

Juho Räsänen

Tähtimäisen anturiradioverkon synkronointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

26.5.2016

Tekijä Otsikko	Juho Räsänen Tähtimäisen anturiradioverkon synkronointi
Sivumäärä Aika	37 sivua 26.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka
Ohjaajat	Tuotekehitysjohtaja Ville Voipio Yliopettaja Matti Fischer
<p>Tarkalla aikajakokanavoinnilla on tärkeä asema tämän työn langattomien lämpöanturien tähtitopologiassa. Jokaisella anturilla on ohjelmoidut aikatiedot mittaustiedon lähetystä varten reitittimelle. Reititin kerää antureilta mittaustietoja lämpötilasta, kosteudesta ja niiden kellonajoista. Kellonaikatietojen perusteella reititin lähettää takaisin kullekin anturille korjaustiedot oikeista kellonajoista. Lopuksi antureiden kideoskillaattorit ylläpitävät synkronointia ajallisesti, millä vältetään tiedonsiirron päällekkäisyydeltä ja täten sanomien tuhoutumiselta.</p> <p>Työ oli tehty toimeksiantona kiinteistöjen mittausratkaisuihin erikoistuneelle yritykselle Si-Tecno Oy:lle. Mittaustulosten perusteella haluttiin varmistaa synkroninen kokonaisuus heidän järjestelmän lämpöantureiden ja reitittimien välillä sekä luotettavan mittaustiedon kerääminen huoneiston lämmönohjaussäätimelle.</p> <p>Työssä selvitettiin radioyhteyden kuuluvuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä muita topologioita anturiradioverkoissa. Toimeksiantajan mittausratkaisussa laitteiden synkronointiin käytettiin aikajakokanavointia, ja sen tarkastelussa työssä keskityttiin antureiden aikaerotietoihin. Perusteellista tarkastelua varten käsiteltiin myös antureiden tahdistuksessa käytettävän kideoskillaattorin toimintaa sekä sen värähtelytaajuuden virhetekijöitä.</p> <p>Tulokset osoittivat, että antureiden aikaerotiedot voivat vaihdella vuorokauden sisällä. Yhdellä kymmenestä anturista oli jo oletustilanteessa liian suuri aikaero, mikä johtaisi mahdollisesti epäsynkroniin. Aikaeron syinä pidettiin tehtaan virhekalibroinnista johtuvia vaihteluja kiteen tuomassa tahdistuksessa tai monitie-etenemisestä johtuviin viiveisiin. Kun antureista osa peitettiin alumiinifoliolla, havaittiin, että anturit eivät riipu toistensa aikaeroista. Peitetty anturit eivät antaneet dataa ollenkaan. Suuria aikaeroja esiintyi myös sen jälkeen, kun foliot irrotettiin. Syinä voivat olla viiveet kuuluvuuteen palaamisessa tai kideoskillaattorien lämpötilojen vaihteluista. Lopuksi kaikki anturit palasivat haluttuihin aikaeroihin, minkä perusteella järjestelmä oli palautuva eikä epäsynkroniin johtamista pystytty todentamaan.</p>	
Avainsanat	aikajakokanavointi, topologia, kideoskillaattori

Author Title	Juho Räsänen Synchronizing Wireless Sensor Network in Star Topology
Number of Pages Date	37 pages 26 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructors	Ville Voipio, R&D Director Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>Accurate Time Division Multiple Access (TDMA) has a key role in the wireless sensor network of this thesis. Wireless temperature sensors are programmed to send data to routers at given timeslots. The router gathers the information of each sensor including measurement data and real time data. The real time data needs to be corrected and then sent back to the sensors. Finally, a crystal oscillator design maintains timeslots to avoid mismatched wireless information flow, resulting in successful synchronization of TDMA.</p> <p>This thesis work was commissioned by Si-Tecno Ltd. The objective was to measure and analyze their technology. Components were temperature sensors and a router. They formed a wireless star network topology. Synchronization in it was measured to get reliable data for heat controlling unit.</p> <p>Wireless communications and structures of other sensor networks were clarified. The measurements focused on timeslot differences of TDMA. A crystal oscillator's functionality for sensor's timing is explained theoretically. Also aspects for losing the synchronization are clarified.</p> <p>The results show that given timeslots can drift over unwanted limits within a day. In default situation, crystal oscillators' calibration for the test and multipath propagation of electromagnetic waves caused bigger changes for one sensor out of ten. When covering some of the sensors with aluminum foil, the results showed that sensors' timeslot differences were not dependent on each other and system still maintained wanted synchronization. In the final state when removing all aluminums, system showed even bigger early timeslot differences which were caused by connection delay or temperature changes of crystal oscillators. In the end, system was still able to reconstruct itself and failure in the synchronization did not appear.</p>	
Keywords	time division multiple access, topology, crystal oscillator

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	4
2	Langaton tiedonsiirto	5
2.1	Sähkömagneettinen aaltoliike	5
2.1.1	Radioaallon rakenne	5
2.1.2	Radioyhteys	7
2.1.3	Vaimeneminen	7
2.2	Radiosignaalien häiriöt	8
2.2.1	Kohina	8
2.2.2	Monitie-eteneminen	10
2.3	Radiosignaali	10
2.3.1	Kantoaaltotaajuuden käyttö	10
2.3.2	Modulointitekniikka	11
2.3.3	Antennien ominaisuudet	12
3	Radioverkko	13
3.1	Aikajakokanavointi	13
3.2	Topologiat	14
3.2.1	Tähtikytkentä	14
3.2.2	Point-to-point	16
3.2.3	Kytkentöjen vertailu	16
3.2.4	Wireless mesh -verkot	17
3.3	Komponentit	18
3.3.1	Paristokäyttöiset lämpöanturit	18
3.3.2	Reititin	20
4	Antureiden aikasykronointi	22
4.1	Tahdistuksen kideoskillaattori	22
4.1.1	Oskillaattorityypin toiminta	22
4.1.2	Oskillaattorin taajuusriippuvuus	24
4.2	Kanavointitekniikka	26
4.2.1	Aikajakokanavoinnin mittaus	26
4.2.2	Tulosten tulkinta	27

	2
4.2.3 Tulosten vertailu	34
5 Päätelmiä	35
Lähteet	36

Lyhenteet

TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> . Kanavointimenetelmä, jossa taajuuskais-tan käyttö jaetaan ajallisesti eri osiin.
BER	<i>Bit Error Rate</i> . Bittivirhesuhde kuvaa todennäköisyyttä, jolla yksi lähetet-tävistä biteistä vääristyy siirtotiellä.
PER	<i>Packet Error Rate</i> . Pakettivirhesuhde kuvaa todennäköisyyttä, jolla sa-noma vääristyy siirtotiellä.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> . Langaton lähiverkkoyhteys, jota voidaan käyttää osana langallista verkkoa.
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> . WiFi Alliance -nimisen yhteisön tuotemerkki, jonka tar-koituksena on muodostaa yhteensopivuus IEEE 802.11 -suosituksen mu-kaisten laitteiden välillä.
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> . Langaton anturiradioverkko, joka koostuu ra-diolähetinsolmuista sekä reitittimistä.
TDD	<i>Time Division Duplex</i> . Vuorosuuntainen yhteys, jonka tiedonsiirron suun-taa vaihdetaan tiettyinä aikaväleinä.
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> . Nestekidenäyttö, jossa nestekiteitä ohjataan säh-kökentän avulla ilmaisemaan elektrodeissa tummia kuvioita.
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> . Radiokaista Kansainvälisen televiestin-täliiton radio-ohjeen taajuuksien jaossa.
GPSK	<i>Gaussian Phase-Shift Keying</i> . Digitaalinen vaihemodulaatio, joka hyödyn-tää Gaussin suodatusta.
GMSK	<i>Gaussian Minimum-Shift Keying</i> . Digitaalinen taajuusmodulaatio, joka hyödyntää Gaussin suodatusta.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja mitata paristokäyttöisten lämpötilantureiden ja reitittimen välistä aikasykronointia. Työssä keskityttiin korjaustietoihin, jotka auttavat ylläpitämään antureiden signaalien lähetystä juuri niille varatuissa aikaväleissä. Lähetysignaalien tahdistukseen käytettävät kideoskillaattorit myöhästyivät ajallisesti, minkä johdosta reitittimeltä tarvittiin korjaustietoja antureiden kellonaikojen päivittämiseksi. Suuret korjaustiedot merkitsevät sitä, että anturit lähettäisivät mittaus tuloksiaan samanaikaisesti samalla taajuudella, ja täten mittaustulokset jäisivät reitittimeltä tulkitsematta.

Työn tilaajana oli kiinteistöjen mittausratkaisuihin erikoistunut yritys Si-Tecno Oy. Työ perustui tilaajan mittausjärjestelmän komponentteihin. Opinnäytetyön tekoa varten anturien kideoskillaattorit ohjelmoitiin tuotannossa mahdollisimman tarkaksi. Yhteenvetona työstä haluttiin tietoa kideoskillaattorien luomasta tahdistuksesta ja radiotopologian toimivuudesta sekä vertailukohteita muista samankaltaisista järjestelmistä.

Aiheen valinta oli ajankohtainen, koska sovellusta käytetään asuinrakennusten lämpötilojen, kosteuden ja sisäilmanpaineen mittaamiseen. Langattomalla tiedonsiirrolla ja aikasykronoinnin mahdollistavilla komponenteilla haluttiin varmistaa reaaliaikaisen mittaustiedon kerääminen lämmönsäätelyn tasapainottamiseksi, hukkaenergian minimoimiseksi ja rakennusten yleiskunnon parantamiseksi.

2 Langaton tiedonsiirto

2.1 Sähkömagneettinen aaltoliike

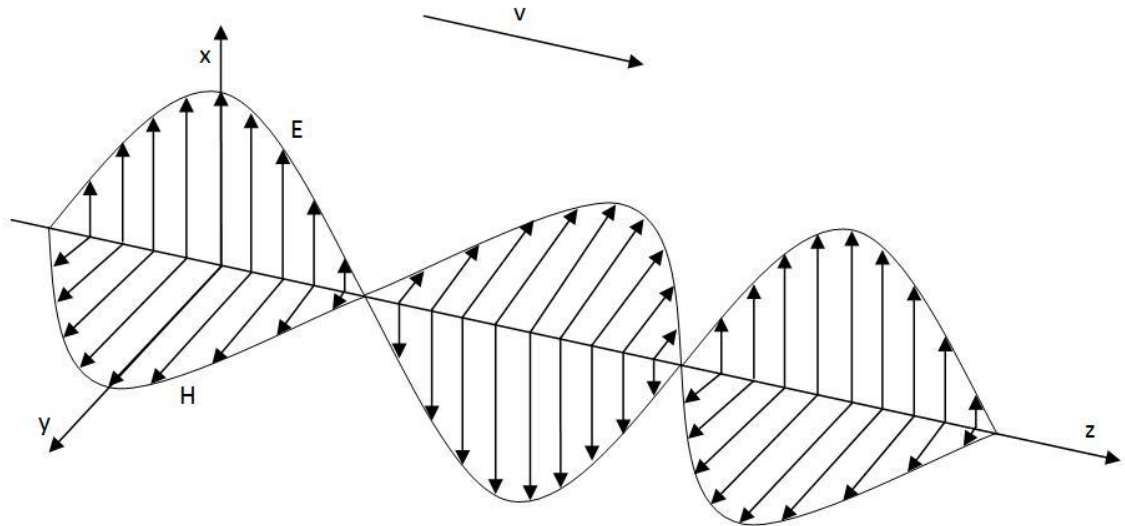
2.1.1 Radioaallon rakenne

Sähkömagneettinen aaltoliike koostuu sähkökentän ja magneettikentän jaksollisesta vaihtelusta. Sen syntytapoja ovat tilanteet, joissa sähkövaraus on kiihtyvässä tai muuttuvassa liike-tilassa. Maxwellin neljä yhtälöä käsittelevät sähkömagnetismia aaltoliikkeen syntytaidoille ja sen kohdatessa suljetun pinnan eli homogeenisen kappaleen. Sähkömagneettinen säteily etenee valon nopeudella $c = 299\,792\,458$ m/s tyhjiössä. Sähkömagneettisella aaltoliikkeellä on aaltoluonteensa lisäksi hiukkasluonne, joka esiintyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen ja väliaineen vuorovaikutuksessa keskenään. Aine voi vastaanottaa ja lähettää energiaa vain tietyn suuruusina energia-annoksina eli kvantteina. Sähkömagneettisessa vuorovaikutuksessa välittäjähiukkasia kutsutaan fotoneiksi. Kvanttien energia voidaan laskea Planckin vakion avulla. Tällöin kokonaisenergia on:

$$W = hf = h\frac{c}{\lambda}, \quad (2.1)$$

jossa $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Js = $4,1357 \times 10^{-15}$ eVs on Planckin vakio, f on taajuus ja λ on aallonpituus. Radioaalloilla on vain lämmittävä vaikutus biologiseen materiaaliin. Radioaalloilla kvantin energian suuruus on pieni verrattuna biologisten materiaalien ionisoimiseen tarvittavaan vähintään 12 eV:n suuruuteen. Polaaristen molekyylien esim. veden lämpenemisen saa aikaan liike aaltojen tahdissa. (5, s. 9–10, 21; 6, s. 13–14, 168.)

Oskillaattoreilla kehitetään suuritaajuisia vaihtovirtaa, joka lähetetään radiotaajuisena lähetyksentenneilla. Virtasilukassa muuttuva sähkövirta luo ympärilleen muuttuvan magneettikentän, joka luo ympärilleen muuttuvan sähkökentän jne. Näin syntyneitä poikittaista aaltoliikettä voidaan kuvata tasoaaltona, jossa sähkö- ja magneettikenttä esiintyvät samanvaiheisinä kohtisuorassa toisiaan ja etenemissuuntaa vastaan (kuva 1). (2, s. 11–12; 5, s. 9, 20, 25.)



Kuva 1. Tasoallon eteneminen $+z$ -suuntaan. Sähkö- ja magneettikenttä ovat samanvaiheisia ja kohtisuorassa toisiaan ja etenemissuuntaa vastaan. (5, s. 25.)

Sähkömagneettinen aaltoliike jaetaan sähkömagneettiseen spektriin niiden taajuuden ja aallonpituuden perusteella. Suurimman taajuusalueen ja lyhytaaltoisimman joukon muodostaa gammasäteily. Matalataajuisimman ja pitkäaaltoisimman joukon muodostavat radioaallot. Radioaallot voidaan jakaa omiin taajuusalueisiin, joita merkitään kirjainlyhenteillä (taulukko 1).

Taulukko 1. Radioaaltojen taajuusalueet (5, s. 11).

VLF	Very Low Frequencies	3–30 kHz
LF	Low Frequencies	30–300 kHz
MF	Medium Frequencies	300–3000 kHz
HF	High Frequencies	3–30 MHz
VHF	Very High Frequencies	30–300 MHz
UHF	Ultra High Frequencies	300–3000 MHz
SHF	Super High Frequencies	3–30 GHz
EHF	Extremely High Frequencies	30–300 GHz

Näitä taajuusalueita voidaan kutsua RF-aalloiksi (radio frequency). Mittausjärjestelmä toimii 434 MHz:n kanta-aaltotaajuudella. Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan $c = \lambda f_c$ saadaan aallonpituudeksi n. 0,7 m. (5, s. 9–10.)

2.1.2 Radioyhteys

Yleisesti tärkein radioyhteys on suora yhteys, jolloin kuuluvuusalueella lähettimen signaali havaitaan, ja se on vastaanottimella luettavissa. Kuuluvuusalueeseen vaikuttavat esteet ja radioaallon pituus. Lähettimen signaali voidaan havaita taustan kohinasta, mutta tietoliikenne ei onnistu huonon yhteyden takia. Silloin sanoman tulkitsemiseen vaadittavat bitit ovat vääristyneet. Signaali voi myös häiritä muuta radioliikennettä, eikä sitä voida tulkita taustakohinasta. (2, s.12–13; 5, s. 224.)

Yhteysväliillä käytetään yhtä aikajakokanavointiin perustuvaa kanavaa. Ideaalitapauksessa vastaanotettu signaaliteho P_r voidaan laskea Friisin vapaan tilan yhtälöllä:

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 P_t, \quad (2.2)$$

jossa P_t on anturin lähetysteho, λ on radioaallon aallonpituus, r on antennien välinen etäisyys, G_t ja G_r ovat lähetys- ja vastaanottoantennien vahvistuksia. (3; 5, s. 224–225.)

2.1.3 Vaimeneminen

Vaimenemisessa radiosignaalin sisältämä teho vähenee, ja signaalin amplitudi pienenee matkan kasvaessa. Vapaan tilan vaimennuksessa eli lähettimen näköyhteysreitillä vaimenemista voidaan kuvata kaavalla (2.3):

$$N = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2. \quad (2.3)$$

Vaimennuksesta käytetään yksikköä desibeli (dB), joka kuvaa tehosuhdetta. Radiotaajuuksilla vaimeneminen tapahtuu etäisyyden neliössä. Täten kuvitellun ympärisäteilevän radiosignaalin teho jakautuu suuremmalle alueelle etäisyyden kasvaessa. Silloin tietyssä pisteessä aallon kehällä teho on pienempi kuin säteilylähteen läheisyydessä.

Vaimeneminen on myös suoraan verrannollinen käytettävään taajuuteen. Siksi pienemmät taajuudet vaimenevat vähemmän kuin suuremmat. (2, s.13–14.)

Mittausjärjestelmässä huoneiden anturien ja porraskäytävään asennettavan reitittimen välillä on eristäviä rakennuksen seiniä. Väliaineessa radioaallon aallonpituus muuttuu nopeuden suhteessa. Nopeus väliaineessa voidaan laskea kaavan (2.4) avulla:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} c, \quad (2.4)$$

jossa ε on väliaineen permittiivisyys ja μ on permeabiliteetti. Ne kuvaavat väliaineen sähköisiä ja magneettisia ominaisuuksia. Homogeenisessa väliaineessa, jonka ominaisuudet ovat vakiot ja paikasta riippumattomat $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ ja $\mu = \mu_0\mu_r$. Suhteellinen permittiivisyys ε_r ja permeabiliteetti μ_r ovat väliaineesta riippuvia vakioita. Tyhjiössä $\varepsilon = \varepsilon_0 \approx 8,8542 \times 10^{-12}$ F/m ja $\mu = \mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. (5, s. 21, 49–50.)

Radioyhteysvälin kokonaisvaimennuksessa otetaan huomioon sisätilojen vapaan tilan vaimennuksen lisäksi absorptio rakennuksen seinistä, diffraktio ja monitie-eteneminen. Vastaanotettuun tehoon vaikuttavat myös antennien suuntausvirheet ja impedanssiepäsovitus. (5, s. 180, 225.)

2.2 Radiosignaalien häiriöt

2.2.1 Kohina

Kohinalla tarkoitetaan häiriötä, joka aiheuttaa vastaanotetun signaalin vääristymistä. Nämä häiriöt huomataan satunnaisina jännitteinä ja virtoina. Avaruudesta ja ilmakehästä tulee anteeniin kohinaa. Kosmisen säteilyn aiheuttama kohina on hallitsevinta taajuusalueella 20 MHz–1 GHz. Mittausjärjestelmässä teoreettisia kuuluvuusrajoja asettaa lämpökohina, joka on varausten lämpöliikkeestä johtuvaa värähtelyä antennien läheisyydessä. Elektronien törmäykset aiheuttavat niiden liiketilojen muutoksen, ja se synnyttää säteilyä. Mitä lämpimämpää aine on, sitä useammin tapahtuu törmäyksiä. Kyseessä on valkoista kohinaa eli taajuudesta riippumatonta.

Muita kohinalajeja ovat raekohina ja $1/f$ -kohina. Raekohinaa esiintyy esim. puolijohteen ja metallin rajapinnoissa, joissa virta ei ole tasaista tai elektroniputkissa. Se koos-

tuu elektronin varauksen suuruista impulsseista. Matalilla taajuuksilla myös elektronien määrän vaihtelu puolijohteiden johtavuusvyössä synnyttää ns. $1/f$ -kohinaa, jonka suuruus on kääntäen verrannollinen taajuuteen. (1, s. 26; 5, s. 131, 205–211.)

Vastaanotinantennin kohinateho P_n voidaan laskea kaavan (2.5) avulla:

$$P_n = kT_s B_{RF}, \quad (2.5)$$

jossa $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ WK}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ on Boltzmannin vakio. B_{RF} on vastaanottimen kohinakaistanleveys, jonka suuruus riippuu moduloidun suurtaajuussignaalin kaistanleveydestä lähetystä varten. T_s on vastaanottojärjestelmän kohinalämpötila. (5, s. 225.)

Vastaanottimen toimintaa ja radioyhteyden kuuluvuutta voidaan tutkia vastaanotetun tehon P_r ja kohinatehon P_n signaali-kohina-suhteena:

$$S/N = \frac{P_r}{P_n} = \frac{G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 P_t}{kT_s B_{RF}} = \frac{G_t P_t \lambda^2}{(4\pi r)^2 k B_{RF}} \frac{G_r}{T_s}. \quad (2.6)$$

Kaavan (2.6) tekijöistä voidaan muodostaa myös ns. linkkibudjetti, jolloin arvoja laskeaan summaamalla ja vähentämällä desibeliarvoja. (5, s. 225.) Vastaanottimen kohinan määrää kuvaa kohinakerroin F . Siinä kohinan määrää verrataan ideaaliseen kohinatomaan vastaanottimeen, kun molemmissa vastaanottimissa on 290 kelvinin lämpötilassa olevat sovitetut vastukset kohinalähteinä. (5, s. 205–206.)

Digitaalisissa radiojärjestelmissä bittivirhesuhde BER (bit error rate) on todennäköisyyttä kuvaava suure, jolloin yksi bitti vääristyy siirtotiellä. Kaistanleveyden kasvattaminen ja siirtonopeuden pudottaminen parantavat bittivirhesuhdetta eli pienentävät arvoa. Tietyllä siirtotien BER-arvolla voimme laskea sanoman lähetyskertojen määrän, joka koostuu bittien joukoista. Mittausjärjestelmässä oleellisempi on PER-arvo (Packet Error Rate), joka kuvaa prosentuaalista todennäköisyyttä lähetettyjen sanomien vääristymiselle vastaanottimella. Yksi sanoma sisältää mittadatan lähetykseen vaadittavien bittien lisäksi virheen tunnistus- ja synkronointikoodin. Tästä johtuen yhdenkin bitin tulkitsematta jääminen tunnistus- ja synkronointikoodissa voi aiheuttaa koko sanoman tulkitsemisessä virheen. (1, s. 27–28; 2, s.19; 3; 15.)

2.2.2 Monitie-eteneminen

Monitie-etenemisellä tarkoitetaan signaalien heijastumista rakennusten seinistä, mikä havaitaan signaalien siirtoviiveinä, vääristyminä, energian menetyksenä, summautumisenä tai toisensa kumoutumisena vastaanottimella. Jos heijastuneet signaalit ovat samassa vaiheessa, ne vahvistavat toisiaan, ja jos ne ovat eri vaiheessa, ne kumoavat toisensa. Väliaine, jonka signaali kohtaa, ja signaalin aallonpituus vaikuttavat heijastumiseen. Myös viestin symbolien pituudella on vaikutusta monitie-etenemisestä koituviin haittoihin monitilaisissa järjestelmissä. Mitä pidempiä symbolit ovat, sitä pienemmät vaikutukset heijastumisesta aiheutuvilla vaihe-eroilla. Mittausjärjestelmässä käytetään digitaalista modulointitekniikkaa, jossa tiloja eli symboleja on neljä, ja jokainen koostuu bittiparista. (1, s. 32–33; 2, s. 15–16.)

Mittausjärjestelmässä ei symbolien välistä interferenssiä esiinny. Sitä esiintyy suuremmilla siirtonopeuksilla etäisyyden kasvaessa riittävän suureksi ja symbolien fyysisen pituuden ollessa kilometrejä. *Langattomilla WLAN-yhteyksillä heijastumiset aiheuttavat sen, että lähiverkon kuuluvuus sisätiloissa vaihtelee jopa kymmenien senttimetrien matkalla* (1, s. 33). (2; 3.)

Signaalin häipyminen voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka vaikuttavat vastaanotetun signaalin muotoon. Hitaalla häipymisellä tarkoitetaan vastaanotetun signaalin keskiarvon muuttumista. Siihen vaikuttavat mittausjärjestelmään tulevat näköesteet. Nopea häipyminen näkyy ns. Raleigh-jakautumisena, eli satunnaisesti jakautuneiden osasignaalien summautumisena. Silloin signaali interferoi itsensä kanssa. Sen synnyttävät lähettimen liike vastaanottimeen nähden eli Doppler-ilmiö tai monitie-eteneminen. Doppler-ilmiötä ei esiinny mitattavassa järjestelmässä, sillä laitteet ovat kiinnitettyinä paikoillaan. (2, s. 15.)

2.3 Radiosignaali

2.3.1 Kantoaaltoaajuuden käyttö

Mittausjärjestelmän kantoaaltoaajuuden 434 MHz:n käyttö kuuluu teollisuuden käytössä olevien ISM-taajuusalueiden (Industrial, Science and Medical) joukkoon. Suomessa radiotaajuuksien käyttöä ohjaa viestintävirasto. Se määrittelee ehtoja radiolähettimien käyttöön sekä mahdolliseen radioluvan hakemiseen. Suomi kuuluu taajuudenjakoalu-

eeseen 1 Kansainvälisen televiestintäliiton ITU:n (International Telecommunications Union) radio-ohjesäännön mukaan. (16; 17.)

Viestintävirasto huomioi ITU:n radio-ohjesääntöjen taajuusalueita sekä ominaisuuksia, kuten määrittelemällä kaistanleveys, maksimilähetysteho ja sen toimitasuhde ISM-taajuusalueiden käyttäjiä varten. Mittausjärjestelmässä lähettimien maksimi lähetysteho on anturin tehonkulutuksen ja määräysten takia rajattu 10 milliwattiin. (16; 17.)

2.3.2 Modulointitekniikka

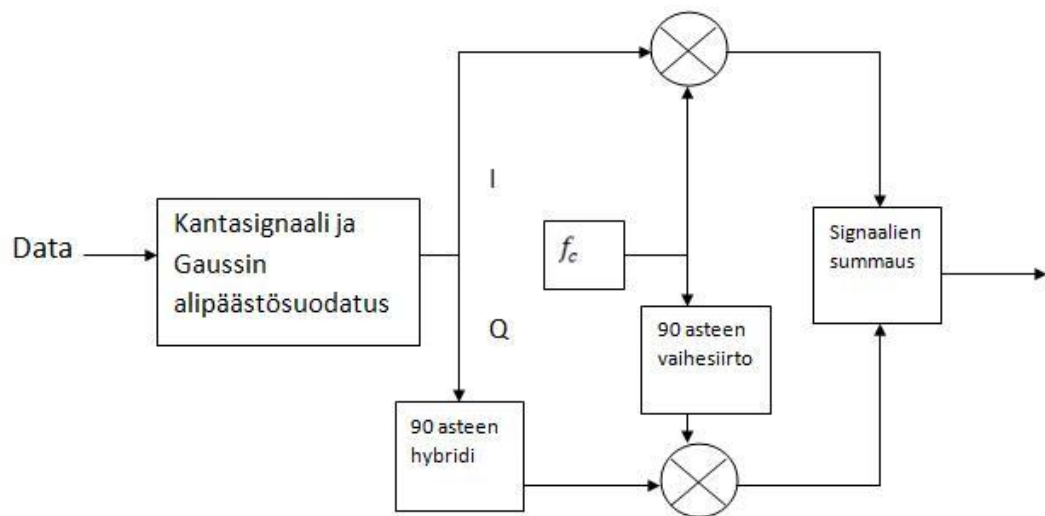
Mikroprosessorissa moduloidaan suurtaajuista signaalia mittausdatan sisältävällä informaatiolla. Suurtaajuinen signaali saadaan oskillaattorista. Kyseessä on radiotiellä tapahtuvaa kapeakaistaista siirtoa, jossa tieto moduloidaan vain tietylle taajuuskaistalle yhtä kanavaa varten. Moduloitu signaali lähetetään lähes isotrooppisesti säteilevillä antennilla. (2, s. 21; 5, s. 211.)

Mittausjärjestelmän signaalien moduloinnissa lähetystä varten käytetään digitaalista vaiheensiirtotekniikkaa GPSK (gaussian phase-shift keying) tai toiselta nimeltään GMSK (gaussian minimum-shift keying). Digitaalisen modulaation etuina analogiseen verrattuna ovat mm. hyvä häiriönsietokyky perustuen spektrin tehokkaaseen käyttöön, taajuuksien uudelleen käytettävyys ja aikajakokanavoinnin helppo toteutus. (5, s. 219–220, 222–224; 9.)

Moduloiva kantataajuussignaali kulkee Gaussin suodattimen läpi ennen sen yhdistymistä suurtaajuiseen signaaliin. Gaussin suodatuksessa hyödynnetään digitaalista signaalien käsittelyä niin, että kaistanleveyden reunataajuuksilla vaimennus on hyvin voimakasta, suodatus on kapeakaistaista ja sillä on tarkka impulssivaste. Gaussin suodattimelle on myös ominaista, että sen impulssivasteen sinc-funktion avulla pidetään moduloivan signaalin amplitudin vaihtelut vähäisinä päästökaistalla. Lopputuloksena suodatin tarjoaa pienintä mahdollista puolen bittitaajuuden eroa loogisten tilojen välillä. Mittausjärjestelmän kannalta GPSK:n etuja ovat spektrin tehokkaan käytön lisäksi epälineaaristen vahvistimien käyttö antureiden tehonkulutuksen parantamiseksi. Vaimeeminen ja häiriöt esiintyvät yleensä amplitudin muutoksina, joka pysyy lähes muuttumattoman vaihemodulaatioissa. Epälineaarilla vahvistimilla on parempi hyötysuhde kuin lineaarisilla vahvistimilla niiden siirtofunktioiden jännitteiden suhteen. Lineaarisen vahvistimen käyttö on oleellista amplitudimodulaatioissa spektrin vääristymisen ja leve-

nemisen välttämiseksi, koska epälineaarinen vahvistin lisää harmonisia kerrannaistajuuksia. (6, s. 224; 9.)

Kantaaaltosignaalin muodostamiseksi lähettimellä ja sen purkamiseksi vastaanottimella käytetään IQ-modulaattoria (kuva 2) ja -demodulaattoria. Kantaaaltosignaalin vaiheella on kaikkiaan neljä tilaa, ja yhtä tilaa eli symbolia kuvataan kahdella bitillä. Symbolin ensimmäinen bitti syötetään I-haaraan ja toinen Q-haaraan. Eri symbolien välillä on 90 asteen vaihe-ero. (6, s. 222; 9.)



Kuva 2. IQ-modulaattori. (6, s. 222; 9.)

IQ-demodulaattorin toiminta on käänteinen. Siinä generoidun suurtaajuussignaalin tulee olla samanvaiheinen lähetyksen kanssa. Vastaanottimessa signaali jaetaan haaroihin ja sekoitetaan kantaaaltotaajuuden kanssa, kuten lähetyksessä, ja lopuksi signaali suodatetaan. Muodostetut I ja Q haarat tulkitaan vaiheilmaisimen kautta bitteihin verrannollisiksi jännitteiksi. (6, s. 222, 224.)

2.3.3 Antennien ominaisuudet

Antennin säteilemän kentän ominaisuuksia voidaan kuvata reaktiivisen lähikentän, lähikentän ja kaukokentän alueilla. Lähikentän alueella antennin säteilyominaisuudet riippuvat etäisyydestä. Koska antennin eri osien etäisyydet muuttuvat paljon käytettyyn

aallonpituuteen nähden, havaintopisteen etäisyyden muuttuessa. Mittausjärjestelmä toimii kaukokentän alueella. Lähi- ja kaukokentän raja voidaan laskea kaavan (2.7) avulla:

$$r = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2.7)$$

jossa D on antennin suurin mitta kohtisuorassa säteilysuuntaa vastaan. Kaukokentässä esiintyvät vain sähkö- ja magneettikentän komponentit samanvaiheisina ja kohtisuorassa toisiaan vastaan (ks. kuva 1 s. 6). (5, s. 151–152, 158.)

Antennien suorituskykyä voidaan tulkita antennin suuntakuvion ja vahvistuksen avulla. Säteilyominaisuuksia kuvataan pallokoordinaatistossa z -tasossa 0 asteesta 180 asteeseen kasvavana kulmana θ . Sen suuntaa osoittava vektori projisoidaan xy -tasoon. Saadaan vielä kulma Φ , joka on väliltä 0 - 360 astetta. Antennit ovat resiprookkisia, eli antennin lähettämä teho tiettyihin suuntiin vastaanotetaan myös samoista suunnista. Myös yhteysvälivaimennus on sama kahden erilaisen antennin välillä molempiin suuntiin. Epäresiprookkisuutta esiintyy, jos antennissa on esim. ferriittikomponentteja tai vahvistimia. Mittausjärjestelmässä antennien vahvistukset jäävät pieniksi niiden pienien rakenteiden vuoksi, ja koska pienien antennirakenteiden halutaan olevan ympärisäteileviä. (5, s. 151.)

3 Radioverkko

3.1 Aikajakokanavointi

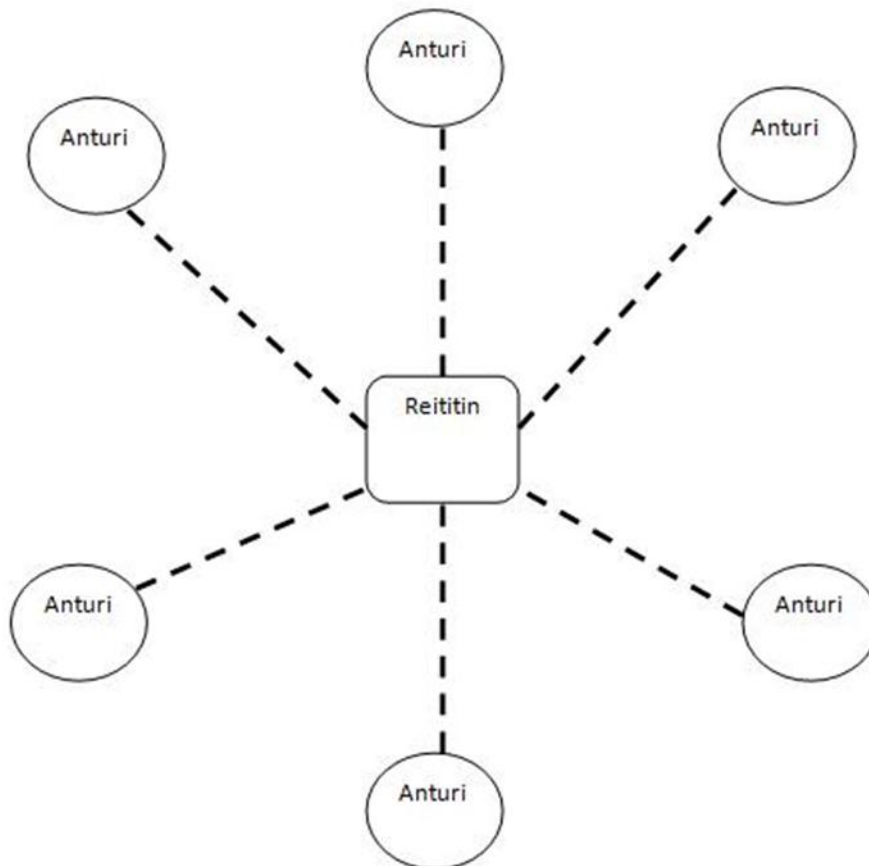
Aikajakokanavointi (Time Division Multiple Access) perustuu tiedonsiirtotien jakamiseen signaalien lähittäjien kesken. Kukin verkon käyttäjä lähettää sanomansa varuissa aikaväleissä. Yksi kanava koostuu samalla taajuudella lähetetyistä peräkkäisistä sanomista. Sitä voidaan käyttää yksisuuntaisena tai vuoro-suuntaisena. Lisäksi toisen kanavan avulla tiedonsiirto voidaan tehdä molempiin suuntiin samanaikaisesti. Vastaanottimella sanomat erotellaan muiden käyttäjien kesken tai kerätään bittijonoksi. (1, s. 106.)

Yhden kanavan eri käyttäjät tarvitsevat tahdistuksen mm. aikaväliensä ylläpitämiseen, signaalien kumoutumisen välttämiseksi ja signaalien tulkintaan vastaanottimena. Signaalien lähettäjien tulee olla tietoisia omista aikaväleistään reaaliaikaan verrattuna ja tarvittaessa myös korjata tahdistukseen käytettävien kideoskillaattorien aikatietoja.

3.2 Topologiat

3.2.1 Tähtikytkentä

Tähtimäinen kytkentä toteutetaan niin, että jokaisella mittausanturilla on oma radioyhteytensä reitittimelle (ks. kuva 3). Mittausjärjestelmässä yksi asuinkerroksen reititin muodostaa usean haaran langattoman yhteyden huoneiden antureiden kanssa.

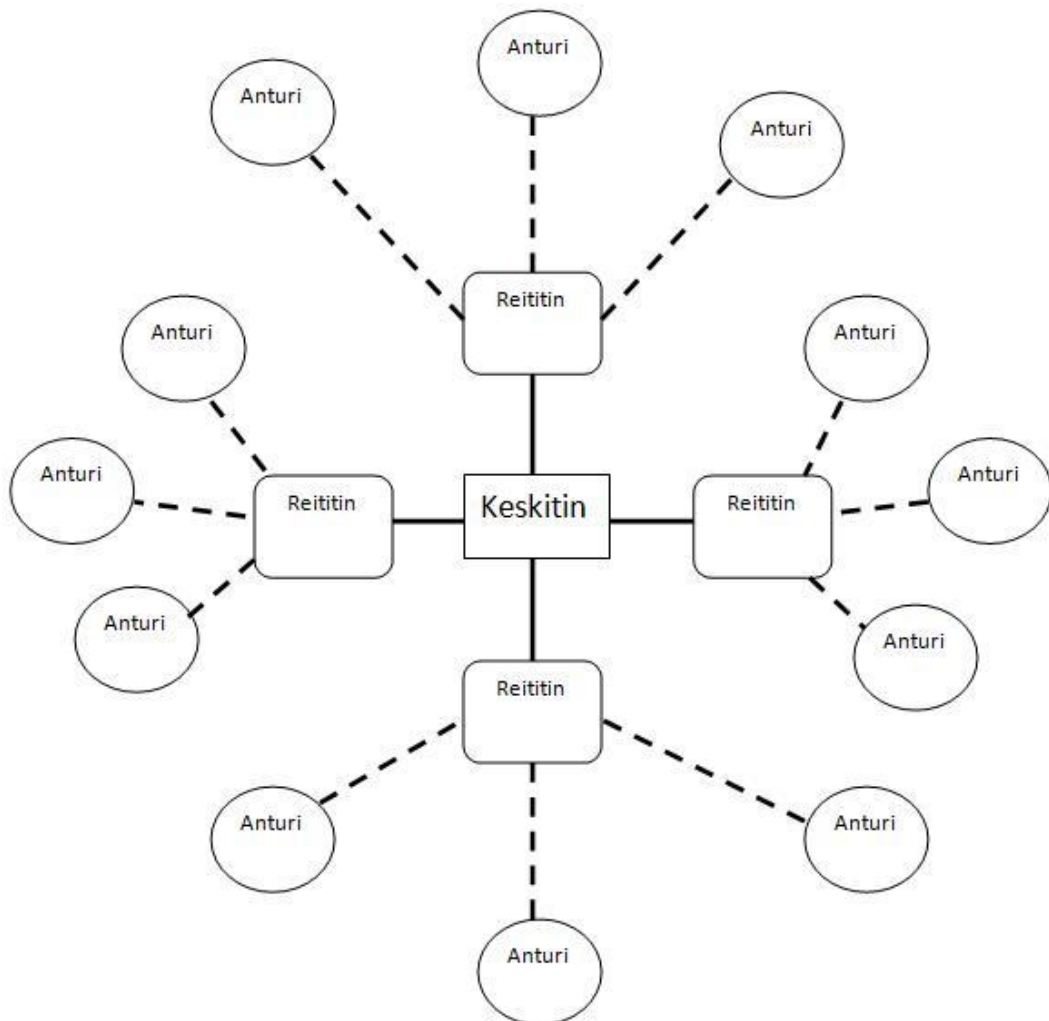


Kuva 3. Antureiden ja reitittimen välinen tähtimäinen radioyhteys.

Tähtimäisen kytkennän etuna on sen yksinkertainen rakenne ja siirtotien varaaminen langattomassa tiedonsiirrossa. Tähtimäisessä kytkennässä siirtotietä käytetään kaksi-

pisteyhteytenä (point-to-point) anturilta reitittimelle ylävirtaan. Kun käytössä on sama kanta-aaltotaajuus 434 MHz:n antureiden välillä mittausjärjestelmässä, molempien signaali katoaa, jos tiedonsiirto tapahtuu samanaikaisesti samalla siirtotiellä. Tähtimäinen kytkentä mahdollistaa myös kaksipisteyhteyden reitittimeltä antureille alavirtaan. (1, s. 77, 106; 2, s. 73.)

Mittausjärjestelmän kokonaiskuvan muodostaa joukko tähtimäisiä kytkentöjä (kuva 4).



Kuva 4. Joukko tähtimäisiä kytkentöjä. Reitittimet kytketään johdoin keskittimeen.

Lopuksi eri reitittimet on yhdistetty langallisesti keskittimelle, joka kerää kaikki vastaanotetut mittatiedot ja hallinnoi verkkoa. (3.)

3.2.2 Point-to-point

Yksisuuntaisen yhteyden lisäksi tähtimäinen kytkentä mahdollistaa vuorosuuntaisen point-to-point -yhteyden. Mittausjärjestelmässä anturit lähettävät aluksi reitittimelle mitaustietojaan, kun siirtotie on vuorollaan jokaisen anturin käytössä. Lopuksi samalla taajuudella anturit myös kuuntelevat vuorollaan reititintä. Ne mm. päivittävät kideoskillaattoritietojaan saamiensa aikatietojen perusteella. Tällä tavoin anturien välistä aikasykronointia ylläpidetään. (3.)

Mittausjärjestelmän aikajakokanavoinnissa antureiden lähetysajat on jaettu kiinteään pituisiin aikaväleihin, jotka toistuvat säännöllisesti. Mittausdatan siirto tapahtuu ensiksi yksisuuntaisesti antureilta reitittimelle. Tämän jälkeen anturien ja reitittimen välisessä tiedonsiirrossa käytetään TDD (Time Division Duplex)-nimistä muunnelmaa. Anturit lähettävät kellonaikatietojaan reitittimelle. Näiden aikojen väleissä reititin välittää kellonsiirtotietoja kullekin anturille erikseen, jolloin kyseinen anturi kuuntelee ja siirtää kellonaikaansa. Yhden kokonaisen TDD-aikavälin aikana tapahtuu siis yhden anturin ja reitittimen välinen vuorosuuntainen yhteys. Aikavälit kiertävät anturista toiseen järjestyksessä, ja lopuksi reitittimet kokoavat niiltä saadut tiedot bittijonoksi keskittimelle. (1, s. 75, 106; 2, s. 24; 3.)

3.2.3 Kytkentöjen vertailu

Tähtimäisen kytkennän lisäksi langattomassa tiedonsiirrossa voi esiintyä rengaskytkentöjä sekä näiden molempien yhdistelmiä. Rengaskytkennässä laitteet kytketään renkaaseen, jossa jokainen on verkon tiedon välittäjänä. Tieto kulkee laitteelta toiselle ja solmujen järjestyksestä riippuen sanoma voi joutua kulkemaan täyden kierroksen. Käyttämällä kahta eri rengasta tiedonsiirto voidaan tehdä niissä vastakkaisiin suuntiin, jolloin tiedon vastaanottaminen on nopeampaa solmujen välillä. Rengaskytkennässä tiedon siirtäminen voidaan tehdä myös reitittimen kautta. Reititin kytkisi tiedon oikealle vastaanottimelle eli solmulle. Rengaskytkentä muistuttaisi silloin reitittimen ulkopuolelta tähtimäistä kytkentää. (1, s. 78.)

Nykyisessä mittausjärjestelmässä tietoa ei tarvitse välittää anturilta toiselle. Rengaskytkennän soveltaminen mahdollistaisi tarkasta aikajakokanavoinnista luopumisen. Anturit odottavat omaa vuoroaan edeltävän anturin ja reitittimen välillä. Reititin kutsuu

seuraavaa anturia, ja tieto renkaassa etenee. Tiedonkulku voisi olla varmempaa virhetilanteiden ja aikasykronoinnin kannalta.

3.2.4 Wireless mesh -verkot

Nykyaikainen isoja alueita kattava wireless mesh -verkko koostuu useista radiolähetinsolmuista, jotka kommunikoivat keskenään. Verkon topologian muodostaa joukko tähtimäisiä kytkentöjä, joissa tiedonsiirron suunta voi vaihdella parhaimman kuuluvuuden saamiseksi. Vain yhden solmun tarvitsee olla liitettynä johdoin palvelimeen. Langattomat solmut voivat olla esim. paristokäyttöisiä, aurinkopaneeleja hyödyntäviä tai kytkettyinä vaihtoverkkojännitteeseen. Mesh-verkko hyödyntää WiFi-standardeja (Wireless Fidelity) IEEE 802.11 a, b ja g kommunikoidessaan solmujen ja niiden käyttäjien kesken. Solmut ohjelmoidaan osaksi verkkokokonaisuutta niin, että ne automaattisesti löytävät nopeimman siirtotien solmulta toiselle palvelimelle asti. Riippuen verkon suuruudesta jonkin solmun tehtävä voi olla yhdistää tieto jälleen takaisin palvelimeen langattomasti. Solmuilla voidaan kattaa isoja alueita ja tarjota julkisia palveluita. Mitä tiheämmässä solmuja on toisiinsa nähden, sitä parempi on signaalien häiriönsietokyky, nopeus ja kuuluvuus. (10.)

Wireless Sensor Network (WSN) ja Wireless Mesh Sensor Networks (WMSN) perustuvat langattomaan mesh-radioverkkoon. Lähtökohtana on solmujen pieni tehonkulutus ja pääteaseman verkon ylläpito sekä Ethernet-kytketyminen. Mittaussovelluksiin perustuvat solmut ovat suurimman osan ajasta tehon säästötilassa, mutta niiden joukossa olevat reititin solmut lähettävät ja vastaanottavat signaaleja jatkuvasti. Reitittimiksi määritetyt solmut käyttävät siis erillistä tehölähdettä, ja niiden avulla voidaan kasvattaa topologian kokoa. WSN-ratkaisussa solmuille määritetyt sarjanumerot löytyvät pääteaseman reitittimen listalta ja liittymiseksi mesh-verkkoon solmut lataavat aluksi konfiguraatietietonsa sieltä. Solmujen määrää voidaan siis helposti lisätä osaksi alkuperäistä topologiaa. (11.)

Erona tämän työn mittausjärjestelmään on WSN-ratkaisut, jotka ovat luonnostaan ns. itse toipuvia signaalien katketessa. Solmujen lähettämät signaalit löytävät tiensä uutta reittiä pitkin, kuten reititinsolmujen kautta pääteasemalle. WSN-topologia voidaan muodostaa yhä suuremman alueen kattavaksi sijoittamalla reititinsolmuja tietyin välimatkoin. Mutta yhden reitittimen tähtitopologiaa varten voi olla enintään noin kahdeksan

solmua. Mittausjärjestelmässä käytetään vähintään yhtä reitintä 1024 anturia kohden. (3; 11.)

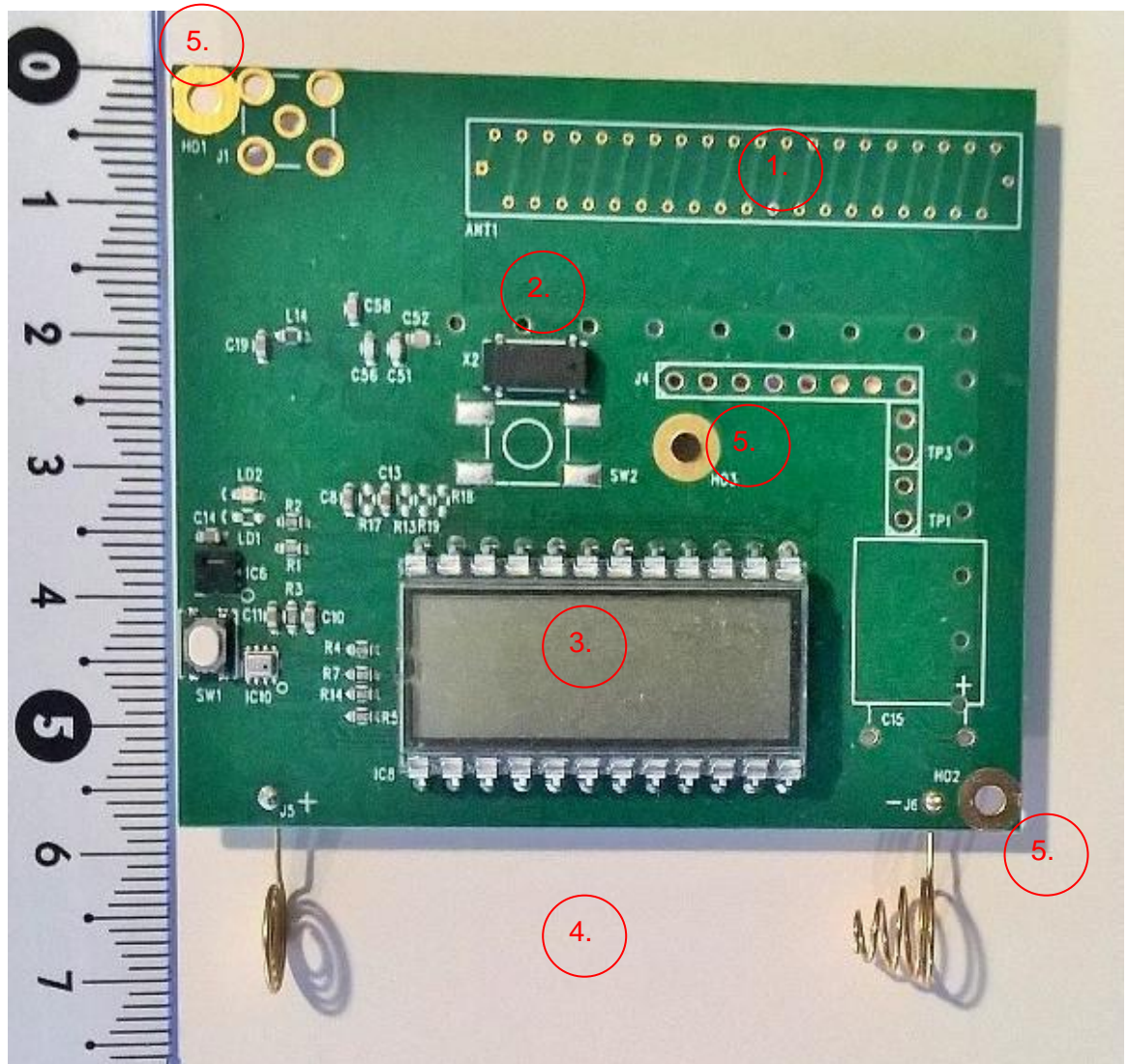
3.3 Komponentit

3.3.1 Paristokäyttöiset lämpöanturit

Mittausjärjestelmän lämpöanturit mittaavat säädettävien väleillä huoneiden lämpötilaa, kosteutta, hiilidioksidipitoisuutta ja ilmanpainetta. Mitatun keskimääräisen lämpötilan perusteella voidaan tasapainottaa patteriverkoston toimintaa. Suhteellisen kosteuden ja sisäilmanpaineen mittauksella voidaan ylläpitää rakennuksen kuntoa ja säädellä ilmanvaihtoa. Hiilidioksidipitoisuuden mittaamisella voidaan arvioida energiankulutusta kodinkoneista ja asukkaista hukkaenergian minimoimiseksi. (4.)

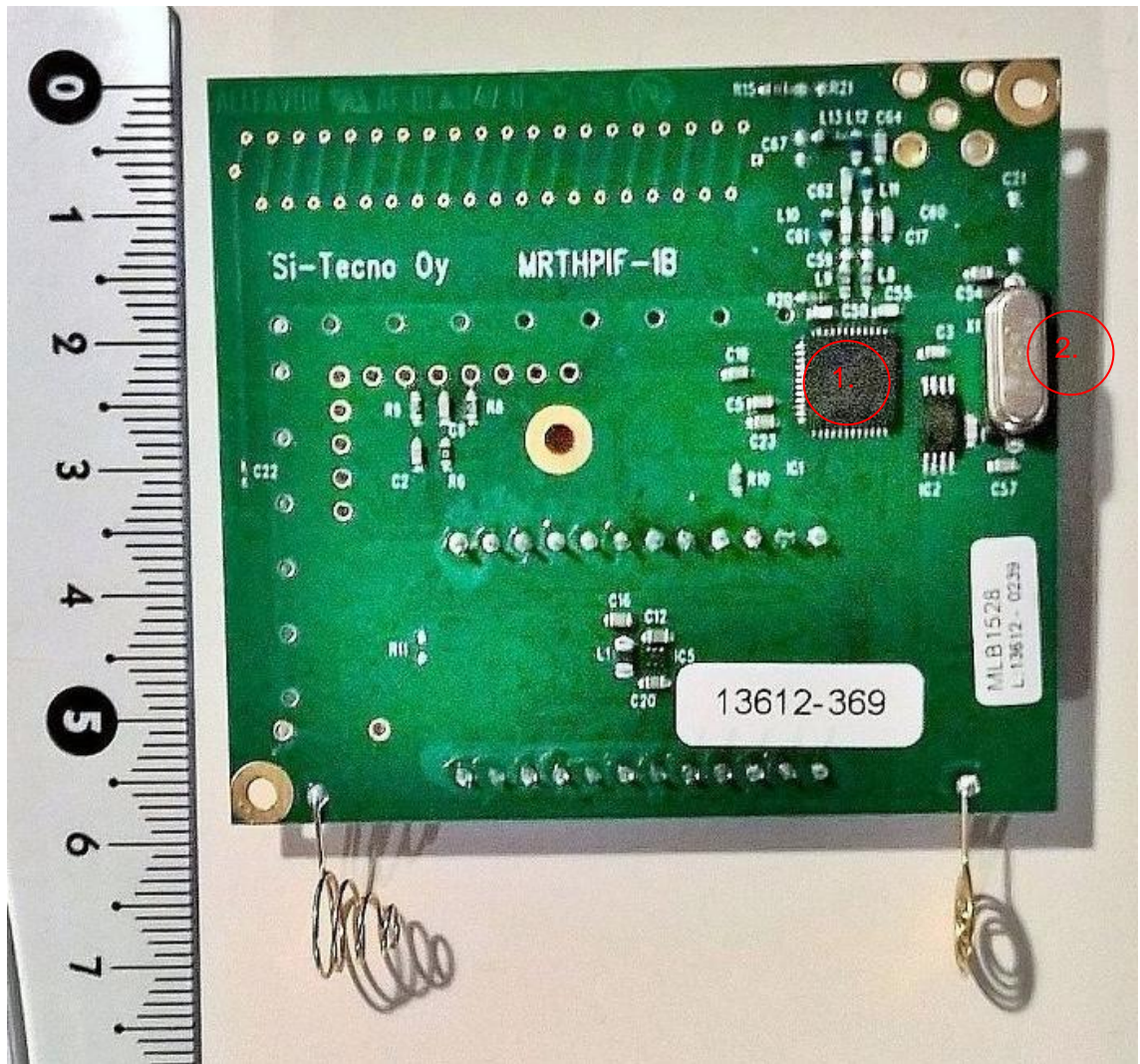
Paristojen käyttöikä on n. 10 vuotta, kun mittaus-/lähetysväli on 10 minuuttia. Anturit tallentavat mittadataa omaan muistiinsa 8 viikon ajan 10 minuutin mittausvälillä. Anturi kuluttaa tehoa peruskulutuksessa ja vastaanottimen päällä pidossa sekä radiosignaalin lähetyksessä. (4.)

Kuvassa 5 on anturi ilman koteloä edestäpäin. Ympyröitynä ensimmäisenä on käänin kierroksista koostuva ympärisäteilevä monopoli antenni radiosignaalin lähetykseen ja vastaanottoon. Toisena on kello-oskillaattorikide mikroprosessorin toimintojen ja aikasykronoinnin tahdistukseen. Kolmantena on taustavaloton LCD-näyttö, joka kuvaa haluttua mittaussuuretta tummalla segmenttikuvilla. Neljäntenä on 3,6 V:n AA-paristolle varatut kytkennät. Viidentenä ovat kuparireunuksiset reiät kotelon kiinnittämistä varten. (4.)



Kuva 5. Lämpöanturi edestäpäin kuvattuna.

Kuvassa 6 on sama anturi takaa.

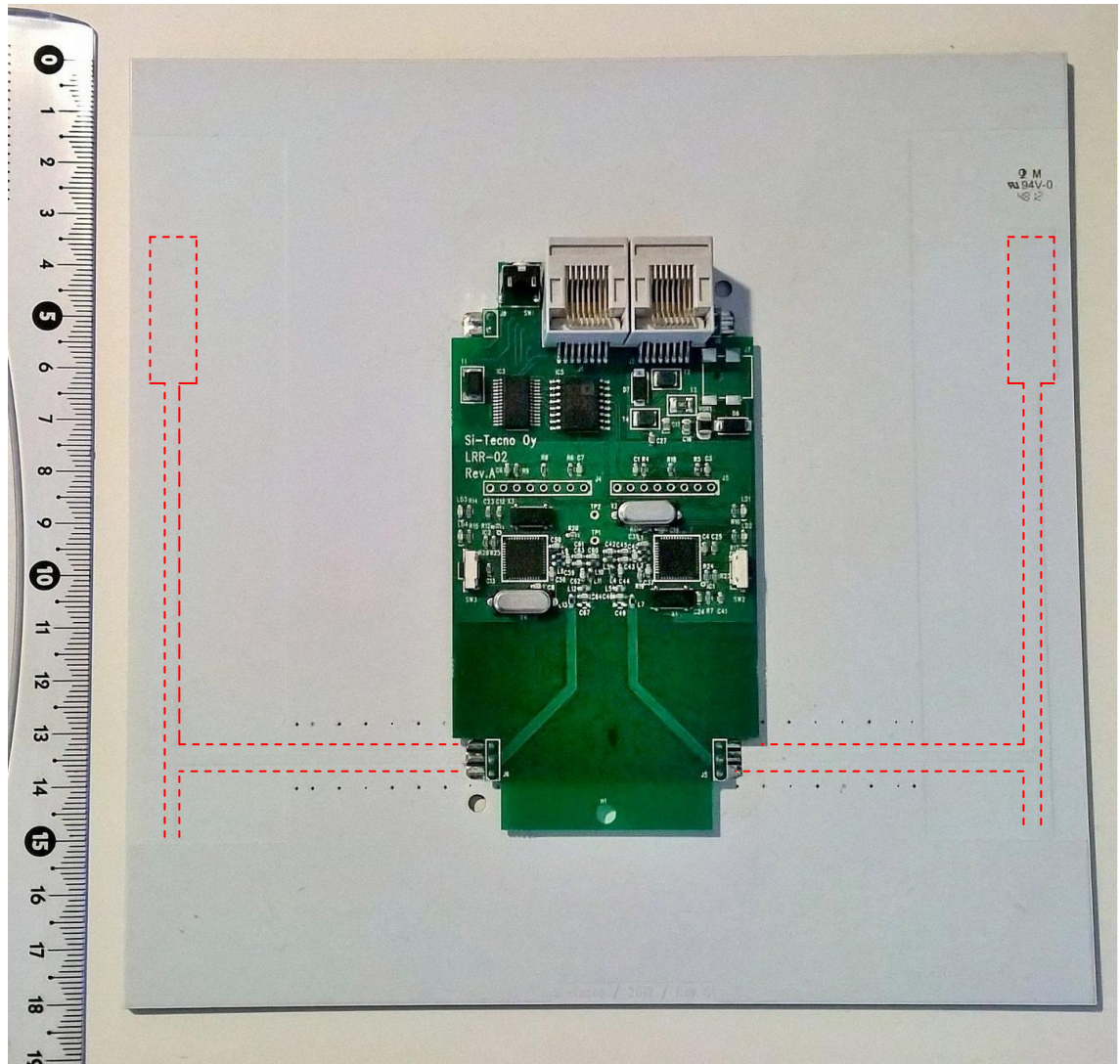


Kuva 6. Lämpöanturi takaa.

Ympyröitynä ensimmäisenä on mikroprosessori signaalien käsittelyä ja komentojen suorittamista varten. Mikroprosessorissa moduloidaan digitaalisesti suurtaajuista signaalia mittausdatan sisältävällä informaatiolla. Suurtaajuinen signaali saadaan oskillaattorista, joka on merkitty kuvassa numerolla 2. (3.)

3.3.2 Reititin

Mittausjärjestelmän yksi reititin koostuu kahdesta apertuuriantennista, niitä yhdistävästä piirilevystä ja LAN-kytkennöistä keskittimelle. Apertuuriantennit ovat lähes isotrooppisesti säteileviä dipoliantenneja. Kuvassa 7 on reititin edestäpäin kuvattuna. Punaisilla katkoviivoilla on havainnollistettu eristemateriaalin sisällä olevia antenneja.



Kuva 7. Reititin edestä.

Mittausjärjestelmässä kahden antennin käyttäminen perustuu signaalien taajuuden ja paikan diversiteettiin. Monitie-etenemisen takia signaalit voivat heijastuessaan kumota toisensa reitittimellä. Tällöin signaalien vaiheet ovat 180 astetta toisiinsa nähden, eli puoli aallonpituutta. Kun vastaanottimessa käytetään kahta eri etäisyydellä toisistaan olevia antennia, signaaleilla on joko aallonpituuden tai taajuuden suhteen eroa. Silloin reititin pystyy aina tulkitsemaan antureilta lähetetyt signaalit. Kahden tai useamman yhdistelmäantennin käytöllä voidaan saavuttaa myös parempi vahvistus.

4 Antureiden aikasykronointi

4.1 Tahdistuksen kideoskillaattori

4.1.1 Oskillaattorityypin toiminta

Mittausjärjestelmän antureissa käytetään 32,768 kHz:n taajuista kidettä mikroprosessorin kellosignaalia ja aikajakokanavoinnin tahdistusta varten. Taajuus on soveltuva sen vähäisen tehonkulutuksen takia. Se on myös standarditaajuus reaaliaikaisissa kellosovelluksissa. Mikroprosessorin toiminnallinen virta on alle 1 μA , kun oskillaattori, ajastin ja kellosignaali ovat käytössä. Kiteeseen kytkettävä teho on maksimissaan 1 μW . (12.)

Pietsosähköisen ilmiön avulla kvartsikiteen mekaaninen värähtely muuntuu elektroni- seksi signaaliksi ja päinvastoin. Kuvassa 8 on esitettyä kiteen mekaaninen ”haaruk- kamalli” (tuning-fork) sekä värähtelypiirin sijaiskytkentä. Sijaiskytkennässä kiteen me- kaanisia ominaisuuksia kuvataan RCL-piirin komponentein R_m , L_M ja C_M . Shunt- kondensaattori C_0 muodostuu kiteen kotelosta, sen liitäntäpinneistä sekä piirilevyn ominaisuuksista. Näistä komponenteista voidaan muodostaa kiteen sarjaresonanssi- ja rinnakkaisresonanssitaajuuksille kaavat. Sarjaresonanssitaajuutta kuvataan kaavalla (4.1):

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M C_M}}. \quad (4.1)$$

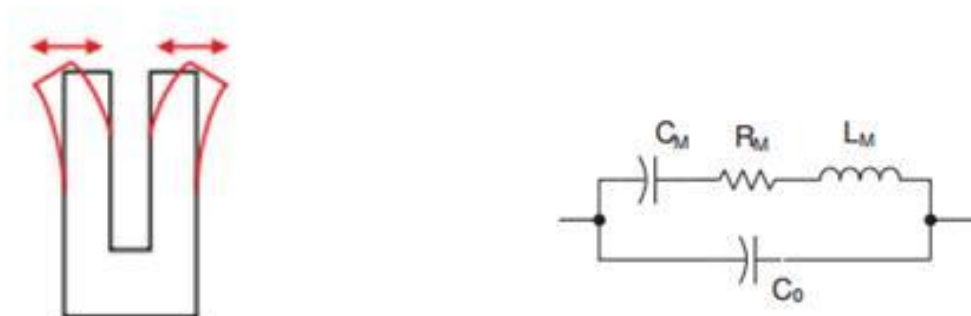
Rinnakkaisresonanssitaajuuden kaavassa (4.2) huomioidaan vielä C_0 :

$$f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M C_M}} \sqrt{1 + \frac{C_M}{C_0}}. \quad (4.2)$$

Kuvan 8 sijaiskytkennästä voidaan muodostaa myös yhtälö sarjaresonanssivastukselle (ESR) Equivalent series resistance:

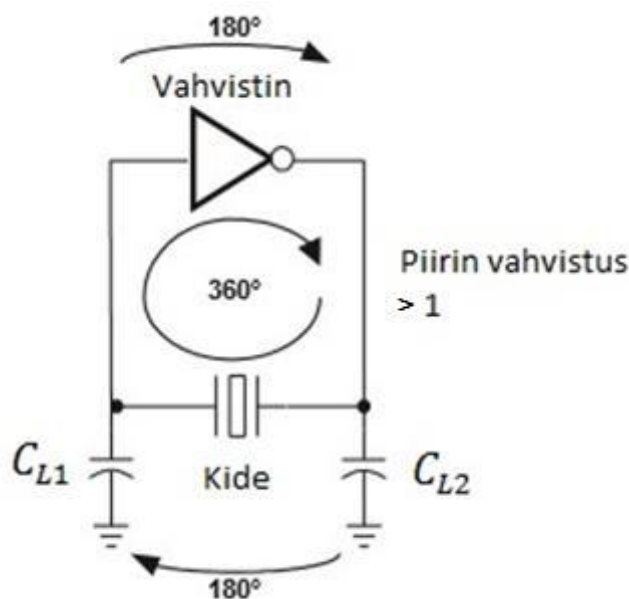
$$ESR = R_M \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2, \quad (4.3)$$

jossa kondensaattori C_L kytkeytyy kiteen ja maan välille (ks. kuva 9). ESR kuvaa kiteen mekaanisia värähtelyhäviöitä. Pienillä pintaliitoskiteillä on yleensä suuri ESR-arvo, koska niissä esiintyy värähtelyä enemmän, ja täten energiankulutus kasvaa. ESR-arvo on yleensä väliltä 30–100 k Ω . Eri kiteiden data sheet -tiedoissa annetaan arvot komponenteille C_0 , C_L , R_m tai ESR. (12.)



Kuva 8. Oskillaattorin mekaaninen kide ja värähtelypiirin sijaiskytkentä (12).

Antureissa kide on osana Pierce-oskillaattorikytkentää (kuva 9). Kytkentä mahdollistaa halutun sarjaresonanssitaajuuden 32,768 kHz:n tarkan käytön. Kiteen värähtelyn takaamiseksi piirin vahvistuksen on oltava enemmän kuin yksi, ja piirissä signaalin täytyy olla samassa vaiheessa. Muuten piirissä esiintyy vaihekohinaa. Invertoiva vahvistin muodostaa 180 asteen vaihesiirron signaalille sekä sen halutun vahvistuksen. Kuorman kytkettävät kondensaattorit ja kide muodostuvat signaalille toisen 180 asteen vaihesiirron. Kondensaattoreiksi C_{L1} ja C_{L2} valitaan kaksi yhtä suurta arvoa, jotka vaikuttavat halutun taajuuden stabiilisuuteen. Kuorman kapasitanssien laskemisessa huomioidaan Shunt-kondensaattorin C_0 :n arvo, joka on tyypillisesti 2 pF. Kuorman kapasitanssien suuruus on väliltä 6–15 pF. Kytkennän hyödyntäessä sarjaresonanssitaajuutta, erillisten kondensaattorien kapasitanssien ja kiteelle ominaisten kapasitanssien toleranssien avulla voidaan laskea värähtelyn keskitaajuuden vaihtelut. Kondensaattorien muodostama yhteiskapasitanssi sijoitetaan silloin yhtälöön C_m :n tilalle. (4.1). Yhtälön avulla saadaan silloin määritettyä tärkeitä taajuudenvaihteluita vastaavia kuorman kapasitanssien arvoja ohjelmoinnin apuvälineeksi sekä esim. piirilevysuunnittelusta johtuvien kapasitiivisten tekijöiden määrittämiseksi. (12; 18.)



Kuva 9. Pierce-oskillaattorikytkentä. (12).

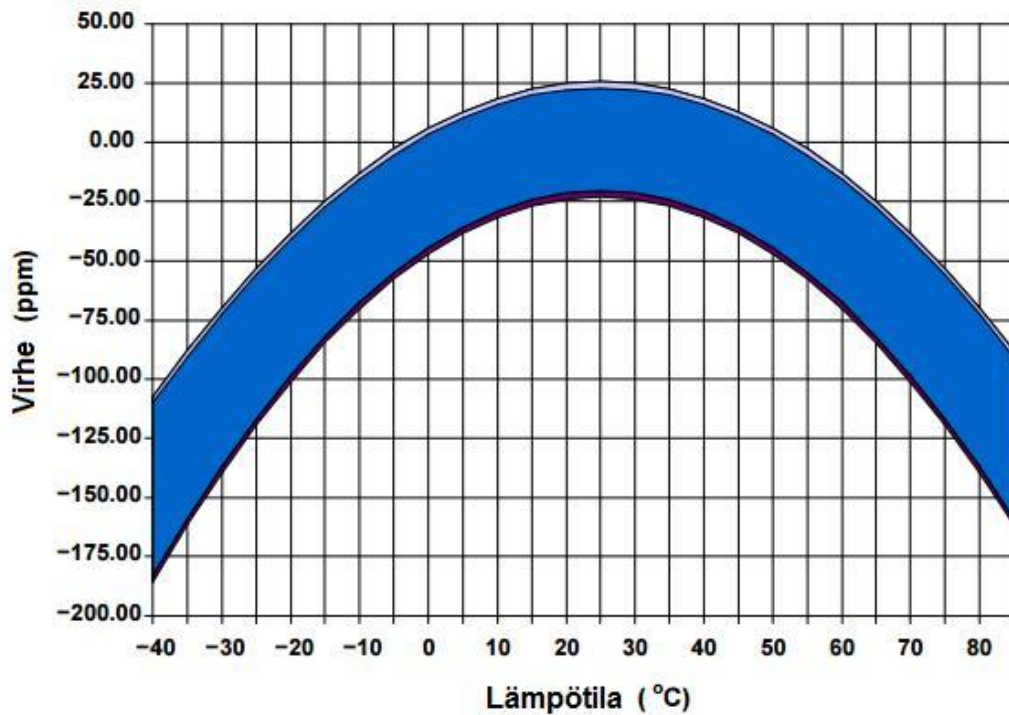
Pierce-kytkentään on lisättävä vielä riittävän suuri vastus vahvistimen lähtöön, jotta lähtövirta ei vahingoita haarukkamallisen kiteen rakennetta. Vahvistimen tuloon ja lähtöön lisätään lopuksi siirtokapasitanssit signaalia varten. Piiriin kytkeytyy aluksi kohinaa, joka myöhemmin stabiloituu piirin ominaisvärähtelytaajuudelle. (12.)

4.1.2 Oskillaattorin taajuusriippuvuus

Tuotannossa mittausjärjestelmän kiteet mitataan tarkasti. Antureiden haarukkamallinen kide on hyvin herkkä taajuudenmuutoksille lämpötilan suhteen. Kiteillä on huoneenlämmössä (+25 °C) n. ± 25 ppm (parts per million) taajuudenvaihtelua. Kompensoitavia virhearvoja ovat Pierce-kytkennän kuorman kondensaattorit C_{L1} ja C_{L2} . Ne ovat mikroprosessorin sisäisiä komponentteja. Vaihtoehtoisesti myös ulkoisten kondensaattorien käyttö olisi mahdollista.

Kuvassa 10 on esitettyä mittausjärjestelmän mikropiirivalmistajan näkemys kiteen ja kytkennän mikroprosessorin tuomista virheistä taajuudenvaihtelussa lämpötilan suhteen. Kuvaajista harmaalla esitetään mikropiirin tuomia maksimivirheitä ja violetilla sen minimivirheitä. Niissä on tutkittu erilaisia kuorman kondensaattorien kapasitanssien arvoja yhdessä mikropiirin muodostamien kapasitanssien kanssa. Tulosten mukaan oikeilla kapasitanssien arvoilla voidaan saavuttaa huoneenlämmössä n. ± 1 ppm:n vaihtelua keskitajuudelle. Niiden tuoma taajuusvaihtelu kiteen keskitajuuteen nähden

olisi $32,768 \text{ kHz} * (\pm 1) * 10^{-6} = \pm 0,032768 \text{ Hz}$. Ajallisesti taajuusvaihtelu tekee silloin päivää kohden n. $\pm 0,086$ sekuntia eli $\pm 0,86$ ms. Sinisellä kuvataan kiteen merkittävimmät virhetekijöitä, eli eri kiteiden keskinäisiä toleransseja, mekaanisesta väsymisestä johtuvaa ikääntymistä ja lämpötoleranssia.



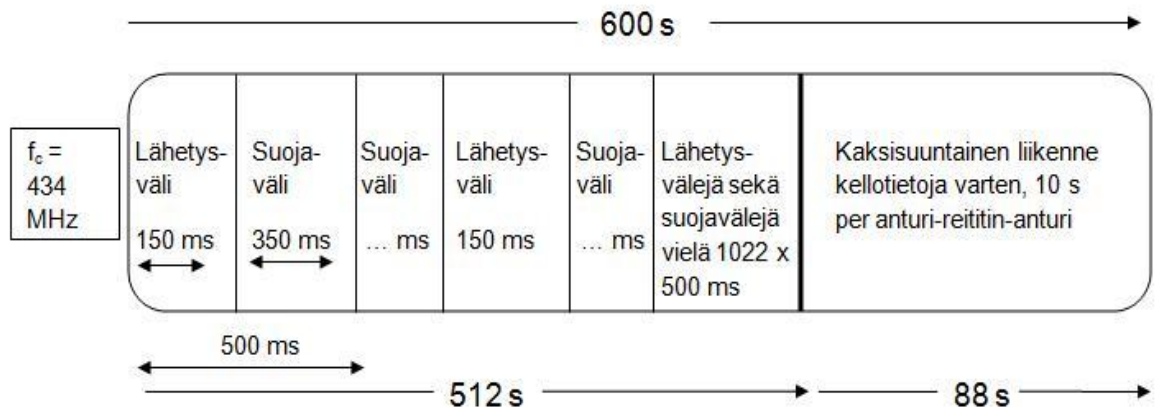
Kuva 10. Kiteen keskitaajuuden poikkeamat miljoonan osissa lämpötilan suhteen (18).

Eri kiteiden data sheet -tietojen perusteella ikääntymisellä on ensimmäisen vuoden aikana huoneenlämmössä n. ± 3 tai ± 5 ppm:n vaihtelua. Suurin vaikutus taajuuden virheeseen on lämpötoleranssilla. Huoneenlämmössä se on n. ± 20 ppm. Tämä vastaa päivän aikana n. ± 173 ms. (13; 18; 19; 20.)

4.2 Kanavointitekniikka

4.2.1 Aikajakokanavoinnin mittaus

Mittausjärjestelmän antureiden TDMA-kehys koostuu mittausdatan lähetyksajoista, suojaväleistä niiden joukossa sekä kaksisuuntaisesta liikenteestä kellonaikojen lähetykseen ja vastaanottoon (kuva 11). TDMA-kehysten kokonaispituus on 10 min, ja se jaetaan 1024 anturin kesken. Jokaiselle anturille on varattu 500 ms:a aikaa mittausdatan lähetykseen. Kukin anturi lähettää vuorollaan 150 ms pituisen sanomansa. Synkronoinnin ylläpitämiseksi jää 350 ms suojaväliä tai ns. joustoaikaa. Mittausdatojen lähetykseen varattu kokonaisaika on siis 512 s. Lopuksi kellonaikojen siirtämiseen varattua aikaa jää 88 sekuntia. Reititin kysyy antureilta aikatietoja, ja siirtotien ollessa vapaa kyseinen anturi antaa kellonaikansa. Vastauksen saatuaan reititin kertoo vielä, kuinka paljon aikatietoa pitää korjata. Kullekin reititin-anturi-reititin yhteydelle on varattu 10 s aikaa. Antureiden kellonajat päivitetään kerran vuorokaudessa. Kyseessä on vuorosuuntainen TDD-yhteys (ks. s. 12–13). (3.)



Kuva 11. TDMA-kehysten rakenne.

Mittausjärjestely koostuu 10 anturista ja yhdestä reititimestä, joka on kytkettynä LAN-kaapelilla piirikorttiin. Piirikortti on myös kytkettynä verkkojännitteeseen sekä USB-nettitikun kautta pilvipalveluun. Pilvipalveluun ohjattuun linkkiin tallentuu päivittäin mittausdataa lämpötilasta ja kosteudesta sekä aikaeroista. Aikaerot kertovat, kuinka paljon kellosynkronointia tulisi siirtää ajanmuutoksena Δt jokaista anturia kohden, kun $\Delta t = t_{\text{loppu}} - t_{\text{alku}}$. Mittayksikkönä oli 10 ms, joka on huomioitu laskennallisesti. Aikaeroja kertyy joka tunti, ja ne pyöristetään kokonaisluvuiksi. Mittauksissa keskitytään aluksi radioyh-

teyden kuuluvuuteen niin, että anturit ovat aikasykronissa. Koejärjestelyssä aiheutetaan huono kuuluvuus yhdelle antureista peittämällä se alumiinifoliolla. Tarkastellaan, mitä muutoksia mittausdataan syntyy. Tämän jälkeen peitetään kaksi anturia lisää varmistuen, että tällä kertaa anturit eivät kuulu reitittimelle asti. Seuraavaksi kymmenestä anturista on kahdeksan peitettyä. Lopuksi antureista ei ole mikään peitettyä. Mittaus-tuloksia on esitetty vuorokauden ajalta jokaista koejärjestelyä kohden.

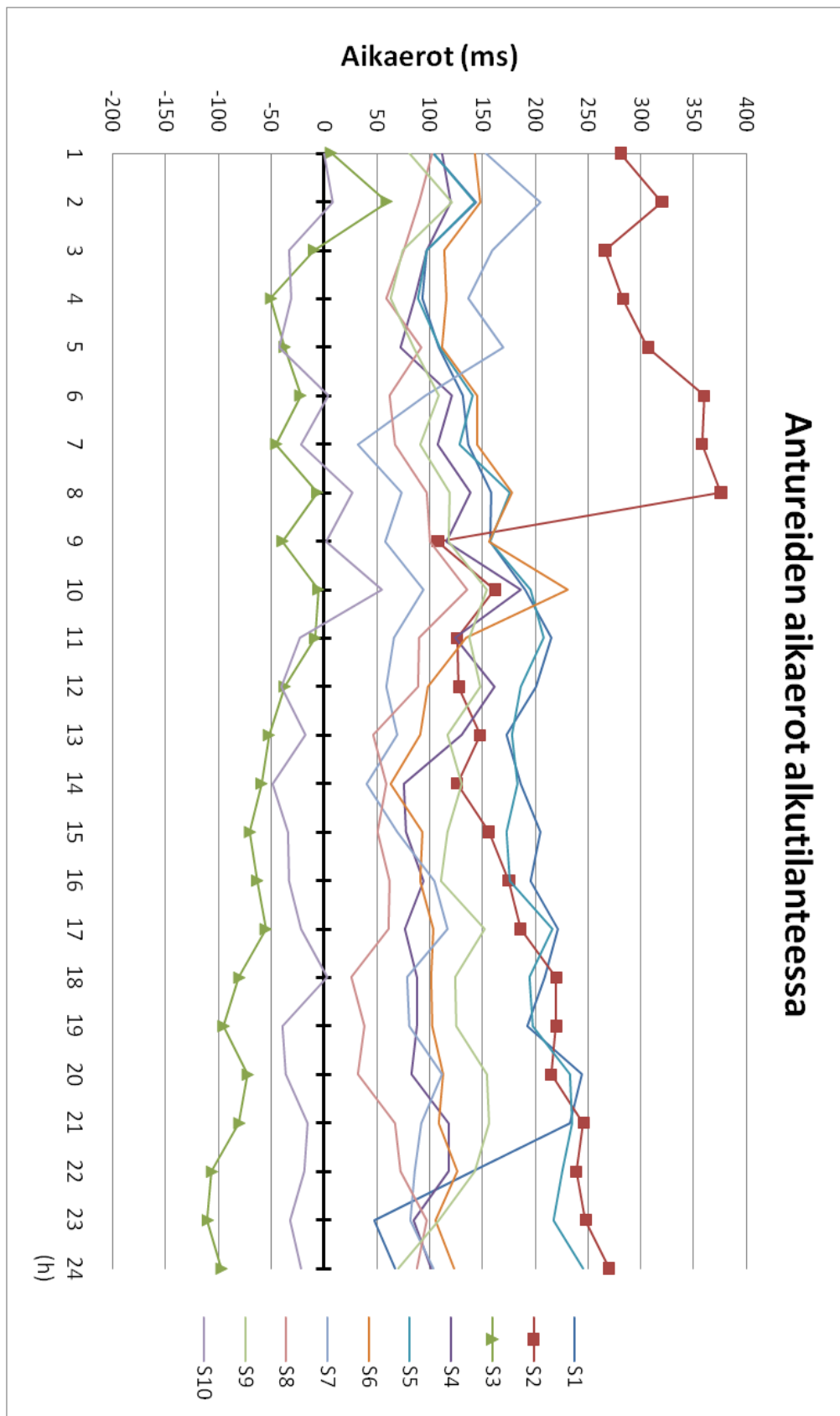
4.2.2 Tulosten tulkinta

Vertailussa keskitytään antureiden aikaeroihin, jotka ovat lähellä tai ylittävät suojavälik-si tarkoitettua 350 ms:n aikaväliä. Tarkastellaan muutoksia tästä edeltävien ja seuraavien antureiden aikaeroissa, miten muutoksia ilmenee ja kuinka nopeasti. Ideaalitapa-uksessa suojaväliä on riittävästi ennen lähetysväliä sekä sen jälkeen eli ± 175 ms.

Taulukossa 2 näkyvät alkutilanteen aikaerot. Taulukkoon on merkitty punaisella suoja-välin ylittäviä positiivisia arvoja ja keltaisella joitakin negatiivisia arvoja. Kuvassa 12 antureiden kuvaajat ovat pääosin halutulla välillä -100 – 250 ms, mutta anturin S2 aika-erot kasvavat melko suuriksi yli 350 ms:n rajan ensimmäisten kahdeksan tunnin aika-na. Täten anturin tulisi siirtää kellosynkroniaan ajassa taaksepäin eli lähettää sano-mansa aikaisemmin. S2 palautuukin yhdeksännen tunnin kohdalla 108 millisekuntiin, josta aikaero vähitellen kasvaa jälleen. Anturin S3 aikaerot ovat puolestaan negatiivisia eli sanoman lähetystä tulee hidastaa. Kuvaajista nähdään, että S3 lähettää sanomansa yhä nopeammin, kun S2 jatkaa myöhästymistään.

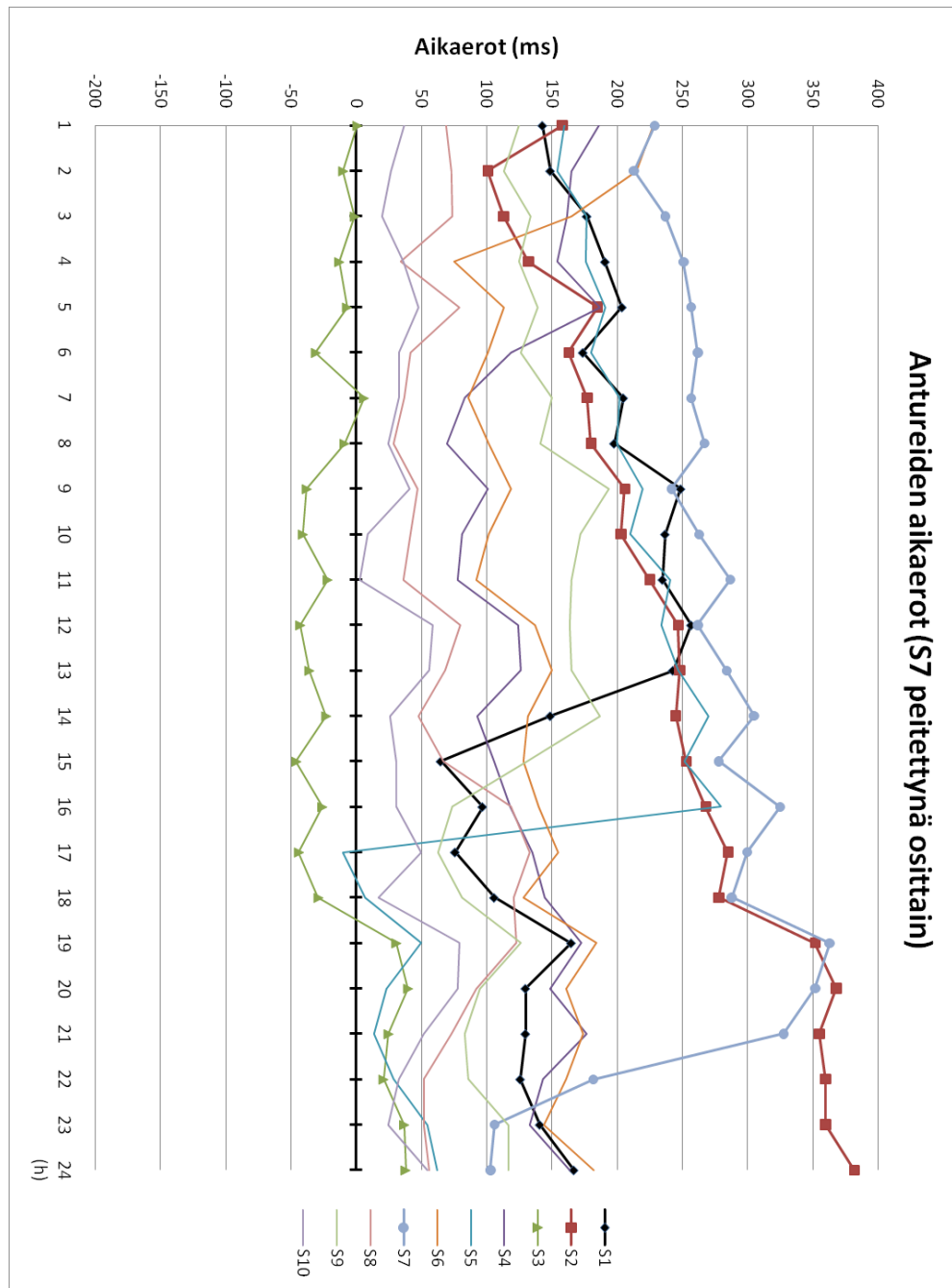
Taulukko 2. Alkutilanteen aikaerot.

	1	2	3	4	5	6
S1	104	144	98	93	109	132
S2	281	320	266	283	307	360
S3	7	60	-9	-50	-37	-22
S4	112	120	97	86	73	121
S5	104	143	98	89	110	141
S6	143	148	114	116	112	145
S7	153	205	160	137	170	96
S8	103	90	76	59	92	62
S9	81	121	75	63	85	109
S10	0	9	-33	-31	-42	4
	7	8	9	10	11	12
	137	159	158	191	215	201
	358	376	108	162	126	128
	-45	-6	-39	-5	-8	-37
	108	139	116	187	124	162
	129	176	158	196	208	186
	145	178	157	231	135	99
	32	74	58	94	66	59
	68	98	101	136	90	89
	91	119	118	154	138	148
	-22	27	2	55	-23	-40
	13	14	15	16	17	18
	173	187	205	196	222	209
	148	126	156	175	186	220
	-52	-59	-70	-63	-55	-80
	131	76	78	94	77	88
	178	183	173	176	217	195
	91	63	93	91	104	102
	70	41	70	105	117	79
	47	59	51	62	61	26
	117	131	117	111	152	124
	-17	-48	-34	-33	-21	3
	19	20	21	22	23	24 (h)
	193	244	233	141	48	68
	220	215	246	239	248	270
	-95	-72	-80	-106	-110	-97
	88	83	118	118	85	102
	198	233	235	226	218	245
	103	113	109	127	106	123
	81	112	92	86	82	104
	39	32	67	73	97	88
	125	154	156	143	109	71
	-39	-36	-15	-18	-32	-21



Kuva 12. Antureiden aikaerojen kuvaajat alkutilanteessa.

Tilanteessa 2 on anturi S7 peitettyä alumiinifoliolla, ja tästä muodostetut kuvaajat kuvassa 13.

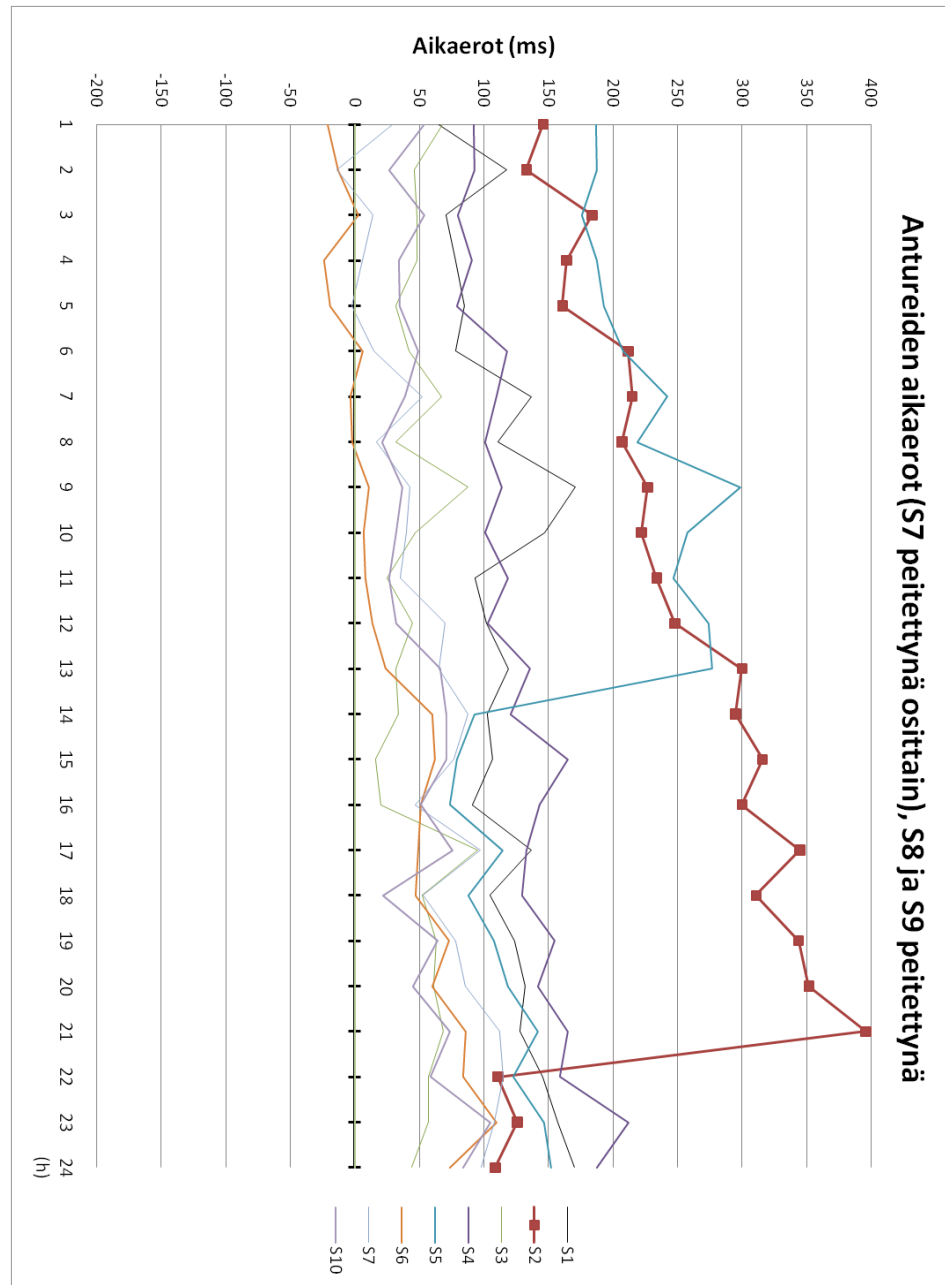


Kuva 13. Antureiden aikaerot tilanteessa 2.

Anturi S7 on ollut seinään kiinnitettyä ja toiselta puoleltaan peitettynä. Kuvaajista nähdään, että S7 myöhästyy sanomansa lähetyksessä yli 350 ms:n rajan ja näin myös anturi S2. Anturi S7 lähettää kuitenkin sanomansa nopeammin pian rajan ylitettyä ja palaa haluttuihin arvoihin. Sen sijaan anturi S2 jatkaa myöhästymistään korjautumatta. Negatiivisia arvoja saa anturi S3, mutta vuorokauden lopussa positiivisia. Muiden antureiden kuvaajat ovat väliltä 0–250 ms.

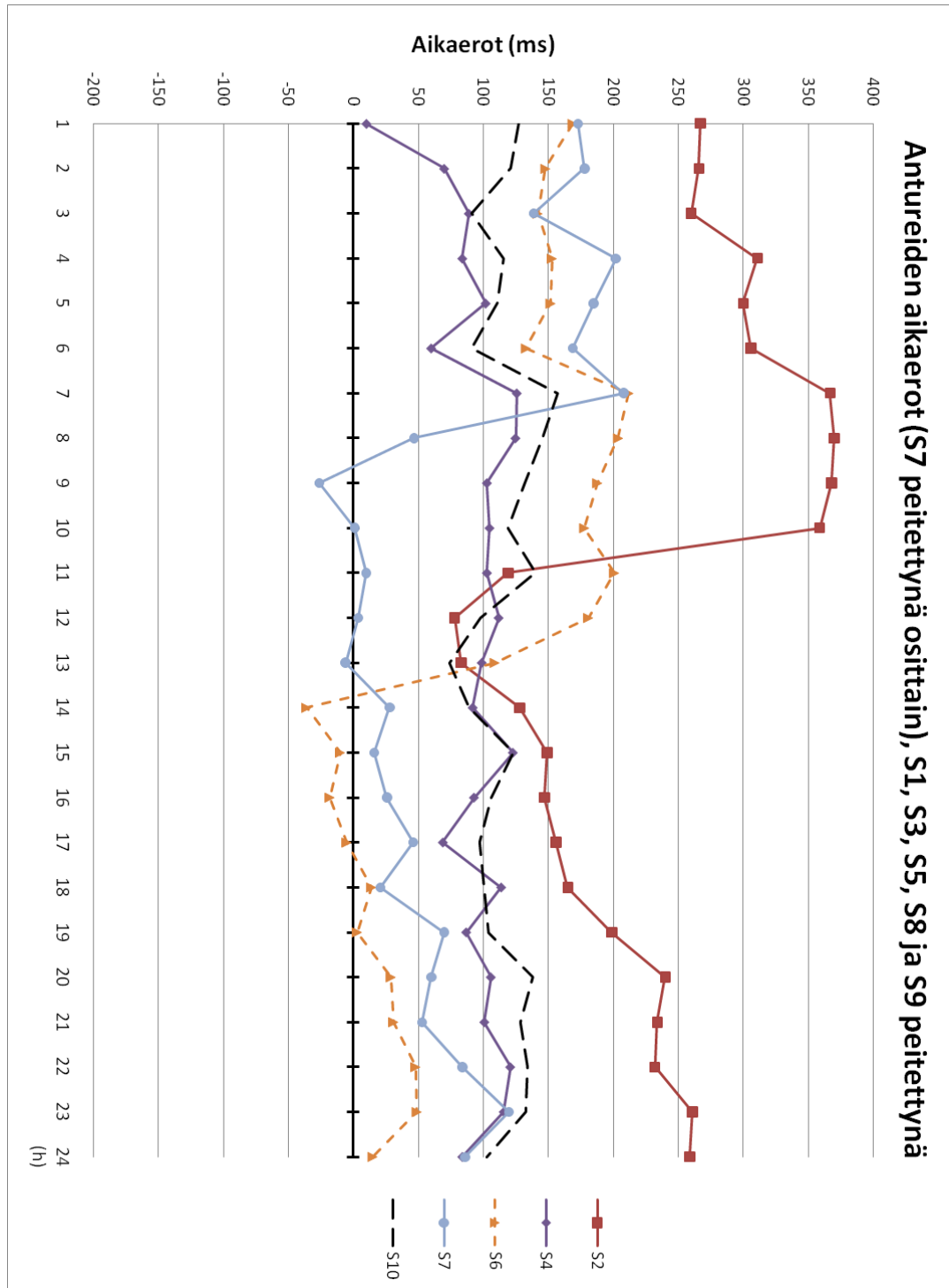
Tilanteessa 3 on anturi S7 peitettynä. Tämän lisäksi ovat peitettynä anturit S8 ja S9 kokonaan (kuva 14). Kuvaajista anturit S8 ja S9 eivät näytä aikaerotietoja ollenkaan.

Antureista muut ovat välillä 0–300 ms paitsi S2, joka käy lähellä 400 millisekuntia 19. tunnin kohdalla, mutta aikaero palaa siitä haluttuihin arvoihin. Antureiden S8 ja S9 peittämisen jälkeen, muiden antureiden arvot vaikuttavat hyviltä tarkasteluajan sisällä lukuun ottamatta anturia S2.



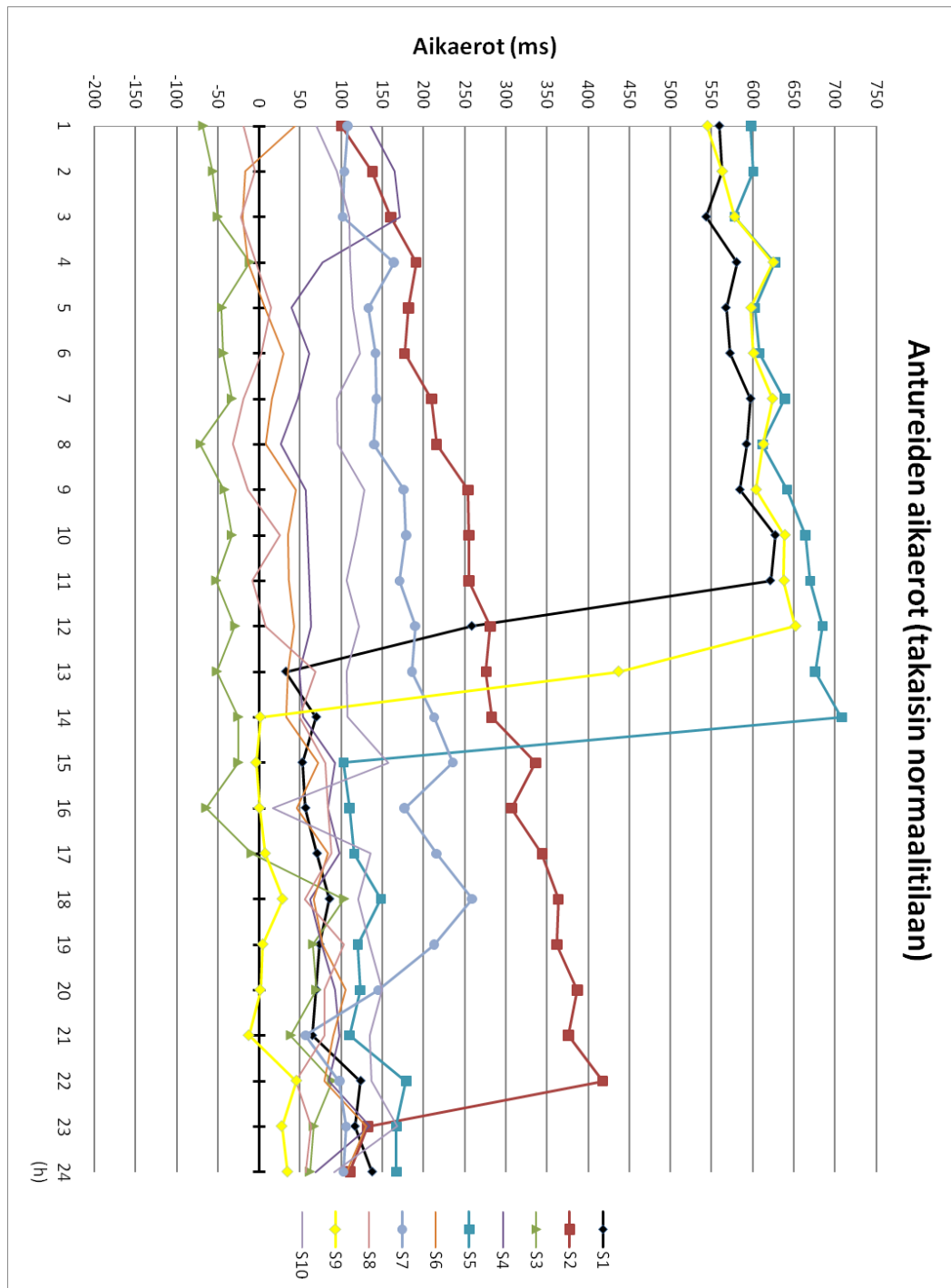
Kuva 14. Antureiden aikaerot tilanteessa 3.

Tilanteessa 4 ovat anturit S1, S3, S5, S7, S8 ja S9 peitettynä (kuva 15). Peitetyistä antureista S7 antaa aikaerotietonsa. Antureista ainoastaan S2 ylittää 350 ms:n rajan, jonka jälkeen aikaero pienenee ja kasvaa jälleen. Muiden antureiden kuvaajat ovat väliltä -50 – 250 ms.



Kuva 15. Antureiden aikaerot tilanteessa 4.

Tilanteessa 5 anturit ovat takaisin normaalitilassa. Kuvassa 16 näkyy huomattavia positiivisia aikaeroja aluksi antureilla S1, S5 ja S9. Myöhemmin kyseiset anturit pysyvät muiden antureiden tavoin välillä -100 – 250 ms. Poikkeuksena ainoastaan anturi S2, jonka aikaero kasvaa arvoon 400 ms, pienenee siitä ja kasvaa jälleen. Anturi S3 saa negatiivisia arvoja.



Kuva 16. Antureiden aikaerot tilanteessa 5.

4.2.3 Tulosten vertailu

Kaikissa mittaustilanteissa on yhtäläistä, että anturin S2 aikaerot suurenevat huomattavasti, jonka jälkeen aikaero vähenee ja kasvaa jälleen. Merkittäviä asioita ovat anturin kiteen kalibroinnin tarkkuus tehtaalla sekä monitie-etenemisestä johtuvat aikaviiveet antureiden sijoittelussa reitittimeen nähden. Anturi S2 oli sijoitettuna ikkunan viereen, mikä mahdollistaa ulkopuolisten aaltojen läsnäolon sekä aaltojen heijastumisen pois-päin. Antureita ei saa sijoittaa esim. suoraan auringonvaloon (4).

Anturin peittäminen alumiinifoliolla aiheuttaa viiveitä aikaeroissa tai aikaeroviestin katkeamista kokonaan. Tilanteessa 2 oli anturi S7 peitettynä osittain, mikä johti sen suurempaan aikaeroon. Anturista S2 oli pilvipalveluun taulukoitujen arvojen mukaan seuraava arvo alle 200 ms tilanteessa 2. Kaikki anturit pystyivät siis korjaamaan aikaerojaan tarkasteluajan sisällä. Kun useat anturit olivat peitettynä tilanteissa 3 ja 4, muiden anturien aikaerot olivat vielä lähellä haluttuja aikaeroja. Tuloksena ei poikkeamaa antureiden välillä. Anturien välistä riippuvuutta aikaeroista ei esiinny kuin antureiden S2 ja S3 välillä tilanteissa 1 ja 2.

Viimeisessä tilanteessa kaikki alumiinifoliot poistettiin. Näistä antureista osalla oli suuria aikaeroja aluksi. Anturit kuitenkin lähestyivät haluttuja aikaeroja. Siihen vaikuttavat reitittimen kuuluvuusalueelle palaamisen lisäksi anturien tahdistukseen käytettävien kiteiden äkilliset lämpötilamuutokset. Anturien lämpötilat muuttuivat lämpösäteilyn heijastuessa alumiinifolioista. Pilvipalveluun kertyneiden mittadatojen perusteella antureiden ilmoittamat lämpötilat olivat kuitenkin jo lähellä huoneenlämpötilaa.

Aikaerot ovat itsenäisiä eri anturien välillä, ja ainoa tieto epäsynkronista olisi ollut mit-taustiedon lähettämättä jääminen tietyltä anturilta. Yli 300 ms:n aikaero tarkoittaa riskiä seuraavan anturin sanoman lähetyksen tuhoutumisesta. Teoreettinen taajuudenvaihtelun virhe on minimissään n. ± 20 ppm huoneenlämpötilassa eli ± 173 ms päivässä (ks. sivu 25). TDMA-kehyksessä on esitetty lähetyksväleille tarkoitettu aika 150 ms ja 350 ms:n suojavaeli (ks. s. 26).

5 Päätelmiä

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja mitata toimeksiantajan mittausjärjestelmää, jonka anturiradioverkko perustuu aikajakokanavoointiin tähtimäisessä kytkennässä. Aikajakokanavoinnin tarkastelussa keskityttiin sen tahdistukseen käytettävien kideoskillaattorien kellonaikatietojen muutoksiin. Kideoskillaattorien tiedettiin jätettävän ajassa ja ne pyrittiin ohjelmoimaan mahdollisimman tarkaksi työtä varten. Sillä todettiin olevan vaikutusta antureilta lähtevien signaalien kumoutumiseen, jos tiedonsiirto tapahtuisi samanaikaisesti.

Mittaamisessa käytettiin kymmentä järjestelmän anturia ja yhtä reititintä. Reititin oli kytkettynä pilvipalveluun, johon kertyi tunneittain mittadataa huoneen lämpötilasta ja kosteudesta kellonaikamuutosten lisäksi. Eri mittaustilanteita luotiin peittämällä antureita alumiinifoliolla. Tarkoituksena oli saada muutoksia aikaerotiedoissa ja tarkastella siten järjestelmän rakenteen toimivuutta. Muutoksia tarkasteltiin vuorokauden ajalta jokaista mittaustilannetta kohden. Mittaustuloksista nähtiin, että joidenkin antureiden kellonaikoihin tarvittavat muutostiedot olivat liian suuria niiden lähetysvälin korjaamiseksi suojaväleihin verrattuna. Osaan muutoksista vaikuttivat anturien keskinäiset aikaerot. Mittaustilanteesta riippumatta yhdellä antureista vaikutti olevan säännöllistä poikkeavuutta tiedonlähetyksen myöhästymisessä. Antureiden kuuluvuuden poistamisella ei ollut vaikutusta muiden anturien tuloksiin, ja järjestelmä oli suojavälien ylittämisenkin jälkeen palautunut haluttuihin aikaerotietoihin. Anturit olivat lähettäneet jokaiselta tunnilta mittaustietoa, ellei antureita ollut kokonaan peitetty alumiinifoliolla. Alumiinien poiston jälkeen huomattiin joko kuuluvuuden palaamisen tai kiteiden äkillisen lämpötilan muutoksen tuovan myöhästyneitä lähetysvälejä.

Lopputuloksena voidaan todeta, että anturien kellonaikojen päivitys on tarpeen vähintään kerran vuorokaudessa teoreettiseen oskillaattorikiteen taajuusriippuvuuteen nähden. Tämä ilmeneekin olemassa olevassa TDMA-kehyksessä, ellei tehtaalla kiteiden kalibroinnissa synny liian suuria toleransseja. Suojavälin ylittävistä antureista tai muista lähellä sitä olevista ei pystytty mittausjärjestelyssä todentamaan epäsynkroniin joutumista, eli lähetettyjen signaalien kumoutumista toisiinsa nähden. Mittaustulosten perusteella kellonajat olisi parempi päivittää useammin.

Lähteet

- 1 Granlund, Kaj. 2007. Tietoliikenne. Jyväskylä: WSOYpro/Docendo-tuotteet.
- 2 Granlund, Kaj. 2001. Langaton tiedonsiirto. Jyväskylä: Docendo Finland Oy.
- 3 Si-Tecno Oy, Helsinki. Keskustelu 22.3.2016.
- 4 Si-Tecno Oy. 2009. Verkkodokumentti. <www.simap.fi>. Luettu 7.1.2016.
- 5 Penttinen, Jyrki. 2006. Tietoliikennetekniikka. Helsinki: WSOY.
- 6 Räisänen, Antti & Lehto, Arto. 2011. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Gaudemus Helsinki University Press.
- 7 Lehto, Heikki & Havukainen, Raimo... 2011. Fysiikka 8; Aine ja säteily. Helsinki: Tammi.
- 8 Hatakka, Jukka & Saari, Heikki... 2009. Physica 8; Aine ja säteily. Helsinki: WSOY.
- 9 Poole, Ian. Verkkodokumentti. <www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pm-phase-modulation/what-is-gmsk-gaussian-minimum-shift-keying-tutorial.php>. Luettu 21.3.2016.
- 10 Roos, Dave. Verkkodokumentti. <<http://computer.howstuffworks.com/how-wireless-mesh-networks-work1.htm>>. Luettu 23.4.2016.
- 11 National Semiconductors. Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/white-paper/11211/en/>>. Luettu 24.4.2016.
- 12 Texas Instruments. Verkkodokumentti. <<http://www.ti.com/lit/an/slaa322b/slaa322b.pdf>>. Luettu 1.5.2016.
- 13 Elfa Distrelec. Verkkodokumentti. <<https://www.elfadistrelec.fi/Web/Downloads/32/7s/GEYER-KX-327S.pdf?mime=application%2Fpdf>>. Luettu 2.5.2016.
- 14 Crystek Corporation. Verkkodokumentti. <<http://www.crystek.com/documents/appnotes/pierce-gateintroduction.pdf>>. Luettu 13.5.2016.
- 15 Texas Instruments. Verkkodokumentti. <<http://www.ti.com/lit/an/swra097/swra097.pdf>>. Luettu 15.5.2016.

- 16 Viestintävirasto. Verkkodokumentti.
<<https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/laitmaarayksetpaatokset/maaraykset/radiotaajuusmaarays4.html>>. Luettu 15.5.2016.
- 17 Finlex. Verkkodokumentti. <http://www.finlex.fi/data/normit/42150-Kasitteet_ja_viittaukset.pdf>. Luettu 15.5.2016.
- 18 Texas Instruments. Verkkodokumentti.
<<http://www.ti.com/lit/an/slaa225/slaa225.pdf>>. Luettu 18.5.2016.
- 19 Abracon. Verkkodokumentti. <<http://www.abracon.com/Resonators/ABS07-LR.pdf>>. Luettu 18.5.2016.
- 20 Maxim Integrated. Verkkodokumentti.
<www.maximintegrated.com/en/design/tools/calculators/product-design/rtc.cfm>. Luettu 19.5.2016.