



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIIKA KARTANO
LANGATTOMAT ANTURIT HITSAUSAUTOMAATIOSSA

Kandidaatintyö

Tarkastaja:
yliopisto-opettaja Mikko Laurikkala

TIIVISTELMÄ

MIIKA KARTANO: Langattomat anturit hitsausautomaatiossa
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 30 sivua, 7 liitesivua
Joulukuu 2017
Automaatiotekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Automaatiotekniikka
Tarkastaja: yliopisto-opettaja Mikko Laurikkala

Avainsanat: hitsausautomaatio, anturit, langaton anturiverkko, häiriöt

Langattomat anturiverkot on yksi tämän vuosituhanen merkittävimmistä tekniikoista. Innovaatiot ja kehitysaskleet langattoman tiedonsiirron ja mikrokontrollereiden osalta ovat vaikuttaneet tähän trendiin. Viimeisten vuosien aikana on otettu käyttöön monia langattomia anturiverkkoja useilla eri aloilla kuten teollisuudessa, rakentamisessa, kotiautomaatiossa, lääketieteessä sekä logistiikassa. Tämän työn tavoitteena on antaa perehdytys, miten langattomat anturit ja anturiverkot sopisivat hitsausautomaatioon, miten niitä voitaisiin hyödyntää ja mitkä prosessit hitsausautomaatiossa voisivat mahdollisesti aiheuttaa häiriöitä niihin.

Työssä käsitellään langattomia antureita ja anturiverkkoja hitsausautomaation sovelluksissa. Työ koostuu kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa perehdytään teoriaan, jossa käsitellään hitsausautomaatiota, langattomien antureiden rakennetta, tiedonsiirtoa ja langattomia anturiverkkoja. Työstä saa myös pienen pintaraapaisun langattomien anturiverkkojen protokolliin, topologioihin ja standardeihin. Toisessa osassa käsitellään Pemamekilla tehtyjä mittauksia, miten hitsausautomaatioprosessit vaikuttavat langattomaan tiedonsiirtoon. Mittausten pohjalta tehdään johtopäätöksiä niiden soveltuvuudesta ja tulevaisuuden näkymistä tällä tekniikan alalla.

Langattomat anturit eroavat langallisista siten, että niihin ei kytketä kaapeloinnilla mitään kiinni. Näin ollen ne eivät saa energiaa miltään ulkopuoliselta lähteeltä eivätkä ne voi välittää dataa eteenpäin kaapeleita pitkin. Näiden tilalle on jouduttu suunnittelemaan vaihtoehtoisia menetelmiä. Energiaressurssien ollessa rajalliset, on kehitetty erilaisia menetelmiä, joilla voidaan kerätä energiaa ympäristöstä. Lisäksi on kiinnitetty huomiota siihen, kuinka paljon langattomat anturit kuluttavat energiaa. Tähän ongelmaan on kehitetty energiatehokkaampia protokollia, standardeja ja topologioita. Näin ollen langattomien antureiden tai anturiverkkojen suunnittelu ei ole niin suoraviivainen prosessi kuin langallisten antureiden suunnittelu.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Teknisten tieteiden tiedekunnassa ja yrityksessä Pemamek Oy. Haluan kiittää työni ohjaajaa Mikko Laurikkalaa ja Pemamek yritystä. Pemamekilta haluan kiittää mittauksissa auttaneita henkilöitä Marko Niemistä, Miikka Saarikkoa ja Pekka Rusia. Näiden lisäksi kiitos kuuluu Phoenix Contactin henkilötuelle, joka auttoi perehdyttämään mittauksissa käytettäviin komponentteihin.

Tampereella, 5.12.2017

Miika Kartano

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	HITSAUSAUTOMAATIO.....	3
	2.1 Automaatioasteet ja edut	3
	2.2 Pemamek Oy	4
3.	ANTURIT	6
	3.1 Mittausketju.....	6
	3.2 Langattomat anturit	7
	3.2.1 Teholähteet.....	8
	3.2.2 Kommunikointijärjestelmä.....	9
	3.2.3 Tuntoelin ja prosessori	9
4.	LANGATON ANTURIVERKKO.....	11
	4.1 Protokollat	12
	4.2 Topologia	14
	4.3 Häiriötekijät.....	15
5.	LANGATTOMAN ANTURIVERKON STANDARDIT	17
	5.1 IEEE 802.15.4	17
	5.2 ZigBee	18
	5.3 WirelessHART	18
	5.4 IEEE 802.11 ja Bluetooth.....	19
6.	MITTAUKSET	20
	6.1 Komponentit ja menetelmät	20
	6.2 Mittaustulokset.....	22
	6.2.1 Plasmaleikkuu	22
	6.2.2 Induktiolämmittimet.....	23
	6.2.3 Kanttiaaltohitsaus.....	23
	6.2.4 Mittaukset eri etäisyyksillä	24
	6.3 Mittauksien yhteenveto	25
7.	YHTEENVETO	27
	LÄHTEET.....	28

LIITE A: MITTAUKSISTA SAADUT RSSI-KUVAAJAT

LYHENTEET JA MERKINNÄT

APS	ZigBeen tarjoama sovellustuki (<i>application support</i>)
ARQ	Protokolla virhetilanteiden hallintaan (<i>automatic repeat request</i>)
CRC	Tiivistealgoritmi, joka laskee bittivirheitä (<i>cyclic redundancy check</i>)
CSMA	Kilpakäytäntöön perustuva protokolla (<i>carrier sense multiple access</i>)
dBm	Desibelimäärä suhteessa milliwattiin
FFD	Täyden toiminnan laite (<i>full function devices</i>)
LCC	Loogisen siirtoyhteyden ohjaus, osana siirtokerrosta (<i>logical link control</i>)
LEACH	Aikataulutukseen perustuva protokolla (<i>low-energy adaptive clustering hierarchy</i>)
LQI	Yhteyden laadun mittari (<i>link quality indicator</i>)
LTS	Ajan synkronointiprotokolla (<i>lightweight tree-based synchronization</i>)
MAC	Hoitaa datan liikennöintiä, osana siirtokerrosta (<i>media access control</i>)
MCU	Mikrokontrolleri (<i>microcontroller unit</i>)
PAMAS	Kilpakäytäntöön perustuva protokolla (<i>power aware multiaccess with signaling</i>)
PDA	Kämmentietokone (<i>personal digital assistant</i>)
PRR	Kertoo vastaanotettujen pakettien suhteen lähetettyihin (<i>packet reception rate</i>)
RFD	Toiminnaltaan rajoitettu laite (<i>reduced function devices</i>)
RSSI	Saavutetun signaalin vahvuusmittari (<i>received signal strength indicator</i>)
S-MAC	Alhaiseen toimintajaksoon perustuva protokolla (<i>sensor-MAC</i>)
SMACS	Aikataulutukseen perustuva protokolla (<i>self-organizing medium access control for sensor networks</i>)
STEM	Alhaiseen toimintajaksoon perustuva protokolla (<i>sparse topology and energy management</i>)
TCP	Tiedonsiirron protokolla (<i>transmission control protocol</i>)
TDMA	Aikajakokanavointiprotokolla (<i>time division multiple access</i>)
TPSN	Ajan synkronointiprotokolla (<i>timing-sync protocol for sensor networks</i>)
UDP	Tiedonsiirron protokolla (<i>user datagram protocol</i>)
WLAN	Langaton lähiverkkotekniikka (<i>wireless local area network</i>)
WSN	Langaton anturiverkko (<i>wireless sensor network</i>)
ZBO	ZigBeen tarjoama sovellus, jolla löytää verkosta muita laitteita (<i>ZigBee device object</i>)

1. JOHDANTO

Tiedonsiirtoteknologia ja anturitekhnologia on ottanut suuria harppauksia langallisista ratkaisuksista langattomiin ratkaisuihin. Ihmisten kodeissa on alkanut esiintyä langattomia anturiverkkoja talon kunnonvalvomiseen sekä taloautomaation ohjaamiseen [1, s. 7]. Monesta taloudesta löytyy myös langattomia reitittimiä eli WLAN-reitittimiä. Samaan radioaalto-tekhnologiaan perustuvia langattomia antureita on alettu käyttämään muun muassa teollisuudessa, terveydenhuollossa, logistiikassa sekä monella muulla alalla.

Teollisuuden aloista etenkin hitsausautomaatiossa langattomien antureiden käyttö on ollut vähäistä tähän päivään asti. Hitsausautomaatiossa käytetään antureita valvomaan hitsausprosessia ja tuotantolaitteiden liikkeitä. Tämän työn tarkoituksena on perehtyä langattomiin antureihin ja langattomaan anturiverkkoon. Työssä suoritetaan mittaukset, joista nähdään hitsausautomaation prosessien vaikutus langattomaan tiedonsiirtoon. Työn tarkoituksena on tehdä johtopäätöksiä langattomien antureiden ja anturiverkkojen soveltuvuudesta hitsausautomaatioon sekä niiden hyödyntämisestä tulevaisuuden hitsausautomaatiossa.

Työ rakenne on seuraava. Ensimmäiseksi perehdytään yleisesti hitsausautomaatioon. Hitsausautomaatiota käsitellään oman työkokemukseni perusteella yrityksessä Pemamek Oy, jonka kanssa yhteistyössä tämä kandidaatintyö on toteutettu. Kolmannessa luvussa siirrytään antureiden toimintaan. Tässä luvussa aluksi tutustutaan mittausketjuun eli miten fyysikaalisen suureen mittaaminen tapahtuu ja miten siitä saatua signaalia ja dataa käsitellään. Seuraavassa luvussa käsitellään langattomien antureiden laitteistoa. Tämä luku käsittelee langattomien antureiden komponentteja ja rajoittavia tekijöitä, jotka tulee langattoman anturin suunnittelussa ottaa huomioon.

Kun langattomat anturit on käsitelty, siirrytään niistä valmistettaviin suurempiin kokonaisuuksiin. Luvussa 4 tutustutaan langattomiin anturiverkkoihin (*wireless sensor network, WSN*). Langattomissa anturiverkoissa käydään läpi yleisimpiä protokollia ja topologioita. Luvussa 4 kartoitetaan myös WSN:n häiriötekijöitä. Häiriötekijöitä mitataan empiirisissä mittauksissa luvussa 6, ja luvun 4 tietojen avulla voidaan perustella mittauksien tuloksia. Luvussa 5 käsitellään teollisuudesta tunnetuimpia WSN-standardeja.

Teoria- ja kirjallisuuskatsauksen jälkeen siirrytään yrityksessä tehtyihin mittauksiin. Mittauksissa tarkastellaan, kuinka hyvin tieto liikkuu langattomasti hitsaussovelluksen ympäristössä. Mittauksissa häiriötä aiheuttamaan käytetään hitsausta, plasmaleikkausta, induktiolämmitystä, vaihdellaan etäisyyksiä ja asetetaan fyysisiä esteitä lähettimen ja vastaanottimen väliin.

Lopuksi työssä kootaan mittauksista saadut mittaustulokset, tehdään päätelmiä niiden pohjalta ja verrataan aiemmin tehtyihin tutkimuksiin. Yrityksen kannalta tämä osuus on tärkein. Yritys saa mittaustietoa, jonka pohjalta voidaan tulevaisuudessa suunnitella enemmän langattomien antureiden ja muiden langattomien tiedonsiirtotapojen käyttökohteita hitsausautomaatiossa.

2. HITSAUSAUTOMAATIO

Yleisperiaatteeltaan hitsaaminen on prosessi, jossa osia liitetään yhteen lämmön tai paineen avulla. Yleisimpiä hitsausprosessissa käytettäviä materiaaleja ovat metallit ja muovit. Standardin SFS 3052 mukaan hitsaus on ”Valmistusmenetelmä, jolla osia liitetään tai päällystetään käyttämällä hyväksi lämpöä ja/tai puristusta siten, että osat muodostavat jatkuvan yhteyden. Hitsauksessa voidaan käyttää lisäainetta, jonka sulamispiste on suunnilleen sama kuin perusaineen”. [2, s. 2] Lämmönlähteenä hitsausprosessissa voidaan käyttää sähkövirtaa eli valokaarta, liekkiä, kitkaa, lasersädettä tai elektronisuihkua. Hitsaussovelluksen ja hitsattavan kappaleen mukaan valitaan vaihtoehtoista paras menetelmä liittämällä kappaleet yhteen. Hitsausmenetelmiä on paljon ja ne eroavat toisistaan hitsattavan kappaleen, lisäaineen, lämmöntuoton ja sulamisen suhteen.

2.1 Automaatioasteet ja edut

Hitsausautomaation tarkoituksena on automatisoida hitsausprosessia. Hitsausautomaatiosta puhuttaessa on hyvä huomata, ettei hitsausautomaatio tarkoita aina robotisoitua solua tai tuotantolinjaa. Automaatioaste näissä sovelluksissa on todella korkea. Hitsausautomaatio voidaan jakaa kuuteen eri automaatioasteeseen. Automaatioasteet on esitetty taulukossa 1, Nousiaisen diplomityössä [3, s. 40–41] luokitetulla tavalla.

Automaatioaste on nykypäivän hitsaussovelluksissa todella korkea. Tämän on mahdollistanut sähköisesti ohjattavat mekaaniset manipulaattorit ja monitieteellisen mekatronisen tekniikan kasvu, jossa tiedon ja datan tarve on lisääntynyt. [4, s. 25] Tämä on johtanut laajaan anturijärjestelmään, jota voidaan käyttää ympäristön valvomiseen, hitsausprosessin ja toimilaitteiden ohjaamiseen sekä laadun tarkkailemiseen. Hitsausautomaatiossa antureita voidaan käyttää esimerkiksi railon seurantaan, hitsausparametrien kuten virran, jännitteen ja langansyötön seurantaan sekä robotin nivelten liikkeiden seurantaan. Näiden lisäksi kappaleiden käsittely on osa hitsausautomaatiota. Kappaleen käsittely sisältää kappaleen muokkaamista ja liikuttelemista, joiden ohjaamiseen tarvitaan antureilta saatua tietoa.

Adaptiivisessa hitsauksessa antureilta kerättyä tietoa voidaan käyttää prosessin reaaliaikaiseen ohjaamiseen. Antureilta saadun datan lisäksi voidaan käyttää apuna konenäköä, esimerkiksi tunnistamaan kappaleen hitsattavia saumoja tai valokaaren ja hitsisulan seuraamiseen. Valokaari voi aiheuttaa häiriötä konenäköön, joten sille on vaihtoehtoisia optisia antureita kuten laserskannereita. [3, s. 42] Antureilta saadun datan hyödyntämiseen tarvitaan prosessointi- ja ohjausjärjestelmäyksikkö, joka pystyy prosessoimaan dataa ja muuttamaan datasta saatua tietoa ohjauskäskyiksi toimilaitteille.

Taulukko 1. Hitsauksen 6 eri automaatioastetta, muokattu lähteestä [3, s. 41].

Automaatioaste	Määritelmä
Käsinhitsaus	Käsivaraisesti suoritettu hitsaus.
Osittain mekanisoitu hitsaus	Käsinhitsaus, jossa lisäaineen syöttö tapahtuu mekanisoidusti.
Mekanisoitu hitsaus	Hitsaus, jossa kaikki pääasialliset suoritukset (lukuun ottamatta työkappaleen käsittelyä) tapahtuvat automatisoidusti. Hitsausarvojen käsivarainen säätö hitsauksen aikana on mahdollista.
Automaattinen hitsaus	Hitsaus, jossa kaikki pääasialliset suoritukset tapahtuvat automatisoidusti. Hitsausarvojen käsivarainen säätö ei ole mahdollista hitsauksen aikana.
Robottihitsaus	Automaattinen hitsaus, jonka suorittaa robotti.
Adaptiivinen hitsaus	Automaattinen hitsaus, jossa liikkeet ja hitsausarvot säätävät automaattisesti ja reaaliaikaisesti antureista saadun tiedon perusteella.

Tämän työn tutkimustuloksia voidaan soveltaa jokaiseen taulukon 1 hitsauksen automaatioasteeseen. Pääasiassa ne konkretisoituvat automaattisessa hitsauksessa, robottihitsauksessa ja adaptiivisessa hitsauksessa, joissa käytetään enemmän antureita valvomaan ja ohjaamaan prosessia.

Hitsausautomaation etuja ovat tuotannon kapasiteetin kasvu, tasaisempi ja parempi laatu, käyttäjäystävällisempi kokemus ja turvallisempi työympäristö. Hitsausautomaatiolla voidaan automatisoida hitsaajaa fyysisesti kuormittavat työtehtävät. Kaikkea hitsattavaa tuotantoa ei kannata automatisoida, sillä käsihitsaus on edelleen paras vaihtoehto muuttuviin pienen kapasiteetin hitsausprosesseihin.

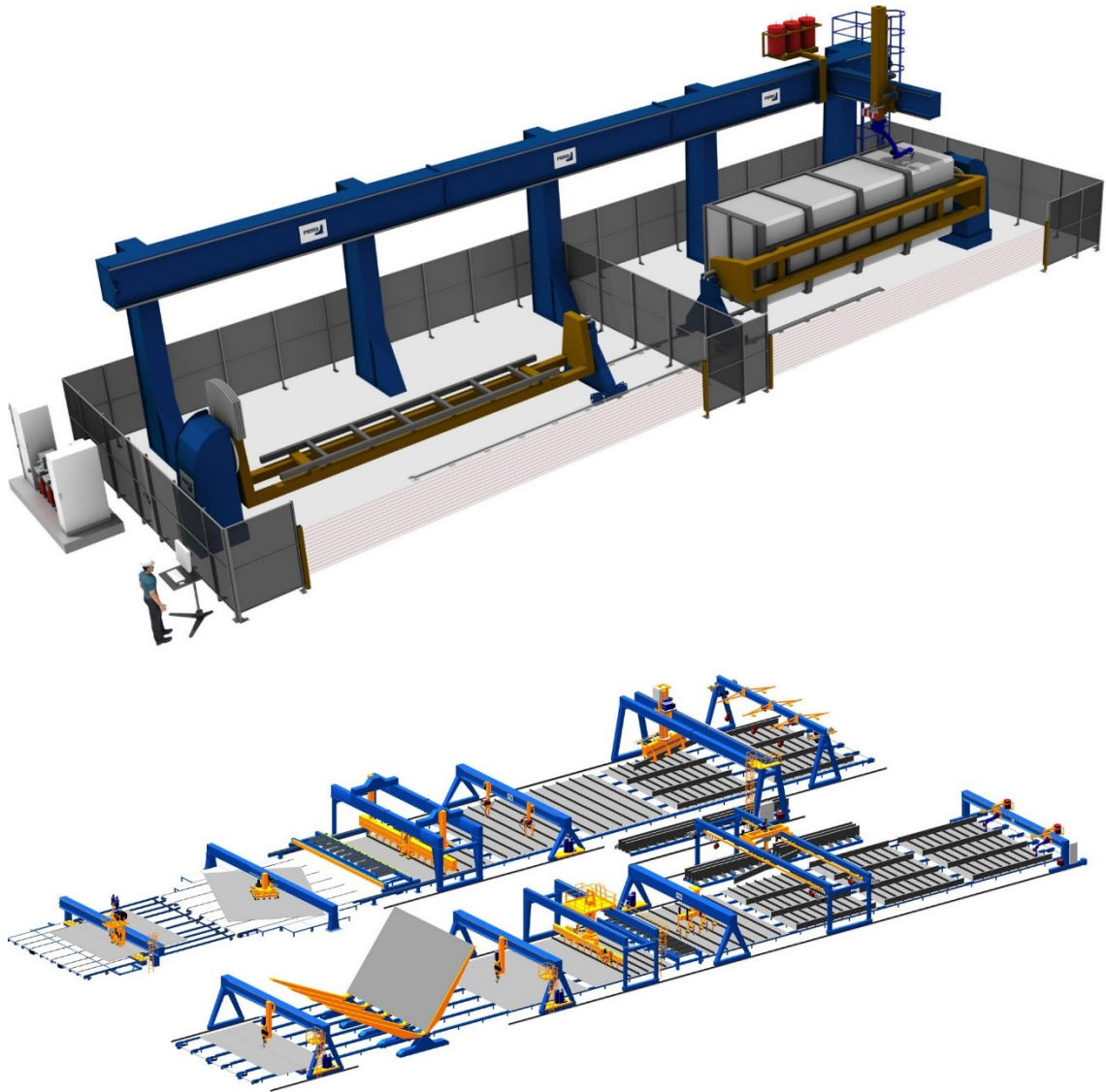
2.2 Pemamek Oy

Tämän työn mittaukset tehtiin Pemamek Oy:llä. Pemamek Oy on Loimaalainen hitsausautomaatioyritys. Pemamek tarjoaa hitsausautomaatioratkaisuja yksittäisistä laitteista suuriin automatisoituihin tuotantolinjoihin tai soluihin. Modulaariset rakenteet mahdollistavat laitteiden laajentamisen jälkikäteen, jos tarvetta syntyy uusille hitsausratkaisuille. Tuotannosta yli 90 % menee vientiin. Pemamek on toimittanut yli 15 000 hitsausautomaatioratkaisua yli 50 eri maahan. Pemamekin hitsaus- ja tuotantoautomaatiosovellukset ovat erikoistuneet erityisesti raskaanteollisuuden tarpeisiin. Yritys valmistaa hitsausautomaatioratkaisuja erityisesti seuraaville aloille:

- laivanrakennus- ja meriteollisuus (*offshore*)
- prosessi- ja ydinvoimateollisuus
- liikkuvat työkoneet
- kattilateollisuus
- tuulivoimateollisuus

- teräsrakenneteollisuus. [5]

Kuvassa 1 on esitetty Pemamekin suunnittelemat robottisolu ja tuotantolinja.



Kuva 1. Pemamekin suunnittelema robottisolu (ylhäällä) ja tuotantolinja (alhaalla) [5].

3. ANTURIT

Anturit ovat teollisuudessa käytettyjä tuntoelimiä. Anturit ovat laitteita, jotka muuntavat fysikaalista suuretta toiseksi fysikaaliseksi suureeksi, yleensä sähköiseksi. Yksinkertainen mittausjärjestelmä voi sisältää vain yhden anturiyksikön, jonka ulostulona on mittauksen lukema tai sähköinen signaali, jonka vahvuuteen vaikuttaa mitattavan suureen voimakkuus. Monimutkaisimmat mittausjärjestelmät koostuvat useammista erillisistä yksiköistä, jotka voivat olla fyysisesti lähekkäin tai erillään. [6, s. 4] Esimerkkinä yksinkertaisesta mittausjärjestelmästä on elohopealla toimiva lämpömittari.

3.1 Mittausketju

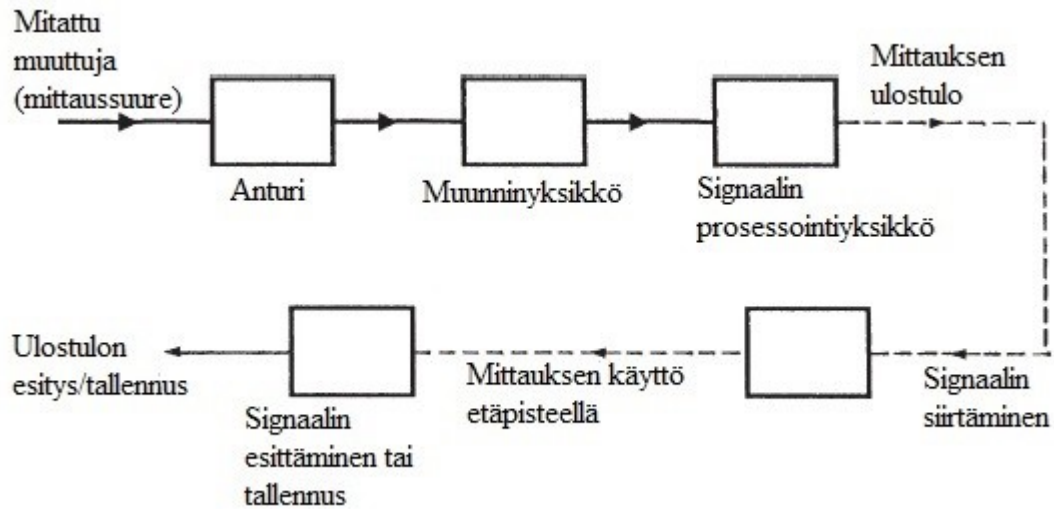
Mittausketjussa ensisijainen mittauselementti on anturi, joka toimii osana mittausjärjestelmää. Anturin tehtävänä on antaa ulostulona mittasuureen funktio (yleensä sähköisessä muodossa). Kuvassa 2 on esitetty anturi ja muut mittausketjun yksiköt osana mittausketjua.

Anturilta lähtevä ulostulosignaali on yleensä epäsuotuisessa muodossa, jolloin tarvitaan muunninyksikkö. Muunninyksiköiden tehtävänä on muuntaa ulostulosignaali käytettävämpään muotoon. Esimerkiksi siirtymämittauksessa ulostulona on resistanssin muutos, joka tulee muuntaa käytettävämpään muotoon eli jännitteeksi. Anturi ja muunnin voivat olla integroituna yhteen, jolloin sitä kutsutaan muuntimeksi (*transducer*). [6, s. 4]

Muunninelementin jälkeen tarvitaan signaalin prosessointielementti. Erittäin yleinen signaalin prosessointielementti on vahvistin, joka vahvistaa anturilta tai muuntimelta tulevaa ulostulosignaalin jännitettä. Muita tehtäviä signaalin prosessoinnilla on poistaa kohinaa ja muokata signaali muotoon, jossa sitä halutaan siirtää. [6, s. 6] Usein tässä vaiheessa signaali muunnetaan analogia-digitaalimuuntimella jännitteestä digitaaliseen muotoon [7, s. 5]. Signaalin prosessointielementti voidaan integroida yhteen anturin ja muuntimen kanssa, jolloin sitä kutsutaan lähettimeksi (*transmitter*). Lähettäjä voidaan kutsua myös yleisesti anturiksi. [6, s. 6]

Osana mittausketjua ja mittausjärjestelmää on signaalin kuljetus (*signal transmission*). Monissa tapauksissa signaali tulee saada kuljetettua lähettimeltä eli anturilta sen vastaanotinpiisteeseen, jossa signaalin dataa voidaan esittää, tallentaa ja käyttää ohjausjärjestelmässä. Signaalin kuljettamaa dataa on mahdollista näyttää suoraan näytöltä, josta halutun suureen muutoksia voidaan tarkkailla. Dataa voidaan myös tallentaa myöhempää käyttöä varten. Mikäli anturi on suoraan takaisinkytketty ohjausjärjestelmään, signaalin näyttö- tai tallennusyksikölle ei ole tarvetta, jollei dataa haluta esittää näytöltä tai tallentaa myöhempää käyttöä varten. [6, s. 6] Signaalia on mahdollista kuljettaa langallisesti tai langat-

tomasti. Tässä työssä tutkitaan signaalin langatonta välittämistä sen vastaanottimelle. Luvussa 6 käsitellään mittauksia, joissa tutkitaan miten hitsausautomaatiassa käytettävät menetelmät kuten hitsaus, plasmaleikkaus ja induktiolämmitys häiritsevät langatonta tiedonsiirtoa.

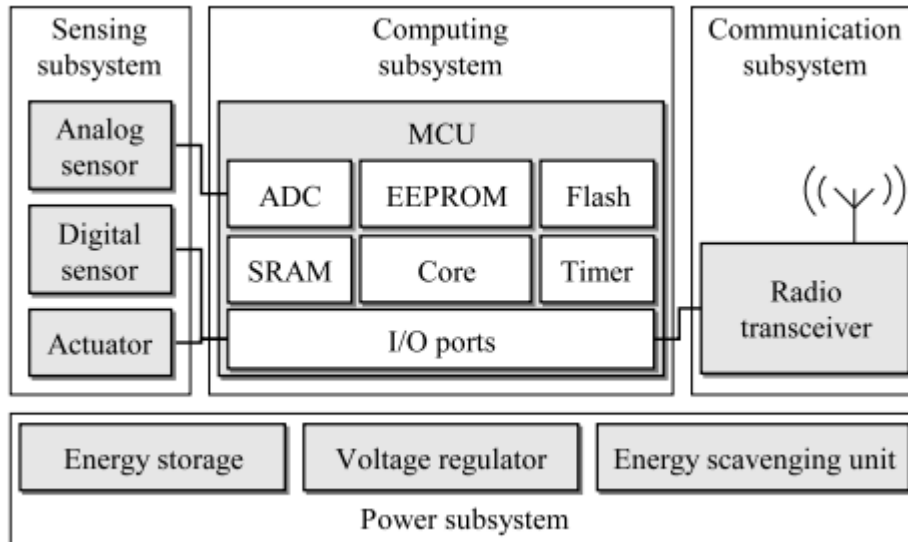


Kuva 2. Mittausketjun yksiköt, muokattu lähteestä [6, s. 6].

Viimeinen osa mittausketjua on piste, jossa mitattua dataa hyödynnetään. Tämä piste vastaanottaa datansa suoraan signaalin näyttö- tai tallennusyksiköltä. Tapauksissa, jossa signaali on yhdistettynä suoraan ohjausjärjestelmään, voidaan halutessa jättää näyttö- ja tallenusyksikkö pois. [6, s. 6–7]

3.2 Langattomat anturit

Nykyiset innovaatiot digitaalisessa elektroniikassa ja langattomassa kommunikoinnissa ovat mahdollistaneet kustannuksiltaan ja energiankulutukseltaan pienempien monitoiminnallisten anturien kehityksen. Anturisolmukohta muodostuu yhdestä tai useammasta anturista sekä kommunikointikomponenteista. Kuvassa 3 on esitetty langattoman anturin laitteisto. Langattomien anturiverkkojen idea perustuu suureen määrään solmukohtia, jotka kommunikoivat keskenään. Langattomat anturiverkot on kehitetty kahdesta syystä, jossa ne toimivat paremmin kuin langalliset anturiverkot. Langattomat anturit voidaan tarvittaessa sijoittaa kauaksi toimintaympäristöstään. Lisäksi voidaan kehittää antureita, joiden tarkoitus on vain mitata ympäristöään ja lähettää mitattua dataa solmukohtaan, jossa dataa käsitellään. [8, s. 393]



Kuva 3. Langattoman anturin laitteisto, jossa anturi on esitettyinä neljänä osakokonaaisuutena [9, s. 17].

Anturisolmukohdat kuluttavat vähän energiaa. Ne koostuvat yhdestä tai useammasta anturista, prosessorista, muistista, teholähteestä, radiosta ja toimilaitteesta. Toimilaite on sähkömekaaninen toimilaite, jolla voidaan ohjata solmukohdan eri komponentteja. Koska antureilla on rajallinen muistitila ja ne on yleensä suunniteltu paikkoihin, joihin on vaikea päästä, on anturissa oltava lähetin ja vastaanotin, joiden avulla kommunikoidaan. Riippuen anturista toimilaite ja komponentit voidaan integroida yhteen. [10, s. 2292]

3.2.1 Teholähteet

Langattomat anturit saavat ensisijaisesti energiansa paristoista. Toissijaisia energialähteitä voivat olla akut tai kondensaattorit. Ne ovat uudelleen ladattavissa, toisin kuin paristot. Jotta langattomista anturijärjestelmistä saataisiin kaikki hyöty irti, on niissä usein myös omatehoisia laitteita (*self-powered devices*). Omatehoisilla laitteilla tarkoitetaan komponenttia, joka hyödyntää ympäristöstä saatavaa energiaa (*energy scavenging*). Yleisimmät omatehoiset laitteet hyödyntävät säteilyenergiaa (valokenno), lämpötilaeroja ja mekaanista liikettä. Omatehoisilla laitteilla voidaan välttää paristojen käyttö kokonaan, mutta silloin energiaa on saatava ympäristöstä jatkuvasti, jotta anturisolmukohta ei kaatuisi. [9, s. 21–22; 11, s. 32–35]

Langattomissa antureissa on tärkeää, että energiaa on saatavilla riittävästi. Myös energiankulutus on saatava minimoitua. Matalan energiankulutuksen ja hyvien energialähteiden ansiosta langattomia antureita on mahdollista käyttää miehittämättömillä asemilla. Kun antureihin ei tarvitse koko ajan vaihtaa paristoja, mikä pienentää huoltokustannuksia merkittävästi jopa satoja antureita kattavassa anturiverkossa.

3.2.2 Kommunikointijärjestelmä

Langattoman tiedonsiirron tukemiseksi on antureissa oltava kommunikointijärjestelmä. Kommunikointijärjestelmä sisältää antennin ja lähetin-vastaanottimen, jota käytetään lähettämään ja vastaanottamaan dataa. Lähetin-vastaanottimen toiminta perustuu ääniaaltoihin, optisiin aaltoihin tai radioaaltoihin. Näistä eniten käytetty ja parhaiten soveltuva menetelmä langattomiin anturiverkkoihin on radioaaltotekniikka. Radioaaltotekniikka mahdollistaa suuren tiedonsiirtonopeuden ja pitkän kantaman. Radioaaltoja käytettäessä lähetin-vastaanottimia ei tarvitse suunnata niin tarkasti, kuin optisia aaltoja käytettäessä. Huonoja puolia radioaaltotekniikassa on suuri antennin koko sekä suurempi energiankulutus kuin optisella tekniikalla. Optisella tekniikalla toteutetussa anturiverkossa lähetin-vastaanottimien pitää olla tarkasti suunnattuna, eivätkä ne siksi sovellu laajoihin dynaamisiin anturiverkkoihin. Ääniaaltotekniikkaa käytetään lähinnä veden alla toimivissa anturiverkoissa. [9, s. 18; 11, s. 21]

Lähetin-vastaanottimen yleisiä toimintoja ovat kanavataajuuden valinta, lähetystehon säätö, lähetetyn datan modulointi, vastaanotetun datan purkaminen ja lähetetyn ja vastaanotetun datan tahdistus. Lähetin-vastaanottimet voivat sisältää lisäominaisuuksia, jotka vähentävät prosessointivaatimuksia mikrokontrolleriyksiköltä (MCU). Tällaisia ovat muun muassa saavutetun signaalin vahvuusmittari (*received signal strength indicator, RSSI*) ja yhteyden laadun mittari (*link quality indicator, LQI*), jotka mittaavat signaalin voimakkuutta ja arvioivat yhteyden laatua viereisiin solmukohtiin sekä tiivistealgoritmi (*cyclic redundancy check, CRC*), joka laskee bittivirheitä saapuneesta datasta. Salaus ja salauksen purkumekanismi pitävät huolen verkon turvallisuudesta. [9, s. 18] Mittausosiossa tarkastellaan RSSI-kuvaajia eli miten signaalin voimakkuus muuttuu etäisyyden ja lähetystehon muuttuessa.

Lähetin-vastaanottimilla on neljä eri toimintatilaa: lähetystila, vastaanottotila, joutilastila (*idle*) sekä unitila. Lähetys- ja vastaanottotilassa energiankulutus on suurinta. Joutilastilassa suurin osa toiminnoista ovat pois päältä, mutta toiminnot pystytään käynnistämään nopeasti, jolloin se kuluttaa vähemmän energiaa. Vähiten energiaa kuluu unitilassa, jolloin kaikki toiminnot ovat pois päältä. [9, s. 19; 11, s. 26]

3.2.3 Tuntoelin ja prosessori

Prosessori on yksi solmukohdan tärkeimmistä komponenteista. Antureissa prosessori on usein toteutettu mikrokontrollerilla. Mikrokontrollerissa integroituu yhteen prosessori, ohjelma- ja datamuisti, ajastin, sisääntulo- ja ulostuloportit, analogia-digitaalimuunnin sekä muita oheiskomponentteja (katso kuva 3). [9, s. 19–20] Mikrokontrollerien etu tavallisiin tietokoneista tuttuihin prosessoreihin on pienempi energiankulutus [11, s. 19].

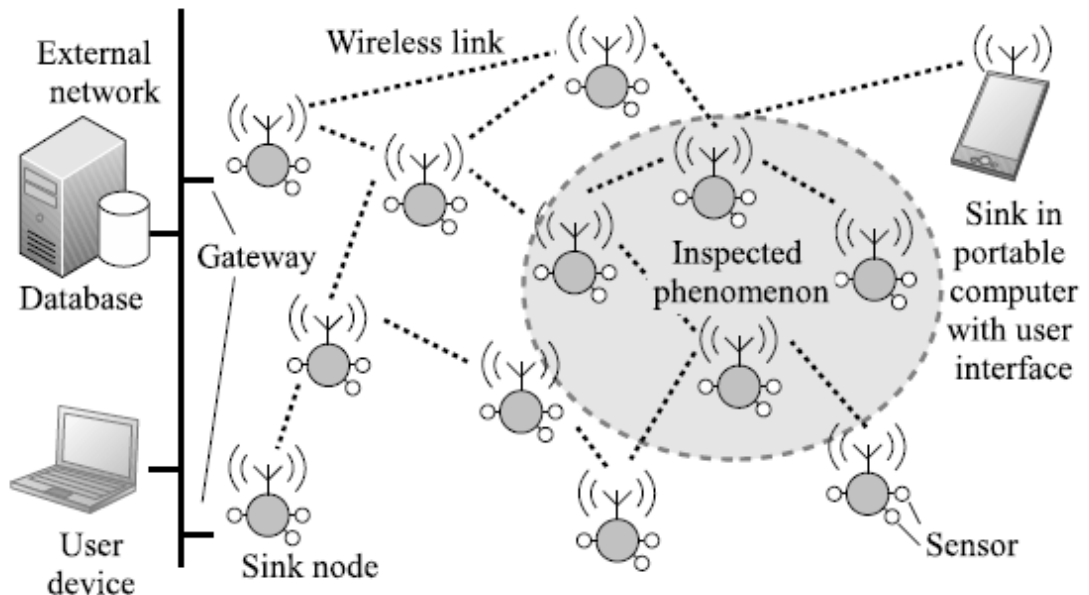
Tuntoelin mittaa jotain tiettyä fysikaalista suuretta. Tärkeää mittaamisessa on mittaus-tarkkuus, pieni energiankulutus ja lyhyt mittausaika, joka määrittää mittauksessa kuluvan

energian. Solmukohta voi toimia myös päätöksentekijäyksikkönä ottamalla sisääntulona anturilukemia toisilta antureilta ja muuntamalla ne ulostuloon komennoiksi. Näitä komentoja toimilaitteet voivat käyttää hyväksi esimerkiksi antureiden liikutteluun. [9, s. 20]

4. LANGATON ANTURIVERKKO

Langaton anturiverkko (*wireless sensor network, WSN*) koostuu useista erillisistä langattomista antureista. Jokainen anturi on matalaenerginen laite, joka kykenee mittaamaan jotain fyysistä suuretta. Nämä muodostavat WSN:n solmukohtia (*nodes*), jotka voivat sisältää yhden tai useampia antureita. Anturit pystyvät prosessoimaan mittausdataa ja lähettämään sitä eteenpäin yhdelle tai useammalle tiedonkeräyspisteelle, joka tunnetaan myös nimellä vastaanotin (*sink node*) tai tukiasema (*base station*). [12, s. 52] Vastaanottimet voivat olla joko antureita tai erillisiä kannettavia laitteita, kuten esimerkiksi PDA (*personal digital assistant*), joka on kädessä kannettava pieni tietokone. Lisäksi vastaanottimet voivat olla yhdyskäytäviä (*gateway*), jotka yhdistävät saadun informaation toiseen verkkoon, kuten Internetiin [11, s. 60]. WSN:n arkkitehtuuri on esitelty pääpiirteittäin kuvassa 4.

WSN:ää on hyödynnetty jo laajalti teollisuusautomaatiossa, hajautetuissa ohjausjärjestelmissä, talon sisäisessä automaatiossa, reaaliaikaisessa koneen kunnonvalvonnassa, lääketieteessä ja monella muulla alalla. Tutkimusten mukaan WSN:n käyttö tulee kasvamaan huomattavasti lähitulevaisuudessa etenkin automaatioaloilla, logistiikassa ja kunnonvalvonnassa. [12, s. 52]

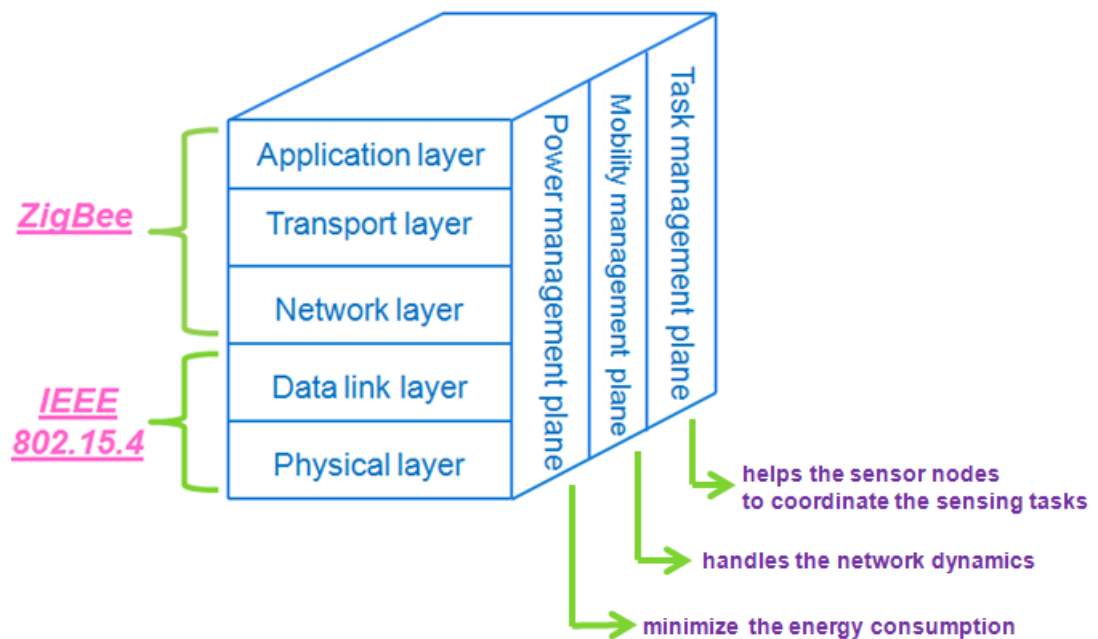


Kuva 4. Langattoman anturiverkon arkkitehtuuri [9, s. 3].

4.1 Protokollat

Tässä luvussa kerrotaan yleisesti, miten langattomien antureiden toiminnallisuudet jaotellaan protokollapinomalliin ja pintapuolisesti käsitellään protokollapinon siirtokerrosta.

Langattomassa anturiverkossa kommunikoivien osapuolten on tarkasti noudatettava määriteltyjä toimintasääntöjä eli protokollia. Langattoman anturiverkon protokollapino voidaan kuvata viisikerroksisena. Viisikerroksisen pinon lisäksi siinä on 3 erilaista hallintatasoa. Nämä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Langattoman anturiverkon protokollapino [13].

Virranhallintatason (*power management plane*) tehtävänä on pitää energiankulutus mahdollisimman pienenä, liikkuvuudenhallintataso (*mobility management plane*) huolehtii anturiverkon dynamiikasta ja tehtävienhallintataso (*task management plane*) auttaa antureita koordinoimaan mitattavia asioita. Langattomassa anturiverkossa fyysinen kerros (*physical layer*) vastaa datan lähettämisestä, vastaanottimien aktivoinnista ja sulkemisesta, kanavan taajuuden valitsemisesta ja yhteyden laadusta. Siirtokerros (*data link layer*) voidaan jakaa kahteen osaan. Loogiseen siirtoyhteyden ohjaukseen (*logical link control, LLC*), jonka tehtävänä on hallita virhetilanteita ja MAC-kerrokseen (*media access control*), joka valvoo datan pääsystä käytettävälle radiokanavalle. Verkkokerros (*network layer*) vastaa siitä, että data löytää tiensä langattoman verkon ylitse halutulle päätelaitteelle. Jotta data kulkisi tietyltä solmukohdalta päätelaitteelle, on datan usein kuljettava useamman solmukohdan kautta (*multihop network*). Kuljetuskerroksen (*transport layer*) tehtävänä on siirron luotettavuuden varmistaminen ja ruuhkan hallinta. Sovelluskerros (*application layer*) tarjoaa rajapinnan käyttöliittymän ja toiminta-alustan välillä.

Sen avulla sovelluksen käyttäjä pystyy informoimaan alempia kerroksia ja ohjaamaan antureiden toimintoja. [13]

MAC-kerrokseen kuuluvat protokollat ovat langattomien antureiden tapauksessa todella kriittisiä sovelluksen toimivuuden kannalta. Viimeisen 30 vuoden aikana MAC-protokollia on kehitetty suuri määrä, mutta niistä kaikki eivät sovellu WSN:ään niiden suuren energiankulutuksen takia. Monet protokollat on suunniteltu langattomaan tiedonsiirtoon ja niistä jatkokehittämällä on saatu energiaa säästäviä protokollia WSN:ään. Muita MAC-protokollien suorituskyvyn mittareita on suoritusteho, viive ja resurssien oikeudellinen jakaminen (*fairness*). WSN:n MAC-protokollat voidaan jakaa karkeasti kolmeen osaan. [11, s. 112–119]

- Alhaiseen toimintajaksoon perustuvat protokollat (*low duty cycle protocols*). Näille tyypillistä on, että ne yrittävät välttää toimintatilassa olemista eli kasvattavat unitilan määrää ja näin säästävät energiaa. Esimerkkeinä STEM- ja S-MAC-protokollat. [11, s. 120–128]
- Kilpakäytäntöön perustuvat protokollat (*contention-based protocols*). Näille tyypillistä on, että ne lähettävät vastaanottopyynnön viereisille solmukohtille ja niistä jokainen voi hyväksyä vastaanottopyynnön ja vastaanottaa signaalin. Tämä voi myös aiheuttaa törmäyksiä, jos useampi kuin yksi naapurisolmukohta aikoo hyväksyä paketin vastaanottamisen samanaikaisesti. Esimerkkeinä CSMA- ja PAMAS-protokollat. [11, s. 129–132]
- Aikataulutukseen perustuvat protokollat (*schedule-based protocols*). Näille tyypillistä on se, että solmukohdat saavat olla unitilassa paljon ja aikajakokanavoinnin (*time division multiple access, TDMA*) avulla kerrotaan muille solmukohtille, milloin ne voivat vastaanottaa ja lähettää dataa. Aikataulutuksen avulla voidaan välttää törmäykset. Esimerkkeinä LEACH- ja SMACS-protokollat. [11, s. 133–139]

IEEE 802.15.4 on standardi, joka on suunniteltu toimimaan langattomissa anturiverkoissa. Tämä standardi toimii fyysisessä kerroksessa ja siirtokerroksessa. MAC-kerroksessa se yhdistelee aikataulutukseen ja kilpakäytäntöön perustuvia protokollia. [11, s. 139–141]

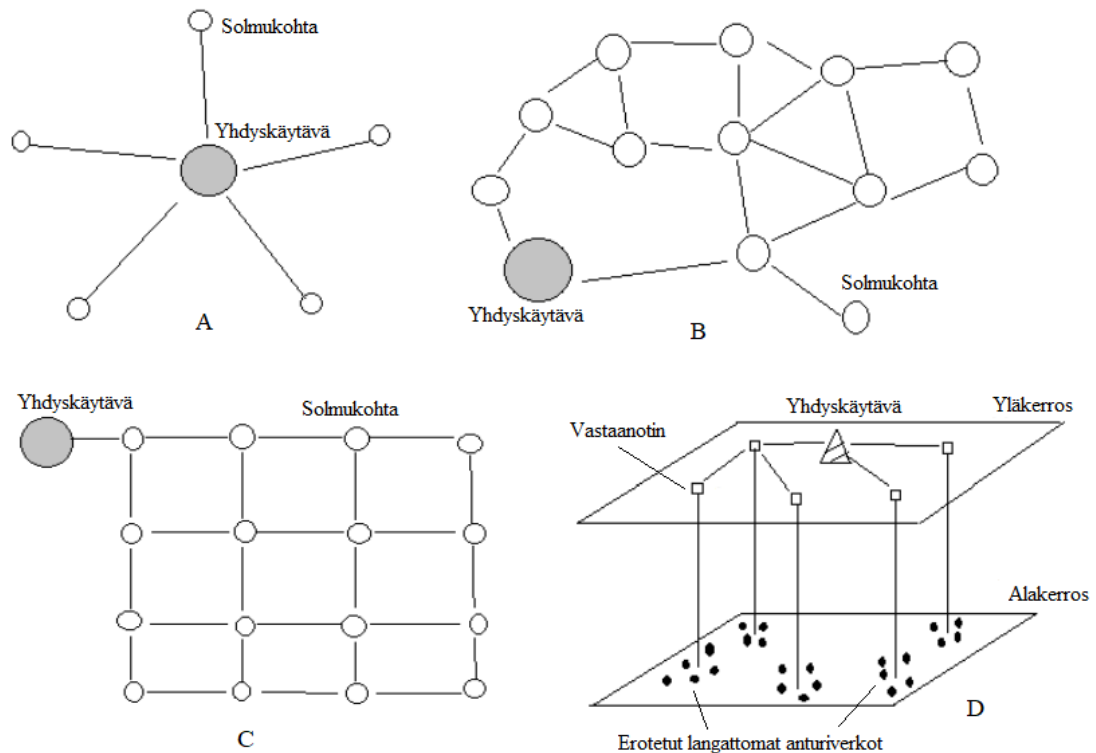
LLC:n tehtävänä on hallita virhetilanteita. Näitä se hallitsee redundanssilla, pakettien uudelleenlähetyksellä, pakettikoon valinnalla ja lähetysteholla. Kasvava luotettavuus tai kasvavat virhetilanteet kasvattavat energiankulusta. ARQ-protokollien (*automatic repeat request*) avulla virhetilanteita hallitaan lähetetyn paketin tarkastussummalla, jonka avulla vastaanottava solmukohta voi tarkastaa paketin eheyden ja tarvittaessa lähettää lähettävälle solmukohdalle pyynnön paketin uudelleenlähetyksestä. [11, s. 149–153]

Monissa hajautetuissa järjestelmissä, kuten myös langattomissa anturiverkoissakin, ajan synkronoiminen on tärkeää. Aika tulee synkronoida siten, että se on oikeassa ajassa (maailman ajassa) tai verrattavissa oikeaan aikaan. Tällöin tiedetään, milloin tapahtumat ovat tapahtuneet ja voidaan järjestää tapahtumat aikajärjestykseen. Langattomissa anturiverkoissa ajan synkronointi pitää toteuttaa protokollien avulla, jotta säästettäisiin tilaa ja energiaa. Tähän toteutettuja protokollia ovat esimerkiksi TPSN (*timing-sync protocol for sensor Networks*) ja LTS (*lightweight tree-based synchronization*). [11, s. 201–217]

4.2 Topologia

Langaton anturiverkko voi vaihdella topologiaaltaan sovelluksien ja käytettyjen standardien mukaan. Parhaan topologian valintaan vaikuttavat suuresti sen energiankulutus ja kustannukset. Yleensä mitä suurempia ja monimutkaisempia verkot ovat rakenteeltaan, sitä korkeammat ovat kustannukset. Kun valitaan topologiaa, on huomioitava myös se, että verkon rakenne voi muuttua, eli solmukohtat tai anturit voivat liikkua ja ympäristö muuttua, jolloin verkon pitää ottaa huomioon nämä muutokset. Solmukohtien on mahdollista muodostaa yhteyksiä kaikkien naapurisolmukohtiensa kanssa, mutta tämä vaatisi suurta lähetystehoa, joka ei ole energiatehokasta. Tähän ongelmaan on kehitetty topologiaohjausprotokollia, joilla saataisiin maksimoitua suorituskykyä ja vähennettyä energiankulutusta. Topologiaohjauksen avulla pystytään muuttamaan verkon topologiarakennetta verkon muuttuessa. [11, s. 251–253]

Yleisimpiä langattomissa anturiverkoissa käytettäviä topologioita ovat tähti (*star*), verkko (*mesh*) tai ruudukko (*grid*). Tähtitopologia on yksinkertaisin topologia anturiverkoon, jossa jokainen solmukohta on suoraan yhteydessä yhdyskäytävään. Se soveltuu vain kooltaan ja lukumäärältään pieniin langattomiin anturiverkkoihin. Verkko- ja ruudukkotoologioissa data siirtyy anturilta anturille, kunnes data saapuu yhdyskäytävälle. Verkkotopologia eroaa ruudukkotoologiasta niin, että verkkomuodossa verkon rakenne on todella satunnainen ja ruudukossa se on hyvin strukturoitu. Nämä verkkotyypit sopivat pinta-alaltaan ja lukumäärältään suuriin langattomiin anturiverkkoihin. Suurissa langattomissa anturiverkoissa eniten käytetty topologia on hierarkialtaan kahteen kerrokseen hajautettu topologia (*two-tier hierarchical cluster topology*). Siinä tasoja on kaksi, joista alemmalla tasolla toimivat toisistaan erotellut anturiverkot, jotka lähettävät dataa ylemmälle kerrokselle vastaanottimeen, joka jakaa kootun tiedon eteenpäin tukiasemalle. Vastaanottimet voivat siirtää tietoa verkkotyypisesti toisten vastaanottimien avulla, kunnes data saavuttaa tukiaseman. Lisäksi alemmalla kerroksella olevat erotellut anturiverkot voivat itsenäisesti määrittää jokaiselle verkolle sopivan topologian, mahdollistaen paremman kommunikaation ja käyttövarmuuden. [14, s. 181–183] Edellä mainitut topologiat on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Langattomissa anturiverkoissa käytettyjä topologioita. A) Tähti-topologia, B) Verkkotopologia, C) Ruudukkotoologia, D) Hierarkialtaan kahteen kerrokseen hajautettu topologia. Muokattu lähteestä [14, s. 182–183].

4.3 Häiriötekijät

Häiriötekijöitä langattomissa anturiverkoissa ovat ankarat ympäristöolosuhteet, käyttövarmuus- ja reaaliaikaisuusvaatimukset, pakettien siirtovirheet, aikaan ja paikkaan sidonnainen yhteyden laatu sekä rajalliset resurssit muistin, prosessoinnin ja energian suhteen. Yleensä energian saatavuus on rajoittava tekijä, jonka takia WSN-verkoissa pyritään energiatehokkuuteen. [15, s. 3559] Gungor et al. [15] esittävät useiden tehtyjen testimitausten [16-19] perusteella seuraavat johtopäätökset:

- Empiiriset tutkimukset ja mittaukset ovat osoittaneet, että kuuluvuusalue ei ole ympyränmuotoinen tai kaareva. Pakettien katoamiset ovat yleisiä, kun edessä on fyysisiä esteitä ja kantamamatka on pitkä. Pakettien katoamiset vaihtelevat ajan ja paikan suhteen.
- Paketit voivat siirtyä ongelmitta solmulta A solmulle B, mutta eivät välttämättä toisinpäin, vaikka lähetysteho on molemmissa solmukohdissa sama.

RSSI (*received signal strength indicator*) ja LQI (*link quality indication*) ovat mittareita, joilla mitataan signaalin voimakkuutta ja yhteyden laatua solmukohtien välillä [9, s. 18].

PRR-mittaria (*packet reception rate*) käytetään ilmoittamaan vastaanotettujen pakettien suhde kaikkiin lähetettyihin paketteihin [15, s. 3563]. Gungorin et al. tekemissä kokeellisissa testimittauksissa mitattiin WSN-verkon yhteyden laatua. Testeissä käytettiin Tmote Sky -antureita, jotka käyttävät CC2420-radiokomponenttia, joka käyttää IEEE 802.15.4 -standardia. Tmote Sky -anturit operoivat yleisesti käytetyllä 2,4 GHz:n taajuudella. [15, 20] Testeissä huomattiin, että samassa tilassa mikroaaltouunin ollessa päällä, joka toimii myös 2,4 GHz:n taajuudella, on suuri vaikutus PRR:ään. PRR vaihteli 35 % ja 100 %:n välillä mikroaaltouunin ollessa päällä ja pois päältä. Testeissä huomattiin myös, että PRR ja LQI korreloivat hyvin keskenään. Niiden Pearson-korrelaatiokerroin on luokkaa 0,7, kun taas PRR:n ja RSSI:n välinen korrelaatiokerroin on vain luokkaa 0,5. Tämä tarkoittaa, että LQI on toimiva mittari arvioimaan, kuinka hyvin paketit pääsevät perille. [15, s. 3560–3563] RSSI:n huonommasta korrelaatiokertoimesta huolimatta, tämän työn mittauksissa käytetään sitä mittaamaan yhteyden voimakkuutta.

5. LANGATTOMAN ANTURIVERKON STANDARDIT

Standardisoidulla teknologialla on monia etuja verrattuna patentoituihin teknologioihin. Standardoitua teknologiaa käyttämällä saavutetaan parempi asiakkaan ja teollisuuden tuki sekä suuremmat markkinat. Langattomien antureiden rajapintoja, tiedontallennusmuotoja, kommunikaatioprotokollia ja muita teknologioita voidaan standardisoida. Standardoinnilla saavutetaan parempi antureiden yhteen liitettävyyden eri valmistajien välillä. [9, s. 7]

Langattomissa antureissa ja langattomassa anturiverkossa voidaan hyödyntää monia eri standardeja. Standardisoidut teknologiat tukevat toisiaan ja toimivat rinnakkain. Eri standardeja käytetään käyttökohteen ja sovellusten mukaan. Tässä luvussa käsitellään langattomissa anturiverkoissa yleisesti käytetyt standardit IEEE 802.15.4, ZigBee ja WirelessHART, sekä kerrotaan miksi langattomassa tiedonsiirrossa tunnetut standardit IEEE 802.11 ja Bluetooth eivät sovellu langattomiin anturiverkkoihin.

5.1 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 -standardi on suunniteltu langattomaan tiedonsiirtoon. Sitä käytetään erityisesti teollisuuden sovelluksissa, jotka vaativat matalaa energiankulutusta, järjestelmän matalaa kompleksisuutta ja helppoa suunnittelua. [10, s. 2299; 11, s. 140] IEEE 802.15.4 -standardi on saanut teollisissa sovelluksissa niin suuren hyväksynnän, että ZigBee ja WirelessHART-standardit on suunniteltu sen päälle. IEEE 802.15.4 määrittelee fyysisen kerroksen ja siirtokerroksen protokollat. [21, s. 2200].

IEEE 802.15.4 -standardoitu verkko tukee kolmenlaisia verkkolaitteita: PAN-koordinaattoreita, koordinaattoreita ja laitteita. PAN-koordinaattorit toimivat kuten yhdyskäytävät (*gateway*), koordinaattorit voivat olla antureita, jotka toimivat keskenään ja pystyvät langattoman anturiverkon sisällä reitittämään dataa. Laitteet ovat antureita, jotka pystyvät kommunikoimaan vain koordinaattoreiden kanssa. Lisäksi standardi määrittää kahdenlaisia laitteita: täyden toiminnan laitteita (*full function devices, FFD*) ja rajoitetun toiminnan laitteita (*reduced function devices, RFD*). FFD:t ovat koordinaattorilaitteita, joista vähintään yksi toimii PAN-koordinaattorina ja RFD:t ovat antureita, jotka voivat kommunikoida vain FFD:n kanssa. [9, s. 9]

5.2 ZigBee

ZigBee rakentuu kokonaan IEEE 802.15.4 -standardin fyysisen kerroksen ja siirtokerroksen päälle [21, s. 2203]. ZigBeen verkkokerros yhdistää päätevastaanottimen tai yhdyskäytävän (*end point/gateway*) muihin verkkosovelluksiin, jotka käyttävät TCP/UDP-protokollaa. Standardissa on aina yksi ZigBee-koordinaattori, joka ohjaa anturiverkkoa. Verkko voi olla topologialtaan tähtimäinen, vertaisverkko tai puuverkko (*cluster-tree*). [9, s. 10]

ZigBeen sovellustuki (*application support, APS*) tarjoaa tukea rinnakkaisten sovellusten kanssa. Sen avulla voidaan yhdistää muita laitteita samaan verkkoon ja siirtää dataa näiden välillä. APS tarjoaa myös mahdollisuuden jakaa tietoa useamman kuin yhden laitteen kanssa samanaikaisesti. ZigBee device object (*ZBO*) auttaa löytämään verkosta muita laitteita ja sovelluksia, joita muut laitteet voivat tarjota anturiverkolle ja auttaa muodostamaan rajapinnan näiden sovellusten kanssa. Standardissa on oma turvajärjestelmänsä, joka pystyy salaamaan dataa. Standardia on kahdenlaista, ZigBee ja ZigBee Pro. Ne toimivat lähes samalla tavalla, mutta ZigBee on tarkoitettu sovelluksiin, jotka vaativat vähemmän muistia ja prosessointitehoa. ZigBee Pro taas tarjoaa enemmän muistia ja prosessointitehoa, sekä parempaa verkon skaalautuvuutta ja suorituskykyä. [9, s. 10–11]

ZigBee on hyvä valinta sovelluksiin, jotka tulee saada helposti käyttöön otettua, joissa on vähän liikennettä ja jotka eivät sisällä kriittisiä sovelluksia. Näiden lisäksi ZigBee-standardin avulla saavutetaan pieni energiankulutus [21, s. 2215].

5.3 WirelessHART

IEEE 802.15.4 -standardissa huomattiin olevan puutteita luotettavuuden ja reaaliaikaisuuden kanssa. WirelessHART-standardi omaksui IEEE 802.15.4 -standardilta vain sen fyysisen kerroksen protokollat ja muokkasi IEEE 802.15.4:n MAC-protokollia. Loput protokollat on määritelty näiden päälle [21, s. 2203]. WirelessHART on standardi sovelluksiin, jotka vaativat tiukennettuja kriteerejä viiveeltä, luotettavuudelta ja turvallisuudelta. WirelessHARTin MAC-kerros perustuu aikataulutettuun protokollaan ja se käyttää TDMA-kanavointia. Sen avulla verkon jokainen solmukohta on ajallisesti synkronoitu ja se kykenee kanavahyppelyyn, eli valitsemaan kanavan, jossa on vähiten häiriötä sillä hetkellä. TDMA:n avulla voidaan tarkasti mitata viivettä ja suoritustehoa. TDMA:n avulla verkon käyttäytymistä on helppo ennakoida ja mitata, mikä on tärkeää teollisuuden sovelluksissa. Haittapuolena TDMA:n aikataulutuksessa on verkon koon jääminen pieneksi ja verkon muutoksien vaikea käsittely. [9, s. 12] WirelessHART-standardia käytetään paljon prosessiteollisuudessa.

5.4 IEEE 802.11 ja Bluetooth

Miksi tuttua WLAN-lähiverkkostandardia IEEE 802.11 ja Bluetoothia ei voida käyttää langattomissa anturiverkoissa? Bluetoothia on käytetty prototyyppinä langattomiin anturiverkkoihin. Bluetooth perustuu siihen, että sillä on aina yksi isäntä, jolla voi olla maksimissaan 7 vastaanottavaa laitetta, joilla on sama kuuluvuusalue samaan aikaan. Tämä rajoittaa langattoman anturiverkon kokoa ja jos sitä halutaan kasvattaa, niin verkosta tulee monimutkainen. Bluetooth perustuu kanavahyppelyyn, jossa isäntä määrää kanavat, joiden välillä vastaanottavat laitteet vaihtelevat taajuuttaan samanaikaisesti. Tämä kuluttaa paljon energiaa ja vaatii todella tarkkaa kellon synkronointia, eikä näin ollen sovellu langattomiin anturiverkkoihin. [11, s. 145–146]

IEEE 802.11 perustuu siihen, että samalla kanavalla voi olla useampia vastaanottavia laitteita samaan aikaan. Vastaanottavien laitteiden pitää olla koko ajan aktiivisina, mikä kuluttaa liikaa energiaa. Lisäksi IEEE 802.11 -standardi tukee topologiaa, jossa vastaanottavan laitteen tulee olla suoraan yhteydessä lähettävään laitteeseen (*single-hop*). Tämä topologia ei toimi suurissa langattomissa anturiverkoissa. IEEE 802.11 onkin tarkoitettu sovelluksiin, jossa tarvitaan suurempaa tiedonsiirtonopeutta ja jotka sallivat suuremman energiankulutuksen. [11, s. 145–146]

6. MITTAUKSET

Mittauksien tarkoitus tässä työssä on kartoittaa hitsausautomaatiossa käytettävien erilaisien prosessien aiheuttamaa häiriötä langattomaan tiedonsiirtoon. Yleisimpiä häiriötekijöitä hitsausautomaatiossa ovat fyysiset esteet, etenkin metalliset fyysiset esteet, joiden läpi 2,4 GHz:n radioaallon on vaikea kulkea. Toinen häiriötekijä on laitteet ja prosessit, jotka tuottavat sähkömagneettisia aaltoja samalla taajuudella kuin langattoman tiedonsiirron toimintataajuus. Tämä vastaa samaa asiaa kuin aiemmassa luvussa, jossa kerrottiin mikroaaltouunin 2,4 GHz taajuuden vaikuttavan voimakkaasti Tmote Sky -antureiden langattomaan tiedonsiirtoon.

Kaikki mittaukset on toteutettu Pemamekin tarjoamilla resursseilla ja heidän toimintaympäristössään Loimaalla.

6.1 Komponentit ja menetelmät

Mittauksissa käytetään Phoenix Contactin seuraavia komponentteja:

- Phoenix Contact - Wireless module - FL WLAN 1100 – 2702534 (asiakas/client) [22]
- Phoenix Contact - Wireless module - FL WLAN 5100 – 2700718 (tukiasema/gateway) [23]
- Phoenix Contact - Antenna - ANT-OMNI-2459-02 – 2701408 [24].

Yrityksen tuotannosta johtuvista syistä, langattomia antureita ei päästy kokeilemaan tässä työssä. Sen sijaan, langaton tiedonsiirto on toteutettu WLAN-moduuleilla. Mittauksissa FL WLAN 1100 -moduuli toimii asiakkaana ja FL WLAN 5100 -moduuli toimii tukiasemana. Mittauksissa toteutettu tiedonsiirtotapa on kahdenvälinen tiedonsiirto (*point-to-point transmission*). Tämä ei ole anturiverkon tyypillinen tiedonsiirtotapa, mutta toimiva menetelmä kartoittamaan häiriöitä näissä mittauksissa.

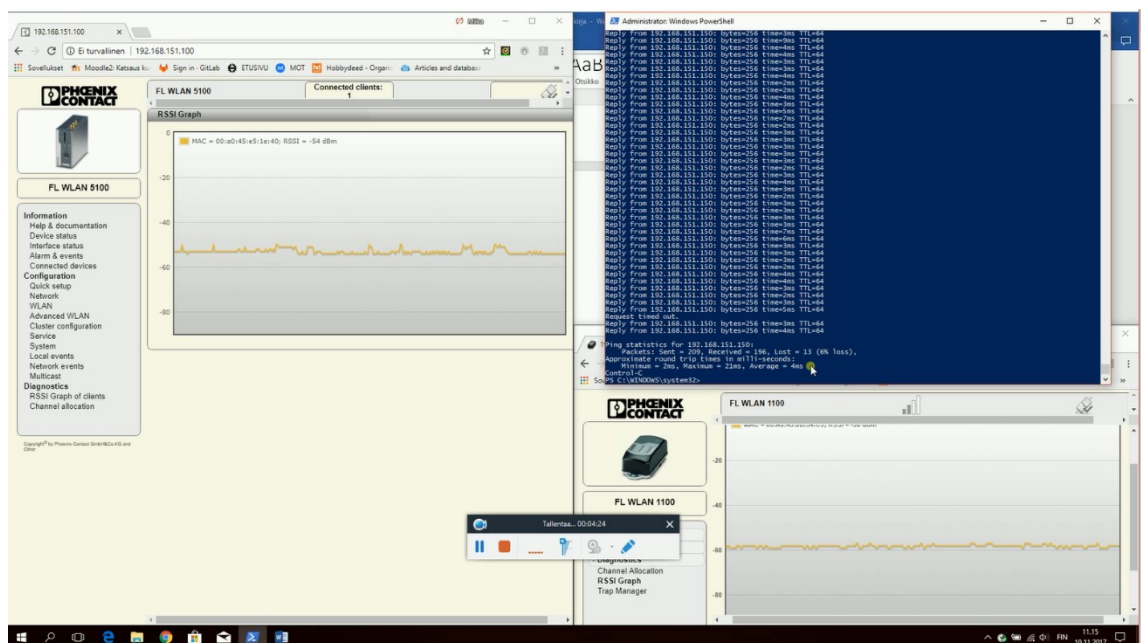
Mittauksissa kahdenvälinen tiedonsiirto mahdollistaa sen, että mitattavissa oleva häiriötekijä saadaan asetettua suoraan asiakkaan ja tukiaseman väliin. Tämä mahdollistaa luotettavamman mittaustuloksen ja sen, että mitattava häiriötekijän saadaan paremmin mittaauksissa esiin.

Miksi WLAN-moduulit mahdollistavat luotettavat tulokset työn kannalta, vaikka ne eivät ole langattomia antureita ja käyttävät standardia IEEE 802.11? Ensimmäinen syy on se, että molempien langaton tiedonsiirto perustuu standardiin, jossa dataa siirretään 2,4 GHz:n taajuudella. Langattomissa antureissa voidaan käyttää myös muita standardeja, jotka käyttävät muita taajuuksia, mutta 2,4 GHz:n taajuus on yleisin. Mittauksien tarkoi-

tus on todentaa, aiheuttavatko hitsausautomaatiossa käytettävät laitteet ja prosessit sähkömagneettista aaltoilua kyseiselle taajuusalueelle ja näin ollen häiriötä langattomaan tiedonsiirtoon. Mittauksissa on lähinnä kyse siitä, millä taajuusalueella eri prosessit ja laitteet toimivat. Jos prosessit toimisivat samalla taajuusalueella, niin mittauksissa tämän pitäisi ilmentyä datapakettien suurempana katoamisprosenttina eli PRR olisi huonompi.

Toinen asia jota tarkastellaan, on signaalin voimakkuus eli RSSI (*received signal strength indicator*). Signaalin voimakkuuteen vaikuttaa lähetysteho ja sen ailahtelevuuteen vaikuttaa voimakkaasti taajuus, jota käytetään. Tulos on vertailukelpoinen, koska taajuus on mittauksissa sama kuin langattomien antureiden taajuus. Eri taajuuksilla radioaallot eivät käyttäytyisi samalla tavalla kohdatessaan fyysisiä esteitä. Esimerkiksi 5,0 GHz:n taajuus ei siedä niin paljon fyysisiä esteitä, lyhyemmän aallonpituuden takia, kuin 2,4 GHz:n taajuus.

Mittauksissa signaalin voimakkuuden mittarina käytettiin Phoenix Contactin tarjoamaa ohjelmaa, joka piirtää RSSI-kuvaajan automaattisesti ja josta näkee signaalin voimakkuuden desibeleinä milliwattia kohden [dBm]. Lähetettyjen ja kadotettujen datapakettien mittaamiseen käytettiin Windows PowerShellin komentoa *ping*. Kuvassa 7 on esitetty, millaista tietoa edellä mainituilla menetelmillä saadaan esille.



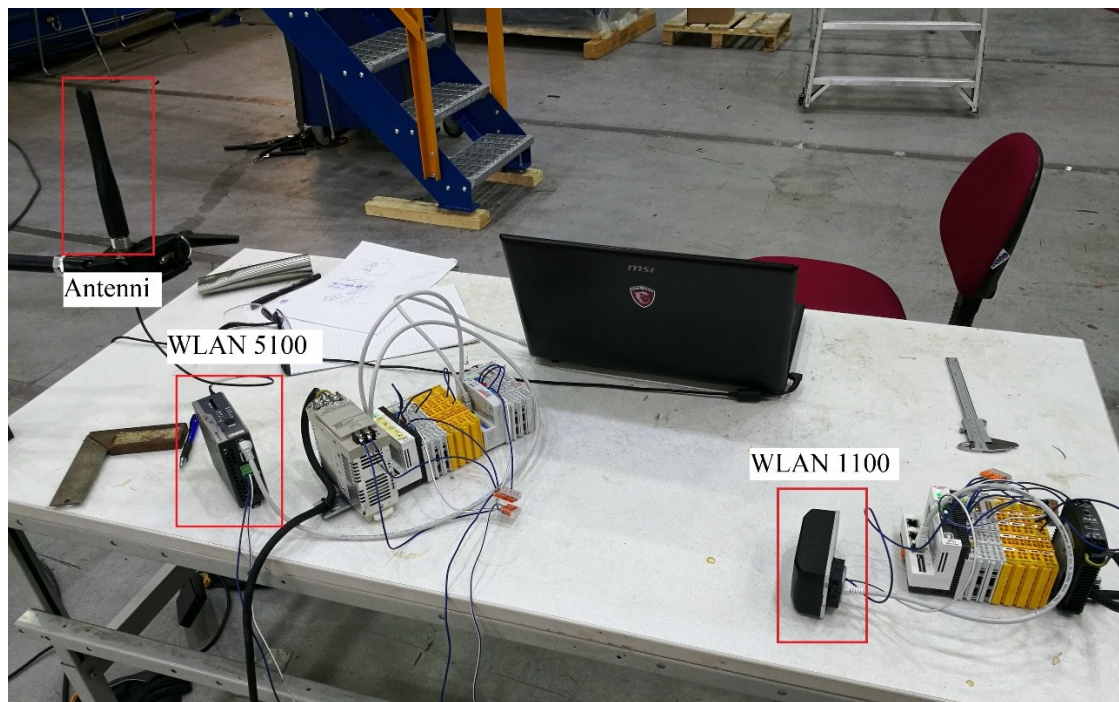
Kuva 7. Mittauksessa käytetyt mittarit.

Ping-komento lähettää asiakkaalle eli tässä tapauksessa WLAN 1100 -moduulille tietynkokoisen datapaketin ja mittaa millisekunteina, kuinka nopeasti paketti kulkee

WLAN-moduulien välillä. Mittauksissa tämä komento asetettiin jatkuvaksi, eli se toistaa edellä kuvattua tapahtumasarjaa, kunnes se pysäytetään. Pysäyttäessä Windows PowerShell tuo esiin analyysin, jossa kerrotaan lähetetyt, vastaanotetut ja kadotetut datapaketit, sekä pienin viive, suurin viiveen ja keskiarvoviive.

6.2 Mittaustulokset

Mittauksissa häiriötä aiheuttamaan käytettiin plasmaleikkuukonetta, induktiolämmittimiä ja kanttiaaltohitausta. Näiden lisäksi tehtiin mittauksia tilanteissa, jossa mahdolliset häiriötekijät on minimoitu ja joissa vaihdeltiin WLAN-moduulien etäisyyttä ja lähetystehoja. Kuvasta 8 näkee mittaukseen tarvittavat komponentit. Kuvassa 8 WLAN-moduulit ovat lähellä, mutta todellisissa mittauksissa niiden etäisyyttä kasvatettiin ja väliin asetettiin mahdollisia häiriötekijöitä. Mittauksista saadut tulokset on tiivistetty taulukoihin 2–6 ja RSSI-kuvaajat on esitetty liitteessä A.



Kuva 8. Mittaukseen tarvittavat komponentit. WLAN-moduulien etäisyyttä kasvatetaan ja väliin asetetaan mahdolliset häiriötekijät.

6.2.1 Plasmaleikkuu

Plasmaleikkuussa tehtiin yksi vertailukelpoinen mittaus, josta voitiin analysoida datapaketien katoamista. Kyseisessä mittauksessa WLAN-moduulien etäisyys oli noin 7 m ja lähetystehona käytettiin molemmissa WLAN-moduuleissa 5 dBm lähetysteho, joka oli moduulien minimilähetysteho. Mittaus kesti noin 40 sekuntia. Vertailukohdaksi on otettu

mittaus, jossa plasmaleikkuri oli pois päältä, mutta muut muuttajat pysyivät samoina. Lähetetyn datapaketin koko oli 128 tavua. Plasmaleikkurin ollessa pois päältä, mittausdataa kerättiin pidemmältä ajanjaksolta. Taulukosta 2 on esitetty mittauksista saatu data. Liitteen A kuvissa 9 ja 10 on esitetty mittauksesta saadut RSSI-kuvaajat.

Taulukko 2. Datapakettianalyysi plasmaleikkauksen ollessa päällä ja pois.

	Plasmaleikkaus päällä	Plasmaleikkaus pois päältä
Keskiviive	4 ms	4 ms
Minimi viive	2 ms	2 ms
Maksimi viive	8 ms	14 ms
Lähetetyt datapaketit	36	78
Kadonneet datapaketit	2	6
Katoamisprosentti	6 %	8 %

6.2.2 Induktiolämmittimet

Induktiolämmittimiä käytettäessä tehtiin kaksi vertailukelpoista mittausta. Ensimmäisessä mittauksessa WLAN-moduulien etäisyys oli noin 10 m, ja toisessa mittauksessa WLAN-moduulien etäisyyttä pienennettiin 2 metriin, jolloin induktiolämmittimet olivat suoraan moduulien välissä. Molemmissa mittauksissa lähetetyn datapaketin koko oli 128 tavua ja WLAN-moduulien lähetystehot olivat minimissä eli 5 dBm. Induktiolämmittimiä käytettäessä lämmitys vaihe kesti vain kymmeniä sekunteja ja siksi ei ole paras mahdollinen tilanne analysoida datapakettien katoamista. Taulukossa 3 on esitetty mittauksista saatu data ja liitteen A kuvissa 11–14 on esitetty mittauksista saadut RSSI-kuvaajat.

Taulukko 3. Datapakettianalyysi induktiolämmityksen ollessa päällä ja pois päältä, kahdella eri etäisyydellä.

	Induktiolämmitys päällä		Induktiolämmitys pois päältä	
	10 m	2m	10 m	2 m
Etäisyys	10 m	2m	10 m	2 m
Keskiviive	7 ms	4 ms	6 ms	4 ms
Minimi viive	2 ms	2 ms	2 ms	2 ms
Maksimi viive	25 ms	17 ms	32 ms	10 ms
Lähetetyt datapaketit	33	42	49	49
Kadonneet datapaketit	1	3	4	1
Katoamisprosentti	3 %	7 %	8 %	2 %

6.2.3 Kanttiaaltohitsaus

Kanttiaaltohitsauksessa saatiin tehtyä useampia vertailukelpoisia mittauksi. Mittauksissa WLAN-moduulien lähetysteho oli minimissä eli 5 dBm. Lähetetyn pakettidatan koko oli edellisistä mittauksista poiketen 256 tavua. WLAN-moduulien etäisyys oli noin 7 metriä.

Taulukossa 4 on esitetty mittauksista saatu data hitsauksen ollessa päällä ja pois päältä. Liitteen A kuvissa 15–18 on esitetty mittauksista saadut RSSI-kuvaajat.

Taulukko 4. *Datapaketianalyysi kanttiaaltohitsauksen ollessa päällä ja pois päältä. Molemmista kaksi eri mittausta.*

Mittaus	Kanttiaaltohitsaus päällä		Kanttiaaltohitsaus pois päältä	
	1	2	3	4
Keskiviive	3 ms	3 ms	3 ms	3 ms
Minimi viive	2 ms	2 ms	2 ms	2 ms
Maksimi viive	19 ms	12 ms	73 ms	36 ms
Lähetetyt datapaketit	176	155	213	309
Kadonneet datapaketit	17	13	14	28
Katoamisprosentti	9 %	8 %	6 %	9 %

6.2.4 Mittaukset eri etäisyyksillä

Viimeisissä mittauksissa tutkittiin etäisyyden ja fyysisten esteiden vaikutusta datapaketin katoamiseen ja signaalin voimakkuuteen. Näissä mittauksissa lähetetyn datapaketin koko oli 256 tavua. Taulukossa 5 on ensiksi ilmoitettu data, kun matka on 1 m ja 7 m. Sen jälkeen on esitetty tilanne, jossa antenni on peitettynä, mikä laskee huomattavasti signaalin vahvuutta. Mittauksissa WLAN-moduulien lähetysteho oli minimissä eli 5 dBm. Liitteen A kuvassa 19 on esitetty RSSI-kuvaaja, kun WLAN-moduulien etäisyys on 1 m.

Taulukko 5. *Datapaketianalyysi kahdella eri etäisyydellä, sekä antenni peitettynä.*

Etäisyys	Ei esteitä		Peitetty antenni
	1m	7 m	7m
Keskiviive	3 ms	3 ms	3 ms
Minimi viive	2 ms	2 ms	2 ms
Maksimi viive	57 ms	22 ms	42 ms
Lähetetyt datapaketit	189	216	186
Kadonneet datapaketit	17	10	16
Katoamisprosentti	8 %	4 %	8 %

Taulukossa 6 on esitetty tilanne, jossa etäisyyttä on kasvatettu 50 metriin ja WLAN-moduulien välissä ei ole selkeää näköyhteyttä, eli niiden välissä on fyysisiä esteitä. Taulukossa on esitetty datapaketianalyysi kolmella eri lähetysteholla. Liitteen A kuvissa 20 ja 21 on esitetty vertailu, jossa signaalinvahvuudet on muokattu samaan kuvaan, josta on helppo vertailla lähetystehon vaikutusta signaalin vahvuuteen.

Taulukko 6. Datapakettianalyysi kolmella eri lähetysteholla.

Lähetysteho	50m, ei näköyhteyttä			
	5 dBm	5 dBm	12 dBm	20 dBm
Keskiviive	30 ms	31 ms	11 ms	4 ms
Minimi viive	2 ms	2 ms	2 ms	2 ms
Maksimi viive	2319 ms	1512 ms	236 ms	112 ms
Lähetetyt datapaketit	225	219	226	210
Kadonneet datapaketit	6	12	8	13
Katoamisprosentti	2 %	5 %	3 %	6 %

6.3 Mittauksien yhteenveto

Datapaketttianalyysissä tärkeää tietoa on keskiviive ja datapakettien katoamisprosentti. Minimiviive oli jokaisessa datapakettianalyysissä sama, 2 ms. Maksimi viive saattoi nousta satunnaisesti todella suureksi. Lyhyen kantaman mittauksissa viiveet pysyivät maltillisina, mutta kun etäisyyttä kasvatettiin 50 metriin ja lähetystehoa vaihdeltiin, niin keskiarvo ja maksimi viiveet kasvoivat merkittävästi.

Mittauksissa mitattiin myös pakettien katoamista. Kaikkien mittausten pakettien katoamisprosentin keskiarvo oli 6 %. Rinnastettuna tähän tulokseen on huomioitava, että yksikään mittaus ei eronnut tästä keskiarvosta merkittävästi. Tästä voidaan päätellä, että yksikään mittauksissa käytettävä hitsausautomaation prosessi ei vaikuttanut pakettien katoamiseen merkittävästi. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseiset prosessit eivät suurella todennäköisyydellä tuota sähkömagneettista säteilyä WLAN-moduulien käyttämälle 2,4 GHz:n taajuusalueelle. Toisin kuin Gungorin et al. tekemissä mittauksissa, joissa käytettiin mikroaaltouunia, joka toimii 2,4 GHz taajuudella. Niissä mittauksissa mikroaaltouuni vaikutti niin, että jopa 75 % datapaketeista katosi. [15, s. 3561]

Liitteessä A olevia signaalien vahvuuksia tarkasteltaessa voi huomata, että WLAN 1100 -moduulilla oli aina huonompi signaalien voimakkuus kuin WLAN 5100 -moduulilla. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että WLAN 5100 -moduulissa käytettiin antennia, joka lähettää signaalia ympärilleen. Eli WLAN 5100 -moduulilta lähtevää signaalia ei oltu suunnattu tarkasti WLAN 1100 -moduulille. Kun taas WLAN 1100 -moduuli sisältää antennin, joka lähettää signaalia tarkasti 30 asteen kulmassa kohti WLAN 5100 -moduulia. Jokaisessa mittauksessa WLAN 1100 -moduuli oltiin suunnattu tarkasti kohti WLAN 5100 -moduulia. Tämä huomataan myös 50 metrin mittauksissa, jossa WLAN 5100 -moduulilla signaalien vahvuus heittelee huomattavasti enemmän. Tämä aiheutuu, kun jokin fyysinen este katkaisee WLAN 1100 -moduulin näköyhteyden WLAN 5100 -moduulille, jolloin signaalien vahvuus heikkenee. Liitteen A RSSI-kuvaajista huomataan, että etäisyyden kasvaessa signaalien vahvuus laskee. Liitteen A kuvista 20 ja 21 huomataan, että lä-

hetystehoa kasvatettaessa signaalin vahvuus kasvaa. Signaalin vahvuuden laskiessa riittävän alas moduulit lakkaavat kuulemasta toisiaan, joka johtaisi pakettien katoamiseen. Kolarin et al. tutkimus [25] osoittaa signaalin voimakkuuden merkityksen datapakettien katoamiseen. Tutkimuksessa selvisi, että signaalin ollessa hyvä, PRR on koko ajan lähemmäksi 100 %. Kun saavutaan alueelle, jossa signaalin voimakkuus lähenee kriittistä raja-arvoa, niin paketteja alkaa kadota satunnaisesti paljon. [25, s. 1434]

Hitsausautomaation prosessit eivät aiheuttaneet signaalin voimakkuuteen muutoksia. Pientä vaihtelua esiintyi signaalin voimakkuudessa prosessin ollessa käynnissä, mutta se luultavasti johtui koneiden ja ihmisten liikkeistä mitattavalla alueella. Voidaan todeta, että hitsausautomaation prosessit eivät aiheuta pahinta häiriötä. Suurin häiriönaiheuttaja oli koneiden ja muiden muuttujien liikkeet niin, että ne katkaisevat kahden solmukohdan näköyhteyden.

7. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin langattomia antureita ja anturiverkkoja. Näiden lisäksi tehtiin mittauksia, miten hitsausautomaation eri prosessit vaikuttavat langattomaan tiedonsiirtoon. Mittauksista huomattiin, että hitsaus-, leikkaus- ja lämmitysprosesseilla ei ollut suoranaista vaikutusta datapakettien katoamiseen ja signaalin vahvuuteen. Näiden perusteella pystytään toteamaan, että langattomat anturit ja anturiverkot soveltuisivat hyvin hitsausautomaation sovelluksiin. Jotta tulevaisuuden hitsausautomaatiossa voitaisiin ottaa langattomia antureita käyttöön suuremmalla volyyymilla, pitää niille tehdä kattavammat kokeet. Tässä työssä tehdyt mittaukset antoivat vain pientä näyttöä siitä, että ne soveltuisivat myös hitsausautomaatioon. Tästä seuraava vaihe olisi todennäköisesti langattomien antureiden tai anturiverkkojen kokonaisvaltaiset kokeet, esimerkiksi osana automatisoitua hitsausautotantolinjaa.

Hitsausautomaation yrityksessä Pemamek Oy spekuloitiin alkuun, että langattomat anturit eivät korvaa lähivuosina langallisia antureita. Langallisissa on edelleen omat etunsa verrattuna langattomiin antureihin. Kuitenkin monella muulla teollisuuden alalla langattomat anturit ja anturiverkot ovat yleistymään päin niiden uusien innovaatioiden ja käyttökohteiden ansiosta. Näin ollen voidaan olettaa, että hitsausautomaatiossakin tullaan lähivuosina ottamaan langattomia antureita ja anturiverkkoja enemmän käyttöön.

Pemamekilla on joissain sovelluksissa otettu käyttöön langatonta tiedonsiirtoa, mutta se on ollut lähinnä pakon edessä, kun kaapelointi on ollut mahdotonta viedä komponenteille. En itse näe, että olisi vielä tärkeää korvata kaikkia langallisia antureita langattomilla, mutta niiden potentiaali on suuri. Esimerkiksi Yanin et al. tekemässä tutkimuksessa [26, s. 367–372] langattomia antureita ja langatonta anturiverkkoa käytettiin hitsausautomaatiossa moottorinohjausjärjestelmään ja Machedon-Pisun veljesten tekemässä tutkimuksessa [27, s. 394–400] langatonta anturiverkkoa käytettiin mittaamaan hitsausympäristön ilmanlaatua.

Seuraava kehitysaskel tulee varmasti olemaan langattomien antureiden käyttöönotto langallisten antureiden rinnalla. Esimerkiksi ohjausjärjestelmään tarvittava mittaustieto hankitaan edelleen langallisilla antureilla, mutta niiden ohella langattomilla anturiverkoilla mitataan esimerkiksi ilmanlaatua, ilman kosteusprosenttia ja valvotaan laitteiden kuntoa. Siitä seuraava askel olisi mittaustiedon kerääminen langattomien antureiden avulla, joiden dataa käytetään ohjausjärjestelmässä ohjaamaan hitsauksen eri prosesseja. Kuitenkin päästäkseen tähän vaiheeseen, on voitettava suunnittelijoiden luottamus langattomiin antureihin. Nykypäivän edistyneet sovellukset, joissa on otettu onnistuneesti langattomia anturiverkkoja käyttöön, toimivat hyvinä esimerkkeinä mihin niillä kyetään nyt jo.

LÄHTEET

- [1] U. Eswaran, R. Rajith, Real Time Home Automation System using WSN with Power Optimization, *i-Manager's Journal on Instrumentation & Control Engineering*, Vol. 4, Iss. 3, 2016, pp. 7.
- [2] Standardi SFS 3052, Hitsaussanasto. Yleistermi, Helsinki 1995, Suomen Standardisoimisliitto, 122 s.
- [3] J. Nousiainen, Putkimaisten kappaleiden hitsausautomaatoratkaisun kehittäminen, Lappeenranta 2014, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma, 101 s.
- [4] S.C.A. Alfaro, P. Drews, Intelligent systems for welding process automation, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 28, Iss. 1, 2006, pp. 25-29.
- [5] Pemamek, Welding Automation, verkkosivu saatavissa (viitattu 17.11.2017): <http://pemamek.com/>.
- [6] A.S. Morris, R. Langari, *Measurement and Instrumentation*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2012, 560 p.
- [7] J.P. Bentley, *Principles of measurement systems*, 4th ed. Pearson Prentice-Hall, Harlow, 2004, 521 p.
- [8] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless sensor networks: a survey, in: *Computer Networks*, Vol. 52, Iss. 12, 2002, pp. 393-422.
- [9] J. Suhonen, M. Kohvakka, V. Kaseva, T.D. Hämäläinen, M. Hännikäinen, *Low-Power Wireless Sensor Networks: Protocols, Services and Applications*, Springer, 2012.
- [10] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, Vol. 52, Iss. 12, 2008, pp. 2292-2330.
- [11] H. Karl, A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*, Wiley, Hoboken (NJ), 2005, 497 p.
- [12] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A Comprehensive Analysis of the MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 7, Iss. 1, 2011, pp. 52-65.
- [13] S. Argoubi, K. Maalaoui, M.H. Elhdhili, L. Azzouz Saidine, Quality of Service support in WSN, a survey, 2014, Saatavissa (viitattu 13.11.2017): https://www.researchgate.net/publication/267642367_Quality_of_Service_support_in_WSN_a_survey.

- [14] K. Gurwinder, G.R. Mohan, Energy Efficient Topologies for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Distributed and Paraller Systems*, Vol. 3, Iss. 5, 2015, Saatavissa (viitattu 20.11.2017): <https://pdfs.semanticscholar.org/cef5/88084f583a22c2e3123b30b80deea2555787.pdf>.
- [15] V.C. Gungor, B. Lu, G.P. Hancke, Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, Iss. 10, 2010, pp. 3557-3564.
- [16] A. Willig, M. Kubisch, C. Hoene, A. Wolisz, Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, Iss. 6, 2002, pp. 1265-1282.
- [17] M. Zamalloa, B. Krishnamachari, An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, Vol. 3, Iss. 2, 2007.
- [18] J. Zhao, R. Govindan, Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks, *Proceedings of the 1st international conference on embedded networked sensor systems*, ACM, pp. 1-13.
- [19] G. Zhou, T. He, J.A. Stankovic, T. Abdelzaher, RID: radio interference detection in wireless sensor networks, *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, IEEE, pp. 901 vol. 2.
- [20] Tmote Sky Sensor Datasheet, Moteiv Corporation, Saatavissa (viitattu 1.10.2017): <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>.
- [21] Q. Wang, J. Jiang, Comparative Examination on Architecture and Protocol of Industrial Wireless Sensor Network Standards, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, Iss. 3, 2016, pp. 2197-2219.
- [22] Phoenix Contact FL WLAN 1100/1101 User Manual, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG, 2017-05-03, Saatavissa: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Phoenix%20Contact%20PDFs/FL_WLAN_1100,1101_UM.pdf.
- [23] Phoenix Contact FL WLAN 5100 User Manual, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG, 2013-06-05, Saatavissa: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Phoenix%20Contact%20PDFs/2700718,2701093_UM.pdf.
- [24] Phoenix Contact Antenna - ANT-OMNI - 2549-02, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG, 2014-03-27, Saatavissa: <https://www.phoenixcontact.com/gb/products/2701408>.
- [25] V. Kolar, S. Razak, P. Mähönen, N.B. Abu-Ghazaleh, Link quality analysis and measurement in wireless mesh networks, *Ad Hoc Networks*, Vol. 9, Iss. 8, 2011, pp. 1430-1447.

- [26] Z. Yan, X. Han, X. Dai, Design and implement of welding motor control system based on wireless sensor network, *Procedia Engineering*, Vol. 23, pp. 367-373.
- [27] M. Machedon-Pisu, T. Machedon-Pisu, Work Conditions Assessment in Welding Environments with Wireless Sensor Networks, *Advanced Materials Research*, Vol. 1128, 2015, pp. 394-400.

LIITE A: MITTAUKSISTA SAADUT RSSI-KUVAAJAT

Mittauksista saadut RSSI-kuvaajat eli signaalin voimakkuutta kuvaavat kuvaajat on esitetty tässä liitteessä. Kuvat on järjestelty samaan järjestykseen, kuin työssä on käsitelty kyseisiä mittauksia. Kuviin piirretyt vihreät neliöt kuvaavat aikaväliä, jolloin kyseisestä mittauksesta on otettu datapakettianalyysiin saatu data, kun prosessi ei ole päällä. Punaiset neliöt kuvaavat samaa asiaa, mutta silloin kun prosessi on päällä. Jos neliöitä ei ole ollenkaan, niin koko RSSI-kuvaaja kuvastaa kuvatekstissä mainittua mittausta.



Kuva 9. Plasmaleikkuuta käytettäessä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 5100 -moduulilta, etäisyys 7 m.



Kuva 10. Plasmaleikkuuta käytettäessä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 1100 -moduulilta, etäisyys 7 m.



Kuva 11. Induktiolämmitystä käytettäessä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 5100 -moduulilta, etäisyys 10 m.



Kuva 12. Induktiolämmitystä käytettäessä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 1100 -moduulilta, etäisyys 10 m.



Kuva 13. Induktiolämmitystä käytettäessä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 5100 -moduulilta, etäisyys 2 m.



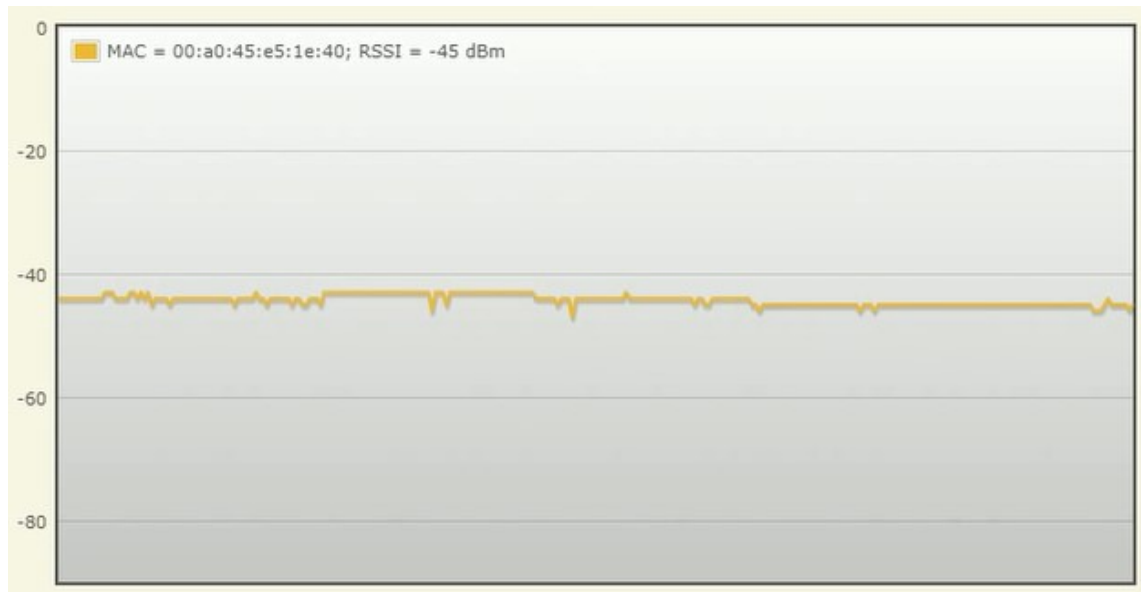
Kuva 14. Induktiolämmitystä käytettäessä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 1100 -moduulilta, etäisyys 2 m.



Kuva 15. Kanttiaaltohitsauksen ollessa päällä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 5100 -moduulilta, etäisyys 7 m.



Kuva 16. Kanttiaaltohitsauksen ollessa päällä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 1100 -moduulilta, etäisyys 7 m.



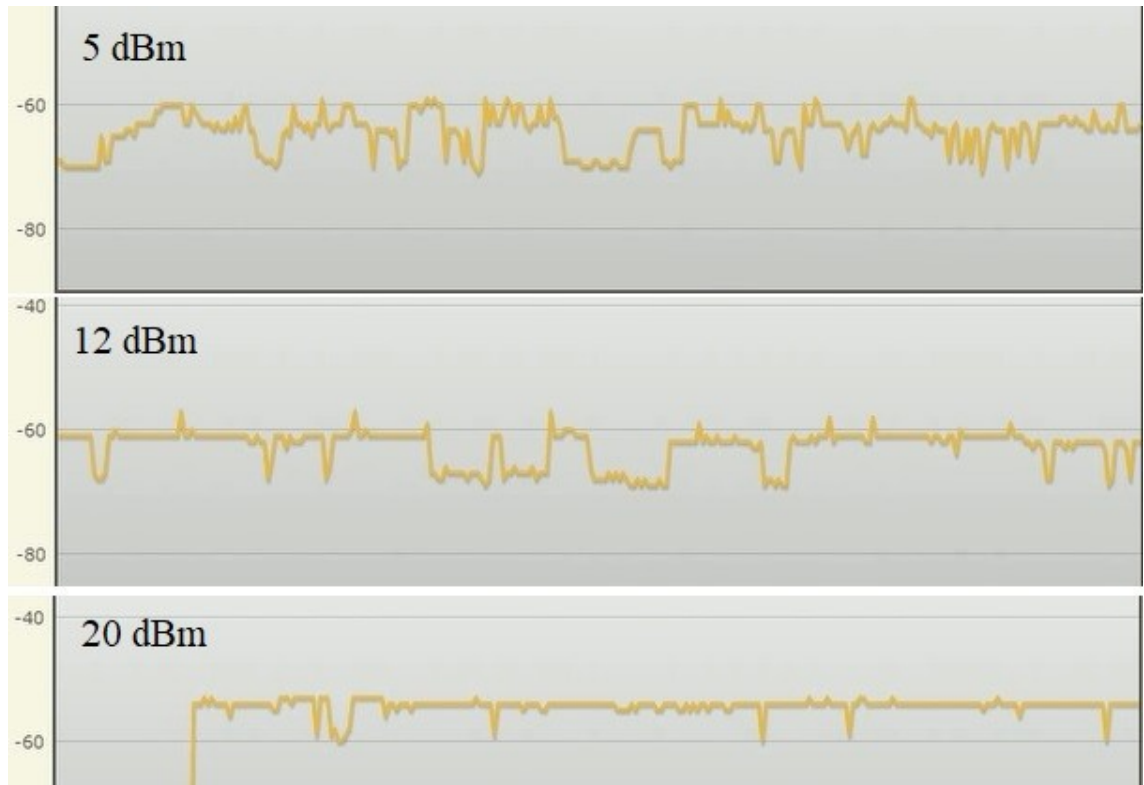
Kuva 17. Kanttiaaltohitsauksen ollessa pois päältä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 5100 -moduulilta, etäisyys 7m.



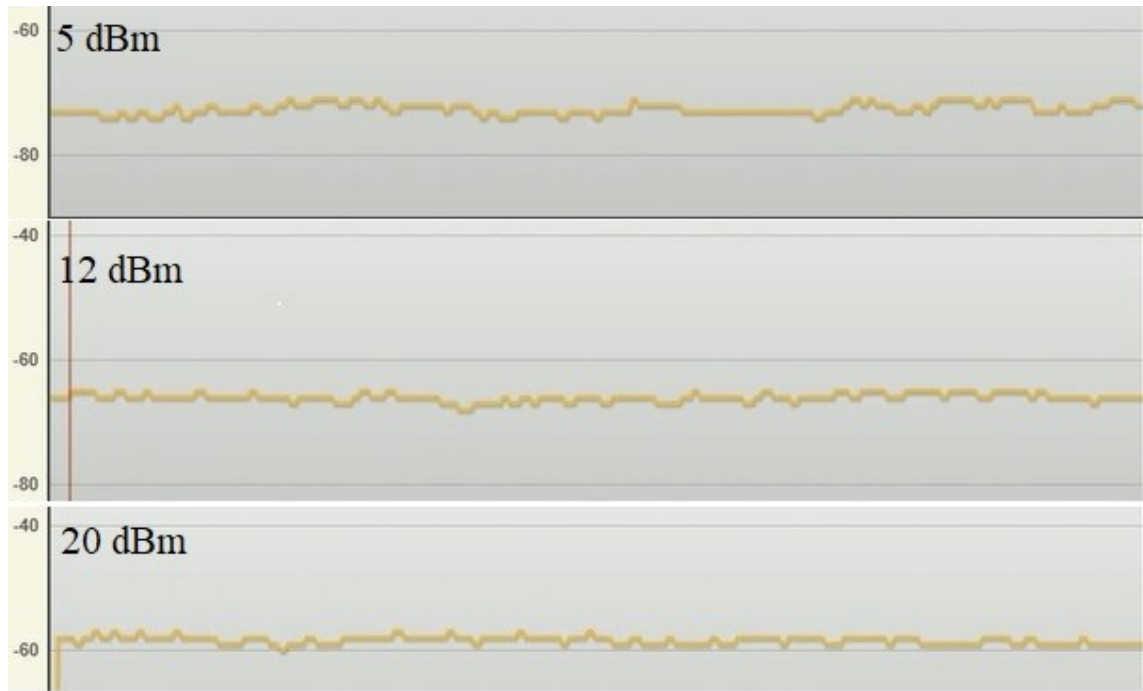
Kuva 18. Kanttiaaltohitsauksen ollessa pois päältä saatu RSSI-kuvaaja WLAN 1100 -moduulilta, etäisyys 7 m.



Kuva 19. WLAN-moduulien RSSI kuvaajat etäisyyden ollessa 1 m.



Kuva 20. WLAN 5100 RSSI-kuvaajat eri lähetystehoilla. Etäisyys 50 m ja välissä fyysisiä esteitä.



Kuva 21. WLAN 1100 RSSI-kuvaajat eri lähetystehoilla. Etäisyys 50 m ja välissä fyysisiä esteitä.