollien luokittelu tehdään sen mukaan, millaisen kuvan verkosta yksittäiset laitteet muodostavat [98 s. 545-560][99 s. 85-86, 120, 204]. Linkin tila -protokollat muodostavat verkosta täydellisen kuvan ja tämän perusteella etsivät parhaimman reitin kohteeseen. Etäisyysvektoriprotokollien

muodostama kuva verkosta on epätäydellinen ja yksittäiset laitteet tietävät vain eri kohteiden suunnan ja etäisyyden. Polkuvektoriprotokollat tuntevat eri kohteista koko polun, jonka avulla ne voidaan saavuttaa, mutta eivät verkon täydellistä kuvaa kaikkine yhteyksineen. Langattomien anturiverkkojen ja ad hoc -verkkojen erityispiirteiden johdosta näissä käytetään monimuotoisempia reititysprotokollia, joten myös näiden luokittelu on mahdollista useamman ominaisuuden perusteella. Protokollia voidaan tarkastella esimerkiksi luodun verkon rakenteen tai protokollan toiminnan kautta.

Verkon rakennetta käsiteltäessä, jako litteisiin, hierarkkisiin ja sijaintikeskeisiin [94 s. 144-159][97] luokittelee protokollat sen mukaan millaisen roolin eri noodit ottavat verkossa. Litteissä protokollissa kaikilla verkon noodeilla on yhtäläiset tehtävät ja vastuut reitityksessä ja lisäksi verkon looginen topologia vastaa hyvin noodien todellista sijaintia. Hierarkkisessa reitityksessä verkko saattaa loogiselta topologialtaan olla esimerkiksi puumainen, jolloin verkon juurinoodia lähellä noodeilla on suurempi vastuu koko verkon toiminnasta. Sijaintikeskeisessä reitityksessä pakettien välitys perustuu tavanomaisen laiteosoitteen sijasta laitteen sijaintitietoon.

Tarkasteltaessa puolestaan protokollien toimintaa, jako reaktiivisiin, proaktiivisiin ja hybridiprotokolliin luokittelee protokollat sen mukaan, milloin reittitieto eri kohteisiin kerätään ja lasketaan [99]. Reaktiiviset protokollat keräävät tarvittavat tiedot ja laskevat reitin eri kohteisiin vasta kun näille on tarve. Näin menetellen noodien ei tarvitse ylläpitää tarpeetonta reitti-informaatiota. Proaktiiviset protokollat suorittavat reittien haun automaattisesti heti kun se on mahdollista ja tämän jälkeen vain ylläpitävät reittitietoa. Näin reititys tapahtuu nopeammin kuin reaktiivisissa protokollissa, mutta reititys vaatii enemmän noodin resursseja.

Hybridiprotokollat yhdistävät piirteitä reaktiivisista ja proaktiivisista protokollista.

Luokittelu voidaan tehdä myös esimerkiksi datakeskeisten, hierarkkisten, sijaintikeskeisten ja palvelunlaatukeskeisten välille [98]. Datakeskeisessä reitityksessä dataa keräävä noodi pyytää mitattua dataa *tietyltä alueelta* jolloin reititysprotokolla yhdistää kohdealueen noodien mittausdatan samaan pakettiin vähentäen lähetettävää pakettimäärää. Hierarkkisessa reitityksessä lähekkäin sijaitsevat noodit muodostavat automaattisesti klustereita. Reitittäessä paketteja, kohdenoodin tarkka sijainti on vain samaan klusteriin kuuluvien noodien tiedossa ja muiden klusterien noodit tietävät ainoastaan kohdeklusterin sijainnin suhteessa muihin klustereihin. Sijaintikeskeisessä reitityksessä paketteja ei välttämättä välitetä tietylle yksittäiselle noodille, vaan jollekin tietyllä fyysisellä alueella sijaitsevalle laitteelle. Tämä reititys vaatii noodeilta luotettavan sijaintitiedon. Palvelunlaatukeskeinen reititys painottaa yhteyden laatuun liittyviä parametreja, kuten esim. verkon latenssia.

Käytännössä kaikki edellä kuvatut protokollatyypit keräävät jokaiselle noodille reitityksessä tarvittavan informaation erilliseen ns. reititystauluun. Protokollasta riippuen eri taulukoita ja tietovarastoja voi olla myös useampia [99]. Yhteistä kuitenkin on se, että reititystaulu sisältää aina tiedon siitä, kuinka eri kohdelaitteet voidaan saavuttaa. Protokollien olennaisin ero onkin, *kuinka* tämä tieto kerätään ja mitä pidetään parhaimpana reittinä.

Lisäksi langattomissa anturiverkoissa on myös mahdollista välittää paketteja ilman varsinaista reititysprotokollaa. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi tulvahaku (engl. flooding) ja juoruaminen (engl. gossiping) [102]. Tulvahaussa noodi välittää yksittäisen paketin aina kaikille naapureilleen, jotka välittävät tätä



myös edelleen. Näin menetellen paketti lopulta päätyy oikealle vastaanottajalle nopeinta reittiä pitkin, mutta haittapuolena on menetelmän aiheuttama suuri energiankulutus kaikilla verkon laitteilla. Lisäksi yksittäinen noodin voi vastaanottaa useita kopioita samasta paketista. Käytännössä tulvahaun toteuttaminen tarvitsee toiminnallisuuden, joka estää yksittäistä noodia lähettämästä uudelleen samaa pakettia. Juoruaminen poikkeaa tulvahausta hieman: tässä yksittäinen noodin lähettää paketista vain yhden kopion *satunnaisesti valitulle* naapurille. Näin menetellen paketti päätyy lopulta oikealle vastaanottajalle, mutta haittapuolena on tuntematon ja mahdollisesti pitkään viive sekä heikko energiatehokkuus: yksittäinen paketti voi kiertää verkossa pitkään kuluttaen muiden noodien energiaa ennen päätymistään vastaanottajalle. Puutteistaan huolimatta tulvahakua ja juoruamista käytetään osassa anturiverkoista joko sellaisenaan tai muiden reititysprotokollien ohessa [103]. Ne soveltuvat käytettäväksi pienikokoisissa verkoissa, joissa välitettävät pakettimäärät ovat suhteellisen vähäisiä. Tulvahakua on myös mahdollista muokata esimerkiksi siten, että noodien toimintaan vaikuttaa esim. jäljellä oleva kapasiteetti noodien teholähteissä [104].

#### **4.2.2 Reititysprotokollien resurssivaatimukset**

Reititysprotokollat käyttävät noodin mikro-ohjaimen laskenta- ja muistiresursseja reititiedon keräämiseen sekä myös tämän tiedon ylläpitoon. Eri protokollat eroavat toisistaan sen mukaan, kuinka paljon ne käyttävät noodin eri resursseja esimerkiksi suhteessa verkon noodien määrään tai laajuuden ja verkossa esiintyvien polkujen pituuksiin. Tunnistettavia eri tilanteita laskenta-, muisti- ja

viestintäresurssien käytölle ovat reittien haku, reittitiedon ylläpito ja verkon topologian muutos esim. vikaantumisen johdosta. [99][105]

Esimerkkinä resurssien kulutuksesta on mobiileissa ad hoc- ja anturiverkoissa käytetty AODV-reititysprotokolla [106], jota voidaan luonnehtia proaktiiviseksi ja litteäksi. AODV:llä reittitietoa tarvitessaan noodi käynnistää reitinhakuprosessin ja lopulta säilöö tarvitsemansa informaation reititystauluun. Tässä taulussa on useita kenttiä: kohdeosoite, kohteen sekvenssinumero, hyppyjen määrä, seuraavan laitteen osoite, TTL-arvo, edeltävien noodien lista ja reitin tila. Edeltävien noodien lista sisältää polun, mitä reittiä pitkin kohdenoodi voidaan saavuttaa. Mikäli käytössä kahdeksanbittinen osoitteistus, tämä on myös eri osoitekenttien pienin mahdollinen koko. Vaikka jotkin arvot voidaankin ilmaista kahdeksanbittistä pienemmin lukuarvoin, näiden käyttö on ongelmallista, koska esim. alaluvun 3.2 mikro-ohjaimet käyttävät kahdeksan bitin rekistereitä. Lisäksi kehitysyökalut<sup>5</sup> ja kääntäjät eivät välttämättä mahdollista tätä suoraan. Näin ollen AODV-protokollan reititystaulussa yksi kohde vie seitsemän tavua ja edeltävien noodien lista mahdollisesti vielä enemmän verkosta riippuen. Jos verkossa noodit viestivät ei pelkästään juurinoodin vaan myös toistensa kanssa, voi jo sadan noodin verkko käyttää yli yhden kilotavun reititystaulua kullakin noodilla. Juuri muistiresurssien riittämättömyys on ollut esimerkiksi eräässä sadan noodin tarkkuusmaatalouden mittausjärjestelmässä viimeisenä syynä siihen, miksi AODV on soveltumaton [108]. AODV:stä onkin olemassa useita muita variantteja [109], kuten esim. TinyAODV, joka on yksinkertaistettu toteutus ja kuluttaa AODV:tä selkeästi vähemmän resursseja. Tällä protokollalla noodit voivat viestiä vain juurinoodin eivätkä toistensa kanssa.

---

<sup>5</sup> Esimerkiksi alaluvussa 5.1 käsitellyn PSoC-mikro-ohjaimen PSoC Designer -kehitysympäristössä pienin mahdollinen C-kääntäjän käyttämä tietotyyppi on char, joka vie yhden tavun. [107]

Myös muut anturiverkoissa käytetyt reititysprotokollat käyttävät erillistä reititystaulukkoa, josta ilmenee, kuinka kullekin eri kohteelle saavutetaan paras reitti. Proaktiivisissa reititysprotokollissa muistinkäyttö on erityisen suurta, koska protokollat joutuvat keräämään tiedon reititystaulukkaan ennen kuin sitä tarvitaan. Esimerkiksi DSDV-protokolla kerää kutakin kohdetta varten reititystauluun viisi kenttää tietoa [110]. Muistinkulutus tässä kasvaa suhteessa verkon kokoon [99]. Joillakin muilla reititysprotokollilla muistinkäyttö saattaa kasvaa jopa neliöllisesti verkon kokoon nähden [98][99].

## 5 Anturinoodi PSoC-mikro-ohjaimella

Tässä luvussa käsitellään PSoC-mikro-ohjainta sekä tämän eri sovelluksia langattomissa anturiverkoissa. Lisäksi esitellään PSoC:lla toteutettu anturinoodi sekä näistä koottu anturiverkko. Toteutetun anturinoodin eri ominaisuuksia ja piirteitä analysoidaan ja verrataan alaluvussa 3.1 esiteltyihin noodeihin. Vertailun jälkeen luvussa pohditaan PSoC:n soveltuvuutta anturiverkkoihin eri näkökulmista. Lopuksi luvussa tuodaan esiin perusteltuja, asiaa käsitteleviä aiheita jatkotutkimuksiksi.

### 5.1 PSoC-mikro-ohjain

PSoC (Programmable System on Chip) [111][112] on Cypress Semiconductorin valmistama mikro-ohjainperhe, jonka laitteita voi kutsua myös sirulla olevaksi järjestelmäksi. Näiden olennaisin piirre on, että samalla sirulla on itse mikro-ohjaimen lisäksi vapaasti konfiguroitavia analogisia ja digitaalisia lohkoja. Näillä voidaan toteuttaa mm. AD- ja DA-muuntimia, analogisia suotimia, vahvistimia, pulssinleveysmodulaattoreita, erilaisia laskureita ja ajastimia, SPI- ja I2C-ohjaimia sekä muita laitteita. Lisäksi eri lohkojen väliset kytkennät voidaan toteuttaa pääosin piirin sisällä. PSoC:ssa on myös kaksi eri RC-oskillaattoria: 24 MHz IMO (engl. Internal Main Oscillator) ja 32 KHz ILO (engl. Internal Low-speed Oscillator), monipuolinen kellotietojen hallinta (eri kellotaajuuudet eri lohkoille ja ytimelle), lepo- ja ns. watchdog-ajastin sekä muita sisäänrakennettuja oheislaitteita. PSoC-mikro-ohjainperhe jakaantuu PSoC 1, 3 ja 5 – arkkitehtuureihin, joiden olennaisimpana erona on käytetty prosessoriydin: PSoC 1:ssä ytimenä on M8C, PSoC 3:ssa Intel 8051 ja PSoC 5:ssä ARM Cortex M3.

Suurimpana erona arkkitehtuurien välillä on laskentateho ja energiankulutus. Tässä tutkielmassa PSoC-termillä viitataan PSoC 1 -arkkitehtuurin laitteisiin.

PSoC on tekniikaltaan [113] 8-bittinen RISC-tyyppinen mikro-ohjain, joka on toteutettu M8C-ytimen ympärille. M8C pohjautuu Harvard-arkkitehtuuriin ja sillä saavutetaan suurimmalla 24 MHz kellotaajuudella 4 MIPS laskentateho; aritmeettiset käskyt vievät 4-10 kellojaksoa [114]. Flash-tyyppistä ohjelmamuistia PSoC:ssa on 4 – 32 kt ja RAM-muistia 256 t – 2 kt [112]. Muistien sekä analogisten ja digitaalisten lohkojen määrät riippuvat PSoC:n tyyppistä. Sisäisesti suurimmissa PSoC-piireissä (esim. CY8C29866, CY8C29666 ja CY8C29466 [115]) digitaalisia lohkoja on 16 ja analogisia 12 kpl. Piirissä olevaa flash-muistia on lisäksi mahdollista käyttää EEPROM-muistin tavoin normaalin käytön aikana [116]. Lisäksi PSoC voi ohjelmoida itse oman ohjelmamuistinsa [117].

Tyypillisen PSoC-mikro-ohjaimen, CY8C29466:n [115], tulojännitealue on 3 – 5,25 V kellotaajuuden ollessa alle 12 MHz ja 4,75 – 5,25 V 24 MHz taajuudella. Virrankulutus aktiivisena on 5 mA 3,3 V jännitteellä ja 3 MHz kellotaajuudella. Vähävirtaisessa lepotilassa virrankulutus on tyypillisesti 3  $\mu$ A 3,3 V käyttöjännitteellä, kun kaikki PSoC:n sisäiset lohkot on sammutettu ja I/O-liitännät ovat virtaa kuluttamattomassa tilassa. Tällöin aktiivisena on ainoastaan sisäinen 32 KHz ILO-oskillaattori ja ajastin, joka voi herättää PSoC:n määrätyn ajan kuluttua. Tulojännitteen ollessa alle 3 V on mahdollista käyttää sisäänrakennettua SMP (engl. Switch Mode Pump) –hakkuriregulaattoria. SMP tarvitsee vain kolme passiivista ulkoista komponenttia, mutta sillä saavutetaan tyypillisesti vain 50 % hyötysuhde. Taulukossa 5 on esitetty PSoC:n ja luvussa 3.2 käsiteltyjen mikro-ohjainten olennaisimmat ominaisuudet.

Mikro-ohjain	Kellotaajuus, jolla 1 MIPS	Virrankulutus lepotilassa	Virrankulutus aktiivisena	RAM- muisti	Ohjelma- muisti
PSoC	6 MHz	3,3 $\mu$ A	5 mA @ 3 MHz	2 kt	32 kt
ATmega	1 MHz	10 $\mu$ A	5 mA @ 4 MHz	1 kt	8 kt
PIC	5 MHz	2 $\mu$ A	3 mA @ 4 MHz	4 kt	64 kt
MSP430	1 MHz	1,3 $\mu$ A	330 $\mu$ A @ 1 MHz	10 kt	48 kt

Taulukko 5 - PSoC:n ja luvun 3.2 mikro-ohjainten ominaisuuksien vertailu

PSoC:n vahvuus on sen konfiguroitavissa lohkoissa. Rakenteeltaan näitä on neljää eri tyyppiä: kolme analogista ja yksi digitaalinen. Yksittäinen digitaalinen lohko on rakennettu muutaman rekisterin ja yksinkertaisen ALU:n ympärille. Tämän avulla esim. asynkronisen sarjadataan lähetys on mahdollista siten, että CPU-ydin lataa lohkoon seuraavan lähetettävän tavun, ja lohko itse huolehtii yksittäisten bittien lähetyksestä oikealla kellotaajuudella. Analogiset lohkot ovat puolestaan huomattavasti monimuotoisempia. Yksi näistä on jatkuva-aikainen ja kaksi pohjautuvat kytketyn kondensaattorin (engl. switched capacitor) käyttöön. Jatkuva-aikaisessa lohossa on operaatiovahvistin, lukuisia analogisia multipleksereitä ja digitaalisesti säädettävä vastus. Kytkettyä kondensaattoria käyttävissä lohkoissa suurella nopeudella toimivat puolijohdekytkimet kuljettavat sähkövarauksia haluttuja reittejä pitkin määritellyllä nopeudella. Myös tämän lohkon aktiivisena ytimenä on operaatiovahvistin. Asettamalla lohkojen eri toimintaparametrit (multipleksereiden tulojen valinnat, kytkimiä ohjaavien signaalien taajuus sekä vaihe jne.) on näillä mahdollista toteuttaa hyvin monimuotoisia oheislaitteita. Koska asetukset tehdään rekisteritasolla on konfiguraatiota mahdollista vaihtaa ja muuttaa normaalin käytön aikana. [113]

Käytännössä PSoC ei vaadi normaaliin toimintaansa ulkoisia oheiskomponentteja. Kuitenkin tarkkoja ajastuksia varten tarvitaan lisäksi ulkoinen 32 KHz kellokide, koska PSoC:n sisäisten oskillaattoreiden tarkkuus on huomattavan heikko. 24 MHz IMO:n tarkkuus on dokumentaation perusteella  $\pm 2,5 \%$  [113]. Mittausten<sup>6</sup> perusteella jo normaaleissa toimisto-olosuhteissa taajuuden poikkeama 32 KHz ILO:ssa (jota käytetään mm. lepoajastimessa) nimellisestä saattaa olla jopa 6 %. Lisäksi taajuuden vaihtelu on huomattavaa, jopa useita prosentteja minuutissa ilman ulkoisten tekijöiden muutosta. Käytettäessä ulkoista kellokidettä myös IMO voidaan tahdistaa tähän vaihelukitulla silmukalla.

Käyttämällä vain PSoC:n sisäisiä lohkoja ja näiden välisiä kytkentöjä on mahdollista esimerkiksi toteuttaa lukuisia eri sovelluksia ilman ulkoisia aktiivikomponentteja. Tyypillisiä ja hyviä esimerkkisovelluksia ovat esimerkiksi sykkeen mittaus [118] käyttäen erilaisia vahvistimia, AD-muunninta ja komparaattoria tarvitsee vain muutamia ulkoisia passiivikomponentteja. Lisäksi PSoC:lla on mahdollista simuloida 555-ajastinta [119] tai demoduloida FSK-lähete korrelaatiovastaanottimella käyttämällä analogisia vahvistimia, suotimia, viivelinjaa ja komparaattoreita [120]. Myös esimerkiksi lämpötilan mittaus käyttämällä termoparia [121] onnistuu vain sisäisiä lohkoja käyttäen. PSoC:n valmistaja esittää [111] sovellusalueiksi mm. ympäristön mittauksen eri antureita käyttäen ja moottoreiden sekä tehon ohjauksen. Valmistajan tunnistamat PSoC:n vahvuudet liittyvät mikro-ohjaimen joustavuuteen, normaalisti ulkoisten järjestelmien integroimisen mikro-ohjaimen sisälle ja kustannusten laskuun.

---

<sup>6</sup> Mittaukset toteutettiin vertaamalla PSoC:n sisäisen 32 kHz oskillaattorin nopeutta GPS-järjestelmästä saatavaan 1 Hz referenssitaajuuteen. Mittaus toistettiin useilla eri mikro-ohjainyksilöillä saaden kaikissa tapauksissa samankaltaisia tuloksia.

## 5.2 PSoC:ta käyttävät sovellukset anturiverkoissa

Tämä alaluku käsittelee PSoC-mikro-ohjaimen käyttöä eri sovelluksia anturiverkoissa ja esittelee ne toteutukset, joissa PSoC:lla on merkittävä rooli.

### 5.2.1 ProSpeckz

ProSpeckz [122] on Arvandin ja Wongin vuonna 2004 Edinburghin yliopistossa kehittämä anturinoodi. Noodia on käytetty tutkimustyössä, joka käsittelee ”kaikkialla läsnä olevien laitteiden verkotusta”. Käytännössä anturinoodissa on vain PSoC-mikro-ohjain, 2,4 GHz taajuudella toimiva CC2420-radiopiiri, tarvittavat jänniteregulaattorit ja liitäntöjä joihin voidaan kytkeä erilaisia antureita. Lisäksi noodissa on joko litiumioniakku tai ns. nappiparisto. Tekniikaltaan tämä on mikro-ohjainta lukuun ottamatta samankaltainen alaluvun 3.1 anturinoodien kanssa. MAC-protokollana noodissa on SpeckMAC [52] varianttia tarkemmin määrittelemättä. Noodin käyttämää reititysprotokollaa ei ole dokumentoitu. Anturinoodien esimerkkisovelluksena on hajautettu paloilmaisin.

ProSpeckz-noodin [122] suurin heikkous on sen 330  $\mu\text{A}$  lepovirrankulutus. Tätä on useasti pidetty esimerkkinä PSoC:n soveltumattomuudesta langattoman anturiverkon noodin mikro-ohjaimeksi. Esimerkiksi kappaleessa 3.1.1 käsitellyn ENS-alustan kehitykseen on vaikuttanut suuresti ProSpeckz-noodista saadut kokemukset, joiden mukaan ”PSoC ei ole ideaali langattoman anturiverkon noodin mikro-ohjaimeksi suuren lepovirrankulutuksen johdosta etenkin verrattuna MSP430- tai AVR-mikro-ohjaimiin” [36]. Lisäksi ProSpeckz-noodia on käytetty esimerkkinä kirjallisuudessa siitä, kuinka ”PSoC tarjoaa monipuolisia mahdollisuuksia analogisten signaalien prosessointiin, mutta kuinka sen suuri



lepovirrankulutus pienentää merkittävästi laitteella saavutettavaa toiminta-aikaa eikä ole soveltuva anturiverkkoihin” [34 s. 39][40 s. 32]. Myös ProSpeckz-noodista edelleen kehitetty versio, ProSpeckz II, on energiankulutukseltaan samaa tasoa: 300  $\mu\text{A}$  "syvässä lepotilassa" [123]. Tulokset vaikuttavat poikkeuksellisilta, koska PSoC-mikro-ohjaimen lepovirrankulutus on valmistajan dokumenttien [111 s. 135] mukaan noin 3  $\mu\text{A}$ . Tämän voidaan olettaa johtuvan joko anturinoodin jänniteregulaattorin suuresta tyhjäkäyntivirrasta tai siitä, että ProSpeckz ei hyödynnä kaikkia PSoC-mikro-ohjaimen virransäästöominaisuuksia.

### 5.2.2 Mittausverkko rannikkoalueille

Argentiinan San Jorge -lahden rannikkoalueille kehitetty mittausjärjestelmä [124] on kustannustehokas PSoC-mikro-ohjaimeen pohjautuva langaton anturiverkko. Verkossa anturinoodeina toimivat poijut mittaavat eri suureita, kuten veden lämpötilaa eri syvyyksiltä ja veden suolaisuutta. Yksittäinen anturinoodi pohjautuu CY8C29466 PSoC-mikro-ohjaimeen ja käyttää liikennöintiin Xbee Pro - ZigBee-moduulia. Sen teholähteenä toimii aurinkopaneeli sekä tämän avulla ladattava lyijyhyytelöakku. Noodit lähettävät mitattuja suureita niitä keräävälle maa-asemalle säännöllisin väliajoin. Verkon noodit voivat myös välittää toistensa paketteja. Järjestelmä mahdollistaa myös noodien ohjelmoinnin ja PSoC-mikro-ohjaimen sisäisen rakenteen konfiguroinnin radiolinkin ylitse. Tästä anturiverkosta ei kuitenkaan ole saatavilla sen teknisiä tietoja noodien kantomatkaa lukuun ottamatta. Noodien virrankulutus, toiminta-aika sekä fyysinen koko on jätetty dokumentoimatta julkaisussa. Tämä on ymmärrettävää, koska kyseessä on merentutkimusalan konferenssissa esitelty järjestelmä. Kuitenkaan kokonaisenergiankulutuksen osalta laitetta ei voida pitää

edistyksellisenä, sillä jo pelkästään noodeissa käytetyn XBee Pro -radiomoduulin [125] virrankulutus on lähetystilassa noin kymmenkertainen ja vastaanottotilassakin lähes kolminkertainen verrattaessa alaluvussa 3.1 esitettyihin anturinoodeihin.

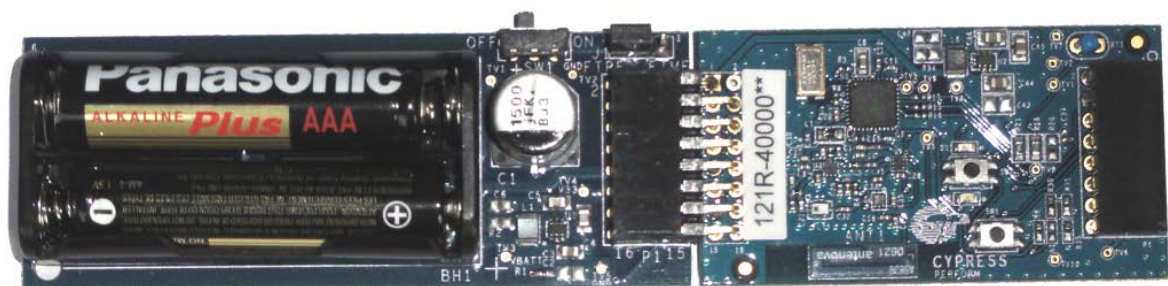
### 5.2.3 PNet

PNet [126] New Yorkin osavaltion yliopistossa kehitetty PSoC-mikro-ohjainta käyttävä *langallinen* anturiverkko, jota on käytetty ”kyberfyysisten järjestelmien” kehityksessä ja tutkimustyössä, jossa tutkitaan PSoC:n soveltuvuutta tällaiseen verkkoon. Teknisesti PNet on useiden noodien muodostama ristikon muotoinen verkko, jossa yksittäinen noodi kommunikoi sarjayhteydellä viereisten noodien kanssa käyttämällä PSoC:n asynkronista sarjaliikennelohkoa. Muita tietoja noodien teknisestä toteutuksesta tai todellisesta energiankulutuksesta ei ole saatavilla.

### 5.2.4 Cypress Semiconductorin CyFi -verkot

Cypress Semiconductorin CYRF7937 CyFi -radiopiiri [127] on alustana muutamissa langattomissa anturiverkoissa. Piiri toimii 2,4 GHz taajuusalueella, sillä saavutetaan enimmillään 1 Mbps liikennöintinopeuksia GFSK-lähetelajilla, mutta myös DSSS-hajaspektritekniikan käyttö on mahdollista 250 kbps nopeudella. Se on tilanvaihtoihin kuluvan ajan sekä virrankulutuksen puolesta kilpailukykyinen alaluvun 3.3 radiopiireihin verrattuna: 21 mA lähetettäessä ja alle 1  $\mu$ A lepotilassa. Vaikka CyFi-radiopiirissä onkin SPI-liitäntä mikro-ohjainta

varten, sen käyttö on mahdollista vain PSoC-mikro-ohjainten kanssa, koska rajapintaa ei ole täysin dokumentoitu ja vain PSoC:n kehitystyökaluissa on tälle sisäänrakennettu tuki. CyFi-protokollapinon [128] avulla on mahdollista toteuttaa topologiaan tähtimäisiä verkkoja, joissa on enintään 250 noodia. Protokolla tarjoaa luotettavan viestinnän nooidien ja tähtiverkon keskusnoodin välillä, mutta ei pakettien reititystä. CyFi-verkossa keskusnoodi ei voi virrankulutuksen johdosta olla akkukäyttöinen. CyFi-radiopiirin CY3271 First Touch -kehitysalustaa käytetään mittausjärjestelmien lisäksi esimerkiksi langattomien anturiverkkojen opetuksessa [129]. Tässä kehitysalustassa on valmiina PSoC-mikro-ohjain, CyFi-radio, muutama LED, termistori ja vapaita I/O-liitäntöjä. Lisäksi kehitysalustaan kuuluu erillinen PSoC:ta ja CyFi-radiota käyttävä laite, jossa on lisäksi USB-liitäntä datan siirtoon tietokoneelle. Tyypillinen kehitysalustasta koottu anturinoodi on esitetty kuvassa 6. Tarkkoja teknisiä tietoja tällaisen anturinoodin suorituskyvystä tai energiankulutuksesta ei ole dokumentoitu edes käytetyn kehitysalustan ohjekirjaan [130]. Suoritettujen mittausten perusteella CY3271:n oletusprojektina toimivan energiatehokkaan langattoman lämpömittarin virrankulutus lepotilassa on  $400 \mu\text{A} \pm 50 \mu\text{A}$ . Käytännössä tämä on vaatimaton lukema verrattuna alaluvun 3.1 anturinoodeihin.



Kuva 6 - CY3271-kehitysalustasta koottu anturinoodi

Langaton anturiverkko kasvihuoneiden parametrien ohjaukseen [14] pohjautuu CY3271-kehitysalustaan. Tarkkuuskasvihuoneympäristössä anturinooidien tulee mitata kasvihuoneen sisä- ja ulkopuolista ilmaa sekä maaperää useista eri pisteistä. Näiden tietojen perusteella järjestelmä voi ohjata mm. tuuletus-, lämmitys- ja kastelujärjestelmiä tarvittaessa paikallisesti optimiolosuhteiden saavuttamiseksi. Vaikka järjestelmän noodeista ei ole saatavilla niiden tarkkoja teknisiä dokumentaatioita, on tutkijaryhmän lopputulos se, että Cypress Semiconductorin järjestelmä on "paras yksinkertainen järjestelmä, joka toimii luotettavasti pienellä tehonkulutuksella kasvihuoneiden ohjauksessa" [14].

[131] esittelee toisen PSoC:ta käyttävän anturiverkon, jonka noodit on myös koottu suoraan CY3271-kehitysalustan laitteista. Datan reititykseen kyseinen verkko käyttää SPIN-protokollaa, jonka käyttöä julkaisussa esitellään kattavasti. Konferenssijulkaisussa kiitetään noodin pientä fyysistä kokoa, joka saavutetaan suurella integraatioasteella. Kuitenkin CY3271:n fyysiset mitat [132] käytetyssä konfiguraatiossa (13,5 cm x 3 cm) ovat selkeästi suuremmat, kuin esimerkiksi alaluvussa 3.1 esitellyn ENS-alustan [36] noodilla (ilman aurinkopaneelia 4,5 cm x 4,5 cm) tai SENTIO-noodin [50] (3 cm x 5 cm).

### **5.2.5 Eri rajapintojen toteutus erilaisissa järjestelmissä**

PSoC:lla on toteutettu monessa lääketieteellisessä anturiverkkojärjestelmässä antureiden liittäminen kommunikaatiosta vastaavaan laitteeseen. Lääketieteellisessä datankeruujärjestelmässä [24] laitteen ytimenä on MICA2-anturinoodi ja tämän ohessa on PSoC, jolla toteutetaan EKG-signaalien jatkuva näytteistys ja datan prosessointi välitettävän datan määrän vähentämiseksi.

Langattomassa terveydenvalvontaverkossa [27] jokaisessa mittauskohteessa kommunikoinnista ja analogisten signaalien näytteistyksestä vastaa Tmote-anturinoodi. PSoC:lla on tässä järjestelmässä toteutettu pulssioksimetrin antamien analogisten signaalien suodatus ja vahvistus siten, että PSoC toimii käytännössä analogisena komponenttina ja antaa signaalin *digitaalista rajapintaa käyttämättä* analogisesti ulos. Sulautetussa langattomassa hermoston toiminnan tallennus- ja stimuloitijärjestelmässä [25] PSoC:n sisäänrakennetun instrumentointivahvistimen avulla on toteutettu mittausjärjestelmä, joka ei vaadi erillisiä vahvistimia, ja joka tarvittaessa toteuttaa DA-muuntimen avulla hermoston stimuloinnin. Tässä järjestelmässä ohjaus- ja verkkologiikasta vastaa TelosB-anturinoodi. Lisäksi PSoC:ta on käytetty esimerkiksi EEG-signaalien luokittelussa [26] muissa TelosB-noodia käyttävissä järjestelmissä.

Teollisuuden ohjausjärjestelmissä on käytössä esimerkiksi langaton anturinoodi [133], jossa on Atmelin ARM9 (AT91RM9200) mikro-ohjaimena ja PSoC, jolla toteutetaan noodiin analogiset signaalitulot ja -lähdöt. [134] esittelee IRIS-anturinoodiin pohjautuvan järjestelmän, jossa on erillinen PSoC:lla toteutettu anturirajapintakortti, joka on mahdollista uudelleenohjelmoida verkon yli. Ohjelmointi käsittää PSoC:n ohjelmiston ja sisäisten analogisten lohkojen kytkennät ja konfiguraation. Tyndall-noodi on pohjana fyysisesti pienelle järjestelmälle [135], jossa PSoC:lla mitataan eri antureita käyttäen mm. liuenneen hapen määrää ja veden happamuutta rannikkoalueella.

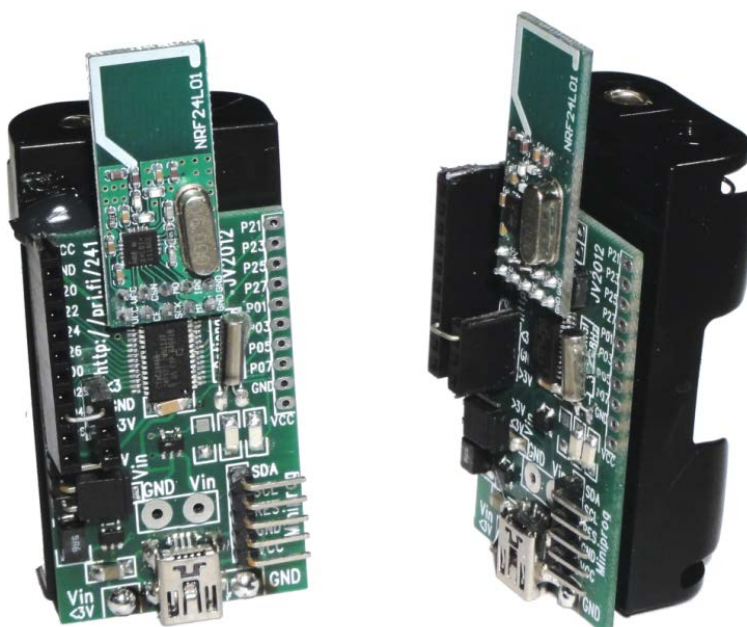
## 5.2.6 Yhteenveto PSoC:n eri anturiverkkosovelluksista

Ainoa, muihin yleisesti käytettyihin anturinoodeihin verrattavissa oleva PSoC:ta mikro-ohjaimenaan käyttävä anturinoodi, ProSpeckz, on lepovirrankulutukseltaan noin kaksi kertaluokkaa moderneja, luvussa 3.1 esitettyjä anturinoodeja huonompi. Tätä tulosta on useasti käytetty esimerkkinä PSoC:n soveltumattomuudesta anturiverkkoihin. Tuloksena saatu virrankulutus on myös noin kaksi kertaluokkaa huonompi kuin mikro-ohjaimen valmistajan teknisissä dokumenteissa ilmoittama. Näin ollen voidaan perustellusti olettaa, että ProSpeckz-noodi joko ei hyödynnä kaikkia PSoC:n virransäästöominaisuuksia, virrankulutuksen mittausta ei ole tehty asianmukaisesti tai että noodissa on muita puutteita esim. elektroniikassa tai komponenttien valinnassa.

Rannikkoalueiden mittausjärjestelmä, ProSpeckz ja PNet osoittavat, että PSoC:illa on kuitenkin mahdollista toteuttaa erilaisia mittausjärjestelmiä ja anturiverkkoratkaisuja. Myös PSoC:lle toteutettua CyFi-radioverkkoprotokollaa on käytetty onnistuneesti tietyissä sovelluskohteissa. CyFi-toteutuksia ei voida kuitenkaan suoraan rinnastaa moderneihin, yleiskäyttöisiin anturinoodeihin mm. sen rajoitusten ja dokumentaation puutteiden johdosta. Sovellukset, joissa PSoC on ollut käytössä anturirajapinnassa osoittavat selkeästi, että tämä mikro-ohjain soveltuu hyvin mitä erilaisimpiin signaalien käsittely-, mittaus-, luokittelu- ja ohjaustehtäviin aina teollisuudesta lääketieteellisiin sovelluksiin. Lisäksi PSoC:ta on mahdollista käyttää mitä erilaisimpien antureiden ja mittalaitteiden yhteydessä.

### 5.3 Toteutettu anturinoodi PSoC-mikro-ohjaimella

Tätä tutkielmaa varten suunniteltiin ja toteutettiin PSoC-mikro-ohjainta käyttävä anturinoodi. Noodin suunnittelun lähtökohtana oli toteuttaa komponenttimäärältään mahdollisimman yksinkertainen laite, kuitenkin tinkimättä jänniteregulaattoreiden kytkennän laadusta ja virrankulutuksen minimoimisesta. Energianlähteenä noodi käyttää kahta LR6-paristoa ja fyysisiltä mitoiltaan se on lähes samankokoinen kahden LR6-pariston pidikkeen kanssa. Kuva 7 esittelee anturinoodin eri puolilta. Yksittäisen anturinoodin ulkomitat piirilevyantenni mukaan lukien ovat 72 x 30 x 27 mm (LxKxS). Ulkoisesti toteutettu noodi muistuttaa alaluvussa 3.1.4 esiteltyä FireFly- [48] tai esim. Mica-anturinoodia [136]. Anturinoodin kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 1. Seuraavissa alaluvuissa esitellään anturinoodi yksityiskohtaisesti.



Kuva 7 - Toteutettu anturinoodi

### 5.3.1 Teholähde ja energiankulutus

Noodin teholähteenä on kaksi sarjaan kytkettyä LR6-paristoa. Tulojännitealue on siten 1,6 - 3 V ja paristojen kapasiteetti paristomallista riippuen esimerkiksi 1,1 - 2,8 Ah [31][32]. Jännite nostetaan PSoC-mikro-ohjaimen ja radiopiirin käyttämään 3,3 volttiin Texas Instrumentsin ns. boost-tyyppisellä TPS61097-33DBVT-hakkuriregulaattorilla [137]. Tulojännitealueella regulaattorilla saavutetaan 88 - 94 % hyötysuhde 10 mA kuormalla. Sen tyhjäkäyntivirta on tyypillisesti alle 5  $\mu$ A. Regulaattorin oheiskomponenttien valinta, kytkentä ja osasijoittelu on tehty valmistajan datalehden esimerkkien ja ohjeiden perusteella. Regulaattorin valinnan perusteena olivat soveltuvat jännite- ja virta-alueet sekä pienin tyhjäkäyntivirta yhdessä suuren hyötysuhteen kanssa käytetyn Farnell-elektroniikkatukkurin edustamista hakkuriregulaattoreista [138].

Hakkuriregulaattorin lisäksi noodissa on Texas Instrumentsin TPS73130-lineaariregulaattori [139]. Regulaattorin jännitepudotus on tyypillisesti vain 30 mV, eikä se tarvitse ulkoisia kondensaattoreita. Tämän tarkoituksena on pudottaa PSoC:n ohjelmoinnissa tarvittavan MiniProg-ohjelmointilaitteen syöttämä 5 V jännite mikro-ohjaimelle soveltuvaksi. Lisäksi tämän avulla noodin teholähteenä on mahdollista käyttää yhtä litiumionikennoa tai noodi voidaan kytkeä kiinteästi 5 V tulojännitteeseen. Anturinoodin mitattu virrankulutus eri tiloissa on esitetty taulukossa 6. Taulukossa on esitetty virrankulutus eri tiloissa kolmella saatavalla laskentateholla, koska virrankulutus riippuu huomattavasti CPU:n käyttämästä kellotaajuudesta. Mittaukset on tehty 3,0 V tulojännitteellä.



Toimintatila	Virrankulutus @ 2 MIPS	Virrankulutus @ 1 MIPS	Virrankulutus @ 0,5 MIPS
Lepotila <sup>7</sup>	14,3 $\mu$ A	14,3 $\mu$ A	14,3 $\mu$ A
CPU aktiivinen	8,1 mA	3,8 mA	3,3 mA
Lähetystila (0 dBm)	23,8 mA	19,5 mA	19 mA
Vastaanottotila	28,1 mA	23,8 mA	23,3 mA

Taulukko 6 - Toteutetun anturinoodin mitattu virrankulutus

### 5.3.2 Radiolähetin-vastaanotin

Toteutettu anturinoodi käyttää Nordic Semiconductorin nRF24L01+ -radiopiiriä, joka käytännössä vastaa alaluvun 3.3.2 nRF2401A-radiopiiriä. Valinnan perusteena on käyttö hyvällä menestyksellä eri anturinoodeissa [43] ja pienin energiankulutus datan lähetyksessä sekä vastaanotossa yhtä bittiä kohden. Radiopiiriä ei käytetty sellaisenaan, vaan piiri on osa kaupallisesti saatavilla olevaa radiomoduulia, joka vastaa valmistajan esimerkkikytkentää [141] mm. piirilevyantennin osalta.

Käytetyn radiopiirin herkkyys on -82 dBm 2 Mbps, -85 dBm 1 Mbps sekä -94 dBm 250 kbps nopeudella. Toteutetussa anturinoodissa radiopiiriä käytetään 1 Mbps nopeudella tämän tarjotessa kompromissin nopeuden ja herkkyyden välillä. Pisin radiomoduulilla saavutettava luotettava toimintaetäisyys (pakettivirhesuhde < 1 %) on noin n. 40 m vapaassa tilassa 1 Mbps nopeudella. Sisätiloissa toimintaetäisyyttä hallitsee yhteyden matkalla olevien esteiden, seinien ja

---

<sup>7</sup> Mikroampeeriluokan virrankulutus mitattiin HP3478A-yleismittarilla [140]. Mittauksessa mitattiin ensin sarjavastuksen tarkka vastus nelijohdinkytkennällä. Tämän jälkeen mitattiin kahdenkymmenen anturinoodin yhteinen virrankulutus samaa sarjavastusta käyttäen. Saadun virrankulutuksen tarkkuus - huomioiden jännitteen ja sarjavastuksen mittausten epätarkkuus - on  $\pm 0,5 \mu$ A.

lattioiden määrä sekä kulma, joissa nämä kohdataan. Mittausten perusteella yhteys toimii luotettavasti enintään kahden kevytrakenteisen väliseinän läpi alle kahdenkymmenen metrin etäisyydelle asti. Rakenteissa käytetty ontelolaatta vaimentaa signaalia liiaksi eikä tämän läpi saada luotettavaa yhteyttä, ellei lähete kohtaa laattaa lähes suorassa kulmassa ja yhteysvälin pituus ole huomattavan lyhyt, eli noin 10 m. Kokemukset signaalin etenemisestä ja vaimenemisesta sisätiloissa ovat yhteneviä kirjallisuudesta löytyvien tietojen kanssa<sup>8</sup>.

Radiopiirin lähettämien ja vastaanottamien pakettien käyttämä Enhanced ShockBurst -pakettiformaatti [74] on esitetty kuvassa 8. Paketin alussa on yhden tavun tahdistuskenttä. Kolmen tai viiden tavun kohdeosoitekenttä osoittaa vastaanottajan. Tämä on verkon kokoon nähden suhteettoman suuri, mutta sen kokoa ei voi asettaa pienemmäksi. Vastaanotossa piiri tunnistaa sille saapuvat paketit osoitteiden perusteella hyläten muille laitteille osoitetut paketit. Yhdeksän bitin ohjauskenttä sisältää mm. tiedon paketin koosta. Datakenttä sisältää käyttäjän lähettämän datan ja voi olla kooltaan enintään 32 tavua. Yhden tai kahden tavun CRC-tarkiste lisätään automaattisesti paketin loppuun. Pakettia vastaanotettaessa paketti hylätään jos tarkiste on virheellinen.

Tahdistus 1 tavu	Kohdeosoite 3 – 5 tavua	Ohjauskenttä 9 bittiä	Data 0 – 32 tavua	CRC-tarkiste 1 – 2 tavua
---------------------	----------------------------	--------------------------	----------------------	-----------------------------

Kuva 8 – Enhanced ShockBurst-pakettiformaatti [74]

---

<sup>8</sup> Signaalin lähtötaso 0 dBm, vastaanottimen herkkyys -85 dBm ja 5 dB marginaali jättää etenemisvaimennukselle 80 dB. 20 m etenemisvaimennus [sivu 33, alaviite 4] 2.4 GHz taajuudella on noin 66 dB, jolloin kahden kevytrakenteisen väliseinän vaimennus olisi n. 14 dB. 10m etenemisvaimennus on noin 61 dB, jolloin ontelolaatan vaimennus olisi noin 19 dB. Kirjallisuudessa [142][143] esitetään vastaavia arvoja signaalin vaimenemisesta sisätiloissa ja eri rakenteissa.

### 5.3.3 Noodin anturit

Koska toteutettua anturinoodia käytetään ainoastaan PSoC-mikro-ohjaimen soveltuvuuden arviointiin eikä todellisiin mittaussovelluksiin, ei anturinoodissa ole kiinteitä antureita. Mikäli tarpeen, on anturinoodiin kuitenkin mahdollista liittää useita erityyppisiä antureita ja mittalaitteita. Anturinoodin laajennusportteihin on mahdollista tuoda kahdeksan 0 – 3,3 V analogista tulosignaalia. PSoC-mikro-ohjaimen sisäisiä multipleksereitä, vahvistimia, suotimia ja AD-muuntimia on mahdollista käyttää näiden tulosignaalien käsittelyssä. Myös analogisen alijärjestelmän käyttämät referenssijännitteet [144] on mahdollista tuoda laajennusporttien kautta. Anturinoodi voi myös tarvittaessa mitata oman virtalähteensä napajännitettä ennen sen regulointia. Lisäksi noodissa on useita vapaita liitäntöjä erityyppisten digitaalisen antureiden varten. Antureiden käyttäessä digitaalisia sarjaväyliä näiden liittäminen noodiin on suoraviivaista käyttäen PSoC:n digitaalisia kommunikaatiolohkoja. Lisäksi käytettäessä anturinoodia aktuaattoriverkoissa noodilla on mahdollista ohjata eri laitteita käyttämällä esimerkiksi DA-muunninten analogisia tai PWM-modulaattoreiden digitaalisia ulostuloja. Käytännössä liitäntöjen puolesta noodiin on mahdollista kytkeä luvussa 3.4 esitetyt anturityypit. Tällä voidaan myös toteuttaa kaikki luvussa 5.2 esitetyt PSoC:ta käyttävät sovellukset.

Anturinoodin ja anturiverkon testausta varten noodin liitäntöihin on kytketty ainoastaan noodin pariston napajännitteen mittausta ja Microchipin valmistama analoginen lämpötila-anturi MCP9701 [145]. Tämän aktiivisen anturin antama jännite on verrannollinen lämpötilaan ja sen tarkkuus on  $\pm 4$  °C. Molemmat tulosignaalit näytteistetään käyttämällä PSoC:n sisäisillä lohkoilla toteutettua 12-bitin AD-muunninta. Mittauksessa ei käytetä ulkoisia komponentteja lämpötila-

anturia lukuun ottamatta. Lämpötila-anturi kytketään virrattomaksi kun sitä ei käytetä

#### **5.3.4 Toteutetun noodin ohjelmisto**

Anturinoodin ohjelmisto ja PSoC:n sisäisten lohkojen väliset kytkennät laadittiin käyttämällä Cypress Semiconductorin ilmaiseksi tarjoamaa PSoC Designer 5.2 -kehitysohjelmistoa [146], joka on ainoa saatavilla oleva työkalu PSoC 1 -perheen mikro-ohjaimille. Anturinoodin ohjelmisto toteutettiin modulaariseksi, jossa ISON OSI-mallin [87] eri kerrosten toiminnallisuudet ovat selkeästi erotettu toisistaan tiedostotasolla. Näin menetellen esimerkiksi anturinoodin ohjelmiston laajentaminen tai protokollien vaihtaminen on mahdollista ilman tuntuvaa ohjelmiston muokkausta tai uudelleentoteutusta. Noodissa ei ole varsinaista käyttöjärjestelmää. Mikro-ohjaimen sisäisten järjestelmien (SYSCLK) kellotaajuutena on 24 MHz ja CPU:n kellotaajuus on valittavissa 12 MHz ja 1,5 MHz välillä. Käytännössä noodin suorituskyvyllä CPU:n kellotaajuudella ei ole merkitystä koska käytettävät protokollat ovat laskennallisesti kevyitä. Saatava laskentateho on 2 - 0,5 MIPS.

Noodin ohjelmiston ytimenä toimii pääsilmutta, jota suoritetaan toistuvasti 8 Hz taajuudella. Jokaisella suorituskerralla pääsilmutta kutsuu useita noodin toiminnasta vastaavia aliohjelmia. MAC-protokollan ns. työskentelyfunktioita kutsutaan jokaisella pääsilmutkan kierroksella. Tämä mm. vastaanottaa saapuvia ja lähettää lähetyspuskurissa olevia kehyksiä. Lisäksi joka 8. pääsilmutkan kierroksella (eli 1 Hz taajuudella) kutsutaan aliohjelmia, jotka huolehtivat toistuvista tapahtumista, jotka eivät ole itse verkon kannalla olennaisessa roolissa.

Näin toistuviin tehtäviin kuuluu mm. analogisten tulosignaalien näytteistys, näytteistetyn datan sekä naapuruussuhteita kuvaavan taulukon lähetys juurinoodille. Pääsilmutta on lisäksi rakennettu niin, että kaikkia ajoituksia on mahdollista vaihtaa myös anturinoodin normaalin käytön aikana. Tieto uusista ajoituksista voidaan välittää noodille anturiverkon läpi.

Noodi viettää vähävirtaisessa lepotilassa sen ajan, joka pääsilmutan yhdeltä kierrokselta jää käyttämättä edellä kuvattuihin tehtäviin (MAC-protokollan vaatima aika ja toistuvat toimet kuten tulosignaalien näytteistys). Kun pääsilmutan kierroksen muut tehtävät on suoritettu tallettaa noodi nykyisen tilansa. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikkien PSoC-mikro-ohjaimen eri lohkojen toimintaa määrävien rekisterien sisältö talletetaan RAM-muistiin. Tämän jälkeen ohjelma sammuttaa kaikki ylimääräiset mikro-ohjaimen sisältämät virtaa kuluttavat lohkot ja asettaa myös kaikki muut virtaa kuluttavat järjestelmät mahdollisimman vähävirtaiseen tilaan. Käytännössä toteutetaan kirjoittamalla soveltuvat arvot eri lohkojen toimintaa määräviin rekistereihin. Tähän kuuluu I/O-liitäntöjen asettaminen korkeaimpedanssiseen tilaan, analogisten puskureiden ja referenssien sammutus sekä kaikkien konfiguroitavien digitaalisten ja analogisten lohkojen sammutus. Kun CPU lopulta siirretään lepotilaan, sammutetaan myös 24 MHz ns. pääoskillaattori. Lopulta käyttöön jää ainoastaan sisäinen 32 KHz oskillaattori, yksinkertainen laskuri joka herättää mikro-ohjaimen tunnetun ajan kuluttua ja RAM-muisti säilyttäen sisältönsä. Ennalta määrätyn ajan kuluttua mikro-ohjain herää lepotilasta, käynnistää 24 MHz pääoskillaattorin ja CPU-ytimen, joka jatkaa pääsilmutan suoritusta. Lepotilasta palaamisen jälkeen palautetaan kaikkien PSoC:n toiminnallisten osien tila siihen, johon jäätin juuri ennen lepotilaan siirtymistä. PSoC:n virransäästön kannalta olennaiset tehtävät on kuvattu erillisessä Cypress Semiconductorin ns. Application Notessa [147].

### 5.3.5 Toteutetun noodin MAC-protokolla

Anturinoodiin toteutettiin soveltuvin osin alaluvussa 4.1.3 kuvattu SpeckMAC-D -protokolla [52]. Protokollan valinnan perusteena on se, että tätä on aiemmin käytetty ProSpeckz-anturinoodissa. Näin kahden eri PSoC:ta käyttävän noodin energiankulutukset ovat paremmin verrattavissa. Toteutetussa anturinoodissa protokollan  $T_{\text{Interval}}$  on 125 ms ja  $T_{\text{Preamble}}$  n. 12 % tätä pidempi, jotta eri mikro-ohjainyksilöiden sisäisten oskillaattoreiden epätarkkuuksilla (kuvattu luvussa 5.1) ei ole merkitystä viestinnän onnistumisen kannalta.

Toteutetun anturinoodin nRF24L01+ -radiopiirissä ei ole vastaanotetun signaalin tason mittausta [78], joten SpeckMAC-D:n (kuvattu alaluvussa 4.1.3) toteutus ei ole optimaalinen. Anturinoodi ei voi päätellä, lähettääkö toinen noodi dataa vai ei, ellei se pidä radiopiiriä vastaanottotilassa aikaa, joka on vähintään kaksi kertaa pisimmän kehyksen vastaanottoon kuluva aikaa. Esim. 1 Mbps lähetysnopeudella ja 32 tavun kehyskoolla tämä on 512  $\mu\text{S}$ , kun esim. CC2420-radiopiiri voi puolestaan antaa vastaanotetun signaalin voimakkuuden tyypillisesti jo 128  $\mu\text{S}$  ajassa [71]. Lisäksi nRF24L01+ -radiopiiri ei voi toistaa jatkuvasti samaa lähetettävää kehystä, vaan lähetys pitää tauottaa 4 ms välein 160  $\mu\text{S}$  ajaksi, jotta lähetyksen aikana avoimessa tilassa toimiva vaihelukko voidaan lukita kvartsikidettä käyttävään oskillaattoriin. Näistä syistä johtuen toteutetun anturinoodin energiankulutus muunkaan suorituskyvyn ohella ei ole täysin verrattavissa esim. ProSpeckz-noodin energiankulutukseen käytettäessä SpeckMAC-D-protokollaa.

Kuva 9 esittää MAC-protokollan käyttämän kehysformaatin. Korostevärillä merkityt kentät ovat nRF24L01+ -radiopiirin käyttämää Enhanced ShockBurst -kehystä, joka on kuvattu luvussa 5.3.2. Kolmitavuinen kohdeosoite voi olla yhden

laitteen osoittava tai se voi olla yleislähetysosoite. Koska toteutettu anturinoodi ja sen protokollat käyttävät vain kahdeksan bitin osoitteita, kohdeosoitekentän kaksi ensimmäistä tavua ovat aina vakioita. Lähdeosoite on kehyksen lähettävän noodin osoite. Datakenttä sisältää reititysprotokollan vaatimat otsikot ja lähetettävän datan.



Kuva 9 - MAC-protokollan käyttämä kehysformaatti

Normaalin toiminnan lisäksi MAC-protokollan toteutus ylläpitää erillistä taulukkoa tämän naapurilaitteista. Aina vastaanottaessaan kehyksen noodi kirjaa kehyksen lähettäneen noodin osoitteen taulukkoon. Taulukkoon kirjatut naapurilaitteet poistetaan taulukosta vapaasti määriteltävän ajan kuluttua. Lisäksi noodi voi säännöllisin välein lähettää tämän taulukon juurinoodille verkon topologian analysointia varten. Käytännön toteutuksessa juurinoodi ei itse kuitenkaan analysoi tätä dataa, vaan välittää sen edelleen PC-tietokoneelle verkon rakenteen kuvaamista varten. Mikäli verkossa ei välitetä dataa, voivat noodit lähettää tyhjän kehyksen säännöllisin välein. Näin menetellen saadaan ylläpidettyä tietoa noodien välisistä naapuruussuhteista ja verkon topologiasta.

### 5.3.6 Toteutetun noodin reititysprotokolla

Anturinoodiin reititysprotokollaksi toteutettiin luvussa 4.2.2 kuvattu tulvahaku. Perusteena juuri tulvahaun toteutukselle on sen merkittävän yksinkertainen toimintaperiaate. Koska tutkielmassa tutkitaan PSoC:n soveltuvuutta pääasiassa laitetekniikan kautta, eivät monimutkaiset reititysprotokollat toisi tähän lisäarvoa. Lisäksi tulvahaun toimintaa on helppo analysoida ja tämän vaikutus noodien energiankulutukseen paketteja lähetettäessä on helppo laskea. Vastaanottaessaan paketin noodit tarkistaa, onko kyseinen paketti vastaanotettu aiemmin. Mikäli paketti on jo vastaanotettu, se pudotetaan eikä tähän reagoida muutoin. Näin menetellen estetään verkossa yksittäisten pakettien muutoin aiheuttama pakettimyrsky. Jos paketti on uusi ja osoitettu tälle noodille, reititysprotokolla välittää paketin datasisällön erilliselle aliohjelmalle käsittelyä varten. Jos paketti puolestaan on osoitettu jollekin toiselle noodille, se lähetetään edelleen yleislähetyksenä kaikille kantomatkan sisällä oleville muille noodeille.

Kuva 10 näyttää tulvahaun käyttämän pakettiformaatin. Kohde- ja lähdeosoite ovat paketin kahdeksanbittiset osoitteet. Sekvenssinumeron (myös kahdeksanbittinen arvo) asettaa paketin alkuperäinen lähettäjä, joka kasvattaa numeroa yhdellä jokaista uutta lähetettyä pakettia kohden. Verkon noodit käyttävät tätä sekvenssinumeroa tunnistamaan jo vastaanotetut paketit: jokainen noodit ylläpitää taulukkoa, joka sisältää kahdenkymmenen edellisen paketin tunnistetiedot – eli lähdeosoitteen ja sekvenssinumeron. Aina vastaanottaessaan paketin noodit tarkistaa taulukosta onko kyseinen paketti vastaanotettu aiemmin. Jos paketti on vastaanotettu jo aiemmin, sitä ei käsitellä uudelleen. Jos paketti puolestaan on uusi, lisätään sen tunnistetiedot jo nähtyjen pakettien tunnistetietotaulukkoon.



Kohde- osoite 1 tavu	Lähde- osoite 1 tavu	Sekvenssi- numero 1 tavu	Data 0 – 16 tavua
----------------------------	----------------------------	--------------------------------	----------------------

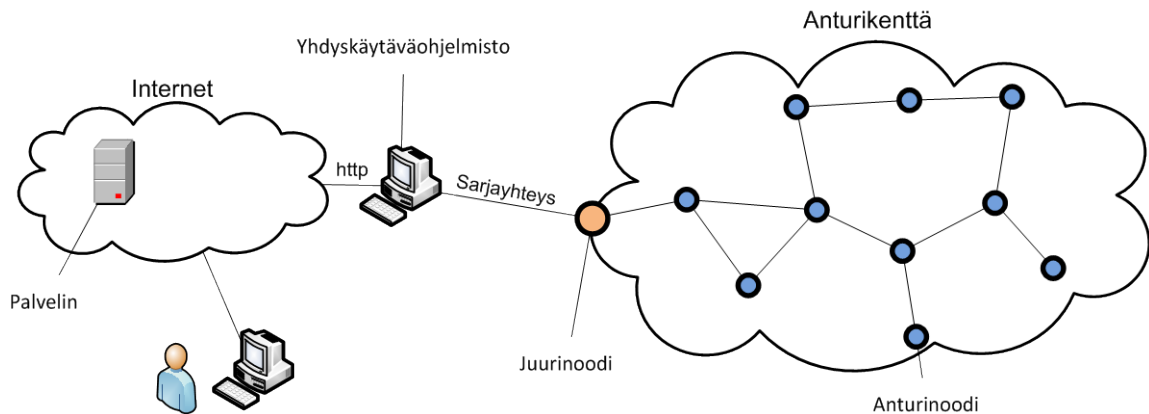
Kuva 10 - Tulvahakua käyttävän reititysprotokollan pakettiformaatti

Käytännössä pakettien lähetys tulvahakua käyttäen lisää paketin alkuun tarvittavat otsikkotiedot (lähettäjän ja vastaanottajan osoitteet sekä sekvenssinumeron) ja välittää tämän jälkeen paketin edelleen MAC-kerroksen lähetysfunktiolle. MAC-protokolla koteloi saadun paketin oman kehysformaattinsa sisään ja lähettää sen yleislähetysnä kaikille kantomatkan sisällä oleville noodeille. Toimintaansa varten tulvahaku tarvitsee ainoastaan 40 tavun taulukon jo nähtyjen pakettien tunnistamista varten.

### 5.3.7 Ohjelmisto mittausdatan keräykseen, visualisointiin ja verkon hallintaan

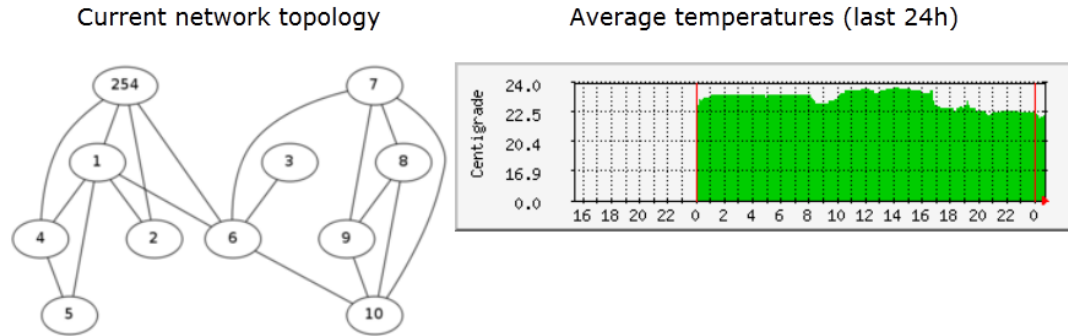
Anturiverkosta saatavan mittausdatan keräykseen, tämän visuaaliseen esitykseen, sekä verkon noodien hallintaan laadittiin erillinen moniosainen järjestelmä. Kuva 11 esittää tämän järjestelmän rakennetta. Anturiverkossa oleva, kiinteästi sijoitettu ns. juurinoodi on yhdistetty PC-tietokoneen sarjaporttiin. Juurinoodi välittää kaikki itselleen verkosta saapuvat paketit edelleen tietokoneelle sellaisenaan. Tietokone puolestaan ajaa erikseen laadittua yhdyskäytäväohjelmistoa, joka välittää anturiverkosta saapuneet paketit edelleen Internetiin kytketylle palvelimelle http-protokollan avulla. Pakettien lähetys palvelimelta anturiverkkoon on mahdollista siten, että yhdyskäytäväohjelmisto säännöllisin välein tarkistaa palvelimelta, onko tällä anturiverkkoon välitettäviä paketteja ja jos on, välittää ne edelleen juurinoodille. Tämä lähettää saadut paketit

anturiverkkoon sellaisenaan. Koska yhteydet palvelimelle avataan aina yhdyskäytävöohjelmistolta, on juurinoodi yhdyskäytävöineen mahdollista sijoittaa ympäristöihin, jotka on kytketty Internetiin esim. osoitteenmuunnoksen kautta.



Kuva 11 - Toteutetun anturiverkon rakenne

Internetissä oleva palvelin on käyttäjien käytettävissä WWW-selaimen avulla. Kuva 12 on kuvaruutukaappaus WWW-käyttöliittymän etusivusta. Tämän järjestelmän avulla on mahdollista tarkastella verkosta saatua mittausdataa tai datasta automaattisesti laadittuja kuvaajia. Lisäksi järjestelmä esittää anturiverkon kulloisenkin loogisen topologian ja noodien väliset yhteydet graafisesti. Graafisen esityksen taustalla on noodien säännöllisesti välittämä tieto naapurilaitteistaan, joten kuva esittää verkon loogisen rakenteen. Kuitenkaan noodien todennukaista sijaintia tästä ei voida päätellä, koska ympäristön aiheuttamia vaikutuksia eri noodien välisiin linkkijänteisiin ei tunneta. Anturiverkon yksittäisten noodien eri toimii vaikuttavia parametreja on myös mahdollista muokata käyttöliittymän avulla. Lisäksi yksittäisiltä noodeilta saapuvaa mittausdataa voidaan myös tarkastella erikseen.



Kuva 12 - Anturiverkon WWW-käyttöliittymän etusivu, näkyvissä verkon tämänhetkinen topologia ja kuvaaja lämpötilan keskimääräisistä mittaustuloksista

Kytettäessä anturiverkkoon uusia noodeja, ottavat ne automaattisesti käyttöön tilapäisosoitteen 240. Tätä käytetään oletuksena, jos noodi ei ole vielä vastaanottanut muita asetuksia. Tätä tilapäisosoitetta käyttämällä ne kysyvät juurinoodin kautta toimintaparametreja (oma osoite, mittausintervallit jne.) automaattisesti palvelimelta. Tällöin palvelin asettaa näille seuraavan vapaana olevan osoitteen sekä muut anturinoodin tarvitsemat parametrit. Palvelin pitää jatkuvasti yllä tietokantaa jo annetuista osoitteista jotta välttyään osoitteiden päällekkäisyyksiltä. Anturinoodit tallettavat saamansa parametrit omaan haihtumattomaan EEPROM-muistiinsa, jotta mm. noodin osoite ei muutu jännitekatkoksen yhteydessä. Juurinoodin osoite 254 on ns. kovakoodattu kaikkiin anturinoodeihin.

## 5.4 Anturinoodin rajoitteista ja mahdollisista parannuksista

Anturinoodin mikro-ohjaimen muistien määrä asettaa rajoituksia käytettäville ohjelmistoille ja protokollille. Toteutetussa anturinoodissa ohjelmisto vie ohjelmamuistista noin 9 kt, joka on 28 % käytettävissä olevasta 32 kt:sta. Jos noodille toteutetaan esim. alaluvussa 5.2.5 mainittu uudelleenohjelmointi verkon yli, voi ohjelmisto viedä käytännössä enintään 50 % ohjelmamuistin koosta [117]. Tämä johtuu siitä, että PSoC:n suorittamassa itseohjelmoinnissa uusi ohjelma siirretään tavu tavulta ensin laitteen ohjelmamuistissa sijaitsevaan puskuriin, josta se sitten kerralla siirretään käytettäväksi ohjelmaksi. PSoC:ssa on huomattavasti vapaata ohjelmamuistia eri sovelluksiin, mikäli itseohjelmointia ei ole tarve käyttää. Anturinoodin RAM-muistista ohjelmisto käyttää 953 tavua, joka on 47 % sen 2 kt kokonaismäärästä. Tähän muistinkulutukseen on sisällytetty myös pinon tarvitsema muistinkäyttö. Käytännössä RAM-muistin määrä voi asettaa rajoituksia mm. reititysprotokollan valinnalle tai esimerkiksi näytteistettyjen signaalien käsittelylle anturinoodissa.

PSoC:n sisäisillä lohkoilla on mahdollista käsitellä analogisia tulosignaaleja. Etenkin vahvistinlohkojen avulla toteutettujen kytkentöjen ominaisuudet asettavat tiettyjä rajoituksia mitattavalle kohteelle. Vahvistimissa esiintyvän kohinan taso on parhaimmillaan  $98 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ . Kaistanleveys on vahvistuksesta riippuen enintään n. 200 kHz. PGA:ssa, eli ei-kääntävässä vahvistinkytkennässä vahvistus on säädettävissä ja enimmillään 48 [148]. Kahden tai kolmen operaatiovahvistimen instrumentointivahvistimessa suurin vahvistus on 93 ja yhteismuotoisen häiriön torjunta vahvistuksesta ja topologista riippuen 54 – 60 dB [149]. Käytännössä edellä kuvatut arvot ovat suhteellisen vaatimattomia verrattuna ulkoisin

komponentein toteutettuihin vahvistimiin [150] ja voivat rajoittaa PSoC:n käyttöä mittauskytkenöissä.

Anturinoodissa käytetyn PSoC mikro-ohjaimen laskentateho on enintään 2 MIPS käytetyllä käyttöjännitteellä (jännitealueet esitelty tarkemmin luvussa 5.1). Tämä on vaatimaton lukema verrattuna osaan luvussa 3.2 esitellyistä mikro-ohjaimista, etenkin jos vertailukohtana on AVR, joka saavuttaa jopa n. kymmenkertaisen laskentanopeuden. Tietyissä sovelluksissa tämä saattaa osoittautua riittämättömäksi. Jos laskentatehoa puolestaan ei tarvita, voi noodin virrankulutusta pienentää laskemalla käytettyjä kellotaajuuksia ja sitä kautta myös laskentatehoa.

Myös toteutetun anturinoodin lepovirrankulutusta on mahdollista pienentää lisää. Luvussa 5.1 mainittu PSoC:n laaja tulojännitealue mahdollistaa esimerkiksi litiumpolymeeriakun käyttämisen suoraan ilman erillisiä regulaattoreita. Tällöin mahdollinen jänniteregulaattori tarvitaan ainoastaan radiopiirin, antureiden ja muiden oheislaitteiden vuoksi. Vähävirtaisen lepotilan aikana kaikki muut komponentit on mahdollista pitää täysin sammutettuina mukaan lukien jänniteregulaattori, jos tässä on toiminnallisuus ohjattua sammutusta varten. Tarvittaessa eri laitteita mikro-ohjain voi käynnistää jänniteregulaattorin. Näin menetellen anturinoodin virrankulutus pienenee vähintään jänniteregulaattorin lepovirrankulutuksen verran. Toteutetussa anturinoodissa tämä on n. 7  $\mu\text{A}$ , jolloin jäljelle jäävä lepovirrankulutus olisi vain noin 7  $\mu\text{A}$ . Jänniteregulaattorin käynnistymisestä aiheutuva viive kuitenkin hidastaisi anturinoodin käynnistymistä lepotilasta ja siirtymistä esim. vastaanottotilaan. Tällöin kasvaa luvussa 4.1 kuvattujen käynnistymisaikojen vaikutus energianhävikkiin, jolloin virransäästön todellista lopputulosta ei voida arvioida täydellisesti.

## **5.5 Toteutetun anturinoodin ja -verkon toiminta sekä vertailu muihin laitteisiin**

Tässä alaluvussa kuvataan anturiverkon toimintaa, sen noodien energiankulutusta ja näillä saavutettavia toiminta-aikoja. Lisäksi luvussa verrataan toteutettua noodia erityisesti ProSpeckz-anturinoodiin, mutta myös muihin moderneihin anturiverkkojen laitealustoihin.

### **5.5.1 Anturiverkon toiminta**

Anturiverkkoa koekäytettiin useasti kesällä ja syksyllä 2012 toimisto- ja oppilaitosympäristössä. Enimmillään verkon koko oli 20 noodia ja pituus juurinoodista lukien viisi. Testikäytössä noodeissa, verkossa tai näiden toiminnassa ei havaittu poikkeavuuksia, vaan kokonaisuus toimi odotetusti ja moitteettomasti. Testijaksojen aikana verkossa ei havaittu merkittävää pakettihukkaa: tulvahaku välitti odotetusti kaikki paketit kaikissa tilanteissa juurinoodille, mikäli polku vain oli olemassa. Kahden noodin välisen linkin pakettihukan todettiin olevan alle 1 %. Testijaksoissa, joissa testattiin verkon toimivuutta suurten pakettimäärien kanssa, havaittiin odotetusti törmäyksiä ja merkittävää pakettihukkaa. Tällöin noodien lähettämien pakettien määrä oli yli 50 % niiden kapasiteetistä. Verkko kuitenkin toipui odotetusti ennalleen pakettimäärien laskiessa.

Kun käytetään alaluvussa 5.3.5 kuvattua SpeckMAC-D protokollan toteutusta, saadaan todellisista noodeista tehtyjen mittausten perusteella toiminta-aikasuhteeksi noin 1,4 %. Kokonaisajasta 0,5 % noodia on vain mikro-ohjain aktiivisena ja 0,9 % vastaanottotilassa. Käyttämällä taulukossa 6 (sivu 66) esitettyjä

tuloksia virrankulutuksesta saadaan tästä keskimäärin 0,22 mA. Kahdella Energizer E91 LR6 -alkaliparistolla [31] saavutetaan näin ollen hieman yli vuoden toiminta-aika, mikäli verkossa ei lähetetä paketteja.

Jokainen verkossa lähetetty paketti lähetetään tulvahaun johdosta kerran kaikkien verkon nooidien toimesta. Yhden paketin lähetyksen kesto on 140 ms. Jos mittaus- ja muuta dataa lähetetään koko verkossa keskimäärin esimerkiksi 5 pakettia minuutissa, noodit viettävät lähetystilassa keskimäärin 700 ms yhden minuutin aikana. Tällöin lähetys vie 1,17 % kokonaisajasta. Kun otetaan huomioon edellisen kappaleen mittaukset aktiivisena ja vastaanottotilassa vietetystä ajasta tästä saadaan kokonaisuudessaan toiminta-aikasuhteeksi noin 2,6 %. Käyttämällä edelleen taulukossa 6 (sivu 66) esitettyjä mittaustuloksia, saadaan noodin keskimääräiseksi kokonaisvirrankulutukseksi noin 0,59 mA, joka johtaa esim. kahta Energizer E91 LR6 -alkaliparistoa [31] käytettäessä jopa kuuden kuukauden toiminta-aikaan. Noodeista tehdyt mittaukset ja käytännön havainnot puoltavat tätä tulosta.

### **5.5.2 Toteutetun anturinoodin vertailu ProSpeckz-noodiin**

Koska alaluvussa 5.2.1 esitelty ProSpeckz on ainoa anturinoodi, jossa PSoC vastaa koko noodin toiminnasta, on perusteltua verrata toteutettua anturinoodia juuri tähän. Toteutetussa noodissa on CY8C29466-mikro-ohjain, ProSpeckz-noodissa puolestaan CY8C27643 [122]. Molemmissa on sama CPU-ydin, niiden kelloaajuus- ja käyttöjännitealueet sekä virrankulutukset ovat yhtäläiset. Eroina ovat I/O-liitäntöjen, sisäisten lohkojen, sekä eri muistien määrät

[113][115][151][luvut 5.2.1 ja 5.3]. Toteutetussa anturinoodissa RAM- ja ohjelmamuistia on 2 kt ja 32 kt. ProSpeckzissä vastaavasti 256 t ja 16 kt.

Noodien energiankulutukset on esitetty taulukossa 7. Tulokset ovat jokseenkin yhtäläisiä lähetys- ja vastaanottotiloissa huolimatta eri radiopiireistä. Vain mikro-ohjaimen ollessa aktiivisena virrankulutuksissa on selkeä eroavaisuus. Taulukossa on esitetty toteutetun noodin energiankulutus useilla eri laskentatehoilla. Koska ProSpeckz-noodia ei ole dokumentoitu täysin kellotaajuuksien osalta ei tämän suureen osalta noodeja voi suoraan verrata. Suurimmat erot energiankulutuksissa ovat kuitenkin noodien ollessa täydessä lepotilassa: ProSpeckz kuluttaa lähes 18 kertaa enemmän verrattuna toteutettuun noodiin. Eron voi selittää ainoastaan se, että ProSpeckz-noodissa ei hyödynnetä kaikkia virransäästöominaisuuksia tai että tämän jänniteregulaattorin tyhjäkäyntivirta on poikkeuksellisen suuri. On myös mahdollista, että sen elektroniikassa joitakin muita puutteita tai vikoja. Toteutettu noodi on käytännössä kaikilta osin ProSpeckz-noodia energiatehokkaampi.

Toimintatila	ProSpeckz-noodin energiankulutus [122]	Toteutetun noodin energiankulutus	Parannus prosentteina
Lepotila	1 mW	54,9 $\mu$ W	1721 %
CPU aktiivinen	17 mW	24,3 mW @ 2 MIPS	-30 %
		11,4 mW @ 1 MIPS	49 %
		9,9 mW @ 0,5 MIPS	72 %
Lähetystila	80 mW	71,4 mW @ 2 MIPS	12 %
		58,5 mW @ 1 MIPS	37 %
		57 mW @ 0,5 MIPS	40 %
Vastaanottotila	88 mW	84,3 mW @ 2 MIPS	4 %
		71,4 mW @ 1 MIPS	23 %
		69,9 mW @ 0,5 MIPS	26 %

Taulukko 7 - ProSpeckzin ja toteutetun anturinoodin energiankulutus eri tiloissa



### 5.5.3 Toteutetun anturinoodin vertailu muihin anturinoodeihin

Verrattaessa toteutetun PSoC:ta käyttävän anturinoodin energiankulutusta muihin luvussa 3.1 käsiteltyihin moderneihin anturinoodeihin havaitaan, että sen energiankulutus on samaa suuruusluokkaa muiden anturinoodien kanssa. Taulukko 8 esittelee anturinoodien vertailun. Lisäksi taulukossa on laskennallinen toiminta-aika. Oletuksena on, että noodit viettävät ajastaan 1 % aktiivisena, 1 % dataa lähettäen ja 1 % vastaanottaen sekä käyttävät kahta suurikapasiteettista LR6-paristoa (yht. 8,4 Wh) energianlähteenä. PSoC:n energiankulutus on kellotaajuudella, jolla saavutetaan 1 MIPS laskentateho. Käytännössä PSoC:ta käyttävä noodi sijoittuu toiminta-ajassa toiseksi viimeiseksi ja on vain noin neljänneksen energiatehokkainta TUTWSN Temperature Nodea huonompi. Myös tulee ottaa huomioon se, että noodien suorituskyvyt eivät ole identtisiä. Kuitenkaan tätä ei voida normeerata, koska saatavilla ei ole tarkkoja tietoja kaikkien eri noodien suorituskyvystä.

Anturinoodi	Kulutus lepotilassa	Kulutus $\mu$ C aktiivisena	Kulutus lähetyksessä	Kulutus vastaanotossa	Laskettu toiminta-aika
ENS Platform [36]	183,2 $\mu$ W	10,7 mW	72,2 mW	80,3 mW	193 vrk
FireFly [48]	50 $\mu$ W	24 mW	52,1 mW	59,1 mW	249 vrk
KMOTE [49]	20,1 $\mu$ W	4,5 mW	57,9 mW	63,3 mW	274 vrk
TinyNode [51]	15,3 $\mu$ W	5,4 mW	75 mW	47,4 mW	270 vrk
TUTWSN Temperature Node [47]	37 $\mu$ W	3,17 mW	42,2 mW	60,2 mW	320 vrk
PSoC noodi	54,9 $\mu$ W	11,4 mW	58,5 mW	71,4 mW	240 vrk

Taulukko 8 - Modernien ja toteutetun noodin energiankulutus ja laskennallinen toiminta-aika

Taulukossa 9 on koottuna luvussa 3.1 esiteltyjen anturinooidien mikro-ohjain, laskentateho ja muistien määrät yhdessä toteutetun PSoC:ta käyttävän noodin kanssa. Koska osasta noodeista ei ole tietoa näiden laskentatehosta, tässä on esitetty arvio, joka pohjautuu tietoon noodin energiankulutuksesta ja mikro-ohjaimen energiatehokkuudesta. Taulukosta havaitaan, että PSoC:ta käyttävän noodin laskentateho ja eri muistien määrät ovat muihin verrattuna vähäisiä, mutta silti samassa suuruusluokassa.

<b>Anturinoodi</b>	<b>Mikro-ohjain</b>	<b>Laskentateho<sup>9</sup></b>	<b>Muistin määrä</b> RAM / ohjelmamuisti
ENS Platform [36]	MSP430F2410	≤ 11 MIPS	4 kt / 56 kt
FireFly [48]	ATmega32L	8 MIPS [62]	2 kt / 32 kt
KMOTE [49]	MSP430F1611	≤ 6 MIPS	2 kt / 60 kt
SENTIO [50]	Atmega-perhe	8 MIPS [62][63]	1-8 kt / 16 - 256 kt
TinyNode [51]	MSP430F1611	≤ 7 MIPS	10 kt / 48 kt
TUTWSN Temperature Node [47]	PIC18LF4620	0,2 – 0,5 MIPS	~4 kt / 64 kt
PSoC-anturinoodi	CY8C29466	0,5 - 2 MIPS	2 kt / 32 kt

Taulukko 9 - PSoC sekä alaluvun 3.1 anturinooidien mikro-ohjaimet, näiden laskentateho ja muistien määrät

---

<sup>9</sup> Laskentateho ENS-alustan [36], KMOTEn [49] ja TinyNoden [51] kohdalla on arvio laskentatehon ylärajasta. Tämä perustuu tietoon sekä MSP430-mikro-ohjaimen virrankulutuksesta yhden MIPSin laskentatehoa kohden [68], että anturinoodin energiankulutuksesta tilassa, jossa vain mikro-ohjain on aktiivisena.

TUTWSN Temperature Noden laskentateho on myös arvio, joka perustuu tietoon noodin virrankulutuksesta [47] ja eri kellotaajuuksilla saatuun laskentatehoon sekä tästä aiheutuvaan virrankulutukseen [66][alaluku 3.2.2].

Verrattaessa PSoC-noodia muihin anturinoodeihin analogisten antureiden liitántärajapintojen osalta voidaan havaita, että tässä suhteessa PSoC on ylivoimainen. Alaluvun 3.2 mikro-ohjaimissa ei ole minkäänlaisia analogisten signaalien vahvistukseen tai suodatukseen liittyviä toimintoja. AD-muunninten parametrit eri mikro-ohjaimissa ovat seuraavat:

- MSP430F1611 & MSP430F2410 [70]  
Käyttää ns. Successive Approximation –AD-muunninta, 12 bitin resoluutio, 200 kHz näytteenottotaajuus, 8 multipleksattua kanavaa
- ATmega-sarja [62][63]  
Käyttää ns. Successive Approximation –AD-muunninta, 10 bitin resoluutio, 15 kHz näytteenottotaajuus, 8 multipleksattua kanavaa, suunniteltu alle 10 k $\Omega$  lähdeimpedansseille  
Kaksi differentiaalista kanavaa, enimmillään 200x vahvistus
- PIC18LF4620 [66]  
Käyttää ns. Successive Approximation –AD-muunninta, 10 bitin resoluutio, 100 kHz näytteenottotaajuus, 13 multipleksattua kanavaa, suositeltu lähteen impedanssi enintään 2,5 k $\Omega$ .
- PSoC [113][152]  
Useita eri tyyppisiä AD-muuntimia (mm. ns. successive approximation ja delta-sigma), 6-14 bitin resoluutio muuntimesta riippuen, jopa 65,5 kHz näytteenottotaajuus muuntimesta ja resoluutiosta riippuen, 8 multipleksattua kanavaa, soveltuu myös suuren impedanssin lähteille

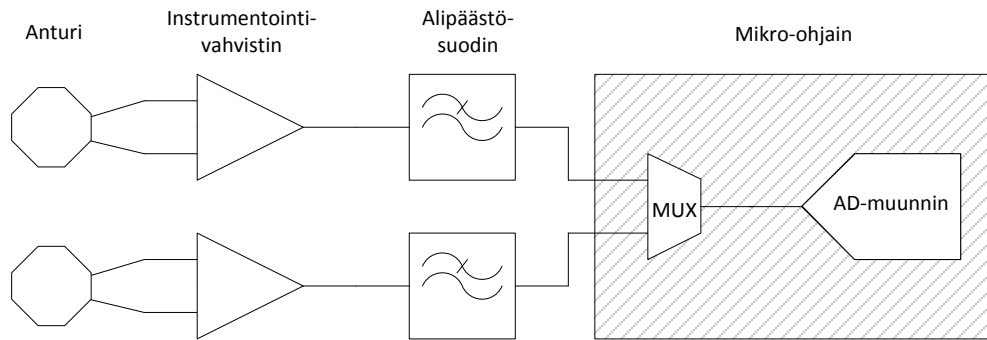
Kaikissa on mahdollista käyttää joko sisäistä tai ulkoista referenssijännitettä. Eri mikro-ohjainten muunninten epälineaarisuus ja kohina on pääpiirteittäin samaa tasoa.

## **5.6 PSoC:lla saavutettavat edut käytännön mittausjärjestelmissä**

Tämä alaluku käsittelee mittausjärjestelmissä saatavia käytännön etuja PSoC:ta käytettäessä. Tällaisia ovat esim. kokonaisenergiankulutus eri tilanteissa, piirilevyiltä vaadittu pinta-ala tai mittauksessa tarvittavien komponenttien kustannukset.

### **5.6.1 Signaalinparannusjärjestelmän vaikutus energiankulutukseen**

PSoC:n sisäisillä lohkoilla on mahdollista toteuttaa useita erilaisia analogisten signaalien käsittelyyn soveltuvia järjestelmiä ja kytkentöjä ilman ulkoisia komponentteja. Käsiteltäessä näiden energiatehokkuutta sekä vaikutusta koko järjestelmän energiankulutukseen tätä analysoidaan kuvitteellisen mittausjärjestelmän kautta. Tässä järjestelmässä oletetaan olevan kaksi eri anturia, joiden molempien antama signaali vahvistetaan instrumentointivahvistimella ennen alipäästösuodatusta. Pääpiirteittäin vastaavia kytkentöjä käytetään useissa eri mittausjärjestelmissä, missä alipäästösuodatus toimii samalla myös laskostumisenestosuotimena. Kuva 13 esittää lohkokaaavion kuvitteellisesta mittausjärjestelmästä, joka on toteutettu käyttäen tavanomaista, alaluvussa 3.2 esiteltyä mikro-ohjainta. Käytettäessä PSoC:ta voidaan mittausjärjestelmä toteuttaa siten, että instrumentointivahvistin ja alipäästösuodin toteutetaan konfiguroitavien lohkojen avulla ilman ulkoisia komponentteja.



Kuva 13 - Kuvitteellinen mittausjärjestelmä toteutettuna tavanomaisella mikro-ohjaimella

PSoC:n instrumentointivahvistin [149] on mahdollista toteuttaa kahden tai kolmen operaatiovahvistimen kytkentänä. Käytännössä eroina ovat yhteismuotoisen häiriön sieto, suurin mahdollinen vahvistus, taajuusvaste ja virrankulutus. Energiatehokkain on  $270 \mu\text{A}$  kulutettava vahvistin, jossa suurin vahvistus on 16, CMRR 54 dB ja kaistanleveys vahvistuksesta riippuen n. 2 – 100 kHz. Kohinajännite on  $354 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ . Käytännössä vahvistimen suorituskykyä voi parantaa eri tavoin, mutta tämä tapahtuu energiankulutuksen kustannuksella. Esimerkiksi tarvittaessa lisää vahvistusta on mahdollista kytkeä toinen vahvistin, joka lisää virrankulutusta vähintään  $142 \mu\text{A}$ :lla [148]. Näin vahvistuskertoimeksi saadaan yhteensä 768. Instrumentointivahvistimen kohinajännitteen pudotus tasoon  $112 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$  puolestaan nostaa virrankulutuksen suurimmillaan noin yhden milliampeerin tasolle.

Verrattaessa PSoC:n instrumentointivahvistimia kaupallisesti saatavilla oleviin vahvistimiin voidaan tehdä useita havaintoja. Käytännössä esimerkiksi kaikki Farnell-elektroniikkatukkurin jälleenmyymät instrumentointivahvistimet [153] ovat suorituskyvyltään (vahvistus, kohina, häiriönsieto jne.) *kaikilta osin parempia* verrattuna PSoC:lla toteutettuihin [149]. Taulukossa 10 on esitelty kaksi eri

instrumentointivahvistinta ja PSoC:n vahvistinten kaksi eri ääripäätä: vähiten energiaa kuluttavin ja suorituskyvyltään laadukkain. Instrumentointivahvistimet on ensisijaisesti valittu hinnan perusteella: MCP6N11 [154] on halvin tukkurin edustama vahvistin ja INA321 [155] puolestaan on halvin alle 100  $\mu\text{A}$  virrankulutuksella. Vertailun yllättävin tulos on PSoC:n laadukkaimman instrumentointivahvistimen suuri virrankulutus ja tästä huolimatta heikko yhteismuotoisen häiriön sieto.

Vahvistin	Kaistanleveys	Virrankulutus	CMRR	PSRR	GAIN
MCP6N11 [149]	500 kHz	800 $\mu\text{A}$	115 dB	112 dB	$\leq 100$
INA321 [154]	500 kHz	40 $\mu\text{A}$	94 dB	86 dB	$\leq 1000$
PSoC:n vähävirtaisin [155]	2 kHz	270 $\mu\text{A}$	54 dB	42 dB	$\leq 16$
PSoC:n laadukkain [155]	200 kHz	3,4 mA	60 dB	62 dB	$\leq 48$

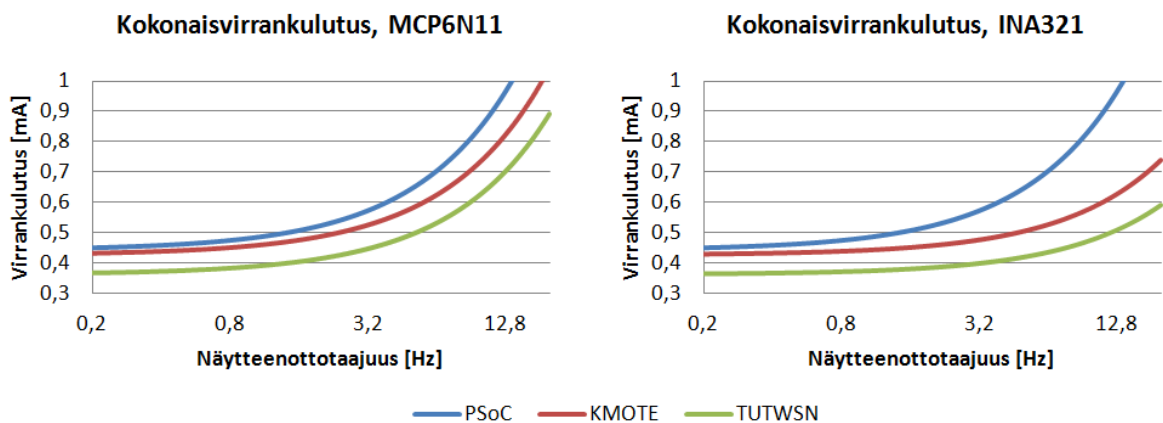
Taulukko 10 - Instrumentointivahvistinten ominaisuuksien vertailu

Järjestelmän kokonaisenergiatehokkuutta voidaan arvioida siten, että lasketaan anturinoodin keskimääräinen virrankulutus, jossa otetaan huomioon noodin oma virrankulutus eri tiloissa sekä vahvistimen vaikutus. Vahvistimen energiankulutuksen laskennassa tulee ottaa huomioon sen vain jaksottainen käyttö. Oletuksena on, että yhden näytteenoton aikana vahvistin on käytössä 10 ms ajan<sup>10</sup>. Lisäksi oletetaan, että anturinoodi on muutoin aktiivisena 1 % ajasta, sekä käyttää 1 % lähettäen ja 1 % vastaanottaen. Kuvaaja 2 esittää kolmen eri

---

<sup>10</sup> Laskennassa oletetaan, että 10 ms on riittävä aika vahvistinten käynnistymiseen ja siihen, että AD-muuntimelta saadaan näyte. Se ei kuitenkaan täysin vastaa todellisuutta: MCP6N11 [154] käynnistyy lepotilasta tyypillisesti 20 ms ajassa, INA321 [155] n. 10  $\mu\text{s}$  ajassa. PSoC:n vahvistinten käynnistymisnopeuksia ei ole dokumentoitu. 10 ms edustaakin vahvistinten keskiarvoa ja tätä käytetään laskennan perusteena.

noodin keskimääräistä virrankulutusta näytteenottotaajuuden funktiona. Kaksi noodeista, KMOTE ja TUTWSN Temperature Node, ovat energiatehokkaimmat luvussa 3.1 esitellyistä noodeista ja kolmas on PSoC:lla toteutettu noodi. Laskennassa KMOTEn ja TUTWSN Temperature Noden käyttämät vahvistimet ovat MCP6N11 [149] ja INA321 [154]. PSoC:n laskentateho on yhden MIPSin tasolla ja sen sisäisillä lohkoilla toteutetut vahvistimet toimivat energiatehokkaimmassa tilassa. Yhdessäkään laitteessa ei ole mukana mahdollisen alipäästösuodatuksen aiheuttamaa virrankulutusta.



Kuvaaja 2 - Anturinooidien kokonaisvirrankulutus eri vahvistinpiirein

Edellä olevasta kuvaajasta 2 ja taulukosta 10 havaitaan selkeästi, että vaikka PSoC:n instrumentointivahvistin saadaankin vain vähän virtaa kuluttavaksi, sillä toteutettu noodi ei kuitenkaan vastaa kokonaisuudessaan toista energiatehokasta anturinoodia, jossa on erillinen vahvistinpiiri. Tähän lopputulokseen ei myöskään olennaisesti vaikuta ulkoisen vahvistinpiirin tyyppi: tilanne on käytännössä sama halvimalla ja energiatehokkaammalla vahvistimella.

PSoC:lla on mahdollista toteuttaa useita eri tyyppisiä suotimia [156], kuten alipäästö-, ylipäästö-, kaistanpäästö- tai kaistanestosuotimia. Olennaista PSoC:lla toteutetuissa suotimissa on, että näiden kaikkia ominaisuuksia, kuten rajataajuuksia, on mahdollista muuttaa myös normaalin käytön aikana. Tähän mukautuvuuteen sisältyy jopa se, että suodinten tyyppiäkin on mahdollista vaihtaa käytön aikana. PSoC:ssa toteutettu alipäästösuodin [157][158][159][160] voi olla joko toisen tai neljännen asteen Bessel, Butterworth, Chebyshev tai elliptinen. Rajataajuudet voivat vaihdella välillä 20 Hz – 150 kHz. Virrankulutus riippuu vahvasti suotimen asteiden määrästä ja rajataajuudesta: parhaimmillaan 200  $\mu$ A, mutta suurilla taajuuksilla neljännen asteen suotimessa esimerkiksi 1,2 mA. Syynä taajuuden vaikutukseen on kytketyn kondensaattorin näytteenottotaajuus ja tätä kautta virrankulutus.

Verrattaessa PSoC:n alipäästösuodinta ulkoisiin, aktiivisiin suodinpiireihin havaitaan, että tässä suhteessa PSoC:n toteutus on lähes kaikkiin muihin verrattuna energiatehokkaampi. Taulukko 11 esittelee Farnell-elektroniikkatukkurin kautta saatavia analogisia [161] ja kytkettyyn kondensaattoriin [162] perustuvia suodinpiirejä. Valinnan perusteena on soveltuva käyttöjännite (3,3 V), suhteellisen alhainen virrankulutus yhdessä alhaisille taajuuksille ulottuvan rajataajuuden kanssa. Lisäksi kaikilla suotimilta vaaditaan vaimennusta estokaistalla vähintään 40 dB ja jyrkkyyttä 20 dB per oktaavi. Taulukossa on myös PSoC:lla toteutettu energiatehokkain sekä ominaisuuksiltaan laadukkain alipäästösuodin. Kaikkien rajataajuutta on mahdollista säätää joko yhtä vastusta tai piirille syötettyä taajuutta muuttamalla.

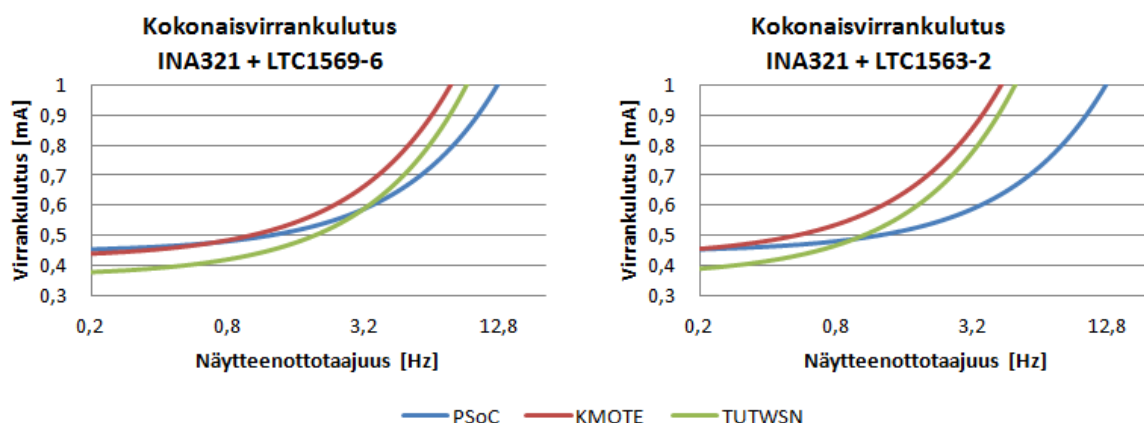


Alipäästösuodin	Tyyppi	Aste	Rajataajuus	Virran- kulutus
LTC1569-7 [163]	Analoginen	10	2 kHz – 150 kHz	6 mA
LTC1569-6 [164]	Analoginen	10	1 kHz – 64 kHz	3 mA
LTC1563-2 [165]	Analoginen, Butterworth	4	256 Hz – 256 kHz	6 mA
LTC1068 [166]	SC, nelikko- Butterworth	2	1 Hz – 50 kHz	3,5 mA
MAX7414 [167]	SC, Butterworth	5	1 Hz – 15 kHz	1,2 mA
MAX7427 [168]	SC, elliptinen	5	1 Hz – 12 kHz	0,8 mA
MAX7407 [169]	SC, elliptinen	8	1 Hz – 10 kHz	2 mA
PSoC:n vähävirtaisin toteutus [157]	SC, useita eri topologioita	2	20 Hz – 30 kHz	200 $\mu$ A
PSoC:n laadukkain toteutus [158]	SC, useita eri topologioita	4	20 Hz – 150 kHz	1,2 mA

Taulukko 11 - Puolijohdesuodinpiirejä ja PSoC:n energiatehokkain sekä laadukkain suodin

Laskettaessa kuvan 13 mukaisen mittausjärjestelmän kokonaisenergiankulutus otetaan huomioon anturinooidien oma virrankulutus ja vahvistinten sekä alipäästösuodinten vaikutus. Noodin oma energiankulutus on laskettu tilanteessa, jossa se on 1 % ajasta aktiivisena sekä lähetys- ja vastaanottotiloissa, eli toimii 97 % toiminta-aikasuhteella. Vahvistinten ja suodinten oletetaan olevan aktiivisena aina yhtä näytteenottoa varten 10 ms ajan. Kuvaaja 3 esittää kolmen eri anturinooidin keskimääräistä kokonaisvirrankulutusta näytteenottotaajuuden funktiona käyttäen energiatehokkaita instrumentointivahvistimia ja kahta eri analogista suodinpiiriä. PSoC on laskettu 1 MIPS laskentateholla ja energiatehokkaimmilla vahvistimilla sekä suotimilla. Kaksi muuta noodia, KMOTE ja TUTWSN

Temperature Node, ovat energiatehokkaimmat luvussa 3.1 esitellyistä noodeista. [149][154][155][alaluku 5.5.3][164][165]



Kuvaaja 3 - Anturinooidien virrankulutus eri suodinpiirein

Edellä olevasta kuvaajasta 3 havaitaan, että PSoC:lla toteutettu mittausjärjestelmä on tietyissä tilanteissa energiatehokkaampi kuin toisella anturinoodilla ja ulkoisella mittauskytkennällä toteutettu järjestelmä. Tulokseen vaikuttaa kuitenkin huomattavasti komponenttien oman virrankulutuksen lisäksi myös näytteenoton kesto ja taajuus. Esimerkiksi KMOTE-noodi kahdella energiatehokkaalla INA321-instrumentointivahvistimella ja kahdella LTC1569-6 –suotimella on energiatehokkaampi PSoC:lla toteutettuun järjestelmään verrattuna, jos yksittäinen mittaus kestää enintään 10 ms ja toistuu alle 0,8 Hz taajuudella.

Tämänkaltainen vertailu ei ole kuitenkaan täysin kattava, eikä sen tulosta voi yleistää kaikkiin tilanteisiin. Alipäästösuodatus on mahdollista toteuttaa valmiiden suodinpiirien lisäksi myös erillisillä operaatiovahvistimilla, jotka voivat olla tarvittaessa huomattavan vähävirtaisia. Esimerkiksi LP324 [170] on Texas Instrumentsin valmistama nelikko-operaatiovahvistin, joka käyttää aktiivisena

vain 85  $\mu\text{A}$ . Alipäästösuodatus on myös mahdollista toteuttaa pelkin passiivikomponentein [169 s. 35-39]. Operaatiovahvistimin tai passiivikomponentein toteutetussa suodatuksessa rajataajuuksien muuttaminen ei tosin ole helposti käytön aikana mahdollista. Tarvittaessa sellaista signaalinparannuskytkentää, joka koostuu useista eri lohkoista, ja jossa tulee olla helposti vaihdettavat parametrit, voi PSoC olla energiatehokkaampi tiettyä mittaustaajuutta useammin tehtävässä mittauksessa. Tähän kuitenkin vaikuttavat merkittävästi komponenttien valinnat ja PSoC-sisäisiltä toiminnoilta vaaditut ominaisuudet. Mikäli kytkennässä vaaditaan suurta laatua, ei PSoC ole realistinen vaihtoehto. Jos kytkennältä vaaditaan suurta joustavuutta ja mukautuvuutta, on PSoC realistinen vaihtoehto koska kaikkia sen sisäisten lohkojen parametreja ja kytkentöjä on mahdollista muokata käytön aikana. Eri parametrien suuren määrän vuoksi tuleekin arvio todellisesta energiankulutuksesta tehdä kaikissa tilanteissa aina erikseen.

### **5.6.2 Signaalinparannusjärjestelmän vaikutus laitteen hintaan ja kokoon**

Tarkasteltaessa alaluvun 5.6.1 signaalinparannuskytkennän komponenttien hintaa havaitaan, että yhdessä nämä voivat muodostaa merkittävän osan anturinoodin komponenttien kustannuksista. Taulukkoon 12 on koottu luvussa 3.1 käsiteltyjen anturinoodin mikro-ohjaimet, sekä näiden hintatiedot. Lisäksi tässä on luvussa 5.6.1 käsiteltyjen vahvistinten sekä analogisten suodinten hintatietoja. Hinnat ovat Farnell-komponenttitukkurin [172] yksikköhintoja. Mikäli komponentista on useita eri koteloiteja, on valittu halvin pintaliitoskoteloitu malli. Taulukossa on lisäksi kunkin komponentin piirilevyiltä vaatima pinta-ala, mutta tähän ei ole sisällytetty komponentin mahdollisesti vaatimia passiivisia oheiskomponentteja.

Komponentti	Selite	Hinta	Pinta-ala
MSP430F1611 [70]	Mikro-ohjain käytössä KMOTE-noodissa	15,19 €	81 mm <sup>2</sup>
MSP430F2410 [173]	Mikro-ohjain ENS-alustassa	10,61 €	81 mm <sup>2</sup>
PIC18LF4620 [66]	Mikro-ohjain TUTWSN Temperature Nodessa	7,30 €	144 mm <sup>2</sup>
ATMega32L [62]	Mikro-ohjain FireFly-noodissa	8,56 €	49 mm <sup>2</sup>
CY8C29466 [115]	PSoC mikro-ohjain	9,45 €	80 mm <sup>2</sup>
INA321 [154]	Vähävirtainen instrumentointivahvistin	2,49 €	20 mm <sup>2</sup>
MCP6N11 [149]	Halpa instrumentointivahvistin	1,84 €	6 mm <sup>2</sup>
LTC1569-7 [163]	Alipäästösuodinpiiri, 2 – 150 kHz	14,61 €	30 mm <sup>2</sup>
LTC1569-6 [164]	Alipäästösuodinpiiri, 1 -64 kHz	18,99 €	30 mm <sup>2</sup>
LTC1563-2 [165]	Alipäästösuodinpiiri, 0,256 – 256 kHz	4,93 €	19 mm <sup>2</sup>

Taulukko 12 - Anturinoodeissa ja mittauskytkennöissä käytettävien komponenttien yksikköhinnat ja niiden vaatimat pinta-alat

Taulukosta 12 voidaan havaita, että hinnaltaan PSoC-mikro-ohjain sijoittuu selkeästi alaluvun 3.1 anturinooidien halvimpien mikro-ohjainten joukkoon. Mikäli mittauskytkennässä käytetään erillisiä vahvistinkomponentteja, PSoC on huomattavan kustannustehokas, jos vahvistimet on mahdollista toteuttaa PSoC:n sisäisin lohkein, eikä ulkoisia komponentteja tarvita. Järjestelmässä, jossa kytkennässä tulee käyttää aktiivista alipäästösuodinpiiriä, PSoC on selkeästi taloudellisin vaihtoehto, mikäli vain sen sisäisten lohkojen suorituskyky on riittävä. Vaaditun pinta-alan puolesta PSoC on kooltaan pientä tasoa. Mikäli järjestelmässä on tarpeen käyttää ulkoisia suodin- tai vahvistinkomponentteja on PSoC:lla toteutettu vastaava järjestelmä jo muutaman aktiivikomponentin ja näiden oheiskomponenttien jälkeen pinta-alaltaan selkeästi pienin ja kustannustehokkain.

## 5.7 Noodin toteutuksesta, vertailusta muihin noodeihin, PSoC:n käytöllä saatavista eduista ja sen soveltuvuudesta

PSoC-mikro-ohjaimella toteutettu anturinoodi on teknisesti yksinkertainen laite, jossa komponenttimäärä on hyvin vähäinen. Sen radiopiiri ja jänniteregulaattori ovat vähän energiaa kuluttavia ja toimivat odotusten mukaan. Noodin ohjelmisto on toteutettu modulaariseksi ja tälle on toteutettu SpeckMAC-D-kilpavarausprotokolla ja tulvahaku pakettien reititykseen. Noodit mittaavat ympäristöstään lämpötilaa ja välittävät tämän tiedon dataa keräävälle laitteelle. Järjestelmään kuuluu lisäksi www-käyttöliittymällä varustettu palvelu noodien asetusten hallintaan ja verkosta saadun datan visualisointiin. Toteutettu kahdenkymmenen noodin anturiverkko toimii kaikin puolin moitteetta.

Verrattuna edeltävään vastaavaan laitteeseen, eli ProSpeckz-anturinoodiin, toteutettu noodi on merkittävästi kehittyneempi käytännössä kaikilla eri osaluokilla. Etenkin lepovirrankulutuksessa erot ovat todella suuria: ProSpeckz 1 mA, toteutettu noodi n. 14  $\mu$ A. Näin ollen mitkään edeltävät kokemukset PSoC:n suuresta lepovirrankulutuksesta eivät pidä paikkaansa. Verrattuna muihin moderneihin anturinoodeihin PSoC-noodin energiankulutus on samassa suuruusluokassa, mutta se sijoittuu noodien viimeisten joukkoon. Laskentaresurssien puolesta toteutetun noodin enimmäislaskentateho ylittää selkeästi modernien noodien heikkotehoisimman, mutta on silti vain neljäsosa tehokkaimmasta anturinoodista. Muistiresurssien puolesta noodi on pääpiirteittäin samalla tasolla muiden modernien noodien kanssa, mutta vähäinen RAM-muistin määrä saattaa asettaa noodin käytölle rajoituksia tietyissä sovelluksissa.

Muiden modernien anturinooidien käyttämien mikro-ohjainten analogisten signaalien käsittelyyn liittyvät järjestelmät eivät vastaa miltään osin PSoC:lla toteutettuja ratkaisuja. PSoC:n avulla on mahdollista toteuttaa monipuolisia vahvistus-, suodin- ja AD-muunninjärjestelmiä. PSoC:n soveltuvuutta anturiverkkoihin puoltavat myös sen useat eri sovellukset mitä moninaisimmissa mittausjärjestelmissä. Sen sisäisillä lohkoilla on toteutettu useita erilaisia datankeruulaitteita eri ympäristöihin hyvin kokemuksiin. Käytännössä se soveltuu käytettäväksi kaikissa kappaleen 2.2 esittelemissä sovelluskohteissa.

Useista eri laitteista (suotimista, vahvistimista jne.) koostuvissa mittausjärjestelmissä PSoC-noodi voi olla energiataloudellisempi kuin muut modernit anturinooidit. Sen sisäisillä rakenteilla toteutetut eri kytkennät ja etenkin suotimet ovat vähävirtaisia verrattuna kytkentöihin, jotka on toteutettu erillisistä puolijohteista. Tietyissä tilanteissa PSoC:ta käyttävä anturinooidi voi olla energiatehokkaampi, kuin jokin toinen anturinooidi yhdessä ulkoisilla komponenteilla toteutetun kytkennän kanssa. Tätä tulosta ei kuitenkaan voi yleistää kaikkiin tilanteisiin, koska se riippuu puhtaasti sovelluksesta, käytettävistä antureista ja toteutetusta kytkennästä, komponenttien valinnoista ja mittaustaaajuudesta. Vaadittaessa mittauskytkennältä suurta laatua ei PSoC millään osa-alueella voita ulkoisin komponentein toteutettua kytkentää.

Mikro-ohjainten kustannuksia verrattaessa PSoC sijoittuu hinnaltaan keskiluokkaan, ja on kalleimpia mikro-ohjaimia jopa kolmanneksen halvempi. Analysoitaessa muita aktiivikomponentteja sisältävän mittausjärjestelmän hintaa ja sen käyttämää pinta-alaa erottuu PSoC:lla toteutettu noodi selkeästi muista. PSoC:lla toteutettu järjestelmä on merkittävästi halvempi, jos on tarve käyttää esimerkiksi operaatio- tai instrumentointivahvistimia tai erillisiä puolijohdesuotimia. Tämä koskee kuitenkin vain sellaisia sovelluksia, joissa

PSoC:n sisäänrakennettujen lohkojen suorituskyky on riittävä. Pinta-alaltaan PSoC-toteutus on hinnan tavoin kilpailukykyinen.

Tässä tutkielmassa käsitellyistä anturinoodeista tai mikro-ohjaimista PSoC on käytännössä ainoa, jolla voidaan toteuttaa ns. älyanturi. Älyanturissa [9, luku 33.7.1] noodi on mahdollista konfiguroida käytön aikana uudelleen ja sen alhaisen tason toimintaparametreja on mahdollista muuttaa. PSoC:n analogisten ja digitaalisen lohkojen rakennetta ja näillä toteutettujen oheislaitteiden tyyppejä ja parametreja on mahdollista muokata lähes vapaasti normaalin käytön aikana. Lisäksi PSoC on myös mahdollista ohjelmoida anturiverkon yli. Tällainen älyanturi voidaankin asentaa kohteeseen, ja sen mittauslaitteisto on mahdollista sovittaa halutun kaltaiseksi asennuksen *jälkeen*. Käyttökohteina tällaisille järjestelmille ovat sellaiset ympäristöt, joiden todellinen luonne saattaa muuttua mittausjakson aikana ja eri kohteet joissa halutaan käyttää yhdenmukaista anturinoodilaitteistoa. Toteutettaessa edes lähes vastaavalla tavalla muokattavissa oleva järjestelmä alaluvun 3.1 laitealustoilla tai alaluvun 3.2 mikro-ohjaimilla vaatisi tämä huomattavan laajat ulkoiset kytkennät. Käytön aikana säädettävä analogisten komponenttien toiminta puolestaan johtaisi merkittävään energiankulutuksen, fyysisen koon ja kustannusten kasvuun.

PSoC on soveltuva mikro-ohjain käytettäväksi langattomissa anturiverkoissa. Sen käytöllä voidaan saavuttaa merkittäviä etuja mittausjärjestelmissä, joissa pyritään laitteen pieneen kokoon tai pieniin kustannuksiin. Energiankulutukseltaan PSoC ei itsessään ole erityisen vähävirtainen, mutta jos mittausjärjestelmä tarvitsee esimerkiksi instrumentointivahvistimia tai puolijohdesuotimia, on PSoC:lla toteutettu noodi tietyissä tilanteissa energiatehokkaampi. Kuitenkaan antureiden mittauksessa suurta tarkkuutta tai laatua vaativiin järjestelmiin PSoC ei ole soveltuva mikro-ohjain.

## 5.8 Jatkotutkimus

Luonnollisen jatkeen tällä tutkielmalle muodostavat PSoC 3 ja PSoC 5 –perheiden mikro-ohjainten soveltuvuuden tutkiminen. Kummastakaan perheestä ei ole julkaistu syksyyn 2012 mennessä mitään tieteellisissä julkaisuissa<sup>11</sup>, joka viittaisi näiden käyttöön langattomissa anturiverkoissa tai muissa vastaavissa sovelluksissa. Kuitenkin näiden mm. laskentateho, muistin määrä ja virrankulutus ovat huomattavasti paremmat PSoC 1 -perheen mikro-ohjaimiin verrattuna [111][112]. Voidaankin olettaa, että näillä toteutettu anturinoodi olisi selkeästi nyt toteutettua noodia parempi useilla tavoilla mitattuna.

Alaluku 4.2.2 käsittelee reititysprotokollien resurssivaatimuksia. Asia on olennainen koska PSoC:n muistin määrä muihin moderneihin anturinoodeihin verrattuna on vähäinen. Kattavaa tutkimusta eri langattomiin anturiverkkoihin soveltuvien protokollien muistin tai laskentaresurssien käytöstä ei ole tehty. Mitkä olisivat soveltuvien protokollien todelliset resurssivaatimukset eri tilanteissa?

Alaluku 5.6, jossa käsitellään PSoC:lla saatavia etuja todellisissa mittausjärjestelmissä, on sisällöltään pinnallinen eikä käsittele asiaa syvällisesti. Asiaa tulisikin tutkia laajemmin ja selvittää PSoC:n analogisen alijärjestelmän optimaalisin käyttökohteen ja todellinen suorituskyky. Lisäksi tulisi kattavasti selvittää milloin PSoC:lla toteutettu mittausjärjestelmä on eri mittarein arvioituna parempi, kuin erillisistä puolijohteista koottu. Tässä tulisi ottaa huomioon komponenttien energiankulutus, pinta-ala ja myös näiden soveltuvuus ominaisuuksien puolesta eri mittauskohteisiin.

---

<sup>11</sup> Tarkistettu 1.10.2012 mm. Google Scholar (<http://scholar.google.com>), arXiv (<http://arxiv.org>), ja IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org>) -palveluista.



## 6 Yhteenveto

Langattomat anturiverkot ovat järjestelmiä, jotka koostuvat yksittäisistä laitteista, noodeista. Näiden avulla on mahdollista mitata monia suureita eri ympäristöissä. Sovelluskohteet ulottuvat koti- ja teollisuusautomaatiosta terveydenhuollollisiin sekä sotilassovelluksiin asti. Mittauskentällä yksittäisiä antureita saattaa olla satoja, tai jopa tuhansia. Anturiverkon toiminnan kannalta olennaista on energiatehokas toiminta ja se, että yksittäiset anturinoodit välittävät edelleen myös toistensa liikennettä. Laitteiden keräämät mittaustulokset ja muu data välitetään dataa keräävälle laitteelle joka lopulta mahdollistaa datan analysoinnin. Anturinoodien välistä kommunikaatiota hallitsevat MAC- ja reititysprotokollat. Ensimmäinen määrittelee kuinka viestintä tapahtuu vierekkäisten noodien välillä. Jälkimmäisen vastuulla on löytää paketeille paras reitti koko anturiverkon halki. Näillä protokollilla on useita eri toimintatapoja ja niiden ominaisuudet poikkeavat vahvasti toisistaan. Myös protokollien laite- ja resurssivaatimukset eroavat toisistaan osan vaatiessa tiettyjä ominaisuuksia käytettävältä laitteistolta.

Yksittäinen anturinoodi koostuu neljästä eri yksiköstä: mikro-ohjaimesta, antureista, radiolaitteesta ja virtalähteestä. Moderneissa, vuosina 2006...2012 julkaistuissa anturinoodeissa käytetään muutamaa tavanomaista mikro-ohjainta (mm. AVR, PIC & MSP430) ja radiopiiriä, mutta näiden ominaisuudet ovat pääpiirteittäin yhtenevät. Käytännössä näillä noodeilla saavutetaan pitkiä toiminta-aikoja virransäästöominaisuuksien ja energiatehokkaiden protokollien ansiosta.

Cypress Semiconductorin PSoC-mikro-ohjain poikkeaa tavanomaisista mikro-ohjaimista siten, että siinä on useita vapaasti konfiguroitavia analogisia ja digitaalisia lohkoja. Näillä on mahdollista toteuttaa mm. monipuolista analogisten

signaalien käsittelyä ilman ulkoisia komponentteja. PSoC:ta käyttäen on toteutettu vain yksi moderneja noodeja vastaava laitealusta, ProSpeckz. Kirjallisuudessa tätä on käytetty esimerkkinä PSoC:n soveltumattomuudesta anturiverkkoihin sen suuren lepovirrankulutuksen johdosta. PSoC-mikro-ohjainta on kuitenkin käytetty hyvin kokemuksiin muiden anturinooidien kanssa eri antureiden liittämässä

Tätä tutkielmaa varten toteutettiin yksinkertainen PSoC-mikro-ohjaimen pohjautuva anturinoodi ja näistä koottiin anturiverkko. Verkosta saatava tieto välitettiin reaaliajassa Internetiin kytketylle palvelimelle, joka mm. visualisoi saadun datan. Anturinoodista tehdyistä mittauksista kävi ilmi, että energiankulutukseltaan PSoC:illa toteutettu noodi ei ole aivan samalla tasolla muiden modernien nooidien kanssa, mutta on silti samassa suuruusluokassa. Myös komponenttien valmistajien antamat tiedot puoltavat mittaustuloksia. Edeltävät julkaisut PSoC:n merkittävän suuresta lepovirrankulutuksesta sen ollessa anturinoodina eivät siten läheskään vastaa todellisuudessa saavutettavia arvoja. Käytännössä tältä osin PSoC vastaa muita moderneja anturinoodeja. PSoC:n käytön hyötyjä eniten rajoittavat tekijät liittyvät sen rajalliseen laskenta- ja muistikapasiteettiin, sekä selkeästi heikkolaatuisiin analogisiin oheislaitteisiin.

Tämän tutkielman lopputuloksena on, että PSoC on soveltuva mikro-ohjain anturiverkkoihin joissa ei käytetä paljon resursseja vaativia protokollia tai tehdä laskentaintensiivisiä toimia. Optimaalinen mikro-ohjain se on silloin, kun antureiden mittaus tapahtuu usein ja vaatii tarvittaessa mukautettavat signaalinparannuskytkennät, joilta ei edellytetä hyvää suorituskykyä. Näissä tilanteissa PSoC:lla voidaan saavuttaa muihin moderneihin anturinoodein verrattuna parempi kokonaisenergiankulutus, pienempi hinta ja fyysinen pinta-ala. Kuitenkin eri tekijöiden suuresta määrästä johtuen tulisi PSoC:n soveltuvuus arvioida aina erikseen jokaista sovelluskohdetta varten.

## Lähteet

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks - Theory and Practise*. Wiley, 2010.
- [3] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck, "Wireless underground sensor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 669–686, Nov. 2006.
- [4] L. Li, M. C. Vuran, and I. F. Akyildiz, "Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks," *Proc. Med-Hoc-Net'07*, 2007.
- [5] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, May 2005.
- [6] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [7] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdury, "Wireless multimedia sensor networks: A survey," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 14, no. 6, pp. 32–39, 2007.
- [8] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Networks*, vol. 51, no. 4, pp. 921–960, Mar. 2007.
- [9] M. Ilyas and I. Mahgoub, *Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems*. Boca Raton: CRC Press, 2005.

- [10] S.-L. (Ed. . Wu, *Wireless ad hoc networking : personal-area, local-area, and the sensory-area networks*. Boca Raton FL: Auerbach Pub., 2007.
- [11] K. Sohraby, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Hoboken N.J.: John Wiley & Sons, 2007.
- [12] X.-Y. Li, *Wireless ad hoc and sensor networks : theory and applications*. Cambridge ;;New York: Cambridge University Press, 2008.
- [13] T. Wark, P. Corke, P. Sikka, L. Klingbeil, Y. Guo, C. Crossman, P. Valencia, D. Swain, and G. Bishop-Hurley, "Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks," *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 6, no. 2, pp. 50–57, 2007.
- [14] D. D. Chaudhary, S. P. Nayse, and L. M. Waghmare, "Application of Wireless Sensor Networks for Greenhouse Parameter Control in Precision Agriculture," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 140–149, Feb. 2011.
- [15] Y. Li, Z. Wang, and Y. Song, "Wireless sensor network design for wildfire monitoring," in *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, 2006, vol. 1, pp. 109–113.
- [16] G. Werner-Allen, J. Johnson, M. Ruiz, J. Lees, and M. Welsh, "Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network," in *Wireless Sensor Networks, 2005. Proceedings of the Second European Workshop on*, 2005, pp. 108–120.
- [17] M. Castillo-Effer, D. H. Quintela, W. Moreno, R. Jordan, and W. Westhoff, "Wireless sensor networks for flash-flood alerting," in *Devices, Circuits and Systems, 2004. Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on*, 2004, vol. 1, pp. 142–146.

- [18] K. K. Khedo, R. Perseedoss, and A. Mungur, "A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 2, no. 2, pp. 31–45, May 2010.
- [19] L. Zheng, "ZigBee wireless sensor network in industrial applications," in *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference, 2006*, pp. 1067–1070.
- [20] A. J. Goldsmith and S. B. Wicker, "Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 9, no. 4, pp. 8–27, 2002.
- [21] J. A. Gutierrez, "On the use of IEEE 802.15. 4 to enable wireless sensor networks in building automation," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on, 2004*, vol. 3, pp. 1865–1869.
- [22] T. J. Dishongh and M. McGrath, *Wireless sensor networks for Healthcare Applications*. Artech House, 2010.
- [23] D. Trossen and D. Pavel, "Sensor networks, wearable computing, and healthcare Applications," *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 6, no. 2, pp. 58–61, 2007.
- [24] Fei Hu, S. Lakdawala, Qi Hao, and Meikang Qiu, "Low-Power, Intelligent Sensor Hardware Interface for Medical Data Preprocessing," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 13, pp. 656–663, Jul. 2009.
- [25] N. X. Fernando, D. N. Macklin, M. Y. Hsu, and J. W. Judy, "An embedded wireless neural stimulation and recording system," in *Neural Engineering, 2007. CNE'07. 3rd International IEEE/EMBS Conference on, 2007*, pp. 333–336.

- [26] F. Hu, Y. Xiao, and Q. Hao, "Congestion-aware, loss-resilient bio-monitoring sensor networking for mobile health applications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 27, no. 4, pp. 450–465, 2009.
- [27] B. Quach, M. Balakrishnan, D. Benhaddou, and X. Yuan, "Implementation of integrated wireless health monitoring network," in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Medical-grade wireless networks*, 2009, pp. 63–68.
- [28] V. Kaseva, T. D. Hämäläinen, and M. Hännikäinen, "A wireless sensor network for hospital security: from user requirements to pilot deployment," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, p. 17, 2011.
- [29] "IEC 60601-1, Medical Electronic Equipment - Part 1: General Requirements for Safety and Essential Performance." International Electrotechnical Commission, 1995.
- [30] J. Chinrungrueng, U. Sunantachaikul, and S. Triamlumlerd, "Smart parking: An application of optical wireless sensor network," in *Applications and the Internet Workshops, 2007. SAINT Workshops 2007. International Symposium on*, 2007, pp. 66–66.
- [31] "Energizer E91 LR6 Battery Datasheet." Energizer Holdings, Inc.
- [32] "Eveready 1215 LR6 Battery Datasheet." Eveready Battery Co.
- [33] "Akut | Farnell Suomi." [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/batteries-rechargeable>. [Viitattu: 20.10.2012].
- [34] J. (Ed. . Zheng and A. (Ed. . Jamalipour, *Wireless sensor networks : a networking perspective*. Hoboken: IEEE ;Wiley-Blackwell, 2009.
- [35] C. Park, K. Lahiri, and A. Raghunathan, "Battery discharge characteristics of wireless sensor nodes: An experimental analysis," *power*, vol. 20, p. 21, 2005.

- [36] M. Barnes, C. Conway, J. Mathews, and D. K. Arvind, "ENS: An Energy Harvesting Wireless Sensor Network Platform," 2010, pp. 83–87.
- [37] M. Kuorilehto, *Ultra-low energy wireless sensor networks in practice : theory, realization and deployment*. Chichester England ;;Hoboken NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [38] N. Poojary, S. V. Krishnamurthy, and S. Dao, "Medium access control in a network of ad hoc mobile nodes with heterogeneous power capabilities," in *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, 2001, vol. 3, pp. 872–877.
- [39] S. Kumar, V. S. Raghavan, and J. Deng, "Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 3, pp. 326–358, May 2006.
- [40] W. Stallings, *Network and internetwork security : principles and practice*. Englewood Cliffs, N.J.; New York,: Prentice Hall, ; IEEE, 1995.
- [41] A. D. Wood and J. A. Stankovic, "Denial of service in sensor networks," *Computer*, vol. 35, no. 10, pp. 54–62, 2002.
- [42] J. Beutel, "Metrics for sensor network platforms," in *Proc. ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'06)*, 2006.
- [43] M. Kohvakka, "Medium Access Control and Hardware Prototype Designs for Low-Energy Wireless Sensor Networks," Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2009.
- [44] R. Verdone, *Wireless sensor and actuator networks technologies, analysis and design*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2008.
- [45] R. Bischoff, J. Meyer, and G. Feltrin, "Wireless sensor network platforms," *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2009.
- [46] M. A. . Vieira, C. N. Coelho Jr, D. C. da Silva Jr, and J. M. da Mata, "Survey on wireless sensor network devices," in *Emerging Technologies and*

- Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference, 2003*, vol. 1, pp. 537–544.
- [47] M. Kohvakka, J. Suhonen, M. Hannikainen, and T. D. Hamalainen, "Transmission power based path loss metering for wireless sensor networks," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*, 2006, pp. 1–5.
- [48] A. Rowe, R. Mangharam, and R. Rajkumar, "FireFly: A time synchronized real-time sensor networking platform," *Wireless Ad Hoc Networking: Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks, CRC Press Book Chapter*, 2006.
- [49] N. Madabhushi, "KMote - Design and Implementation of a Low Cost, Low Power Hardware Platform for Wireless Sensor Networks," Indian Institute of Technology, 2007.
- [50] F. Linnarsson, P. Cheng, and B. Oelmann, "SENTIO: A Hardware Platform for Rapid Prototyping of Wireless Sensor Networks," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 3002–3006.
- [51] H. Dubois-Ferrière, L. Fabre, R. Meier, and P. Metrailler, "TinyNode: a comprehensive platform for wireless sensor network applications," in *Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*, 2006, pp. 358–365.
- [52] K. J. Wong and D. Arvind, "SpeckMAC: low-power decentralised MAC protocols for low data rate transmissions in specknets," in *Proceedings of the 2nd international workshop on Multi-hop ad hoc networks: from theory to reality*, 2006, pp. 71–78.
- [53] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks," in



- Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, 2006, pp. 307–320.
- [54] G. K. Nelson, M. A. Lombardi, and D. T. Okayama, “NIST Time and Frequency Radio Stations: WWV, WWVH, and WWVB.” National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [55] R. Mangharam, A. Rowe, R. Rajkumar, and R. Suzuki, “Voice over sensor networks,” in *Real-Time Systems Symposium, 2006. RTSS’06. 27th IEEE International*, 2006, pp. 291–302.
- [56] A. Rowe, V. Gupta, and R. R. Rajkumar, “Low-power clock synchronization using electromagnetic energy radiating from ac power lines,” in *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2009, pp. 211–224.
- [57] M. Buevich, A. Rowe, and R. Rajkumar, “SAGA: Tracking and Visualization of Building Energy,” 2011, pp. 31–36.
- [58] W. Weber, J. M. Rabaey, and E. H. L. Aarts, *Ambient intelligence*. Berlin; New York: Springer, 2005.
- [59] M. Martinelli, L. Ioriatti, F. Viani, M. Benedetti, and A. Massa, “A WSN-based solution for precision farm purposes,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 2009, vol. 5, pp. V–469.
- [60] N. Burri, P. Von Rickenbach, and R. Wattenhofer, “Dozer: ultra-low power data gathering in sensor networks,” in *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on*, 2007, pp. 450–459.
- [61] G. Barrenetxea, F. Ingelrest, G. Schaefer, M. Vetterli, O. Couach, and M. Parlange, “SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring,” 2008, pp. 332–343.

- [62] "ATmega32 - 8-bit Microcontroller with 32 KBytes In-System Programmable Flash." Atmel Corporation, 2011.
- [63] "ATmega48/88/168 - 8-bit Atmel Microcontroller with 4/8/16K Bytes In-System Programmable Flash." Atmel Corporation, 2011.
- [64] "8-bit AVR Instruction Set." Atmel Corporation, 2010.
- [65] "PIC ® Microcontrollers - Microchip." [Online]. WWW-sivu: <http://www.microchip.com/pic/>. [Viitattu: 22.10.2012].
- [66] "PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet." Microchip Technology, 2007.
- [67] "PIC18F8722 Family Data Sheet." Microchip Technology, 2004.
- [68] "MSP430 Ultra-Low-Power Microcontroller Family Product Bulletin (Rev. D)." Texas Instruments, 2002.
- [69] "MSP430 Microcontroller | 16 bit Microcontroller | 16 bit MCU – TI.com." [Online]. WWW-sivu: <http://www.ti.com/msp430>. [Viitattu: 20-9-2012].
- [70] "MSP430F15x, MSP430F16x, MSP430F161x Mixed Signal Microcontroller." Texas Instruments, 2011.
- [71] "CC2420 - 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver Datasheet." Texas Instruments, 2007.
- [72] "nRF2401A Single chip 2.4 GHz Transceiver Product Specification." Nordic Semiconductor ASA, 2004.
- [73] "XE1205 - 180 MHz - 1 GHz Low-Power, High Link Budget Integrated UHF Transceiver Datasheet." Semtech Corporation, 2008.
- [74] "nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification." Nordic Semiconductor ASA.
- [75] Y. Liu and X. Han, "Analysis of the Maximal Transmission Rate Based on NRF24L01 Chip System," in *Information Engineering and Computer Science (ICIECS), 2010 2nd International Conference on*, 2010, pp. 1–3.

- [76] “nRF2401A - 2.4GHz RF - Products - Nordic Semiconductor.” [Online]. WWW-sivu: <http://www.nordicsemi.com/jpn/Products/2.4GHz-RF/nRF2401A>. [Viitattu: 22.9.2012].
- [77] “nRF24L01 - 2.4GHz RF - Products - Nordic Semiconductor.” [Online]. WWW-sivu: <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>. [Viitattu: 1.5.2012].
- [78] “nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification.” Nordic Semiconductor ASA, 2008.
- [79] T. Anttalainen, *Introduction to telecommunications network engineering*. Boston: Artech House, 1999.
- [80] J. S. Wilson, *Sensor technology handbook*. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2005.
- [81] A. De Marcellis and G. Ferri, *Analog circuits and systems for voltage-mode and current-mode sensor interfacing applications*. Dordrecht; New York: Springer, 2011.
- [82] “SPI Block Guide V03.06.” Motorola Inc., 2000.
- [83] “I2C-bus specification and user manual.” NXP Semiconductors, 2012.
- [84] “1-Wire Products Design Guide.” Maxim Integrated Products, 2009.
- [85] “Sensors | Farnell Suomi.” [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/sensors>. [Viitattu: 20.9.2012].
- [86] IEEE Computer Society. LAN/MAN Standards Committee, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Standards Board, and IEEE Standards Association, *IEEE standard for information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements. Part 3, Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer*

*specifications*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.

- [87] H. Zimmermann, "OSI reference model—The ISO model of architecture for open systems interconnection," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 4, pp. 425–432, 1980.
- [88] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, "MAC protocols for wireless sensor networks: a survey," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 44, no. 4, pp. 115–121, 2006.
- [89] S. Yoon, "Power management in wireless sensor networks," North Carolina State University, 2007.
- [90] M. A. Labrador and P. M. Wightman, *Topology control in wireless sensor networks with a companion simulation tool for teaching and research*. [Dordrecht?]: Springer, 2009.
- [91] R. Min, M. Bhardwaj, S. H. Cho, E. Shih, A. Sinha, A. Wang, and A. Chandrakasan, "Low-power wireless sensor networks," in *VLSI Design, 2001. Fourteenth International Conference on*, 2001, pp. 205–210.
- [92] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," presented at the SenSys '04 Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, 2004, pp. 95–107.
- [93] J. Haapola, "Evaluating Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks," Oulun Yliopisto, 2003.
- [94] L. Kleinrock and F. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I—Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 12, pp. 1400–1416, Dec. 1975.

- [95] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 12, no. 1, pp. 63–78, 2006.
- [96] N. P. Mahalik (Ed.), *Sensor Networks and Configuration: Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications*. Springer, 2007.
- [97] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 11, no. 6, pp. 6–28, 2004.
- [98] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad hoc networks*, vol. 3, no. 3, pp. 325–349, 2005.
- [99] M. Abolhasan, T. Wysocki, and E. Dutkiewicz, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks," *Ad hoc networks*, vol. 2, no. 1, pp. 1–22, 2004.
- [100] B. A. Forouzan and S. C. Fegan, *Data communications and networking*. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [101] C. Huitema, *Routing on the Internet*. Upper Saddle River, N.J.; London: Prentice Hall, 1999.
- [102] S. M. Hedetniemi, S. T. Hedetniemi, and A. L. Liestman, "A survey of gossiping and broadcasting in communication networks," *Networks*, vol. 18, no. 4, pp. 319–349, 1988.
- [103] Z. J. Haas, J. Y. Halpern, and Li Li, "Gossip-based ad hoc routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, no. 3, pp. 479–491, Jun. 2006.
- [104] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," presented at the MobiCom '99 Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, 1999, pp. 174–185.

- [105] E. M. Royer and C. K. Toh, "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," *Personal Communications, IEEE*, vol. 6, no. 2, pp. 46–55, 1999.
- [106] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "RFC 3561 - Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," 2003. [Online]. WWW-sivu: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561>. [Viitattu: 29.9.2012].
- [107] "PSoC Designer: C Language Compiler User Guide." Cypress Semiconductor, 2003.
- [108] K. Langendoen, A. Baggio, and O. Visser, "Murphy loves potatoes: experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture," 2006, p. 8 pp.
- [109] C. Gomez, P. Salvatella, O. Alonso, and J. Paradells, "Adapting AODV for IEEE 802.15. 4 mesh sensor networks: theoretical discussion and performance evaluation in a real environment," in *Proceedings of the 2006 International Symposium on on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2006, pp. 159–170.
- [110] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers," 1994, pp. 234–244.
- [111] "Cypress PSoC Programmable System-on-Chip Brochure." Cypress Semiconductor, 2010.
- [112] "PSoC - PSoC 1 - PSoC 3 - PSoC 5 - Cypress Semiconductor." [Online]. WWW-sivu: <http://www.cypress.com/?id=1353>. [Viitattu: 1.10.2012].
- [113] Cypress Semiconductor Corporation, "PSoC® Programmable System-on-Chip Technical Reference Manual (TRM)." 2011.
- [114] "PSoC Designer: Assembly Language User Guide." Cypress Semiconductor, 2003.

- [115] "CY8C29x66 - PSoC Mixed Signal Array Data Sheet." Cypress Semiconductor, 2004.
- [116] "User Module Datasheet: EEPROM Datasheet E2PROM v0.4." Cypress Semiconductor, 2011.
- [117] A. Smetana, "Cypress Application Note AN2100 - Bootloader: PSoC." Cypress Semiconductor, 2005.
- [118] S. Matviyenko, "Cypress Application Note AN2284 - Low-Cost EKG Pulsometer." Cypress Semiconductor, 2006.
- [119] D. Van Ess, "Cypress Application Note AN2286 - Simulating a 555 Timer with PSoC." Cypress Semiconductor, 2005.
- [120] D. Seguine, "Cypress Application Note AN2336 - Simplified FSK Detection." Cypress Semiconductor, 2006.
- [121] M. G. Raaja, "Cypress Application Note AN2148 - Measuring Temperature Using a Thermocouple." Cypress Semiconductor, 2004.
- [122] D. Arvind and K. J. Wong, "Speckled computing: Disruptive technology for networked information appliances," in *IEEE International Symposium on Consumer Electronics*, 2004, pp. 219–223.
- [123] M. Ling and S. Wong, "ProSpeckz3 presentation." [Online]. WWW-sivu: <http://downloads.specknet.org/2004/ProSpeckz3-presentation.pdf>. [Viitattu: 19.10.2012].
- [124] De Marziani, C., Alcoleas, R., Colombo, F., Costa, N., Pujana, F., Colombo, A., Aparicio, J., Alvarez, F.J., Jimenez, A., Urena, J., and Hernandez, A., "A low cost reconfigurable sensor network for coastal monitoring," presented at the OCEANS, 2011, Spain.
- [125] "XBee® 802.15.4 - Digi International." [Online]. WWW-sivu: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded->

- solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module#specs. [Viitattu: 18.10.2012].
- [126] V. Subramanian and A. Doholi, "PNet: A Grid Type Sensor Network of Reconfigurable Nodes," 2009, pp. 7–13.
- [127] "CYRF7936 - 2.4-GHz CyFi Transceiver Datasheet." Cypress Semiconductor, 2012.
- [128] "CyFi Star Network Protocol Stack Datasheet." Cypress Semiconductor, 2012.
- [129] A. König, "Lehrstuhl Integrierte Sensorsysteme: Elektrische Messtechnik II." [Online]. WWW-sivu:  
[http://www.eit.uni-kl.de/koenig/deutsch/MelLab\\_Intro.html](http://www.eit.uni-kl.de/koenig/deutsch/MelLab_Intro.html).  
[Viitattu: 18.10.2012].
- [130] "CY3271 PSoC FirstTouch Starter Kit with CyFi Low-Power RF - Kit Guide." Cypress Semiconductor, 2008.
- [131] R. Mohiddin, M. Kumar, S. K. Palakurty, S. Bothra, P. Phaneendra, M. B. Srinivas, N. Pidugu, K. Mahalingam, P. Kane, and others, "Building a sensor network with PSoC," in *Sensing Technology (ICST), 2011 Fifth International Conference on*, 2011, pp. 353–357.
- [132] *CY3271 PSoC® FirstTouch™ Starter Kit with CYFi™ Low-Power RF*. Cypress Semiconductor.
- [133] M. Paselli, F. Petr, O. Rousseaux, G. Meynants, B. Gyselinckx, M. Engels, and L. Benini, "A High-Performance Wireless Sensor Node for Industrial Control Applications," 2008, pp. 235–240.
- [134] I. Adly, H. Ragai, A. El-Hennawy, and K. Shehata, "Over-The-Air Programming of PSoC sensor interface in wireless sensor networks," in *MELECON 2010-2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 997–1002.



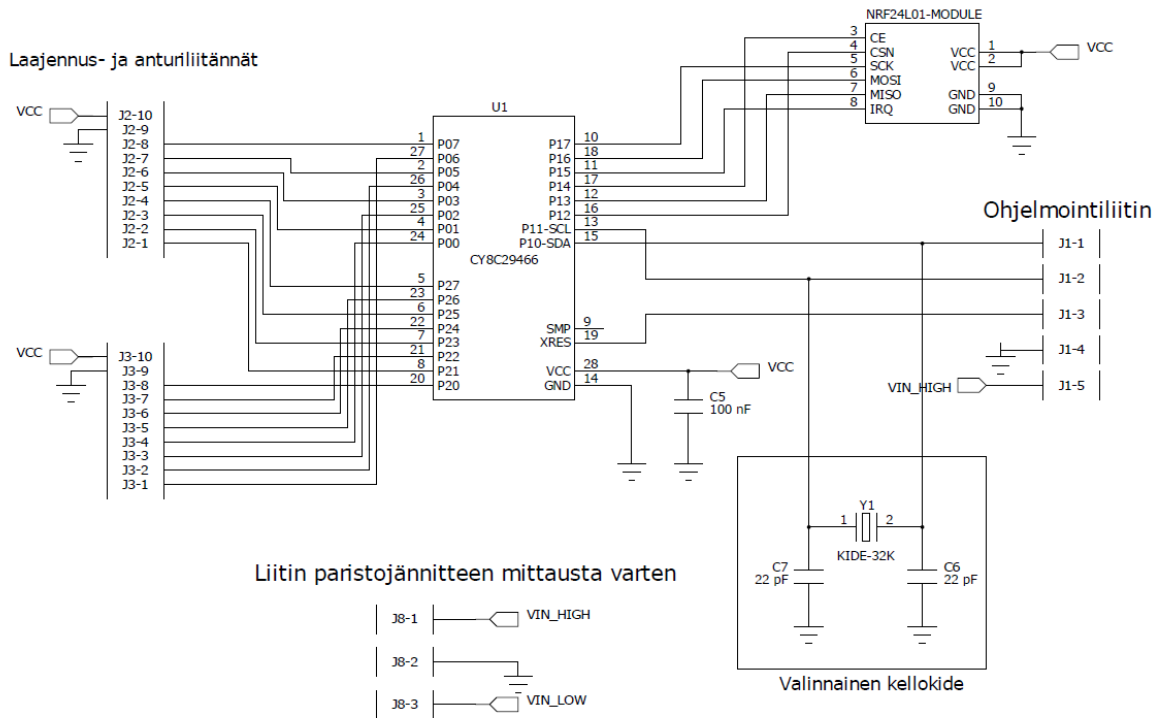
- [135] B. O’Flynn, A. Lynch, K. Aherne, P. Angove, J. Barton, S. Harte, C. O’Mathuna, D. Diamond, and F. Regan, “The Tyndall mote: enabling wireless research and practical sensor application development,” in *Adjunct Proc. 4th Int. Conf. on Pervasive Computing*, 2006.
- [136] J. L. Hill and D. E. Culler, “Mica: A wireless platform for deeply embedded networks,” *Micro, IEEE*, vol. 22, no. 6, pp. 12–24, 2002.
- [137] “TPS61097 - Low input voltage synchronous boost converter with low quiescent current.” Texas Instruments, 2012.
- [138] “Farnell Suomi | DC - DC Converters & Charge Pumps.” [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/dc-dc-converters-charge-pumps>. [Viitattu: 1.3.2012].
- [139] “TPS731xx - Cap-Free, NMOS, 150mA Low Dropout Regulator with Reverse Current Protection.” Texas Instruments.
- [140] “HP 3478A Multimeter Operating Manual.” Hewlett-Packart Company, 1988.
- [141] “nRF24L01+ Reference Module Product Specification.” Nordic Semiconductor ASA, 2008.
- [142] J. C. Stein, “Indoor radio WLAN performance part II: Range performance in a dense office environment,” *Intersil Corporation*, 1998.
- [143] M. Lott and I. Forkel, “A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation,” in *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd*, 2001, vol. 1, pp. 464–468.
- [144] D. Seguire, “Cypress Application Note AN2219 - PSoC 1 Selecting Analog Ground and Reference.” Cypress Semiconductor, 2011.
- [145] “MCP9700/9700A MCP9701/9701A Low-Power Linear Active Thermistor ICs.” Microchip Technology, 2006.

- [146] "PSoC Designer - PSoC Software - Cypress Semiconductor." [Online]. WWW-sivu: <http://www.cypress.com/?id=2522>. [Viitattu: 24.8.2012].
- [147] G. Reynolds, "Cypress Application Note AN47310 - PSoC 1 Power Savings Using Sleep Mode." Cypress Semiconductor, 2011.
- [148] "User Module Datasheet: Programmable Gain Amplifier Datasheet, PGA v 3.2." Cypress Semiconductor, 2012.
- [149] "User Module Datasheet: Instrumentation Amplifier Datasheet, INSAMP v 2.2." Cypress Semiconductor, 2012.
- [150] "LM741 Operational Amplifier." Texas Instruments, 2000.
- [151] "CY8C27xxx - PSoC Mixed Signal Array Data Sheet." Cypress Semiconductor, 2003.
- [152] D. Seguire, "Cypress Application Note AN2239 - PSoC 1 Selecting The Right ADC." Cypress Semiconductor, 2011.
- [153] "Instrumentation Amplifiers | Farnell Suomi." [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/instrumentation-amplifiers>. [Viitattu: 21.9.2012].
- [154] "MCP6N11 - 500 kHz, 800  $\mu$ A Instrumentation Amplifier." Microchip Technology, 2011.
- [155] "INA321, INA2321 - microPower, Single-Supply, CMOS Instrumentation Amplifier." Texas Instruments, 2006.
- [156] D. Van Ess, "Cypress Application Note AN2168 - PSoC 1 Understanding Switched Capacitor Filters." Cypress Semiconductor, 2011.
- [157] "User Module Datasheet: Two-Pole Low-pass Filter Datasheet, LPF2 v 3.00." Cypress Semiconductor, 2011.
- [158] "User Module Datasheet: Four-Pole Low-pass Filter Datasheet, LPF4 v 2.1." Cypress Semiconductor, 2011.
- [159] "User Module Datasheet: Two-Pole Elliptical Low-Pass Filter Datasheet, ELPF2 v1.2." Cypress Semiconductor, 2011.

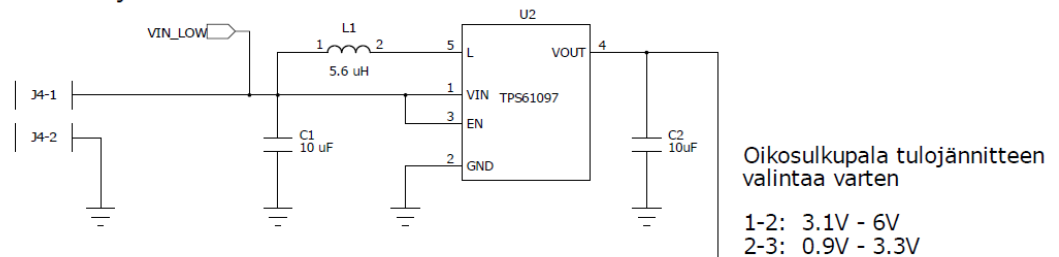
- [160] "User Module Datasheet: Four-Pole Elliptical Low-pass Filter Datasheet, ELPF4 v 1.2." Cypress Semiconductor, 2011.
- [161] "Analog Filters | Farnell Suomi | Results." [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/analog-filters>. [Viitattu: 21.10.2012].
- [162] "Switched Capacitor Filters | Farnell Suomi | Results." [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/switched-capacitor-filters>. [Viitattu: 21.10.2012].
- [163] "LTC1569-7 - Linear Phase, DC Accurate, Tunable 10th Order Lowpass Filter." Linear Technology, 1998.
- [164] "LTC1569-6 - Linear Phase, DC Accurate, Low Power, 10th Order Lowpass Filter." Linear Technology, 1999.
- [165] "LTC1563-2/LTC1563-3 - Active RC, 4th Order Lowpass Filter Family." Linear Technology, 2005.
- [166] "LTC1068 Series - Clock-Tunable, Quad Second Order, Filter Building Blocks." Linear Technology, 1996.
- [167] "MAX7409/MAX7410/MAX7413/MAX7414 Full Data Sheet." Maxim Integrated Products, 1998.
- [168] "MAX7426/MAX7427 Full Data Sheet." Maxim Integrated Products, 2000.
- [169] "MAX7400/MAX7403/MAX7404/MAX7407 Full Data Sheet." Maxim Integrated Products, 1999.
- [170] "LP324, LP2902 - Ultra-Low-Power Quadruple Operational Amplifiers." Texas Instruments, 2005.
- [171] P. Horowitz and W. Hill, *The art of electronics*. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press, 1989.
- [172] "Farnell Suomi | Elektroniikkakomponentit | Elektroniikkaosat." [Online]. WWW-sivu: <http://fi.farnell.com/>. [Viitattu: 1.3.2012].
- [173] "MSP430x23x, MSP430x24x(1), MSP430x2410 Mixed Signal Microcontroller (Rev. H)." Texas Instruments, 2011.

# Liitteet

## Liite 1 - toteutetun anturinoodin kytkentäkaavio



### Liitin alle 3 V tulojännitteelle



### Liittimet yli 3V tulojännitettä varten

