

**Teijo Lappi**

# **LoRa-pohjainen paikantaminen ulkotiloissa**

Tietotekniikan  
pro gradu -tutkielma  
6. maaliskuuta 2020

**Jyväskylän yliopisto**

**Informaatioteknologian tiedekunta**

**Kokkolan yliopistokeskus Chydenius**

**Tekijä:** Teijo Lappi

**Yhteystiedot:** teijolappi@gmail.com

**Puhelinnumero:** 050-4011701

**Ohjaaja:** Ismo Hakala

**Työn nimi:** LoRa-pohjainen paikantaminen ulkotiloissa

**Title in English:** LoRa-based outdoor positioning

**Työ:** Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

**Sivumäärä:** 77

**Tiivistelmä:** Tämän pro gradu-tutkielman tavoitteena oli ottaa selville voiko LoRa-radiota ja siinä käytettyä LoRaWAN-protokollaa hyödyntää paikannustarkoituksessa. Tutkimuksessa selvitettiin, miten LoRaWAN-paikannus toimii ja kuinka sitä voidaan hyödyntää paikannuskäytössä esimerkiksi paristo- ja akkukäyttöisten laitteiden paikantamiseen. Tämän lisäksi selvitettiin LoRa-tekniikan eroja muihin langattomiin verkkotekniikoihin ja tehtiin kattavaa yhteenvetoa nykyisin käytettävistä langattomista radioteknologioista keskittyen erityisesti pitkän kantaman LPWAN-verkkoihin. Tämän lisäksi suoritettiin kaksi erillistä LoRa-paikannuksen testausta Kokkolassa ja Turussa keskittyen paikannustarkkuuteen.

Tutkimuksessa selvisi, että LoRa-pohjainen paikannus on potentiaalinen vaihtoehto korvaamaan GPS-paikannus sellaisissa tilanteissa, jossa riittää ainoastaan sadan metrin tarkkuudella saavutettu paikannustarkkuus. Tutkimus osoitti myös, että nykyisellään Suomen LoRa-verkossa paikannus onnistuu ainoastaan osassa maata, sillä LoRa-yhdyskäytäviä on liian harvassa paikannusta varten.

**Avainsanat:** LoRa, LPWAN, ulkotiloissa paikantaminen

**Abstract:** The Purpose of this abstract was to research if it's possible to use LoRa-radio and LoRaWAN-network-protocol in positioning. The Study cleared up how LoRaWAN-locationing works and how it can be used in positioning, for example battery-powered devices. In addition to this was investigated differencies between LoRa-technology and other wireless network technologies and was made comprehensive summary about wireless radiotechnologies focusing especially in long-range LPWAN-technologies. In addition to this two separate testing of LoRa-locationing was executed in Kokkola and Turku focusing in positioning accuracy. The study revealed that LoRa-based locationing is potential alternative to replace GPS-locationing in such situations where is enough to locate to within hundred meters. The Study also proved that in nowadays positioning using LoRa-network in Finland can achieved only in parts of the country, because LoRa-gateways are too sparsely relocated

for positioning purpose.

**Keywords:** LoRa, LPWAN, outdoor positioning

Copyright © 2020 Teijo Lappi

All rights reserved.

## Sanasto

AOA	Angle of Arrival
BSS	Basic Service Sets
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ESS	Extended Service Sets
FFD	Full Function Device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MAC	Medium Access Control
NB-IoT	Narrow Band Internet of Things
OTAA	Over-the-Air Activation
RFD	Reduced Function Device
RSS	Received Signal Strength
SF	Spreading Factor
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
UNB	Ultra Narrow Band
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

# Sisältö

<b>Sanasto</b>	<b>i</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
1.1 Tutkimuksen tavoitteet . . . . .	1
1.2 LoRa-paikannuksen hyödyt ja mahdolliset käyttökohteet . . . . .	2
<b>2 Paikannus sensoriverkoissa</b>	<b>4</b>
2.1 Satelliittipaikannusjärjestelmät . . . . .	4
2.2 Paikannus langattomissa verkoissa . . . . .	5
2.2.1 Paikannuksen määrittely . . . . .	5
2.2.2 Paikannuksen kriteerien arviointi . . . . .	6
2.2.3 Etäisyyden mittaaminen paikannuksessa . . . . .	8
2.2.4 Paikannusalgoritmien jaottelu . . . . .	10
2.2.5 Paikantamisen tarkkuuden arviointi . . . . .	10
2.3 Sensoriverkkopaikannus . . . . .	11
<b>3 Vähän virtaa kuluttavat langattomat verkot</b>	<b>13</b>
3.1 Lyhyen ja pitkän kantaman verkkojen erot . . . . .	13
3.2 Lyhyen kantaman langattomat verkot . . . . .	14
3.2.1 WLAN . . . . .	14
3.2.2 802.15.4 ja ZigBee . . . . .	16
3.2.3 Bluetooth . . . . .	17
3.2.4 Yhteenveto lyhyen kantaman langattomista verkoista . . . . .	18
3.2.5 Paikantaminen lyhyen kantaman langattomissa verkoissa . . . . .	19
3.3 Pitkän kantaman langattomat verkot . . . . .	20
3.3.1 Sigfox . . . . .	20
3.3.2 NB-IoT . . . . .	21
3.3.3 LoRa . . . . .	22
3.3.4 Yhteenveto LPWAN- järjestelmistä . . . . .	23
3.4 Lyhyen ja pitkän kantaman verkkojen paikannuksen erot . . . . .	24

<b>4</b>	<b>LoRa</b>	<b>26</b>
4.1	LoRa- teknologia . . . . .	26
4.1.1	LoRaWAN . . . . .	27
4.1.2	LoRa-verkon rakenne . . . . .	28
4.1.3	LoRa-päätelaitteet . . . . .	29
4.1.4	Viestinvälitys . . . . .	30
4.1.5	Tietoturvallisuus . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Paikannus LoRa-verkossa</b>	<b>32</b>
5.1	LoRa-pohjainen paikannus . . . . .	32
5.2	LoRa-paikannuksen tarkkuus . . . . .	36
5.3	LoRa-paikannuksen aiemmat tutkimukset . . . . .	38
5.3.1	RSSI-pohjaiset tutkimukset . . . . .	39
5.3.2	TDOA-pohjaiset tutkimukset . . . . .	40
5.3.3	RSSI:n ja TDOA:n vertailu . . . . .	41
5.3.4	LoRa-paikannuksen ja Sigfox-paikannuksen vertailu . . . . .	42
5.3.5	Muut LoRa-paikannuksen tutkimuskohteet . . . . .	42
5.4	Yhteenveto LoRa-paikannuksesta . . . . .	44
<b>6</b>	<b>LoRa-paikannuksen testaaminen</b>	<b>46</b>
6.1	LoRa-paikannuksen testausuunitelma . . . . .	46
6.1.1	Tutkimusmenetelmät . . . . .	47
6.1.2	Laitteisto . . . . .	51
6.1.3	Mittausympäristö . . . . .	51
6.2	LoRa-paikannuksen toteutus . . . . .	55
6.3	Mittaustulokset . . . . .	57
6.3.1	Pohdintoja mittaustuloksista . . . . .	58
6.3.2	Analyysi LoRaWAN-paikannuksen virheistä . . . . .	63
6.3.3	Analyysi LoRaWAN-paikannuksen käyttökelpoisuudesta . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>68</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>70</b>
	<b>Liitteet</b>	

# 1 Johdanto

Kun mietitään mahdollisia teknologioita kohteen paikantamista varten, ensimmäisenä tulee mieleen satelliittipaikannus ja eritoten GPS. Kohde saadaan yleensä suhteellisen tarkasti paikannettua GPS-paikantimen ja satelliittien avulla. GPS:ää käytetään niin paikallaan olevien kuin liikkuvien kohteiden löytämiseen, oli sitten kyseessä staattinen tukiasema tai metsässä juoksenteleva metsästyskoira GPS-pantoiheen. Vaikka GPS-teknologia on testattu ja hyväksi havaittu paikannustekniikka, olisi myös vaihtoehtoisille paikannustekniikoille käyttöä. GPS-paikannin kuluttaa paljon virtaa ollessaan päällä, vaikkakin energiaa voidaan säästää pitämällä GPS pois päältä kun sitä ei tarvita. Lisäksi paikannettavaan laitteeseen joudutaan aina asentamaan oma GPS-paikannin, joka paitsi vie tilaa, lisää myös kustannuksia. Lisäksi GPS:llä on omat katvealueensa, joissa paikannus joko ei onnistu kuten sisätilat tai heikentää sen tarkkuutta kuten puusto tai korkeat rakennukset.

Erään vaihtoehdon GPS:lle tarjoaa pitkän kantaman langaton radiotekniikka LoRa. LoRa mahdollistaa paikannusmenetelmän, jossa ei tarvita erillisiä laitteita tai erillisiä paikannusviestejä päätelaitteen paikantamiseksi. Erillisen paikannuslaitteen sijasta päätelaitteen lähettämät tavalliset viestit ja niiden sisältämät metatiedot mahdollistavat laitteen jäljittämisen ja paikannuksesta vastaa viestit vastaanottava LoRa-verkko yhdyskäytävineen ja tietoja käsittelevä LoRa-palvelin.

## 1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän työn perimmäisenä tavoitteena oli selvittää onko LoRa-radion hyödyntäminen paikannuksessa järkevä vaihtoehto GPS-paikannukselle. Työssä selvitettiin paitsi minkälaisia etuja LoRa-paikannuksesta olisi GPS:ään verrattuna ja olisiko LoRa-paikannus riittävän tarkkaa, jotta siitä olisi käytännössä hyötyä. Lähtökohtaisesti LoRa-paikannusta ei verrattu GPS-tarkkuuteen, sillä oli jo alunalkaen tiedossa, että GPS olisi tässä ylivoimainen. Jos LoRa-paikannuksella päästäisiin alle 100 metrin paikannustarkkuuteen, riittäisi tämä oikein mainiosti.

Lisäksi tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää mitä LoRa-paikannuksesta tiedetään tällä hetkellä ja millaisia tutkimustuloksia siitä ollaan saatu. Koska LoRa-paikannus on suhteellisen tuore aihe, ei tutkimuksiakaan ole valtavaa määrää, joten oli mahdollista perehtyä kattavasti ennestään tehtyihin tutkimuksiin. Lisäksi oli tarkoitus laatia kattava katsaus tämän hetkisiin langattomien verkkojen teknologioihin ja erityisesti pitkän kantaman LPWAN-verkkoteknologioihin, johon LoRa lukeutuu. Samalla saataisiin hyvä kuva minkälaisiin sovelluksiin erilaisia langattomia teknologioita olisi mielekästä käyttää. Luonnollisesti perusteellisimman käsittelyn sai LoRa ja siihen liittyvä LoRaWAN-protokolla.

Lopuksi oli tarkoitus testata LoRa-paikannusta Keski-Pohjanmaan alueella Digitan verkossa heidän tarjoamillaan palveluilla käyttäen erilaisia mittaussuunnitelmia. Tällöin pystyttäisiin paitsi selvittämään paikannuksen tarkkuus, myös LoRa-paikannuksen käytännön toimivuus tutkimushetkellä. Keski-Pohjanmaalla suoritettujen mittausten lisäksi saatiin mittausdataa Turusta, jolloin voitiin tutkia paikannuksen tarkkuutta eri LoRa-verkkoympäristöissä.

## **1.2 LoRa-paikannuksen hyödyt ja mahdolliset käyttökohteet**

Mikäli LoRa-paikannuksen tarkkuus ja toimivuus osoittautuisivat riittävän hyviksi, löytyisi tälle paikannusratkaisulle helposti erilaisia käyttökohteita. LoRa-paikannus mahdollistaa edullisen ja ilman lisälaitteita toimivan paikannusratkaisun GPS:n vaihtoehdoksi. Tällöin pientä virrankulutusta vaativat laitteet voisivat paikantaa itsensä, kuten myös laitteet joiden hinta halutaan mahdollisimman alhaiseksi.

Paikannuslaitteina toimisivat LoRa-pohjaiset laitteet, jotka hyötyisivät omasta paikkatiedostaan ja joiden ei tällöin tarvitsisi tehdä erillistä paikannusviestintää tai toimintoa, vaan paikannus suoritettaisiin normaalien LoRa-viestien metatietojen perusteella. Tällöin paitsi noodit saataisiin halvemmiksi ilman erillistä GPS-paikanninta, myös säästäisivät virtaa koska erillistä virtaa kuluttavaa paikannustoimintoa ei tarvitsisi suorittaa.

Tämän lisäksi monet paikannettavat kohteet, joiden sijainti tarvitsi tietää ainoas-



taan suhteellisen tarkasti ja pienellä virrankulutuksella sopisivat LoRa-paikannuksen käyttökohteiksi. Tällaisia olisivat esimerkiksi suurissa satamissa tai teollisuusalueella olevat kontit. Jos puolestaan kaupunkiympäristössä tarvitsisi tietää halutun kohteen sijainnin, oli se sitten tietty paikka tai vaikkapa parkkeerattu auto, olisi LoRa-pohjainen paikannus mahdollinen toteutusratkaisu, mikäli tarvetta on tietää sijainti ainoastaan korttelin tarkkuudella.

## 2 Paikannus sensoriverkoissa

Tässä luvussa käydään läpi paikannuksessa käytettäviä menetelmiä ja tekniikoita. Paikannusmenetelmissä ja tekniikoissa keskitytään yksinomaan ulkotiloissa paikantamiseen. Ensiksi johdantokappaleessa käydään läpi GNSS-paikannus sekä miksi paikannusteknologiaa yleensä tarvitaan ja perustellaan, miksi GNSS-paikannuksen ohella on tarpeellista olla muitakin paikannusmenetelmiä. Tämän jälkeen käydään läpi muun muassa langattomissa verkoissa käytettäviä menetelmiä, joilla voidaan saada selville päätelaitteen sijainti, sekä kerrotaan paikannuksessa tarvittavista vaatimuksista ja paikannuksessa ilmenevistä virheistä. Lopuksi käydään läpi sensoriverkkopaikannus ja niissä käytetyt menetelmät.

### 2.1 Satelliittipaikannusjärjestelmät

Satelliittipaikannusjärjestelmät, yleisnimityksenä GNSS (Global Navigation Satellite System), hyödyntävät nimensä mukaisesti satelliitteja kohteen sijainnin paikantamiseen. GNSS-järjestelmistä käytetyin on epäilemättä GPS (Global Positioning System), joka käsittää 24 maapalloa kiertävää satelliittia lähettäen erikseen siviili- ja sotilaskäyttöön tarkoitettuja signaaleita (L1 ja L2)[39]. GNSS-vastaanotin kerää tietoja useammalta satelliitilta ja laskee niiden perusteella sijaintinsa. Satelliittipaikannus on parhaimmillaan ulkona avomaastossa, mielellään ainakin neljän satelliitin näkökentässä, joista ainakin kolmen satelliitin paikkatiedot ja yhden satelliitin aikaleiman pitäisi olla tiedossa[43]. GNSS-paikannuksen etuihin kuuluu paikannustarkkuuden lisäksi mahdollisuus palvella suurta määrää käyttäjiä samanaikaisesti sekä GNSS-signaalin häiriösietoisuus[39]. Ongelmaton GNSS-paikannus ei suinkaan ole, vaan esimerkiksi puusto, korkeat rakennelmat tai rotkot sekä elektromagneettiset häiriöt voivat haitata sijainnin määrittämistä. Paikannukseen liittyvien rajoitusten lisäksi GNSS-paikannuksen heikkouksiin kuuluu lisäksi GNSS-paikantimen koko, virrankulutus ja hinta[39]. Lisäksi GNSS-paikannus ei toteudu välittömästi, koska päätelaite lähtee laskemaan sijaintiaan "kylmiltään", mikä saattaa olla vakava ongelma kriittisissä tilanteissa.

## 2.2 Paikannus langattomissa verkoissa

Paikantaminen langattomissa verkoissa on hyvin oleellinen ominaisuus, sillä monet sovellukset tarvitsevat tietoa sijainnistaan, jonka lisäksi sitä tarvitaan esimerkiksi langattoman verkon reitittämisen optimoimiseksi[79]. Monet sovellukset kuten eläinten seurannan tarkkailu tai tavaroiden kuljetuksen logistiikka hyödyntävät paikantamista, jolloin esimerkiksi eläinten käyttäytymistä voidaan tutkia tai saada selville missä haluttu resurssi taikka tuote löytyvät[64]. GNSS-paikantimien käyttö on tällöin järkevää kiinteissä tukiasemissa jotka saavat energiansa verkkovirrasta, mutta paristo- tai akkukäyttöisten päätelaitteiden yhteydessä olisi mielekkäämpää käyttää vaihtoehtoisia paikannusmenetelmiä. Ensinnäkin GNSS-paikannin kuluttaa päällä ollessaan paljon virtaa, jolloin päätelaitteiden akkuja ja paristoja joudutaan vaihtamaan tiheämmällä välillä, vaikkakin virrankulutusta voidaankin säädellä pitämällä GNSS:ää päällä ainoastaan tarvittaessa. Toiseksi GNSS-paikannus vaatii toteutuakseen päätelaitteisiin erillisen GNSS-paikantimen, jonka vuoksi lopputuotteen hinnasta tulee kalliimpi. Kolmanneksi satelliittipaikannuksessa ongelmana ovat tietyt katvealueet kuten sisätilat ja korkeat rakennukset, jolloin tietyissä olosuhteissa GNSS-paikannusta ei ole edes mahdollista käyttää. Täten olisi ideaaleinta, että paikannus voitaisiin toteuttaa siten, että päätelaitteisiin ei tarvitsisi tehdä virrankulutusta tai hintaa lisääviä muutoksia.

### 2.2.1 Paikannuksen määrittely

Paikannus voidaan määritellä joko etäisyysperustaiseksi tai läheisyysperustaiseksi. Etäisyyteen perustuva paikannus voi perustua puolestaan joko tarkkaan sijaintiin, erilaisten menetelmien avulla suoritettavaan etäisyyden arviointiin tai paikannettavan kohteen suunnan arviointiin[83]. Tarkka sijainti saadaan joko GPS-paikantamalla tai tarkkojen maamerkkien perusteella. Etäisyyteen perustuvat menetelmät pyrkivät laskemaan etäisyytensä referenssinoodiin esimerkiksi signaalin voimakkuuden tai viestin lähetysaikojen perusteella. Ympäristön aiheuttamien häiriöiden ja signaalien heijastumien vuoksi etäisyyspohjaisilla menetelmillä ei saada aivan tarkkoja etäisyyksiä. Kulman laskevissa menetelmissä saadaan paikannettua noodin sijain-

nin kulma, joka voidaan yhdistää läheisyyttä mittaaviin tietoihin parantaen näin tarkkuutta. Haittapuolena kulmaa mittaavissa menetelmissä on ylimääräisen tekniikan tarve noodiin lisättävien antennien muodossa. Läheisyyteen perustuvat menetelmät aistivat kantamansa sisällä olevat noodit ja arvioivat niiden perusteella sijaintinsa laskematta etäisyyttä tarkemmin. Tällöin esimerkiksi kauempana sijaitsevien noodien etäisyydet arvioidaan esimerkiksi radiohyppyjen määrän perusteella. Läheisyyteen perustuvien menetelmien etuna on etäisyyttä laskeviin tekniikoihin verrattuna se, että erillisiä lisälaitteita ei tarvita paikantamiseen[63]. Menetelmän tarkkuus kasvaa mitä enemmän muita noodeja on sijaintiansa määrittelevän noodin alueella, mutta sijainti jää aina väistämättä epätarkaksi, mikä onkin läheisyysperustaisten menetelmien heikko kohta. Lisäksi esteet voivat aiheuttaa etäisyyden arvioissa isoja heittoja todellisiin sijaintiin nähden[26].

### 2.2.2 Paikannuksen kriteerien arviointi

Paikannukseen vaadittuja kriteereitä tulee tarkastella huolella paristakin syystä[65]. Ensimmäinen uusien paikannusalgoritmeja suunnitellessa vaatimuksia tulee tarkastella olemassa oleviin tekniikoihin verrattuna. Toiseksi eri sovelluskohteiden paikannuksessa haasteet ovat toisistaan poikkeavia, jolloin toiset vaatimukset ovat tapauksesta riippuen kriittisempiä kuin toiset. Vaatimukset voivat olla joko kaikille paikannustekniikoille yhteisiä kuten paikannustarkkuus tai ominaisuuksina joita joko on tai ei ole, kuten onko paikannusmenetelmä etäisyysriippuvainen tai ei. Seuraavaksi esitellään joitakin tärkeimpiä paikannuksen vaatimuksia.

Mittaustarkkuus kuvaa sitä kuinka hyvin paikannusmenetelmän mittaustulos vastaa todellista sijaintia[65]. Vaikka tarkkuus onkin paikannuksessa aina hyve, on riittävä tarkkuus aina suhteellista. Esimerkiksi 100 metrin tarkkuus mittauksessa voi kuulostaa epätarkalta, mutta jos tarkkailtava alue on kilometrien tai jopa kymmenien kilometrien luokkaa, on tarkkuus täysin hyväksyttävää, kun taas sadan metrin kokoluokassa kymmenien metrien tarkkuus ei enää ole hyväksyttävää. Tämän lisäksi esimerkiksi sensoriverkkojen kaltaisissa järjestelmissä yksittäisen noodin virheellinen paikannustieto on haitallinen siinäkin mielessä, että se vaikuttaa myös muun verkon paikannustarkkuuteen, kun noodit välittävät virheellistä tietoa sijainnistaan[23].

Kattavuus kuvaa puolestaan kuinka hyvin paikannusmenetelmä onnistuu paikantamaan kaikki verkossaan olevat laitteet[65]. Harvaan aseteltujen ja tiheään aseteltujen noodien aiheuttamat haasteet eroavat toisistaan merkittävästi. Mikäli noodeja on alueella harvakseltaan, voi niiden paikantaminen tarkasti olla haastavaa, sillä verrokkipisteinä olevia noodeja tai ankkurinoodia ei ole lähistöllä, jolloin paikannus saattaa jäädä tarkkuuden osalta puutteelliseksi. Tiheässä olevien noodien ongelma on puolestaan runsas viestiliikenne, jolloin lähetetyt paketit saattavat hukkaa törmäysten vuoksi. Lisäksi tiheämmässä verkossa noodien virrankulutus kasvaa viestiliikenteen kasvun vuoksi, mikä pitää myös huomioida paikannuksessa.

Koordinaatistoon liittyvä vaatimus määrittää puolestaan, onko käytetyn verkon koordinaatit globaaleja vai lokaaleja[26]. Koordinaattien ennalta asettaminen saattaa olla työlästä ja tietyissä tilanteissa jopa mahdotonta toteuttaa. Tällöin koordinaatit tulee määrittää jollain muulla tavalla ja käytännössä tämä tarkoittaa ankkurinoo-deja ja näiden tarjoamaa paikannusinformaatiota. Mikäli käytetään globaaleja koordinaatteja, tarvitaan verkossa ankkurinoo-deja, joissa on joko GPS-paikannin tai ennalta asetetut koordinaatit. Ankkurinoo-deja käyttämällä sijainti voidaan saada varsin tarkasti selville, mutta tarkkuus riippuu tällöin ankkurinoodien määrän perusteella[23]. Myös lokaaleja koordinaatteja käytettäessä tarvitaan ankkurinoo-deja, sillä paikannettava kohde määrittelee sijaintinsa suhteessa ankkurinoodien sijaintiin, vaikka sijaintia ei tarvitsisikaan tietää globaalisti. Lokaalia koordinaatistoa käytettäessä ei käytetä lainkaan globaalia koordinaatistoa, vaan käytetty koordinaatisto on ainoastaan paikallinen.

Kustannusvaatimuksilla tarkoitetaan paitsi paikantamisen rahallisia kustannuksia, niin myös energiankulutusta, laskentatehokkuutta ja paikantamisen nopeutta[65]. Paikantamisen alhaiset kustannukset ovat yleensä pois mittaustarkkuudesta, jolloin joudutaan tapauskohtaisesti miettimään näiden kahden suhdetta. Paikantamisen nopeus on puolestaan tärkeää liikkuvien kohteiden paikannuksessa, jolloin usein joudutaan tekemään kompromisseja tarkkuuden suhteen. Laitteet joissa käytetään paikannusta saattavat sijaita sellaisissa paikoissa, että verkkovirran saanti ei ole mahdollista, jolloin joudutaan käyttämään paristoja. Paristoja tai akkuja käytettäessä virrankulutus on kriittinen ominaisuus, jolloin tarkkuudesta joudutaan karsimaan myöskin. Mikäli paikannusmenetelmä hyödyntää GPS:ää, niin väistämättä sekä järjestelmän hinta että virrankulutus kasvavat.

Verkkojen eri topologiat vaikuttavat myös paljon eri paikannusmenetelmien tarkkuuteen[65]. Säännöllisten topologioiden tapauksissa noodit ja ankkurinoodit ovat tasaisin, ennalta määritellyin välein, jolloin etäisyydet on helppo määrittää. Tällöin esimerkiksi radiohyppymenetelmät ovat kohtuullisen tarkkoja, koska oletusarvoinen hypyn pituus eli kahden noodin väli vastaa hyvin todellisuutta. Useimmiten verkot ovat kuitenkin epäsäännöllisesti määriteltyjä, sillä ympäristö asettaa vaatimuksensa noodien sijoittelulle. Tällöin robustimmat paikannusmenetelmät saavat aikaiseksi parempia tuloksia.

### 2.2.3 Etäisyyden mittaaminen paikannuksessa

Seuraavaksi käydään tarkemmin läpi etäisyyden laskemiseen käytettäviä menetelmiä. Etäisyyttä mittaavia menetelmiä ovat muun muuassa RSS, TOA ja TDOA[65]. Tämän lisäksi paikantamisessa voidaan hyödyntää suuntaa mittaavaa menetelmää eli AOA:ta ja RSS-profilointia, jossa muodostetaan alueelta mitatuista RSSI-arvoista kartta, jonka perusteella voidaan paikantaa kohde[65]. Tässä alaluvussa käydään läpi etäisyys- ja suuntapohjaiset mittausmenetelmät, RSS-profiloinnista puolestaan kerrotaan lisää fingerprint-algoritmin yhteydessä alaluvussa 5.1.

Vastaanotetun signaalin vahvuuden mittaamisessa (RSS, Received Signal Strength) verrataan toiselta noodilta saadun signaalin voimakkuutta ja lasketaan paljonko etäisyys ja ympäristöolosuhteet vaimentavat sitä, jonka perusteella saadaan arvio päätelaitteen etäisyydestä[44]. RSS-mittaus toteutetaan noodin RSSI-piirin vastaanottaman signaalin voimakkuuden perusteella[64]. Signaalin voimakkuuden perusteella voidaan laskea etäisyys toiseen noodiin. Signaalin voimakkuuden mittamisen etu on siinä, että se ei tarvitse päätelaitteiden välistä synkronointia[44] ja lisäksi signaalin voimakkuuden mittaaminen kuuluu noodien tehtävään muutenkin [64], jolloin mitään ylimääräistä ei tarvitse asentaa laitteisiin, tehden menetelmäs- tä kustannustehokkaan ja helposti toteutettavan. RSS-arvo on valitettavasti varsin epätarkka, sillä ympäristöolosuhteet saattavat vaihdella suuresti ja sitä myöden niiden vaikutuksen arvioiminen signaalin voimakkuuteen on hankalaa[58]. Häiriöiden aiheuttamien kerrannaisvaikutusten vuoksi RSS-menetelmä on parhaimmillaan silloin, kun noodeja on verkossa tiheästi.

Taulukko 2.1: Paikantamismenetelmien vertailu Alrajeh et al mukaan[23]

	Tarkkuus	Energiätehoisuus	Kustannukset	Komponenttien koko
RSSI	Keskitaso	Korkea	Alhainen	Pieni
TOA	Keskitaso	Alhainen	Korkea	Suuri
TDOA	Korkea	Korkea	Alhainen	Saattaa olla suuri
AOA	Alhainen	Keskitaso	Korkea	Suuri
GPS	Korkea	Alhainen	Korkea	Suuri

Lähetukseen kuluvan ajan mittauksessa (TOA, Time of Arrival, tai TOF, Time of Flight) lasketaan kahden päälaitteen välillä tapahtuvan lähetyksen ja vastaanottamisen välillä kuluva aika ja lasketaan sen perusteella laitteiden välimatka toisistaan[74][35]. TOA voidaan toteuttaa myös siten, että vastaanottava noodi lähettää viestin takaisin lähettäjälle heti vastaanottamisen jälkeen[64]. TOA-menetelmä edellyttää verkon laitteiden kellojen synkronointia, jotta mitattu aika olisi mahdollisimman todenmukainen. TOA on kuitenkin altis niin ympäristön aiheuttamille häiriöille kuin monitie-etenemiselle, jolloin etäisyyden arvioihin tulee virheitä[64]. Lähetysaikojen eron mittauksessa (TDOA, Time Difference of Arrival) puolestaan vertaillaan kahden tai useamman päätelaitteen lähettämää viestiä vastaanottajalle ja näiden lähetysaikojen välisten erojen perusteella voidaan määrittellä lähettäjän ja vastaanottajan välinen etäisyys[51]. TDOA-menetelmän etuna on se, että ainoastaan viestin lähettävien päätelaitteiden kellojen tulee olla synkronoituja, kun taas lähettäjän ja vastaanottajan kellojen ei tarvitse olla synkronoituja.

AOA (Angle of Arrival) eli saapumiskulma hyödyntää vastaanotetun signaalin suuntaa[64]. Tällöin noodissa on kaksi antennia, joiden osoittama suunta on noodin tiedossa. Näiden kahden antennin tai mikrofonin etäisyys noodin keskipisteestä on tiedossa, jolloin signaalin suunta saadaan täten selville kahden antennin vastaanottaman signaalin erojen perusteella. Vaihtoehtoisesti voidaan verrata kahden RSS-arvoa mittaavan antennin arvoja keskenään. Mikäli noodissa ei ole kahta antennia valmiiksi, ne joudutaan hankkimaan, mikä lisää kustannuksia. AOA on samoin kuin TOA:kin altis ympäristön häiriöille ja monitie-etenemiselle.

#### 2.2.4 Paikannusalgoritmien jaottelu

Paikannuksen laskevat algoritmit jaetaan kahteen ryhmään, riippuen missä paikannuksen laskenta suoritetaan, jolloin puhutaan joko keskitetystä tai hajautetusta algoritmista[75]. Keskitetyissä algoritmeissa laskenta suoritetaan keskitetysti yhdessä paikassa noodien keräämien mittaustietojen perusteella. Hyvänä puolena keskitetyissä algoritmeissa on, että jokaisen noodin ei tarvitse erikseen suorittaa laskentaa. Kääntöpuolena mittaustietojen lähettäminen erilliselle taholle aiheuttaa latenssiajan ja virrankulutuksen kasvua. Keskitetyt menetelmät toimivatkin parhaiten pienemmissä verkoissa. Hajautetuissa algoritmeissa puolestaan noodit suorittavat laskennan itsenäisesti. Hajautetut algoritmit voidaan jakaa etäisyyden mittauksen perusteella joko etäisyydestä vapaisiin tai etäisyysperusteisiin algoritmeihin. Etäisyydestä vapaat algoritmit käyttävät läheisyyteen perustuvia menetelmiä, eivätkä laske tarkkaa etäisyyttä. Etäisyysperusteiset algoritmit puolestaan hyödyntävät tarkkaan etäisyyden mittaamiseen tähtäviä menetelmiä. Hajautetun ja keskitetyn algoritmin soveltuvuus liittyy usein verkon kokoon ja rakenteeseen[65]. Hajautetut algoritmit ovat sopivampia suuriin verkkoihin ja ovat energiatehokkaampia keskitettyihin algoritmeihin verrattuna. Toisaalta keskitetyt algoritmit ovat sopivampia ympäristöihin, joissa noodien laskentateho on rajoitettu virransäästöystistä, jonka lisäksi ne ovat suuremmassakin mittakaavassa helpompia suunnitella kuin hajautettujen algoritmien verkot johtuen yhtenäistetystä laskentamallista.

#### 2.2.5 Paikantamisen tarkkuuden arviointi

Paikantamisen virheet voidaan jaotella kolmeen ryhmään, joita ovat aikariippuvaiset virheet, ympäristöriippuvaiset virheet ja geometriasta johtuvat virheet[64][52]. Aikariippuvaiset virheet johtuvat satunnaisista häiriöistä joita tulee radiosignaaliin, kuten esimerkiksi satunnainen häiriösignaali. Tällaisten häiriöiden vaikutusta voidaan minimoida tekemällä useita mittauksia, jolloin yksittäiset häiriöt eivät aiheuta suurempia virheitä etäisyysmittauksiin. Ympäristöriippuvaiset häiriöt johtuvat puolestaan fyysisistä esteistä kuten puista ja rakennuksista. Ympäristöriippuvaiset häiriöt voidaan huomioida useimmiten pysyvinä häiriöinä, ainakin mikäli nodi tai este ei vaihda paikkaansa. Ympäristö saattaa toisinaan muuttua ennalta arvaamattomasti, joten ympäristöriippuvaisten häiriöiden pysyvyyteen ei kannata luottaa sokeasti. Virheiden arvioimista hankaloittaa se, että virhe saattaa ilmetä ainoastaan



yhdessä linkissä tai sitten useammassa. Näistä useampaan linkkiin ilmenevien virheiden analysointi on huomattavasti hankalampaa, jolloin suositetaan usein itsenäisysolettamusta (Independence Assumption), jonka mukaan yksittäisen linkin mittausvirheistä ei voida päätellä vaikuttaako se muiden linkkien virheisiin[64]. Geometriset virheet johtuvat noodien ja tukiasemien sijoittumisesta toisiinsa nähden aiheuttaen paikannusvirhettä. Eräs tällainen virhe aiheutuu kun tukiasemat ovat noodiin nähden kolineaarisia tai lähes kolineaarisia, jolloin noodin sijaintia ei voida määrittää[52]. Tämän vuoksi sijainnin määrittämiseksi täytyy olla vähintään kolme tukiasemaa, jotka eivät ole kolineaarisia.

Merkittävä etäisyyden arviointia haittaava häiriötekijä on signaalin monitie-eteneminen[64]. Monitie-etenemisessä puolestaan lähetetty signaali kulkee esteiden aiheuttamana eri mittaisen reitin, jolloin perille saapuu signaaleja eri aikoihin aiheuttaen mittausvirhettä. Aikaisin saapuvat signaalit hankaloittavat suoraan saapuneen signaalin löytämistä ja myöhään saapunut monitie-eteneminen saattaa heikentää vakavasti suoraan saapunutta signaalia. Signaalin vastaanottimen on tällöin valittava ensimmäinen signaalin huippu, sillä vahvin huippuarvo ei välttämättä ole lyhintä reittiä kulkenut signaali edellä mainituista syistä johtuen. Lisäksi mittaustarkkuuteen vaikuttaa signaalin teho ja taajuus, tehon vaikuttaessa kantomatkaan ja taajuuden puolestaan signaalin kulkemiseen esteiden läpi[20]. Ympäristön aiheuttamien tahattomien häiriöiden lisäksi laitteet ovat myös alttiita ihmisen aiheuttamalle tahalliseksi signaalin häirinnälle[20].

Ulkoisten häiriöiden lisäksi myös noodien omat komponentit aiheuttavat mittausvirhettä, sillä sekä lähettimen että vastaanottimen laitteistoissa ja ohjelmistossa ilmenee jonkin verran viivettä[64]. Vaikka laitteiden viiveet olisivat tiedossa valmistajan ilmoittamina, ilmenee jokaisessa yksittäisessä valmistetussa laitteessa pieniä eroja näiden suhteen, sillä jokainen laite on aina hieman erilainen.

### **2.3 Sensoriverkkopaikannus**

Sensoriverkoissa noodien paikantaminen on useissa sovelluksissa olennainen ominaisuus, puhuttiinpa sitten kohteiden sijainnin jäljittämisestä (esim. kuljetettava tavara) tai hankalasti päästäville alueille sijoitelluista laitteista[65]. Erilaisten käyttötarkoitusten ja toimintaympäristöjen vuoksi sensoriverkoissa hyödynnetään ta-

pauksesta riippuen hyvinkin erilaisia metodeja. Muuttujia ovat esimerkiksi ankkurinoodien määrä, ovatko noodit ja ankkurinoodit paikallaan pysyviä vai liikkuvia sekä kuinka tiheään noodeja on sijoiteltu. Verkon tiheydestä, laajuudesta ja noodien määrästä riippuen käytetään joko keskitettyä tai hajautettua paikannuksen laskentaa. Kaikissa tapauksissa tarkkaa globaalia paikannusta ei ole tarpeellista käyttää, jolloin noodien tulee tietää ainoastaan suhteelliset sijaintinsa. Rajaavimpia tekijöitä sensoriverkkopaikannukseen ovat lähinnä langattomuus, edullisuus ja pieni virrankulutus[49].

Sensoriverkoissa paikantaminen voidaan toteuttaa joko siten, että jokainen verkon noodit tietää sijaintinsa tai että verkossa on joitakin laitteita, jotka tietävät sijaintinsa, jolloin muut laitteet voivat paikantaa itsensä näiden perusteella[72]. Laitteen sijainnin paikantaminen voidaan toteuttaa joko sijoittamalla noodit pysyvästi tiettyihin paikkoihin, jolloin niiden sijainti on aina tiedossa tai varustamalla noodit GNSS-paikantimilla[72]. Pysyvästi sijoitettujen noodien lisäksi tarvitaan kuitenkin myös liikkuvia noodeja, joten näihin ei voida soveltaa pysyvän sijainnin perusteella paikantamista. Mikäli kiinteästi sijoitetuilla ankkurinooodeilla ei voida kattaa koko mitattavaa aluetta, voidaan hyödyntää esimerkiksi eläinten tai robottien mukana kulkevia liikkuvia ankkurinooodeja, mutta nämä ovat puolestaan kalliita ja hankalia toteuttaa[49]. GNSS-paikantimien ongelma sensoriverkkopaikannuksessa on puolestaan korkea virrankulutus. Tällöin on järkevämpi hyödyntää paikannusta ainoastaan osassa verkon laitteissa, jolloin ne toimivat majakan (Beacon) tyyliin kiintopisteinä muille laitteille[49]. GNSS-paikantimien kaltaista tarkkuuttakaan ei aina tarvita, jolloin karkeampikin paikannustarkkuus riittää[59]. Eräs esimerkki ZigBee-verkkojen paikannusmenetelmistä on noodien välisten linkkien laadukkuutta mittaavan LQI-arvon (Link Quality Indication) hyödyntäminen etäisyyden mittaamisessa[49]. LQI arvo voidaan muuntaa etäisyyden laskennassa käytettäväksi signaalin voimakkuutta mittaavaksi RSSI-arvoksi ja täten saada selville noodien välinen etäisyys ilman ylimääräisiä laitteita. Menetelmä on halpa ja laitteiden virtaa säästävä, mutta ei kovin tarkka. Myös noodien välistä suunnan laskemiseen (AOA) sekä signaalien vastaanottoaikojen erojen mittaamiseen perustuvia (TDOA) paikannusalgoritmeja hyödynnetään sensoriverkkojen paikannuksessa.

## 3 Vähän virtaa kuluttavat langattomat verkot

Tässä kappaleessa käydään läpi erilaisia langattomia verkkoja sekä niiden eroavuuksia. Aluksi käydään läpi lyhyen kantaman langattomien verkkojen ja pitkän kantaman langattomien verkkojen eroavuuksia, jolloin lukijalle tulee selväksi, mihin tarkoitukseen kumpikin on tarpeellinen. Tämän jälkeen esitellään lyhyen kantaman langattomat verkkoteknologiat WLAN, 802.15.4 ja Bluetooth, jonka lisäksi esitellään sensoriverkkojen käyttämä ZigBee-standardi. Seuraava alaluku käsittelee tarkemmin pitkän kantaman langattoman verkon eli LPWANin määritelmää ja siinä käytettyjä teknologioita. Lopuksi käsitellään LPWAN-teknologioista lyhyesti Sigfoxia ja NB-IoT:ta ja vertaillaan näitä työssä käytettyyn LoRa-teknologiaan.

### 3.1 Lyhyen ja pitkän kantaman verkkojen erot

Lyhyen ja pitkän kantaman langattomien verkkojen erojen vuoksi niiden käyttötarkoitukset eroavat toisistaan merkittävästi. Langattomat verkot ovat pääsääntöisesti tehty vähän virtaa kuluttaviksi, pois lukien WLAN, joka tarjoaa lyhyen kantaman ja suuren virrankulutuksen vastapainoksi suurempaa tiedonsiirtokapasiteettia. Lyhyen ja pitkän kantaman vähän virtaa kuluttavien verkkojen oleellisin erottava tekijä on kantomatka: Alle tuhannen metrin kantaman laitteet ovat lyhyen kantaman langattomia verkkoja, kun taas yli tuhannen metrin kantaman verkot ovat pitkän kantaman langattomia verkkoja[25]. Toinen erottava tekijä on verkkotopologia. Lyhyen kantaman verkot voivat olla paitsi suoraan yhteydessä tiedonkeruupisteelle tähtitopologian malliin, mutta myös keskenään keskustelevien laitteiden mesh-topologialla järjestettyjä, jolloin verkko voi kattaa suurempiakin maantieteellisiä alueita. Pitkän kantaman verkot ovat puolestaan lähes täysin tähtitopologialla toteutettuja.

Koko ajan yleistyvässä esineiden internetissä (Internet of Things, lyh. IoT) laitteille tulee rajoituksia niin virrankulutuksen, muistin kuin laskentatehokkuuden suhteen, jolloin suorituskykyisemmät mutta virtaa kuluttavammat ja kantamaltaan lyhyemmät verkkoteknologiat kuten WLAN eivät tule kyseeseen[25]. WLAN:sta

onkin julkaistu hiljattain uusi versio IEEE 802.11ah, joka mahdollistaa käytön myös IoT- ympäristössä[27]. Lyhyen kantaman verkot kuten ZigBee ja Bluetooth ovat parhaimmillaan IoT-sovelluksissa maantieteellisesti pienellä alueella[50]. Varsinkin ZigBee/802.15.4 tarjoaa topologisesti joustavan ja vähän virtaa kuluttavan vaihtoehdon, jolloin paristokäyttöisillä laitteilla voidaan rakentaa tiheä keskenään kommunikoi- viden nooidien verkko, jossa paristoja ei tarvitse vaihtaa usein. Pitkän kantaman langattomat verkot kuten LoRa ja Sigfox eivät kykene tarjoamaan tietoliikenteen rajoituksistaan johtuen niin joustavaa palvelua tai vastaamaan tiheiden lähetyssajojen vaatimukseen yhtä hyvin kuin lyhyen kantaman verkot pystyvät. Vastaavasti pitkän matkan langattomat verkot voivat kattaa suuriakin alueita langattomasti vähäisellä virrankulutuksella[50]. Lyhyen kantaman verkot voivat laajentaa kantamaansa esimerkiksi reititinnoodeilla ja mesh-topologialla, mutta tällöinkin päätelaitteiden tai reititinnooidien tulee olla lyhyiden välimatkojen päässä toisistaan.

## **3.2 Lyhyen kantaman langattomat verkot**

Tässä osiossa käsitellään lyhyen kantaman langattomia verkkoja, eli verkkoja joiden kantama jää alle kilometriin. Ensiksi käsitellään langaton lähiverkko eli WLAN/Wi-Fi, jonka jälkeen langattomat sensoriverkot ja niissä käytetyt 802.15.4-standardi ja ZigBee-protokolla. Tämän jälkeen käsitellään Bluetooth-teknologia ja lopuksi vedetään yhteen näiden kolmen verkkoteknologian ominaisuuksia ja eroja.

### **3.2.1 WLAN**

Langaton lähiverkko eli WLAN (Wireless Local Area Network) on määritelty IEEE:n standardilla 802.11. WLAN-laitteiden standardoinnin ja yhteensopivuuden takaamiseksi on perustettu Wi-Fi-allianssi, jonka hyväksymät laitteet saavat käyttää allianssin käyttämää Wi-Fi-tavaramerkkiä[12]. Eri IEEE:n standardit määrittelevät WLAN:in fyysisen kerroksen ja MAC-kerroksen, joista MAC-kerros on samanlainen kaikissa WLAN-standardeissa[82]. Tiedonsiirrossa käytetään radiotien välitystekniikkana hajaspektritekniikkaa, joko taajuushyppelyä (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum) tai suorasekvenssitekniikkaa (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum). WLAN käyttää 2,4 GHz taajuutta, minkä lisäksi standardit 802.11a ja 802.11g hyödyntävät 5 GHz taajuutta. Kahden jälkimmäisen standardin tiedonsiir-

tonopeuden mahdollistaa niissä käytetty OFDM-modulaatiotekniikka. Tiedonsiirtonopeus vaihtelee 1 Mbit/s aina 54 Mbit/s asti. Kaikki WLAN-standardit hyödyntävät törmäyksiä välttelevää CSMA/CA-tekniikkaa, sillä langallisessa lähiverkossa eli LAN:ssa käytettyä törmäyksen tunnistusmenetelmää (CSMA/CD) ei ole mahdollista käyttää langattomassa verkossa langattomassa viestinnässä käytetyn half-duplex-tekniikan vuoksi, joka mahdollistaa ainoastaan joko viestin lähettämisen tai taajuuskaistan kuuntelemisen kerrallaan[2]. Koska langattomissa verkoissa on vain yhteinen taajuuskaista eikä samanlaista yhteistä väylää kuin kaapeleilla yhdistetyissä lähiverkoissa, jolloin kaikki verkon laitteet eivät havaitse toisiaan, mikä mahdollistaa sen, että useampi laite voi lähettää viestejä samaan kohteeseen toisistaan tietämättä samanaikaisesti aiheuttaen törmäyksen[18]. Törmäys voidaan tunnistaa ottamalla käyttöön RTS/CTS-viestintä (Request to Send/Clear to Send), jossa laite lähettää RTS-viestin kohteelle pyytäkseen lupaa lähettää viesti tälle ja saadessaan kohteelta CTS-viestin lähettää paketin kohteelle. Mikäli paketti saapuu perille, vastaanottaja lähettää ACK-viestin lähettäjälle varmistukseksi paketin saapumisesta. Mikäli ACK-viesti ei saavu ajoissa perille, lähetetään paketti uudestaan vastaanottajalle[18]. WLANin kattama käyttösäde voidaan määrittellä joko BSS:n (Basic Service Sets) tai ESS:n (Extended Service Sets) avulla[56]. BSS tarkoittaa yksittäisen tukiaseman kattamaa aluetta ja ESS puolestaan useamman tukiaseman kattamaa aluetta, jossa WLAN-laite voi kulkea yhteyden katkeamatta. Ollessaan useamman kuin yhden tukiaseman alueella, WLAN-laite valitsee tukiaseman joko RSSI-arvon (Received Signal Strength Identifier) tai SINR-arvon (Signal to Interference and Noise Ratio) perusteella.

Jotta WLAN-tekniikkaa voitaisiin hyödyntää myös IoT-sovelluksissa on WLAN:sta kehitetty versio IEEE 802.11ah, jossa on kehitetty kantamaa, virrankulutusta ja IoT-laitteiden tukea[27]. 802.11ah hyödyntää vähemmän käytettyä alle gigahertsin taajuutta, jossa on vähemmän liikennettä kuin WLAN:in normaalisti käyttämällä 2,4 GHz taajuudella. Virrankulutusta on pienennetty optimoimalla lähetettävän paketin kokoa sekä ottamalla käyttöön toimintoja kuten implisiittisten ACK-viestien käyttö, jossa ACK-kehityksiä ei tarvita kaikissa tilanteissa. Suurempien laitteiden määrän tukea varten on kehitetty kanavallepääsymekanismi RAW (Restricted Access Window), jolla pystytään jakamaan asemat erilaisiin ryhmiin ja sallimalla vain tietyn ryhmän käyttää kanavaa tietyinä ajanhetkenä, mikä vähentää törmäysten määrää verkossa.

### 3.2.2 802.15.4 ja ZigBee

WSN (Wireless Sensor Networks) eli langattomat sensoriverkot koostuvat noodeiksi kutsutuista laitteista, jotka keräävät ympäristöstä dataa sensoreiden avulla ja kommunikoivat langattomasti keskenään muiden samaan verkkoon kuuluvien nooidien kanssa[29]. Kerättyään datan noodit lähettävät tietonsa joko suoraan tai muiden nooidien välityksellä tiedonkeruupisteelle eli sinkille, josta data lähetetään yhdyskäytävän kautta ulkopuoliseen verkkoon kuten internetiin. Noodit voivat olla joko yksinkertaisempia, ainoastaan tietoa kerääviä ja sitä eteenpäin lähettäviä RFD-laitteita (Reduced Function Device) tai reitittämiseen kykeneviä älykkäämpiä FFD-laitteita (Full Function Device). Sensoriverkoissa käytetään topologiaa usein joko tähtitopologiaa, mesh-topologiaa tai näiden yhdistelmää. Tähtitopologiassa jokainen noodi on suoraan kytköksissä tiedonkeruupisteelle, jolloin sen ei tarvitse kommunikoida muiden nooidien kanssa. Etuina tässä on alhainen virrankulutus ja yksinkertainen rakenne, toisaalta tähtimallinen verkko ei ole kovinkaan skaalautuva. Mesh-verkossa noodit voivat keskustella ja välittää dataa keskenänsä, mikä edellyttää FFD-laitteiden käyttöä. Tämän topologian etuna on verkon joustavuus, jolloin noodeja voi tulla lisää ja poistua ilman suuria järjestelyjä ja sensoriverkko voi kattaa suuriakin alueita. Mesh-verkko on toisaalta monimutkaisempi ja virran säästäminen on haastavampaa, sillä nooidien täytyy olla useammin hereillä muiden nooidien viestien reitittämistä varten. Sensoriverkkojen nooidien erityispiirteisiin kuuluu virrankulutuksen minimointi, koska noodit ovat useimmiten paristokäyttöisiä laitteita ja näiden tulisi olla toiminnassa mahdollisimman pitkään ilman paristonvaihtoja. Virrankäytön minimointi onnistuu minimoimalla radion käyttö ja pitämällä noodi mahdollisimman pitkään virtaa säästävässä lepotilassa.

Sensoriverkkosovelluksiin käytetty IEEE 802.15.4-standardi eli WPAN-tekniikka (Wireless Personal Area Network) määrittelee ainoastaan fyysisen kerroksen ja MAC-kerroksen, mutta ei ylempiä kerroksia. Tähän löytyy ratkaisuna ZigBee, joka on ZigBee-allianssin kehittänyt protokolla verkkokerroksen ja sovelluskerroksen määrittämiseen WPAN-laitteille[81]. Tämän lisäksi sensoriverkoissa voidaan käyttää käyttöjärjestelmiä jotka sopivat rajallisen muistin ja pienen virrankulutuksen käyttötarpeisiin. Esimerkkejä käytössä olevista käyttöjärjestelmistä ovat muun muassa Contiki ja TinyOS[78]. 802.15.4-standardin käyttämät taajuudet ovat 868 MHz,

915 MHz ja 2,4 GHz ja niiden tiedonsiirtonopeus vaihtelee 20kb/s (868 MHz) aina 250kb/s (2,4 GHz) ja kantama aina kilometristä (868 MHz) 200 metriin (2,4 GHz)[29]. ZigBee hyödyntää samaa lisensoimatonta ISM-kaistaa kuin Bluetooth ja Wi-Fi, mikä vuoksi näiden samanaikainen käyttö saattaa aiheuttaa häiriöitä toisilleen. Häiriöiden estämiseksi eräs ratkaisu on käyttää RTS- ja CTS-viestejä estämään Bluetooth- ja WLAN-laitteiden pääsy samalle kanavalle tarpeeksi pitkäksi aikaa[33]. Langattomia sensoriverkkoja hyödynnetään pienen virrankulutuksen ja edullisuutensa vuoksi tiedonkeruun lisäksi mm. kodin automaatiosovelluksissa ja terveydenhuollon piirissä.

### 3.2.3 Bluetooth

Bluetooth on avoin lyhyen matkan langaton verkko, joka suunniteltiin korvaamaan kiinteät johdot eri laitteiden välillä, sovelluskohteiden ollessa mm. kannettavat tietokoneet, matkapuhelimet ja kuulokkeet[25]. Haastaakseen sensoriverkkotekniikat kuten ZigBee IoT-sovelluksissa Bluetooth on julkaissut Bluetooth Low Energy (LE)-laajennuksen pientä virrankulutusta vaativia IoT-laitteita varten[71]. Bluetooth LE:n protokollapino koostuu samoin kuin normaali Bluetooth kahdesta erillisestä osasta, jotka usein sijaitsevat erillisillä siruilla: Kontrollerista (Controller), joka sisältää fyysisen kerroksen ja linkkikerroksen sekä isännästä (Host), joka huolehtii protokollapinon ylemmistä kerroksista. BLE käyttää usein käytettyä 2,4 GHz taajuutta, mutta estääkseen törmäykset muiden laitteiden kanssa se hyödyntää adaptiivista taajuushyppelyä (Adaptive Frequency Hopping, AFH). BLE käyttää kahdentyyppisiä RF-kanavia, joista datakanavia (Data Channel) se käyttää kommunikointiin ja tiedonsiirtoon laitteiden välillä sekä markkinointikanavia (Advertising Channel) muun muassa laitteiden havainnointiin ja yhteyksien ylläpitämiseen. BLE-laitteet voidaan jakaa neljään eri rooliin, joista kaksi eli Broadcast ja Observe ovat käytössä markkinointikanavilla lähettämässä ja vastaanottamisessa, kun taas kaksi muuta, Central ja Peripheral ovat käytössä datakanavilla ja näistä Central- roolissa oleva määrittää yhteyden luonnin ja hallinnan toisen ollessa alisteisessa asemassa.

Bluetooth 5 paransi teknologian mahdollisuuksia toimia IoT-ympäristössä tehden useita parannuksia LE-versioon[37]. Ensinnäkin maksimaalinen tiedonsiirtonopeus kasvoi 2 Mb/s, mutta sen lisäksi tiedonsiirron kantomatkaa kyettiin kasvattamaan erityisesti uuden Bluetooth 5 Coded- yhteyden avulla. Coded- yhteydessä lai-

Taulukko 3.1: Lyhyen kantaman langattomien verkkojen vertailu

	802.11ah[27]	Bluetooth 5 LE[37]	802.15.4/ Zig- Bee 868 MHz [34]	802.15.4/ ZigBee 2,4 GHz[34]
Taajuus	900 MHz	2,4-2,4835 GHz	868 MHz	2,4 GHz
Kaistanleveys	22 MHz	1 MHz	0,6 MHz	5 MHz
Modulointi	BPSK, QPSK	GFSK	BPSK,O- QPSK,ASQ[73]	O-QPSK[73]
Kantomatka	alle 1,5 km	200 m	1 km[29]	220 m[29]
Salaus	WEP/AES	AES-CCM	AES	AES
Tiedosiirto- nopeus	150Kb/s- 346Mb/s	125Kb/s, 500Kb/s, 2Mb/s	20Kb/s	250Kb/s
Payloadin ko- ko	2312 tavua	255 tavua	102 tavua	102 tavua

te käyttää joko 125 Kb/s tai 500 Kb/s tiedonsiirtonopeutta, jolloin kantomatka voi olla maksimissaan 200 metriä ulkona ja 40 metriä sisätiloissa. Vaikka monissa IoT-sovelluksissa nopeus on toissijainen asia, on nopeammasta tiedonsiirrosta hyötyä esimerkiksi stream-palveluissa ja päivitysten lähettämisessä. Vaikka kantomatkaa ja nopeutta on lisätty, on Bluetooth 5 aikaisempiin versioihin verrattuna myös vähemmän virtaa kuluttavampi edistyneen signaalinmoduloinnin ja taajuuskaistan hyödyntämisen vuoksi. Virransäätöluokat vaikuttavat erilaiset virransäätöluokat joita on Coded-yhteydessä neljä erilaista: 1,1.5,2 ja 3 joissa lähetysteho vaihtelee luokan 1 maksimilähetystehosta +20dBm aina luokan 3 minimilähetystehoon -20dBm[37]. Bluetooth 5:n mukana myös broadcast-lähetysten ominaisuuksia on paranneltu sekä hiljattain lisätty tuki aikaisemmin bluetoothista puuttuneelle mesh-topologialle.

### 3.2.4 Yhteenveto lyhyen kantaman langattomista verkoista

Taulukosta 3.1 voidaan nähdä vertailu lyhyen kantaman langattomien verkkojen ominaisuuksista. Lyhyen kantaman langattomista verkoista 802.11ah tarjoaa runsaasti eri tietotekniikan laitteissa käytetyn ja hyväksi havaitun tekniikan IoT-soveluksiin[27]. Toisaalta 802.15.4/ZigBee on runsaasti käytetty sensoriverkoissa ja on



virrankulutuseltaan ja käyttöönoton helppoudessa houkutteleva vaihtoehto[27]. Bluetooth LE tarjoaa yhtä lailla lyhyen kantaman tiedonsiirtoa pienellä virrankulutuksella, minkä lisäksi tulevaisuudessa kaavailut laajennokset tekniikkaan voivat tuoda uusia etuja, kuten alle gigahertsin taajuuksien hyödyntämisen[27].

### 3.2.5 Paikantaminen lyhyen kantaman langattomissa verkoissa

Paikantamista tarvitaan lyhyen kantaman verkoissa monissa yhteyksissä niin ulko- kuin sisätiloissa. Toisaalta noodien sijainnin tietäminen on usein oleellista mittaustulosten hyödyntämisen vuoksi ja toisaalta noodin sijainti itsessään on oleellisin tieto esimerkiksi eläinten tai tavaroiden liikkeiden seuraamiseen[64]. Lyhyen kantaman vuoksi paikannusta hyödynnetään sisätiloissa, joissa on omat haasteensa tekniikan kannalta[84]. Sisätiloissa on paljon esteitä, jotka aiheuttavat monitie-etenemistä, jonka lisäksi myös sisätiloissa liikkuvat ihmiset aiheuttavat häiriöitä menemällä signaalin tielle. Oma haasteensa on lisäksi sisätilojen vaihtelevuus, jolloin olosuhteet paikannukselle eroavat kohteesta riippuen paljonkin. Lisäksi pienemmällä maantieteellisellä alueella paikannuksen tarkkuudelta ei sallita suurta paikannusvirhetä, jotta paikannuksesta olisi jotain käytännön hyötyäkin.

Sisätiloissa paikantamisessa voidaan käyttää useita mahdollisia etäisyyden mittausten menetelmiä ja mittausteknologioita. Ehkäpä käytetyin ja käyttöönotettavuudeltaan helpoin etäisyysmittausmenetelmä on RSSI, jonka mittaustarkkuus tosin kärsii monitie-etenemisestä ja signaalin heikkenemisestä etenkin esteiden läpi kuljettuaan[84]. RSSI-mittauksen tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä tarkkuutta parantavia algoritmeja sekä fingerprint-menetelmää (ks. alaluku 5.1). Muita etäisyyden mittaamiseen käytettyjä menetelmiä ovat muun muassa ToA, TDoA ja AOA. Sisätiloissa paikantamisen tarkkuuden tulee olla lähtökohtaisesti tarkempaa kuin ulkotiloissa paikantamisessa, ideaalisen tarkkuuden ollessa kymmenen senttimetrin luokkaa[84]. Aikaisemmissa tutkimuksissa paikannuksen mediaaniarvot ovat vaihdelleet muutamasta kymmenestä senttimetristä aina 2,94 metriin[84].

### 3.3 Pitkän kantaman langattomat verkot

LPWANin eli Low Power Wide-Area Networkilla tarkoitetaan langatonta verkkoa, joka kuluttaa hyvin vähän virtaa ja samanaikaisesti kykenee lähettämään viestejä pitkiäkin välimatkoja[70]. Etäisyys tukiaseman ja päätelaitteen välillä vaihtelee ympäristöstä riippuen muutamasta kilometristä kymmeneen kilometriin. LPWAN käyttää pääasiassa alle gigahertsin taajuuksia, joitain poikkeuksia lukuun ottamatta (esim. IN-GENU)[70]. Tällä on parikin etua verrattuna perinteisesti langattomissa verkoissa käytettyyn 2,4 Ghz taajuuteen verrattuna. Ensiksikin alle gigahertsin taajuudet ovat vähemmän käytettyjä, jolloin toisten laitteiden aiheuttamia häiriöitä ei esiinny samassa määrin ja toiseksi alle gigahertsin taajuudet ovat vähemmän herkkiä siirtotien häiriöille kuten monitie-etenemiselle. Moduloinnissa käytetään vaihtoehtoisesti joko kapeakaistaista modulointia (UNB, Ultra Narrow Band) tai hajapektritekniikkaa (Spread Spectrum). LPWANissa käytetään verkkotopologiana lähes yksinomaan tähtitopologiaa. Tällöin päätelaitteen ei tarvitse kuunnella muiden päätelaitteiden viestejä, jolloin laitteita voidaan pitää pitkiä aikoja lepotilassa. LPWAN-verkkojen tiedonsiirtonopeus on varsin pieni johtuen virrankulutuksen minimoinnista ja pitkistä siirtoetäisyyksistä, joten se ei sovellu esimerkiksi videokuvan siirtoon tai yhtämittaiseen datan lähettämiseen. Lisäksi LPWAN-teknologioiden päiväkohtaista liikennettä rajoittavat paitsi valmistajien itse määräävät rajoitukset [42] kuin myös eri maiden omat päiväkohtaiset käyttörajoitukset[30], vaikka teknologia ei käyttöä itsessään rajoittaisikaan. Omimmillaan LPWAN onkin sensoriverkoissa ja IoT-laitteissa, joissa lähetettävien pakettien koko on pieni ja laitteet ovat paristokäyttöisiä.

#### 3.3.1 Sigfox

Sigfox on samannimisen ranskalaisen yrityksen patentoima LPWAN-teknologia, joka hyödyntää UNB-modulaatiotekniikkaa (Ultra Narrow Band). Sigfox-teknologian avoimuuden vuoksi mikä tahansa valmistaja voi myydä Sigfox-päätelaitteita, mutta verkon käytöstä maksetaan korvausta Sigfoxille. Sigfoxin standardoinnista vastaa Sigfox yhdessä telealan standardisoimisjärjestö ETSIn (European Telecommunications Standards Institute) kanssa.

Sigfox käyttää Euroopassa 868 Mhz taajuuskaistaa, jossa se puolestaan hyödyn-

tää hyvin kapeaa 100 hertsin kaistanleveyttä, josta tulee käytetyn UNB-tekniikan nimi[70]. Modulointimenetelmänä käytetään BSPK-modulointia. Synkronoimattomassa yhteydessä paketit lähetetään satunnaisesti valitulla taajuudella, jonka jälkeen paketti lähetetään kahdesti uudestaan eri taajuuksilla läpimenon varmistamiseksi[17]. Pakettien hyötykuorman koko on 0-12 tavua riippuen lähetettävän tiedon sisällöstä. Yksi suurimmista Sigfox-tekniikan vahvuuksista on pitkä kantama, joka vaihtelee alueesta riippuen 10-30 kilometriin[60].

Sigfoxin käytössä on päiväkohtaisia rajoituksia sen suhteen, kuinka monta pakettia voidaan lähettää päivän aikana[60]. Uplink-viestien määrä on rajoitettu 140 viestiin päivässä, kun taas downlink-viestejä voidaan lähettää ainoastaan neljä päivässä, mikä käytännössä estää ACK-viestien hyödyntämisen Sigfox-verkossa. Rajoitukset ovat lähtöisin Euroopan Unionin määräyksistä joilla jaetaan taajuuskaistan käyttö eri järjestelmien käyttäjien kesken[10]. Sigfoxissa ainoastaan päätelaitteet voivat aktivoida käytetyn yhteyden, kun taas taustajärjestelmä voi lähettää dataa ainoastaan päätelaitteen sitä pyytäessä. Sigfox ei käytä lähtökohtaisesti varsinaista viestien salausta, mutta antaa mahdollisuuden asiakkaalle käyttää omaa päästä päähän salausta tai luottaa Sigfoxin omaan salausprotokollaan[17].

### 3.3.2 NB-IoT

NB-IoT pohjautuu 3GPP-standardointijärjestön LTE-matkapuhelintekniikkaan, josta on karsittu virransäästösyistä useita LTE:n ominaisuuksia, jotka eivät ole välttämättömiä IoT-puolella[60]. Näistä syistä johtuen LTE-protokollalle ominaisia taustajärjestelmän broadcast-lähetyksiä päätelaitteille käytetään säästeliäästi ja toisaalta LPWAN-tarkoituksiin tarpeettomat ja virtaa kuluttavat ominaisuudet kuten kanavan laadun tarkkailu on jätetty NB-IoT:stä pois.

NB-IoT hyödyntää GSM:n ja LTE:n käyttämiä 700 MHz, 800 MHz ja 900 MHz taajuuksia ja modulointimenetelmänä QPSK:ta. Taajuuskaistojen valinnassa on käytössä kolme erilaista toimintamallia: Stand-Alone Operation, Guard-Band Operation ja In-Band Operation[60]. Stand-Alone Operationissa hyödynnetään GSM-taajuuksia kun taas kaksi muuta käyttävät LTE-tekniikkaa. Guard-Band Operationin ja In-Band Operationin ero syntyy puolestaan siitä, että ensimmäisessä toimintamallissa käytetään LTE-kanavien välisiä käyttämättömiä turvavyöhykkeitä ja

jälkimmäisessä LTE:n käyttämiä taajuuksia. Kanavallepääsyssä NB-IoT käyttää FD-MA:ta päätelaitteen lähettäessä dataa taustajärjestelmälle, mutta OFDMA:ta tiedon kulkiessa downlink-suuntaan. Verrattuna muihin LPWAN-teknologioihin, NB-IoT:n tiedonsiirtokapasiteetti on varsin suuri, sillä siirtonopeus on 200 kb/s downlink-suuntaan ja 20 kb/s uplink-suuntaan. Lisäksi vasteajat ovat LPWAN-tekniikaksi lyhyitä, mikä tekee siitä erittäin hyvin soveltuvan tiheään tahtiin välitettävään mitaustietoon. Yksittäisen viestin hyötykuorman maksimikoko on 1600 tavua, mikä sekin on suuri verrattuna LoRaan ja Sigfoxiin. Haittapuolena NB-IoT:n kantomatka on edellä mainittuihin teknologioihin verrattuna lyhyt, ainoastaan alle kymmenen kilometriä.

NB-IoT:n skaalautuvuus on erinomainen mahdollistamalla peräti 100 000 laitetta yhdessä NB-IoT-solussa[60]. NB-IoT:ssa ei ole lähtökohtaisesti päiväkohtaisia rajoituksia viestimäärien suhteen. Suurin ongelma on LTE-verkkojen vähäinen määrä, mikä rajoittaa NB-IoT:n käytettävyyttä. NB-IoT tarjoaa LoRaan ja Sigfoxiin verraten laadukkaamman synkronoidun yhteyden, mutta samalla sen käyttö on huomattavasti kalliimpaa. Tästä johtuen NB-IoT on sopivin ratkaisu silloin, kun haluaa mahdollisimman laadukasta pitkän kantaman langatonta yhteyttä.

### 3.3.3 LoRa

LoRa on LoRa-allianssin määrittelemä pitkän kantaman langaton verkkotekniikka, joka käsittää CSS-modulaatiota hyödyntävän fyysisen kerroksen sekä LoRaWAN-protokollan määrittelemän MAC-kerroksen[25]. LoRaWAN on avoin protokolla, jota LoRa-allianssi hallinnoi, kun taas LoRan fyysisestä kerroksen määrittelee LoRa-radioita valmistava Semtech. Tarkempi kuvaus LoRasta löytyy kappaleesta 4.

LoRa käyttää 433 MHz, 868 MHz ja 915 MHz taajuusalueita, joista kaksi ensimmäistä ovat käytössä Euroopassa. LoRassa radiosignaalin moduloinnissa käytetään CSS-modulaatiota, jossa signaali muuttaa taajuuttaan ennalta määritellysti, mitä kutsutaan nimellä "chirp" eli viserrys[46]. CSS-modulaatio edellyttää tarkkaa synkronointia lähettävän ja vastaanottavan laitteen välillä.

LoRa käyttää star-of-stars-topologiaa, missä LoRa-noodit ovat yhteydessä LoRa-yhdyskäytävän kautta verkkopalvelimelle. Vaikka LoRa-teknologia ei itsessään ra-

joita päivittäistä viestiliikennettä, niin käytännössä eri palveluntarjoajilla on usein päiväkohtaisia rajoituksia niiden suhteen[42]. Lisäksi Lora-allianssi saattaa asettaa omia rajoituksiaan viestiliikenteelle. Kaksisuuntainen viestintä on mahdollista LoRa-tekniikassa, joskin tämä on riippuvainen siitä, mihin luokkaan käytetyt LoRa-päätelaitteet kuuluvat. A-luokan päätelaitteet kykenevät ainoastaan rajoitettuun kaksisuuntaiseen viestintään, kun taas enemmän virtaa kuluttavat C-luokan laitteet tarjoavat paitsi kaksisuuntaista viestintää myös lyhyempiä vasteaikoja viestinnässä. LoRa-signaalin kantomatka on noin viisi kilometriä kaupungissa ja 20 kilometriä haja-asutusalueella, joskin maasto ja fyysiset esteet vaikuttavat käytännön kuuluvuuteen, jolloin etäisyys voi olla selvästi lyhyempi. Tämän lisäksi kuuluvuus sisätiloissa on huomattavasti heikompi.

LoRaWANissa suojaus suoritetaan päätelaitteelta yhdyskäytävälle 128-bittisellä AES-algoritmeilla, käyttäen erillisiä avaimia laitteelle, sovellukselle ja verkolle[24]. Päätelaitteiden aktivointi suoritetaan joko tekemällä pyyntö LoRa-palvelimelle (ns. OTAA-menetelmä) tai asentamalla sessioavaimet manuaalisesti päätelaitteelle (ns. ABP-menetelmä).

### 3.3.4 Yhteenveto LPWAN- järjestelmistä

LPWAN- järjestelmiä vertailemalla näkee sen, että vaikka LoRa, Sigfox ja NB- IoT ovat monilta osin samankaltaisia, niin niistä löytyy myös paljon eroja, jolloin käyttötarkoituksistakin löytyy eroavuuksia. Tällöin yksikään esitellyistä järjestelmistä ei ole lähtökohtaisesti toista parempi, vaan tällöin sovellusalan vaatimukset ratkaisevat[60]. NB- IoT tarjoaa parempaa tiedonsiirtonopeutta ja skaalautuvuutta sekä lyhyempiä latenssiaikoja, kun taas LoRa ja Sigfox ovat kantamaltaan, häiriösuudeltaan, virrankulutukseltaan ja hinnaltaan kilpailukykyisempiä. Sigfoxia ja LoRa:aa vertaillaessa Sigfoxin kantama on LoRaa parempi, mutta LoRa:n tiedonsiirtonopeus ja hyötykuorman koko ovat suurempia.

Lyhyesti voisi todeta, että mikäli käyttäjä haluaa nopeita vasteaikoja ja mahdollisimman laadukasta tiedonsiirtoa toteutettavan LPWAN- teknologialla, on tällöin valintana NB- IoT, mikäli LTE- verkon saatavuus ei muodostu ongelmaksi. Jos puolestaan haluaa edullista ja virrankulutukseltaan pientä, pitkän kantaman LPWAN- teknologiaa, silloin vaihtoehtoina toimivat niin Sigfox kuin LoRa. Tässä gradutut-

Taulukko 3.2: LPWAN- järjestelmien vertailu [60]

	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Taajuus	868/915/433 MHz	868/915/433 MHz	LTE:n taajuudet
Kaistanleveys	125/250 kHz	100 Hz	200 kHz
Modulointi	CSS	BPSK	QPSK
Kantomatka	5/20 km	10/40 km	1/10 km
Salaus	AES 128b	Ei ole(huom.3.3.1)	LTE
Max. tiedosiirtonopeus	50 kbps	100 bps	200 kbps
Payloadin maksimikoko	243 tavua	12/4 tavua(UL/DL)	1600 tavua
Standardointi	LoRa-Allianssi	Sigfox/ETSI	3GPP
Paikantaminen	TDOA	RSSI	Ei (v. 2017)
Päiväkohtaiset rajoitukset(huom.3.3)	Ei(huom.3.3.3)	140(UL)/4(DL)	Ei
Kustannukset			
Taajuuskaista	Ilmainen	Ilmainen	>500 M€/MHz
Käyttöönotto	>100/>1000€	>4000€	>15000€
Päätelaitteet	3-5€	<2€	>20€

kielmassa on käytössä LoRa saatavuuden vuoksi, sillä se on käytettävissä Digitan tarjoamana Kokkolan seudulla.

### 3.4 Lyhyen ja pitkän kantaman verkkojen paikannuksen erot

Vaikka sekä pitkän kantaman että lyhyen kantaman verkkojen paikannus voi korvata satelliittipaikannuksen tilanteissa joissa virrankulutus tai ympäristön katvealueet eivät mahdollista sen käyttämistä paikannukseen, on näiden kahden vaihtoehdoisen paikannusmenetelmän käyttökohteissa myös eroja. Lyhyen kantaman verkoissa paikannus tapahtuu maantieteellisesti pienemmällä alueella, tavallisimmin sisätiloissa, jolloin myös paikannusvirheen on oltava pienempi[84]. Lyhyen kantaman verkkojen paikannusta on käytettävä myös silloin kun tarvitaan enemmän tiedonsiirtokapasiteettia useimpien LPWAN-verkkojen kyetessä varsin pieniin tiedonsiirtonopeuksiin[84]. Lisäksi lyhyen kantaman verkot sopivat paljon paremmin reaaliaikaisempaan kohteiden seuraamiseen esimerkiksi teollisuuskäytössä kuin lähetyksärajoituksista usein kärsivät LPWAN-verkot. Sen sijaan suuremmalla maantieteel-

lisellä alueella toimittaessa pitkän kantaman verkot ovat huomattavasti käytännöllisempiä, sillä ne eivät tarvitse tukiasemia lähellekkään samalla tiheydellä lyhyen kantaman verkkoihin verrattuna kyetäkseen paikantamaan kohteensa. Lyhyen kantaman verkot kykenevät paikallistamaan lokaalisti kohteensa varsin tarkasti, mutta globaaliin paikannukseen tarvitaan joko LPWAN-verkkoja tai lyhyen kantaman verkon tukiasemien tarkan sijainnin määrittämistä[84]. Lisäksi LPWAN-verkkojen etu lyhyen kantaman verkkoihin on se, että suurin osa niistä käyttää vähemmän käytettyjä alle gigahertsin taajuusalueita, jotka myös läpäisevät esteitä paremmin kuin korkeammat taajuusalueet. Pitkän kantaman langattomia verkkoja kuten Sigfoxia ja LoRaa voidaan käyttää myös tavarankantamiseen sen lähdettyä tehtaalta, sillä näillä löytyy myös tehtaan ulkopuolelta yhdyskäytäviä kattamaan maantieteelliset alueet aina päätepisteeseen saakka[60].

## 4 LoRa

Tässä kappaleessa käydään läpi työssä käytettyä LoRa- tekniikkaa. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään LoRassa käytettävää tekniikkaa yleisesti sekä esitellään LoRaWAN- protokollaa määrittelevä LoRa- allianssi sekä LoRa- tekniikan maantieteellinen kattavuus. Sitä seuraavassa luvussa pureudutaan tarkemmin LoRaWAN- protokollaan ja käsitellään sen rakenne. Tämän jälkeen on vuorossa LoRa- verkon topologian ja verkkorakenteen läpikäyminen jota seuraa kappale LoRan päätelaitteista. Lopuksi käydään läpi LoRan viestinvälitys ja tietoturvallisuuskysymykset.

### 4.1 LoRa- teknologia

LoRa on Semtechin kehittämään RF- tekniikkaan ja LoRa- allianssin määrittelemään avoimeen LoRaWAN- protokollaan pohjautuva LPWAN- teknologia[77]. Varsinaiset LoRa- laitteet ovat yksinoikeudella Semtechin valmistamia, mutta siinä käytetty LoRaWAN- protokolla on avoin, jota LoRa- allianssi valvoo. LoRa- allianssi on voittoa tavoittelematon satojen yritysten ja järjestöjen yhteenliittymä, joka määrittelee LoRaWAN- protokollan. Suomessa LoRa- verkon ylläpidosta vastaa Digita[15].

LoRa määrittelee yhteyden fyysisen kerroksen, käyttäen CSS- modulaatiota tiedonsiirrossa. MAC- kerroksen määrittelee puolestaan LoRaWAN. LoRa operoi kolmella taajuuskaistalla (433MHz, 868MHz ja 915MHz), joista Euroopassa on käytössä 868MHz ja 433MHz alueet[25]. LoRa kuluttaa hyvin vähän virtaa, joten parhaimmillaan päätelaitteen paristot voivat kestää käytössä jopa kymmenen vuotta. Pitkän kantamatkan ja pienen virrankulutuksen kääntöpuolena tiedonsiirtonopeudet jäävät varsin maltillisiksi. LoRa- radioiden kantomatka ilmoitetaan arviolta 5 kilometriä kaupungissa ja 20 kilometriä maaseudulla, mutta käytännössä kuuluvuuteen vaikuttaa monta eri tekijää[60]. LoRa- radion kuuluvuus sisätiloissa on selvästi heikompaa kuin ulkotiloissa, samoin rakennukset ja suoran näkyvyyden puute tukiasemaan lyhentävät kantomatkaa. Tämän lisäksi tutkimuksissa on havaittu, että lämpötila ja kosteus vaikuttavat pakettien vastaanottamisen onnistumiseen ja vastaanotetun signaalin voimakkuuteen[31].





Kuva 4.1: LoRaWAN-kehysten rakenne

LoRassa radiosignaalin moduloinnissa käytetään CSS- modulaatiota, joka on muunnelma hajaspektritekniikoihin kuuluvasta suorasekventointitekniikasta eli DSSS:tä[46]. DSSS- moduloinnissa lähetettävä data koodataan pieniksi paloiksi hajautettuna koko taajuuskaistalle muodostaen yhden kokonaisen lähetettävän signaalin ja joka yhdistetään näennäislukugeneraattorilla muodostettuun kohinaan[48]. Tämän seurauksena signaalin vastaanottaja kykenee erottamaan heikonkin signaalin kohinasta, mutta tällöin tiedonsiirtokapasiteetti kärsii samalla[46]. CSS- moduloinnissa lähetettävä signaali muuttaa taajuuttaan ennalta määritellysti, mitä kutsutaan nimellä "chirp" eli viserrys. CSS- modulaatio edellyttää tarkkaa synkronointia lähetettävän ja vastaanottavan laitteen välillä. Käytettyjen taajuuksien määrä riippuu käytetystä SF-arvosta, jonka perusteella taajuuksien lukumäärä voidaan laskea kaavalla  $M = 2^{SF}$ [55]. SF-arvoja voi olla kuusi erilaista aina SF-arvosta 7 aina SF-arvoon 12. Mitä suurempi SF-arvo on [21], sitä pienempi siirtokapasiteetti ja pidempi kantomatkana. LoRaWANissa siirtokapasiteetti vaihtelee spreading factor- arvosta riippuen 0,3 kbs aina 50 kbs.

#### 4.1.1 LoRaWAN

LoRaWAN on LoRa- radion käyttämä MAC- kerroksen protokolla, joka määrittelee myös LoRa- järjestelmän arkkitehtuurin [76]. Lisäksi LoRaWAN määrittelee päätelaitteiden luokat sekä järjestelmän salauksen päästä päähän[24]. LoRaWAN- protokollan uusin versio 1.1 ilmoitettiin syksyllä 2017 [47]. Versioon 1.1 on lisätty mm. päätelaiteluokka B ja paranneltu LoRaWANin tietoturva.

LoRaWAN-kehys (4.1) koostuu neljästä osasta: Alustus(preamble), otsikko (header), varsinainen data (payload) ja CRC-tarkistussumma (CRC payload) [25]. Näistä otsikko ja CRC-tarkistussumma ovat valinnaisia. Alustuksessa kehyks lähettää chirp-signaaleja, jonka avulla lähettävä ja vastaanottava laite voivat synkronoida lähetyksen ja joka päättyy synkronointitunnukseen, jonka perusteella muut signaalia kuuntelevat LoRa- verkot tietävät joko kuunnella viestiä tai jättää huomioimatta, mikäli synkronointitunnus ei vastaa omaa. Alustusta seuraa valinnainen otsikkotieto, jossa voidaan ilmoittaa mm. lähetettävän datan koko ja tieto siitä käytetäänkö CRC-tarkistussummaa. Mikäli nämä seikat ovat tiedossa etukäteen viestiä lähettäessä, ei otsikko ole välttämätön. Otsikkotiedon jälkeen voi tulla vielä otsikon eheyden tarkistava CRC-tarkistussumma. Otsikon jälkeen on vuorossa varsinainen lähetettävä data, jonka suuruus voi olla maksimissaan 243 tavua[60]. Varsinainen data koostuu lähetettävän datan lisäksi MAC-kerroksen otsikkotiedoista, kehyksen otsikkotiedoista ja tarkistussummasta [24]. Kehyksen päätteeksi tulee valinnainen 16-bittinen CRC-tarkistussumma, jolla voidaan tarkistaa, onko kehyksen sisältö muuttunut siirron aikana. Downlink-viestin rakenne on samankaltainen kuin uplink-viestissä, erotuksena on se, että CRC-tarkistussumma on ainoastaan otsikolle eikä varsinaiselle datalle [77]. Tällä tavoin pyritään pitämään downlink-viestien koko mahdollisimman pienenä.

#### 4.1.2 LoRa-verkon rakenne

LoRaWAN-protokollaa hyödynnettäessä LoRa-verkko käyttää star-of-stars-topologiaa, jossa päätelaitteet kommunikoivat yhdyskäytävän kanssa, joka puolestaan kommunikoi verkkopalvelimen kanssa[66]. Lopuksi verkkopalvelin ohjaa oikealle sovelluspalvelimelle. LoRa-päätelaite voi lähettää viestejä useammallekin yhdyskäytävän laitteelle, jolloin LoRa-palvelin voi saada saman viestin useammankin kerran. Tämän vuoksi palvelimella on suodatus, joka hylkää kertaalleen vastaanotetut paketit. Tämä aiheuttaa turhia pakettien vastaanottamisia palvelimen puolella, mutta puolestaan lisää viestin läpimenomahdollisuutta ja mahdollistaa päätelaitteen virrankulutuksen minimoimisen, sillä viestiä ei tarvitse lähettää monta kertaa.

LoRaWAN-verkkopalvelin kykenee myös säätelemään jokaisen staattisen päätelaitteen tiedonsiirtonopeutta erikseen ADR:n (Adaptive Data Rate) avulla [66]. Myös liikkuvissa noodeissa ADR:n käyttö on mahdollista, sillä vaikka noodin ol-

lessa liikkeessä ADR:än käyttö ei olekaan mahdollista, on liikkuva noodikin useimmiten paikoillaan. ADR:n käyttö mahdollistaa täten virrankulutuksen minimoinnin ja LoRa-verkon kapasiteetin optimoinnin. Tiedonsiirtonopeus määräytyy käytetyn SF-arvon mukaan ja se määritellään viestien läpimenon määrän perusteella[54]. Kun laitteelle on valittu pienin mahdollinen SF-arvo signaali-kohinasuhteen perusteella, alkaa LoRaWAN-verkkopalvelin analysoimaan viestien läpimenoa ja mikäli valittu SF-arvo ei saa viestejä menemään läpi tarpeeksi paljon, nostetaan laitteen SF-arvoa yhdellä pykälällä. Tämä jatkuu, kunnes sopiva SF-arvo löydetään.

LoRaWAN-verkossa on neljänlaisia verkon osia: päätelaitteet, yhdyskäytävät, verkkopalvelin ja sovelluspalvelin [76]. Verkon päätelaitteet ovat tietoja kerääviä sensoreita tai aktuaattoreita, jotka jaotellaan kolmeen luokkaan (ks. seuraava kappale). Yhdyskäytävä toimii välittäjänä päätelaitteen ja verkkopalvelimen välillä. Päätelaitteen ja yhdyskäytävän välillä käytetään single-hop-tekniikkaa, kun taas yhdyskäytävän ja verkkopalvelimen välillä hyödynnetään IP-pohjaista tiedonsiirtoa. Päätelaitteet eivät ole sidoksissa yksittäiseen yhdyskäytävän laitteeseen, vaan mikä tahansa kuuloetäisyydellä oleva yhdyskäytävä lähettää saamansa viestin verkkopalvelimelle. Verkkopalvelimen tehtävänä on paitsi suodattaa kertaalleen vastaanotetut paketit, niin myös huolehtia verkkoturvallisuudesta ja ACK-viestien lähettämisestä yhdyskäytäville sekä pakettien lähettämisestä oikealle sovelluspalvelimelle. Sovelluspalvelin puolestaan käsittelee saatua päätelaitteen dataa ja tekee tarvittavia toimenpiteitä sen perusteella.

### 4.1.3 LoRa-päätelaitteet

Lora-päätelaitteet jaotellaan A- B- tai C-luokkaan riippuen latenssiaika- ja virrankulutusvaatimuksista [76]. Eri luokkien päätelaitteita voidaan täten käyttää erilaisiin sovelluksiin niiden vaatimuksien mukaan. A-luokan laitteet mahdollistavat rajoitetun kaksisuuntaisen liikenteen päätelaitteen ja taustajärjestelmän välillä. Yhteys aukeaa aina siten, että päätelaite lähettää viestin taustajärjestelmälle, jota seuraa kaksi lyhyttä ikkunaa, jossa päätelaite voi ottaa vastaan viestin taustajärjestelmältä. Taustajärjestelmä ei täten voi lähettää päätelaitteelle muina aikoina viestejä. A-luokan laitteet ovat paristokäyttöisiä sensoreita, joiden virrankulutus on minimoitu ja toisaalta latenssiajat ovat pitkiä [60]. B-luokan laitteet ovat paristokäyttöisiä aktuaattoreita, joiden virrankulutus on hieman suurempaa, mutta toisaalta latenssiajat lyhyempiä kuin luokka A:n laitteilla. A-luokan laitteisiin verrattuna B-

luokan laitteilla on ylimääräisiä aikajaksoja, jolloin päätelaite kuuntelee tulevia viestejä [60]. Synkronointi päätelaitteen ja taustajärjestelmän välillä suoritetaan beacon-viesteillä. Luokka C:n laitteet ovat verkkovirrassa toimivia aktuaattoreita, jotka kykenevät kuuntelemaan tulevia viestejä lähes koko ajan, lukuun ottamatta aikoja jolloin ne lähettävät itse viestejä [60]. Luokka C:n laitteet kuluttavat A- ja B-luokan laitteisiin verrattuna enemmän virtaa, mutta toisaalta latenssiajat ovat hyvin lyhyet.

#### 4.1.4 Viestinvälitys

Koska Lora-päätelaitteiden yksi tärkeimpiä ominaisuuksia on erittäin pieni virrankulutus, on LoRa-verkossa viestinvälitys lähtökohtaisesti uplink-suuntaista, eli päätelaitteelta palvelimelle [53]. Vähiten virtaa kuluttavilla A-luokan laitteilla downlink-liikenne eli palvelimelta päätelaitteelle tapahtuu kahdessa viestinlähetyksen jälkeisessä aikaikkunassa päätelaitteen radion ollessa muulloin levossa, joten liikennettä päätelaitteelle on varsin vähän. Tärkeimpiä downlink-viestinnän tarpeita ovat kuitausviestit ja ennen kaikkea synkronointiviestit, jotta päätelaitteiden RTC-kellot pysyisivät samassa tahdissa koko LoRa-verkon kanssa.

#### 4.1.5 Tietoturvallisuus

LoRa-laitteiden aktivointiin voidaan käyttää kahdenlaista aktivointitapaa OTAA (Over-the-Air Activation) tai ABP (Activation by personalization) [25][61]. OTAA-menetelmässä päätelaite lähettää aktivoinninpyyntöviestissään oman päätelaitteen osoitteen (DevAdd), päätelaitteen uniikin tunnuksen (AppEUI) sekä oman sovellusavaimen (AppKey) yhdessä MIC-tarkistussumman kanssa LoRa-palvelimelle ja mikäli palvelin tunnistaa laitteen näiden perusteella, lähettää se vastavuoroisesti hyväksymisviestin mukana kaksi sessioavainta (NwkSKey, network session key ja AppSKey, application session key). ABP-menetelmässä sessioavaimet asennetaan manuaalisesti suoraan päätelaitteille, jolloin erillistä aktivointipyyntöä ei tarvita. ABP-menetelmää pidetään tietoturvallisuuden kannalta epävarmempana ja mikäli sessioavaimista ei pidetä huolta, voi syntyä vakavia tietoturva-aukkoja [24].

LoRaWANissa suojaus suoritetaan päätelaitteelta yhdyskäytävälle 128-bittisellä AES-algoritmilla, käyttäen erillisiä avaimia laitteelle, sovellukselle ja verkolle [24].

Tätä 128-bittistä AES-avainta käytetään NwSKey- ja AppSKey-sessioavainten luomiseen, joista NwSKey on tarkoitettu viestien eheyden tarkistavan MIC-koodin luomiseen ja tarkastamiseen, kun taas AppSKey on tarkoitettu sovellusdatan salaamiseen ja purkamiseen.

LoRaWANista on löydetty tietoturvaluusuhkia, joista voidaan mainita muun muassa fyysisen kerroksen, sovellusdatan suojauksen, LoRa-laitteiden aktivoinnin ja LoRa-yhdyskäytävän tietoturva-aukot[24]. Fyysisen kerroksen tietoturvauhka mahdollistuu kahden tekijän vuoksi. Ensinnäkin LoRaWANissa lähetysmatkat ovat pitkiä ja toiseksi alhaisen bittivirran vuoksi datan lähettämiseen kuluu paljon aikaa, jolloin vihamielisten tahojen on mahdollista kaapata tai korruptoida lähetettyjä viestejä. LoRaWANin lähetettävien pakettien hyötykuorma on kooltaan aina sama, mikä voi aiheuttaa tietoturvaongelman, mikäli laskurien ylivuotoja tapahtuu. LoRa-laitteiden ABP-aktivointia voi käyttää tietoturvahyökkäykseen mikäli uniikkeja sessioavaimia ei käytetä, jolloin pahimmassa tapauksessa kaikkien verkon laitteiden tietoturva on vaarantunut. Lisäksi yhdyskäytävä on kriittisessä roolissa LoRa-verkossa, sillä se toimii paitsi välittäjänä sovelluksen ja päätelaitteen välillä, myös verkon salausavainten säilöjänä. Tällöin hyökkääjä saattaa joko rampauttaa verkon toiminnan kaatamalla yhdyskäytävän tai aiheuttaa tietoturva-aukon kaappaamalla salausavaimet yhdyskäytävältä.

## 5 Paikannus LoRa-verkossa

Tässä kappaleessa käydään läpi gradun varsinainen tutkimusaihe, eli paikantaminen LoRa-laitteella. Ensiksi käydään läpi perusteet paikantamiseen LoRa-verkossa, jonka avulla lukija saa käsityksen LoRa-verkossa tapahtuvan paikannuksen toimintaperiaatteista sekä vahvuuksista ja heikkouksista. Tässä yhteydessä käydään läpi myös aikaisemmin julkaistuja tutkimustuloksia liittyen paikantamiseen LoRa-verkossa.

### 5.1 LoRa-pohjainen paikannus

LoRa-verkossa paikantamisen mahdollistaa päätelaitteiden ja yhdyskäytävien välinen viestiliikenne. Samalla kun päätelaitteet välittävät esimerkiksi mittaustietoja yhdyskäytävälle, sisältyy viesteihin erilaista metadataa, kuten radiosignaalin vahvuuden RSS-arvo sekä viestin lähettämisen ja vastaanottamisen aikaleimat[38]. RSS-arvon ja aikaleimojen perusteella pystytään arvioimaan päätelaitteen etäisyys viestin vastaanottaneisiin yhdyskäytäviin. Kun vähintään kolmen eri yhdyskäytävän saatua saman päätelaitteen viestin, voidaan päätelaitteen sijainti laskea LoRan tapauksessa joko signaalin voimakkuuden tai viestin lähetykseen kuluneen ajan perusteella[38]. Lisäksi LoRa-päätelaite yleensä lähettää viestejä tasaisin ennalta määrityillä väliajoin, joten laitteen sijainnin päivittäminen tulee luonnostaan, mikäli päätelaitteen kantomatkan sisällä on tarpeeksi yhdyskäytäviä.

LoRa-paikannusjärjestelmä koostuu neljästä eri osasta: päätelaitteesta, yhdyskäytävästä, palvelimesta ja sovelluksesta[40]. Ensinnäkin on LoRa-päätelaite joka lähettää signaalia ja toisekseen on joukko LoRa-yhdyskäytäviä, jotka ottavat signaalin vastaan. Kolmanneksi on palvelin, joka tallentaa ja käsittelee yhdyskäytävän mittaustiedot ja lopuksi on sovellus, joka esittää tiedot käyttäjälle hyödyntäen palvelimen antamaa dataa. Paikannuksen laskeminen suoritetaan palvelimella, joka antaa sijainnin pituus- ja leveysasteina [36][68].

LoRa-paikannus käynnistyy siten, että päätelaite lähettää normaalin viestin kai-

kille yhdyskäytävälle, jotka ovat signaalin kantomatkan sisällä. Paikannuksessa tarvittavat tiedot saadaan tavallisen LoRa-viestin kehyksen metatiedoista, joten erillistä paikantamisviestiä ei tarvitse lähettää [38]. Yhdyskäytävä ottaa vastaan päätelaitteen viestin, lisää siihen oman aikaleimansa vastaanottamisen yhteydessä ja lähettää tiedot eteenpäin palvelimelle. TDOA-pohjaisen etäisyyden määrittämisessä tarvitaan erittäin tarkat aikaleimat ja tämä on ratkaistu tyypillisesti siten, että yhdyskäytävään on liitetty GNSS-paikannin, jonka välityksellä saadaan tarkka aikaleima. Palvelin puolestaan lajittelee viestit päätelaitteen tunnusteen mukaisesti ja mikäli vähintään kolme yhdyskäytävää lähettää kyseisen päätelaitteen samaan ajankohtaan lähetetyn viestin, voidaan päätelaitteen etäisyys yhdyskäytävistä laskea joko signaalin voimakkuuden tai viestin vastaanottoaikojen erojen perusteella [38]. Tarkempaa käsittelyä varten palvelin lähettää mittaustiedot käyttäjän sovellukselle, jossa voidaan parantaa paikannuksen tarkkuutta käsittelemällä tulokset haluttujen algoritmien avulla. Yhdyskäytävien välisten etäisyyksien kasvaessa TDOA-pohjaisen paikannuksen tarkkuus paranee, sillä eri yhdyskäytävien lähettämien viestien aikaerot kasvavat[65].

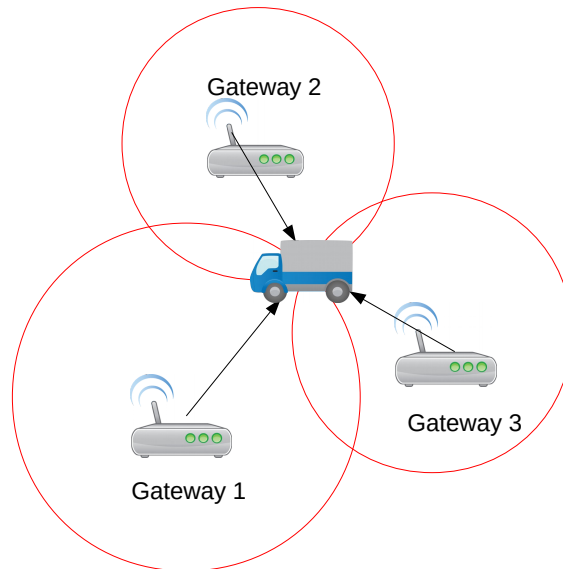
Tavallisin tapa määrittää RSSI-pohjainen etäisyydsmittaus on laskea se perustuen RSS-signaalin vaimenemiseen etäisyyden kasvaessa käyttämällä signaalin log-normaalia etenemismallia[41]. Etäisyyden kasvaessa RSS-signaali heikkenee referenssietäisyyden  $d_0$  suhteen logaritmisesti kaavan  $\overline{PL}(d) = PL(d_0) + 10n \log(\frac{d}{d_0})$  mukaan. Etäisyyteen vaikuttavat niin lähettimen teho kuin lähettävän ja vastaanottavan antennin ominaisuudet (kaavassa  $PL(d_0)$ ), sekä ympäristö- ja taajuusriippuvainen kerroin  $n$ . Etäisyyden mittausta vaikeuttaa oikeassa ympäristössä etenkin ympäristön aiheuttama monitie-eteneminen, joka aiheuttaa vaimenemista ja pahimmassa tapauksessa signaalitason jäämistä niin alhaiseksi, että se putoaa alle vastaanottimen herkkyytystason[41]. Logaritmisesta vaimenemisesta voidaan päätellä, että mitä kauempana kohde on, sitä voimakkaammin signaali vaimenee heikentäen mittaustarkkuutta[67].

Läheisyysperustainen paikannus[67] hyödyntää RSSI:tä etäisyyden arviointiin, mutta toisin kuin perinteisemmässä RSSI:n etäisyyden laskennassa, läheisyysperustaisessa etäisyyesarvion selvittämiseen riittää yksi tukiasema normaalisti vaaditun kolmen sijasta. Etäisyys arvioidaan tällöin sen tukiaseman perusteella, jonka vastaanotetun signaalin vahvuus on suurin. Yksinkertaisuuden vastapainoksi läheisyysperustainen paikannus on huomattavasti epätarkempi.

Etäisyyden mittaukseen perustuvia paikannusmenetelmiä ovat trilateraatio ja multilateraatio. Trilateraatio on paikannusmenetelmä, jossa kohteen sijainti saadaan selville vähintään kolmen tukiaseman perusteella[85]. Jokaisesta tukiasemasta lasketaan etäisyys kohteeseen ja muodostetaan ympyrä, jonka kehällä kohde on. Kun kaikki tukiasemien ympyröiden koot ja sijainnit tiedetään, saadaan kohteen sijainti selville ympyröiden leikkauspisteessä, kunhan tukiasemat eivät ole sijoittuneet kolinearisesti. Käytettäessä vain kahta tukiasemaa saadaan kaksi mahdollista sijaintia, jolloin kolmas tukiasema on välttämättömyys yksiselitteisen sijainnin määrittämiseksi. Kohteen ja tukiaseman välistä kulmaa ei tarvitse selvittää, riittää ainoastaan tietää tukiasemien tarkat sijainnit ja kohteiden ja tukiasemien väliset etäisyydet[62]. Teoriassa ympyröiden leikkauspisteen tulisi antaa tarkka sijainti, mutta ympäristöstä aiheutuvien häiriöiden ja muiden etäisyyden laskemista haittaavien tekijöiden vuoksi käy useimmiten niin, että ympyrät eivät joko leikkaa yksikäsitteises- sä pisteessä tai eivät leikkaa keskenään ollenkaan[85]. Paikannuksen tarkkuuden parantamiseen onkin kehitelty vuosien saatossa useita ratkaisuja eri algoritmien ja virheenkorjausmenetelmien muodossa[85]. Multilateraatiossa (ks. kuva 5.1) puolestaan lasketaan signaalin vastaanottoaikojen erotuksien perusteella kaksi hyperbolan muotoista käyrää joiden leikkauspisteessä kohde sijaitsee[28]. Ensiksi multilateraati- oissa lasketaan signaalien vastaanottoaikojen erot jonka jälkeen ne voidaan muun- taa pituuseroiksi ja joista voidaan muodostaa hyperbolan muotoisia käyriä sijainnin selvittämiseksi[32]. Kolmen tukiaseman aikaerojen perusteella saadaan mahdollisista kohteen sijaintipisteistä muodostettua kaksi hyperbolaa, joiden leikkauskohtaan kohteen sijainti voidaan rajata[28]. Trilateraation ja multilateraation lisäksi on myös muitakin etäisyysperustaisia paikannusmenetelmiä kuten triangulaatio, jossa sijain- ti lasketaan vastaanotetun signaalin tulokulman perusteella ja vähintään kahden vastaanottavan yhdyskäytävän sekä signaalin lähettävän päätelaitteen muodosta- man kuvion etäisyydet voidaan laskea trigonometrian perusteella.[40].

LoRaWAN-protokollassa voidaan käyttää sekä RSSI- että TDOA-pohjaista pai- kannusta, joista TDOA-menetelmällä saadaan tarkempia paikkatietoja[38]. TDO- A:ssa erillinen paikkatiedon laskeva sovellus laskee lähetysten aikaerojen perus- teella paikannettavan laitteen läheisyyden yhdyskäytävästä ja useamman yhdys- käytävän läheisyyskeilojen perusteella sijainti voidaan laskea näiden leikkauspis- teenä multilateraation avulla. TDOA-pohjaisen paikannuksen tarkkuus riippuu yh-





Kuva 5.1: Multilateraatio

dyskäytävien kellojen tarkkuudesta, jotta aikaleimat olisivat mahdollisimman tarkkoja[36]. Esimerkiksi mikrosekuntien tarkkuudella toimivilla kelloilla ei päästä kuin korkeintaan satojen metrien tarkkuusluokkaan, jolloin tarkkaan paikannukseen vaaditaan nanosekuntien tarkkuudella toimivia kelloja [40]. Paikannusvalmiuksilla varustettuja yhdyskäytäviä valmistavat ainakin Kerlink, Cisco ja Tektelic[8][13][1].

Yksinkertaisimmillaan RSSI-pohjainen LoRaWAN-paikannus saadaan tutkimala LoRa-laitteen läheisyyttä (proximity)tukiasemiin, jolloin katsotaan, osuuko laite tukiasemien kantomatkan sisään ja tämän perusteella arvioidaan etäisyys[36]. Etäisyys saadaan laskettua signaalin vaimenemisesta etäisyyden kasvaessa. RSSI-paikannuksen toteuttaminen on erittäin helppoa, sillä viestien lähettämisen yhteydessä signaalin voimakkuutta mitataan jatkuvasti, jolloin ylimääräisiä laitteita tai erillisiä mittauksia ei tarvita. Menetelmä edellyttää kuitenkin että tukiasemien tarkka sijainti on tiedossa. Paikannuksen tarkkuutta voidaan parantaa arvioimalla etäisyyttä signaalin vaimenemisen suhteen, mutta tällöinkin kyseinen menetelmä on varsin epätarkka, tarkkuuden ollessa 1000-2000 metriä[36].

RSSI-pohjaista paikannusta voidaan parantaa esimerkiksi ottamalla käyttöön fingerprint-algoritmi, jossa paikannettavasta alueesta muodostetaan "kartta"aikaisemmin mitattujen tarkkojen RSSI-arvojen perusteella etukäteen tai reaaliaikaisesti vastaanottamalla ankkurinoodeilta näitä tietoja[68]. Tämän jälkeen näitä arvoja verrataan paikannettavalta laitteelta saatuihin RSSI-arvoihin ja päätellään sijainti tämän perusteella. Fingerprint-algoritmi parantaa tarkkuutta selvästi, mutta se edellyttää että lähettävä ja vastaanottava laite ovat asennettu samalle korkeudelle ja toisaalta tallennettuja RSSI-arvoja tulisi päivittää tarpeeksi usein.

Liikkuvan kohteen sijainnin määrittelyyn voidaan käyttää apuna kiihtyvyyssantureita[80]. Tällöin LoRa-päätelaite lähettää ainoastaan ennalta määritellyin välein signaalia, mutta mikäli kiihtyvyyssanturissa havaitaan liikettä, lähettää laite tällöin poikkeamaviestin, päivittäen sijainnin mahdollisimman reaaliaikaisesti. Liikkuvien noodien paikantamista kuitenkin rajoittaa LoRaWAN-protokollan käytölle asetetut päiväkohtaiset rajoitteet koskien viestien määrää, koska sijaintitietoja ei voi päivittää tarpeeksi nopeasti[38]. LoRa-pohjaisen paikantamisen sopivimmat käyttökohteet ovatkin staattiset kohteet, joiden tarkan sijainnin ilmoittaminen ei ole kriittistä kuten esimerkiksi maastoon pysyvästi sijoitettujen laitteiden, varastotuotteiden tai konttien sijainnit. Tämän lisäksi staattisten kohteiden sijaintitietoja ei tarvitse päivittää niin usein, että LoRaWANin päiväkohtaiset rajoitteet tulisivat ongelmaksi. Myöskään hitaasti liikkuvien kohteiden, kuten kävelevän ihmisen, paikantamistarkoituksessa sijaintitietojen päivitysväli ei muodostu suureksi ongelmaksi, sillä kohde ei ehdi liikkua pitkää matkaa päivitysten välillä.

## 5.2 LoRa-paikannuksen tarkkuus

LoRaWAN-protokollassa paikannus voidaan suorittaa energiatehokkaimmin staattisesti sijoitetuilla A-luokan LoRa-laitteilla, jolloin paikannusviestejä lähetetään hyvin harvakseltaan[38]. Mikäli tarvitaan liikkuvia noodeja, virrankulutus kasvaa selvästi, sillä tällöin joudutaan käyttämään joko B- tai C-luokan laitteita sekä tiheämpää viestien lähetystä yhdyskäytävälle[38]. LoRa-allianssi lupaa TDOA-pohjaiselle paikannukselle 20-200 metrin paikannustarkkuuden, mutta myöntää että tarkkuuteen vaikuttavat useat tekijät, joista suurimmat ovat monitie-eteneminen, käytetty paikannusalgoritmi ja LoRa-yhdyskäytävien sijoittuminen paikannettavaan

noodiin nähden[38]. Paikannustarkkuutta voidaan lisätä yhdyskäytävien määrää lisäämällä, lähettämällä paikannusviestejä eri taajuuksilla sekä käyttämällä paikannuksen laskennan yhteydessä erilaisia virheenkorjausmenetelmiä kuten ennakoimista tai simulointia. Huomioitavaa on, että yhdyskäytävien tasainen sijoittuminen on jopa enemmän laitteen paikannusta parantava tekijä kuin läheisyys johonkin yhdyskäytävään[38]. Lisäksi tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä suodattimia paikannuksen yhteydessä sekä hyödyntämällä tietoja oletussijainnista ja kohteen mahdollisista liikkeistä. Myös spreading factor-arvoilla on vaikutusta LoRa-paikannukseen, sillä pienemmillä SF-arvoilla saadaan tiheämpi tietojen päivitysväli, mutta korkeammilla SF-arvoilla saadaan selvästi parempi tukiasemien saavutettavuus pidemmän lähetysvälin ansiosta sekä parempi viestin läpimenoprosentti pienempiin SF-arvoihin nähden[68]. SF-arvojen vaikutuksista paikannukseen on tutkinut mm. Podjevin et al[68] ja niiden tuloksista löytyy lisätietoja taulukosta 5.4. Näissä tutkimuksissa huomattiin, että suurin määrä onnistuneita päivityksiä saatiin arvolla SF-8, kun taas paras viestien läpimenoprosentti oli SF-arvolla 11.

Erilaisia LoRaWAN-pohjaisia paikannuksenlaskentasovelluksia on ilmestynyt esimerkiksi Kerlinkiltä, jonka Wanesy Geolocation hyödyntää trilateraatiota ja TDOA-menetelmää keräten paikannustietoja LoRaWAN-yhdyskäytäviltä[11]. Wanesy Geolocation toimii paitsi Kerlinkin omissa laitteissa, niin se on myös yhteensopiva LoRaWAN Network Serverin kanssa. Tämän lisäksi löytyy vaihtoehtoisesti avoimen lähdekoodin LoRa Server, joka tarjoaa LoRa Geo Serveriä paikantamiseen LoRaWan-verkossa[5][6]. LoRa Geo Serverissä käytetään TDOA-paikannusta ja Semtechin Collos-ohjelmointirajapintaa, minkä lisäksi tarvitaan aikaleimojen purkuavain, jotta tarkkaa paikannustietoa voidaan hyödyntää.

LoRa-radiota voidaan käyttää paikannukseen ilman LoRaWAN-protokollaakin. Tuolloin hyödynnetään LoRan lähettämää dataa, erityisesti RSSI-tietojen muodossa. LoRa-paikannusta voidaan parantaa useilla erilaisilla paikannusalgoritmeilla, joihin lukeutuvat aikaisemmin mainittu fingerprint-algoritmi sekä lisäksi muun muassa min-max- sekä maximum likelihood-menetelmät. Min-max-algoritmissa sijaintia hahmotetaan neliöissä, joissa ankkurinoodi on keskiössä ja neliön sivut ovat pituudeltaan kaksi kertaa ankkurinoodin ja paikannettavan laitteen etäisyyden verran[45]. Paikannettava laite selvitetään toistensa leikkaavien ankkurinoodien min-max-neliöiden leikkauskohdan keskipisteessä. Useamman ankkurinoodin kautta voidaan

tutkia leikkauspistettä, jossa paikannettava laite sijaitsee. Min-max algoritmin suurin etu on sen helppo käyttöönotettavuus. Maximum likelihood-menetelmällä saadaan mittaustuloksissa esiintyvä kohina minimoitua[45]. Suurilla otosmäärillä saadaankin aikaiseksi tarkkoja paikannustuloksia, mutta jos ankkurinoodeja ei ole paljon käytössä, mittausdatan määrä jää pieneksi ja paikannuksen tulokset tässä tapauksessa heikoiksi. Fingerprint-algoritmia voidaan käyttää pelkästään LoRalla, kuten käy ilmi Choi et al[36] suorittamasta tutkimuksesta. Kyseisessä tapauksessa tietoja kerättiin kahdessa vaiheessa, ensin offline-vaiheessa keräämällä verrokkiarvot laitteilta joiden tarkka sijainti tiedettiin ja myöhemmin online-vaiheessa mitattiin tuntematonta sijaintia ja verrattiin tallennettuihin tietoihin. Koska jokaisesta mahdollisesta alueen paikasta ei ole mahdollista lähettää RSSI-tietoja, käytettiin interpolointimenetelmiä laskemaan RSSI-arvot muille mahdollisille sijainneille. Lisäksi on olemassa hybridiratkaisu, jossa yhdistetään RSSI ja TDOA, jolloin voidaan paitisi hyödyntää molempien menetelmien parhaita puolia, mutta myös toimia paikannuksen varamenetelminä, mikäli toinen ei jostain syystä toimi[57].

### 5.3 LoRa-paikannuksen aiemmat tutkimukset

Vaikka LoRa-pohjainen paikannus onkin vielä suhteellisen tuore idea, on aiheesta tehty jo joitain tutkimuksia. Nämä jakaantuvat pääasiassa RSSI-pohjaisiin ja TDOA-pohjaisiin tutkimuksiin, jonka lisäksi kiinnostuksen kohteina ovat usein erilaiset paikannusalgoritmit. RSSI:n perustuvia paikannustutkimuksia ovat tehneet ainakin Aernouts et al[22] vertailemalla sigfoxin ja LoRaWANin paikannustarkkuutta kaupunkialueella, käyttäen RSSI-paikannusta fingerprint-algoritmeilla. Tämän lisäksi Goldoni et al[45] tutkivat paikannustarkkuutta käyttäen RSSI-pohjaista LoRa-paikannusta niin sisä- kuin ulkotiloissa. Choi et al[36] ovat puolestaan suorittaneet mittauksia RSSI:llä fingerprint-algoritmeja hyödyntäen. TDOA-pohjaisia LoRa-paikannuksia ovat puolestaan tehneet Podjevin et al[68] sekä Fargas et al[40], joista ensin mainitussa suoritettiin LoRa-paikannusta julkisessa verkossa liikkuvia noodeja hyödyntäen ja puolestaan jälkimmäisessä staattisten laitteiden paikannusta yksityisessä verkossa. Lisäksi löytyy ainakin yksi RSSI:tä ja TDOA:ta LoRa-paikannuksessa vertaileva tutkimus: Plets et al[67] vertasi useita eri RSSI-pohjaisia mittaus tapoja TDOA-pohjaiseen etäisyysmittaukseen mitattaessa liikkuvia kohteita. Osa LoRa-paikannukseen liittyvästä tutkimuksesta keskittyy puolestaan sisätiloissa pai-

kannukseen, johon liittyy omat ulkotiloissa paikantamisesta eroavat haasteensa.

### 5.3.1 RSSI-pohjaiset tutkimukset

Aernouts et al[22] ovat tutkineet LoRaWANin paikannustarkkuutta Antwerpenin kaupunkialueella, jolloin hyödynnettiin RSSI-paikannusta fingerprint-algoritmeilla. Autoihin kiinnitettyjen päätelaitteiden sijaintia mitattiin marraskuusta helmikuuhun ja mittauksissa paikannusviestejä lähetettiin joka minuutti. RSSI-etäisyysmittauksella saatiin LoRaWAN-paikannuksen keskimääräiseksi virheeksi 398,4 metriä ja mediaanivirheeksi 273,03 metriä[22].

Goldoni et al[45] tutkivat LoRa-paikannusta niin sisä- kuin ulkotiloissa ja keräsivät 100 RSSI-arvoa lähettimen ja vastaanottimen välillä eri etäisyyksiltä. Ulkotilapaikannuksessa mittaukset tehtiin puolen neliökilometrin kokoisella alueella käyttäen paikoillaan pysyviä päätelaitteita, jonka lisäksi osa yhdyskäytävistä oli suoran näköyhteyden päässä ja osa puolestaan näköesteen takana. Paikannuksessa hyödynnettiin paitsi trilateraatiota, myös Min-Max-algoritmia ja Maximum likelihood-algoritmia eli ML-algoritmia joita käsiteltiin luvussa 5.2. Lopputuloksena sekä Min-Max- että ML-algoritmit olivat helpompia ottaa käyttöön, mutta trilateraatio oli selvästi parempi tarkkuudeltaan kuin kumpikaan edellä mainituista. Trilateraation minimivirhe oli pienimmillään 8 metriä ja keskimääräinen virhe pahimmillaan 137 metriä, kun taas Min-Max-algoritmeilla lukemat olivat 10 metriä ja 145 metriä ja ML-algoritmeilla 13 metriä ja 424 metriä. Lisäksi tutkimuksessa huomioitiin, että paikannustarkkuuteen ulkotiloissa vaikutti useampi tekijä signaalin stabiiliudesta valittuun algoritmiin kuin yhtä lailla yhdyskäytävien sijainti päätelaitteeseen nähden. Mahdolliset epätarkkuudet näihin tekijöihin liittyen aiheuttivat peräti satojen metrien heittoja paikannustarkkuuteen[45].

Choi et al[36] suorittamassa tutkimuksessa paikannusta testattiin 340x340 metrin alueella yksityisessä LoRa-verkossa neljän yhdyskäytävän voimin, jossa yhdyskäytävillä ensin opetettiin RSSI-kartat etukäteen suoritettujen RSSI-mittauksen perusteella. Kun yhdyskäytävät oli opetettu, suoritettiin oikeat RSSI-mittaukset. Koska jokaisesta alueen paikasta ei ollut mahdollista kerätä RSSI-näytettä, muodostettiin väliin jäävistä kohdista tarvittavat RSSI-kuvat interpoloimalla mitattujen tulosten perusteella, jolloin saatiin kattava kartta mitattavasta alueesta. Lisäksi tulosten

Taulukko 5.1: Paikannus RSSI-karttojen avulla kolmella eri algoritmilla[36]

	Algoritmi 1	Algoritmi 2	Algoritmi 3
Keskimääräinen virhe	32,5 m	29,8 m	24,1 m
Virheen keskihajonta	26,5 m	24,1 m	17,8 m

parantamiseen käytettiin kolmea eri algoritmia. Yhteenveto tutkimuksen tuloksista löytyy taulukosta 5.1. Paikannusvirhe vaihteli käytetystä algoritmista riippuen 32,5 metrillä 24,1 metriin, kun puolestaan keskihajonta eri algoritmeilla oli enimmillään 26,5 metriä ja pienimmillään 17,8 metriä[36].

### 5.3.2 TDOA-pohjaiset tutkimukset

Podevijn et al[68] tutki LoRa-paikannusta julkisessa LoRaWAN-verkossa liikkuvassa noodissa hyödyntäen TDOA-menetelmää. Mittaus suoritettiin kävellen, polkupyörällä ja autolla päätelaitetta mukana kuljettaen. Mittauksessa käytetyn LoRa-verkon SF-arvoksi valittiin SF-8, koska se tarjosi parhaan suhteen mittauksen tarkkuuden ja tulosten päivittämisen suhteen (ks. osio 5.3.5). Mittauksen mediaanivirhe paikannuksessa oli noin 200 metriä ja 90% mitatuista tapauksista virhe oli alle 500 metriä[68]. Mittausarvot paranivat selvästi kun käytettiin seuranta-algoritmia, jonka avulla mediaanivirhe pieneni 74 metriin ja 90% mitatuista arvoista pääsi alle 180 metriin. Kävellessä paikannustarkkuus parani algoritmin käyttöönoton jälkeen 194 metrillä 74 metriin, pyöräillessä 249 metrillä 206 metriin ja autolla ajaessa 116 metrillä 82 metriin.

Fargas et al tutkimuksessa [40] puolestaan tarkasteltiin TDOA-paikannusta staattisten päätelaitteiden osalta yksityisessä LoRa-verkossa kaupunkiympäristössä käyttäen MALE- ja ALE-algoritmeja. MALE-algoritmissa (Mean Absolute Localization Error) laskettiin koko mittausaineistolle keskimääräinen absoluuttinen paikannusvirhe, kun taas ALE-algoritmissa (Absolute Localization Error) testattiin kaikki mahdolliset arvot yhdyskäytävien rajoittamalta alueelta ja näiden pohjalta laskettiin paikannusvirhe. Lisäksi tutkimuksessa testattiin iteratiivisten ja ei-iteratiivisten MALE-ALE-algoritmien eroja, joiden kan tuloksista lisää alaotsikossa 5.3.5. Tutkimuksen tulokset puolestaan löytyvät taulukosta 5.2. Yhdyskäytävät sijoiteltiin toisistaan 2-

Taulukko 5.2: TDOA-paikannuksen virhe iteratiivisella ja ei-iteratiivisella algoritmilla[40]

	Kohde A	Kohde B	Kohde C
MALE(ei-iteratiivinen)	5,54 km	10,72 km	9,76 km
MALE(ei-iteratiivinen, poikkeamat poistettu)	5,46 km	10,71 km	9,67 km
MALE (iteratiivinen)	1,39 km	1,09 km	1,15 km
MALE(iteratiivinen, poikkeamat poistettu)	1,38 km	1,08 km	1,12 km
ALE (ei-iteratiivinen)	167 m	89 m	427 m
ALE(ei-iteratiivinen, poikkeamat poistettu)	116 m	65 m	206 m
ALE(iteratiivinen)	167 m	175 m	136 m
ALE (iteratiivinen, poikkeamat poistettu)	119 m	127 m	114 m

3 kilometrin päähän nelikulmion muodossa ja sijoiteltiin tarpeeksi korkealle, jotta kattavuus olisi paras mahdollinen. Päätelaitteita oli kolme, joista yksi oli yhdyskäytävien rajaaman alueen sisällä, yksi alueen ulkopuolella ja yksi puolestaan erään yhdyskäytävän välittömässä läheisyydessä. Mittausarvoja verrattiin GPS:tä saatuihin tarkkoihin arvoihin. Tässä mittauksessa neljän yhdyskäytävän kantomatkan sisällä LoRaWAN-paikannuksen tarkkuus ylsi noin 100 metrin sisälle oikeasta sijainnista.

### 5.3.3 RSSI:n ja TDOA:n vertailu

Plets et al[67] suorittamassa tutkimuksessa käytiin läpi erilaisia RSSI-menetelmiä kuten Proximity-menetelmää, Centroid-menetelmää ja Map matching-menetelmää verrattuna TDOA:han. Proximity-menetelmässä tukiaseman, joka vastaanottaa vahvimman signaalin noodilta, oletetaan olevan lähimpänä noodia ja lasketaan etäisyys tämän perusteella[67]. Centroid-menetelmässä puolestaan valitaan kaksi tai kolme parhaan signaalin vastaanottavaa tukiasemaa ja paikannettava noodi asemoidaan näiden tukiasemien muodostaman alueen keskipisteeseen[67]. Map matching-menetelmässä jokainen mahdollinen ehdokas noodin sijainniksi arvoidaan path loss-mallin mukaan lasketut arvot jokaiselle kohteelle ja vertaamalla näitä mitattuihin RSSI-arvoihin[67]. Liikkuvan noodin paikannuksessa verrattiin niin kävellen, pyöräillen kuin autolla ajaen paikannuksen tarkkuutta. Mittauksissa kävi ilmi, että kun mitään tuloksia parantelevia suodattimia ei ollut käytössä, TDOA voitti kaikki RSSI-

menetelmät selvästi. TDOA:ssa mediaanivirhe vaihteli 145 ja 222 metrin välillä, kun taas maksimivirhe vaihteli 506 ja 592 metrin välillä. Vastaavasti RSSI-menetelmien mediaanivirheet vaihtelivat 734 metristä 3681 metriin ja maksimivirheet 3317 metristä 11964 metriin. Käytettäessä Road mapping-suodatinta kaikissa mitatuissa tekniikoissa RSSI- ja TDOA-menetelmien erot tasoittuivat, mutta tarkkuus oli TDOA:ssa edelleen parempi. Sitä vastoin sijaintia pystyttiin päivittämään useammin RSSI-pohjaisissa menetelmissä verrattuna TDOA:han.

#### **5.3.4 LoRa-paikannuksen ja Sigfox-paikannuksen vertailu**

Aernouts et al[22] tutkimuksessa LoRa-pohjaista TDOA-menetelmää verrattiin Sigfoxin paikannustarkkuuteen samassa ympäristössä. Taulukossa 5.3 nähdään haja-asutusalueen ja kaupunkialueiden mittaustulokset. Lora-paikannusta ei suoritettu haja-asutusalueella, toisin kuin Sigfox-paikannusta, joten ainoastaan kaupunkialueelta oli saatavilla vertailukelpoista dataa. Sigfoxin keskimääräinen virhe oli 688,97 metriä ja mediaanivirhe 514,83 metriä[22], joten LoRaWAN-paikannuksen tarkkuus oli huomattavasti parempi kuin sigfoxissa, mikä johtui luultavimmin LoRaWANin mahdollisuudesta lähettää useammin viestejä päivässä ja suuremman määrän dataa kerralla kuin Sigfox.

#### **5.3.5 Muut LoRa-paikannuksen tutkimuskohteet**

Edellä käsitellyissä LoRa-paikannuksen tutkimuksissa otettiin esiin myös muitakin LoRa-paikannuksen ominaisuuksia. Podjevin et al[68] tutkimuksessa otettiin esiin LoRan spreading factor- arvojen vaikutusta mittaustarkkuuteen. Tulokset näkyvät taulukossa 5.4. Tutkimuksessa selvisi, että mitä alhaisempi SF-arvo, sitä useammin laite kykeni lähettämään paikannuspäivityksen, mutta korkeammilla SF-arvoilla päivitysviesti otettiin vastaan paremmalla todennäköisyydellä. Useimmin vastaanotettuja paikkatiedon päivityksiä saatiin SF-arvolla 8. Paikannustarkkuudessa ei havaittu selkeää trendiä SF-arvojen välillä, joskin SF-12 arvolla paikannustarkkuus oli paras. Myös Plets et al[67] tutkimuksessa sivuttiin ihanteellisen SF-arvon käyttämistä paikannuksessa ja lopputuloksena optimaalisimmaksi SF-arvoksi TDOA:lle saatiin niin ikään SF-8, koska tällöin paikannuksen päivityksen väli ja yhydskäytävien saavutettavuus olivat parhaiten tasapainossa. Sitä vastoin RSSI:lle parhaiten sopivaksi



Taulukko 5.3: Sigfox- ja LoRaWAN-paikannuksen vertailu[22]

	Lähetetyt viestit	mediaanivirhe(m)	keskim. virhe(m)
Sigfox haja-asutus	25638	15,4	214,58
Sigfox kaupunki	14378	514,83	688,97
LoRaWAN kaupunki	123529	273,03	398,40

Taulukko 5.4: LoRan Spreading Factor-arvojen vaikutus paikannustarkkuuteen[68]

	Kantomatka	Lähetysväli	Onn. päivitykset	Mediaanivirhe	Keskihajonta
SF-7	9km	4,6s	7%	193m	163m
SF-8	12km	8,2s	19%	207m	270m
SF-9	16km	16,5s	21%	230m	171m
SF-10	21km	28,9s	29%	215m	138m
SF-11	26km	66s	48%	226m	303m
SF-12	34km	116s	31%	164m	144m

osoittautui SF-7. Myöskään tässä tutkimuksessa ei havaittu erityisiä trendejä paikannustarkkuudessa eri SF-arvojen välillä.

Podjevin et al tutkimuksessa verrattiin myös TDOA:ta samoissa mittauksissa testattuihin RSSI:n Centroid- ja Proximity-menetelmiin ja lopputuloksena TDOA peittosi molemmat tarkkuudessa helposti, sillä pelkkä TDOA ilman seuranta-algoritmia pääsi 200 metrin paikannusvirheeseen kun puolestaan Centroid jäi 2200 metriin ja Proximity peräti 2500 metriin[68].

Fargas et al[40] mittauksissa verrattiin iteratiivisen algoritmin paikannustarkkuutta ei-iteratiiviseen algoritmiin hyödyntäen MALE- ja ALE-algoritmeja. Sekä MALE- että ALE-algoritmissa suoritettiin paikannus iteratiivisena että ei-iteratiivisena. Ei-iteratiivisessa menetelmässä käytettiin yksinkertaista multilateraatiomenetelmää, jolloin mittaustulosten laskeminen oli helpompaa, mutta tulokset olivat paljon alttiimpia virheille. Iteratiivisessa menetelmässä puolestaan laskettiin geodeettiset koordinaatit, jotka ovat lähtökohtaisesti tarkempia, mutta myös hankalammin laskettavissa. Kuten taulukosta 5.2 nähdään, iteratiivinen algoritmi oli paikannustarkkuudeltaan parempi. Kääntöpuolena iteratiivinen algoritmi vaatii paljon enemmän laskentatehoa kuin ei-iteratiivinen algoritmi.

## 5.4 Yhteenveto LoRa-paikannuksesta

LoRa-paikannuksen selkeänä etuna on satelliittipaikannukseen verrattuna pieni virrankulutus, jonka lisäksi paikannus voidaan toteuttaa olemassa olevilla LoRa-päätelaitteilla ja yhdyskäytävillä. Huonona puolena LoRa-paikannuksen tarkkuus ei ole läheskään satelliittipaikannuksen luokkaa, mihin vaikuttaa etenkin hankaluus erottaa toisistaan suoraan kulkeneita signaaleja ja monitie-etenemisen kautta kulkeutuneita signaaleja, jolloin kahdella eri etäisyydellä olleet yhdyskäytävät saattavat saada tulokseksi saman etäisyyden päätelaitteelle[69].

Taulukossa 5.5 on esitettyä vertailu edellisessä kappaleessa läpikäydyistä tutkimuksista. Tuloksissa on ilmoitettu mahdollisuuksien mukaan mediaanivirhe, keskimääräinen virhe ja maksimaalinen virhe. Liikkuvien noodien tapauksessa tulokset on eritelty järjestyksessä kävelen, pyörällä ja autolla suoritettut mittaukset. Poikkeuksena tästä Aernouts et al[22] tutkimuksessa oli käsitelty ainoastaan autolla suoritettuja mittauksia. Useista mittaustuloksista valittiin pienimmän mittavirheen tulos, koska se kertoo kuinka tarkkoihin lukemiin oli käytännön mittauksissa mahdollista päästä.

LoRa-paikannuksessa on tutkittu lähinnä TDOA- ja RSSI-pohjaisia paikannusmenetelmiä sekä algoritmien vaikutusta paikannustarkkuuteen, mutta Plets et al[67] suorittamaa vertailua lukuunottamatta vastaan ei ole tullut tutkimuksia joissa olisi verrattu näitä kahta menetelmää testaamalla samassa ympäristössä. Tämän lisäksi LoRa-paikannus olisi mahdollista myös TOA-menetelmällä[36], mutta tutkimuksia tästä ei myöskään ole löytynyt, mikä johtunee hankalammasta päätelaitteen ja yhdyskäytävän synkronoinnista verrattuna TDOA:ssa tarvittavasta yhdyskäytävien keskinäisestä synkronoinnista. RSSI:tä paikannusmenetelmänä puoltaa helppo käyttöönotto[45], kun taas TDOA on lähtökohtaisesti selvästi tarkempi[38]. Lopullinen paikannustarkkuus kuitenkin riippuu niin ympäristöstä, käytettävien yhdyskäytävien määrästä kuin käytetystä algoritmistakin, joten näiden kahden menetelmän mittaustarkkuuden vertailu ei ole niin yksinkertaista. Mikäli käytetään ainoastaan LoRa-palvelimelta saatua mittaustietoa ilman parantelua, on TDOA kuitenkin selvästi tarkempi paikannusmenetelmä[38][36].

Taulukko 5.5: Vertailu LoRa-pohjaisesta etäisyysmittauksesta.

	mediaanivirhe	keskim. virhe	max.virhe
RSSI trilateraatio(Goldoni et al)[45]	-	111	-
RSSI Min-Max(Goldoni et al)[45]	-	106	-
RSSI ML(Goldoni et al)[45]	-	351	-
RSSI Proximity(Podjevin et al)[68]	2500	-	-
RSSI Proximity(Plets et al)[67]	734/1262/1455	-	5186/3687/3317
RSSI Centroid(Podjevin et al)[68]	2200	-	-
RSSI Centroid(Plets et al)[67]	2339/1867/1420	-	4879/5265/3992
RSSI Fingerprint(Aernouts et al)[22]	273,03	398,4	-
RSSI Fingerprint(Choi et al)[36]	-	24,1	-
RSSI Map matching(Plets et al)[67]	1346/1664/1137	-	4820/4656/3335
TDOA(Podjevin et al)[68]	74/206/116	-	177/358/285
TDOA(Fargas et al)[40]	-	65	-
TDOA(Plets et al)[67]	207/222/145	-	578/592/506

## 6 LoRa-paikannuksen testaaminen

Tässä kappaleessa käydään läpi LoRaWAN-paikannuksen testaus. Ensiksi esitellään suoritetuissa mittauksissa käytetty laitteisto ja Digitan LoRaWAN-verkko, jonka avulla paikannus toteutettiin, sekä esitellään mittauksissa käytetyt paikannusmenetelmät. Tämän jälkeen esitellään mittausympäristö, jossa paikantaminen on suoritettu sekä varsinainen mittaustapahtuma. Lopuksi esitellään mittaustulokset ja analysoidaan niiden antamia tietoja.

### 6.1 LoRa-paikannuksen testaussuunitelma

Suomessa Digita tarjoaa koko maanlaajuista LoRaWAN-verkkoa asiakkailleen kuin myös yksityiseen käyttöön tarkoitettuja verkkoja[9]. Vuonna 2015 koekäyttöön suomessa otetun LoRaWAN-verkon verkkopalvelu on toteutettu Actilityn ThingPark Wireless-alustan avulla[14]. Digita kuuluu Actilityn ohella LoRa-allianssiin. Actility on toteuttanut ThingParkin alustalla kaksi LoRaWAN-päätelaitteiden lähettämän tiedon analysointiin tarkoitettua verkkopalvelua: Wireless Logger(Kuva 6.1) ja Wireless Survey(Kuva 6.2).

Wireless Logger-palvelussa käyttäjä voi tarkastella laitteensa lähettämien ja vastaanottamien pakettien liikennettä pakettikohtaisesti[16]. Wireless Loggerissa lähetettyjen ja vastaanotettujen pakettien hyötykuorman sisällöt voidaan avata ja tarkastella pakettien datasisältöä. Palvelun kautta käyttäjä voi tutkia pakettien metatietoja kuten parhaimman linkin laatua ja sijaintia, käytettyä SF-arvoa, laitteiden aikaleimoja ja mikäli mahdollista, laitteen paikannustietoja. Jokaisen päätelaitteen tiedot voi suodattaa tämän Dev EUI-numeron perusteella, minkä lisäksi mittaustietojen halutun ajanjakson voi rajata. Wireless Loggerin tarjoamat tiedot saadaan ulos myös taulukkolaskentatiedoston muodossa, jolloin tietojen jatkokäsittely on helpompaa.

Network Survey-palvelussa käyttäjä voi puolestaan visualisoida laitteen paikannustietoja[16]. Päätelaitteen liikkeitä näkee kartalla samoin kuin kantaman päässä olevat yhdyskäytävät. Network Surveyssä voidaan nähdä graafisella tavalla muun

muassa käytetyt SF-arvot, vastaanotettujen signaalien voimakkuuden, yhdyskäytävien sijainnit, saavutettujen yhdyskäytävien määrän sekä liikkuvan päätelaitteen reittiä kartalla. Myös Network Survey-palvelun tiedot saadaan taulukkolaskentatiedoston muodossa jatkokäyttöä varten.

Molemmista palveluista saadaan paikannuksen kannalta oleelliset tiedot. Etäisyyden mittaamisen kannalta palveluista saadaan niin aikaleimat kuin vastaanotetun signaalin voimakkuudet sekä signaalin vastaanottaneiden yhdyskäytävien määrä. Palveluista löytyy myös lasketut etäisyydet parhaimman yhteyden tarjonneeseen yhdyskäytävään ja kyseisen yhdyskäytävän koordinaatit. Mikäli paikannus on onnistunut, löytyy palveluista päätelaitteen koordinaatit niin LoRa-paikannuksen laskemana kuin GNSS-paikantimen antamat koordinaatit, mikäli tällainen on käytössä.

### 6.1.1 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa käytettynä paikannusmenetelmänä päätettiin käyttää multilateraatiota, jossa LoRa-päätelaitteen etäisyyden mittaaminen suoritettaisiin TDOA:lla ja mikäli tällä etäisyyttä ei saataisi mitattua, käytettäisiin vaihtoehtoisesti RSSI:tä. Tärkeimpinä syinä tähän oli se, että Digitan ja Acitlityn tarjoama Thingpark ja sen palvelut tarjosivat paikannuspalvelua ensisijaisesti TDOA-pohjaisesti, mutta tarvittaessa myös RSSI:nä. Thingparkin palvelut tarjosivat paitsi itse laitteen paikannuksen GPS- ja LoRaWAN-pohjaisesti, mutta myös kaikki tarvittavat paikantamiseen vaadittavat mittaustiedot. Tämän lisäksi minkäänlaisia mittaustuloksia parantavia mittausalgoritmeja ei aiottu käyttää ja paikannuksen tulisi olla samalla mahdollisimman tarkka ja helppo ottaa käyttöön. RSSI-pohjainen etäisyysmittaus olisi käytännössä helpointa toteuttaa, mutta kuten aiemmista tutkimuksista on käynyt ilmi[38][36][67], on RSSI-pohjaisen etäisyysmittauksen virhe niin suuri verrattuna TDOA:han, että ilman parantavia algoritmeja niiden hyödyntäminen ei olisi mielekäästä. Täten TDOA tarjoaa helppokäyttöisyyden ja mittaustarkkuuden suhteen parhaimman kompromissin.

Paikannusta varten Digitalta saatiin käyttöön paikannussovellus Gelocation solver, joka tulee Digitan hyödyntämän Thingparkin kautta. Yhdyskäytäviltä saadut LoRa-viestien tiedot lähetetään palvelimelle, joka puolestaan siirtää tarvittavat tie-

WIRELESS-LOGGER Last Update: 2019-08-24 18:31:35

Dashboard [ 100006325 ]

Device Filtering:  Clear Device Filtering: 0018820000001C55 Clear LRC ID Filtering:  Clear LRC ID Filtering:  Clear AS ID Filtering:  Clear AS ID Filtering:  Clear Logout

From:  To:

Decoder: raw

Auto Reload: no Expand All:

Refresh Export size: 100 Export Map

Last packets

UTC Timestamp	Local Timestamp	DevAddr	DevEUI	Port	FcCnt	NFCnt	AFcCnt	RSSI	SNR	ESP	SFDR	Subband	Channel	LRC ID
2019-08-17 08:14:50.572	2019-08-17 11:14:48.572	E0023939	0018820000001C55	1	2						SF9	G3	RX2	0000201
2019-08-17 08:14:48.971	2019-08-17 11:14:48.971	E0023939	0018820000001C55	None	3									0000201
Device [Lat (sat): 63.861057 Lon (sat): 23.424942 Loc (sat): 23.424942 Loc (radius): 5000.0 Loc (time): 2019-08-17 10:14:48.971 Alt: 0.0 Alt (radius): 0.0 Acc: 0.0 North Velocity: 0.0 East Velocity: 0.0]														
2019-08-17 08:14:48.577	2019-08-17 11:14:48.577	E0023939	0018820000001C55	1	3			-119.0	-8.5	-128.02	SF12	G2	LC8	0000201
2019-08-17 08:14:48.572	2019-08-17 11:14:48.572	E0023939	0018820000001C55	1	3			-111.0	-5.5	-117.57	SF12	G2	LC8	0000201
2019-08-17 08:14:41.049	2019-08-17 11:14:41.049	E0023939	0018820000001C55	0	1						SF9	G3	RX2	0000201
2019-08-17 08:14:39.471	2019-08-17 11:14:39.471	E0023939	0018820000001C55	None	2									0000201
2019-08-17 08:14:39.074	2019-08-17 11:14:39.074	E0023939	0018820000001C55	1	2			-119.0	-8.0	-127.63	SF12	G2	LC4	0000201
2019-08-17 08:14:39.049	2019-08-17 11:14:39.049	E0023939	0018820000001C55	1	2			-113.0	-3.25	-114.68	SF12	G2	LC4	0000201
2019-08-17 08:14:31.197	2019-08-17 11:14:31.197	E0023939	0018820000001C55	0	0						SF12	G3	RX2	0000201
2019-08-17 08:14:29.661	2019-08-17 11:14:29.661	E0023939	0018820000001C55	None	1									0000201
2019-08-17 08:14:29.212	2019-08-17 11:14:29.212	E0023939	0018820000001C55	1	1			-119.0	-3.75	-124.27	SF12	G1	LC3	0000201

Page 1

V7.2.7 Copyright Activilly 2017

Kuva 6.1: Kuvakaappaus ThingPark Wireless Logger-palvelusta



dot kuten aikaleimat erilliselle Geolocation solverille, joka laskee sijainnin arvioitujen etäisyyksien avulla. Laskennan jälkeen Geolocation solver lähettää sijaintitiedon palvelimelle, joka puolestaan välittää tämän erilliselle sovellukselle, jonka kautta käyttäjä saa laitteen paikkatiedon selville. Paikannuksen tuloksen pystyi näkemään niin Wireless Logger-palvelussa kuin Network Survey-palvelussa. Käyttöön saadussa Geolocation Solverissa oli mukana kolme erilaista mittausmenetelmää. Kolmesta mittausmenetelmästä ensimmäisessä hyödynnettiin sekä TDOA:ta että RSSI:tä, kun taas kahdessa jälkimmäisessä käytettiin pelkästään TDOA:ta.

Ensimmäinen mittausmenetelmä on "TDOA RSSI", jossa etäisyyslaskenta ensisijaisesti suoritetaan TDOA:n perusteella ja mikäli se ei onnistu, etäisyysmittaus tehdään RSSI:n perusteella. RSSI:n tukemana paikannus saadaan todennäköisemmin suoritettua, mutta mikäli tähän joudutaan turvautumaan, paikannuksen tarkkuus kärsii merkittävästi. Lisäksi mittausmenetelmä käyttää tiedonsiirron optimoivaa ADR-mekanismia tiedonsiirtonopeuden optimoimiseksi ja energiankulutuksen minimoimiseksi[7]. Tukiasemia tulee olla vähintään kolme laitteen kantaman (n. 15 km) etäisyydellä, jotta paikantaminen olisi mahdollista. Digitalta saatujen dokumenttien perusteella TDOA/RSSI-mittausmenetelmä valikoi yhdyskäytävänsä siten, että parhaimman RSSI-arvon antava yhdyskäytävä valikoidaan lähimmäksi yhdyskäytäväksi ja loput tarvittavat yhdyskäytävät ovat puolestaan ne, jotka ovat lähinnä lähimmäksi arvioitua yhdyskäytävää.

Kun ADR otetaan käyttöön, päätelaite asettaa ADR-bitin päälle ja LoRa-verkko alkaa keräämään mittaustietoja lähetetyistä uplink-viesteistä. Kun ADR:n käyttöön oton jälkeen on tehty 20 mittausta, voidaan niiden perusteella selvittää parhaimman yhteyden tarjoava yhdyskäytävä. Kun tämä on saatu selville, lasketaan turvamarginaali yhdyskäytävän signaali-kohina-suhteesta, jolloin joko tiedonsiirtonopeutta voidaan kasvattaa tai lähetystehoa pienentää. ADR:n käyttö edellyttää, että olosuhteet pysyvät stabiileina ja paikannettava noodi paikoillaan, joten mikäli laite liikkuu tai olosuhteet muuttuvat, ADR asetetaan pois päältä. Kun ADR-bitti asetetaan uudestaan päälle olosuhteiden salliessa, on suoritettava uudet yhteyden laadun mitaukset, sillä aikaisemmat mittaustiedot on hylätty kun ADR otettiin edellisen keran pois käytöstä.

Toinen mittausmenetelmä on "TDOA no ADR tuning", joka hyödyntää niin ikään



TDOA:ta, mutta ilman ADR:ää eli tiedonsiirtonopeutta ei optimoida. ADR:n käyttö LoRa-verkossa on erittäin suositeltavaa aina kun mahdollista, mutta toisinaan sen käyttäminen ei ole mahdollista. Mikäli päätelaite liikkuu tai RF-olosuhteet eivät pysy stabiileina (esimerkiksi päätelaitteen ja yhdyskäytävän väliin ilmestyy este), ei ADR:ää voida hyödyntää[7]. Tässä mittausmenetelmässä käytetään ainoastaan TDOA:ta, joten paikannusta ei suoriteta mikäli se etäisyysarvio ole TDOA:lla laskettavissa.

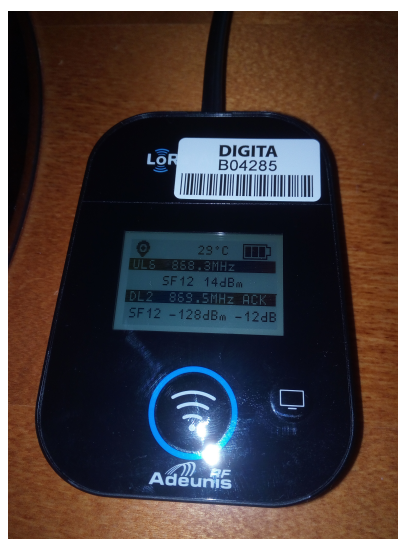
Kolmas mittausmenetelmä on "TDOA no ADR tuning SF10-12", joka on puolestaan muutoin samanlainen kuin toinen mittausmenetelmä, paitsi Spreading factor-arvot on lukittu välille SF10-SF12. Kuten on jo aiemmin todettu, SF-arvojen ollessa korkeita yhdyskäytävien saavutettavuus paranee mutta samanaikaisesti päivitystiheys harvenee[68][67]. Sitä vastoin aiempien tutkimusten perusteella korkeampia SF-arvoja käytettäessä ei mittaustarkkuuden pitäisi muuttua merkittävästi. Mittausmenetelmässä käytetään ainoastaan TDOA:ta, joten paikannusta ei suoriteta mikäli etäisyysarvio ei ole TDOA:lla laskettavissa.

### **6.1.2 Laitteisto**

Paikannettavana LoRa-päätelaitteena käytetään Adeunisin LoRa/Sigfox-verkon testauslaitetta(ks. kuva 6.3), joka sisältää myös GPS-paikantimen[3]. Päätelaitteen Lora-paikannusta verrataan laitteen GPS-paikantimen antamiin koordinaatteihin. Vaikka GPS-paikannus ei olekaan absoluuttisen tarkka, on se kuitenkin tässä tapauksessa riittävän tarkka toimiakseen verrokkina LoRa-paikannukselle. LoRa-paikannuksen sijainti puolestaan lasketaan päätelaitteen lähettämien LoRa-viestien tiedoista Digtan palvelun kautta. Verkon testauslaitteen kantama on arviolta ulkotiloissa maksimissaan 15 kilometriä[4]. Laite lähettää testisignaalia joko oletusarvoisesti ennalta määrätyn ajanjakson tai manuaalisesti painamalla laitteen lähetysnappia. Laite näyttää GPS-koordinaattien lisäksi signaalin voimakkuuden, lähetykseen käytetyn SF-arvon, vastaanotettujen ja lähetettyjen pakettien määrän sekä lämpötilan.

### **6.1.3 Mittausympäristö**

LoRa-paikannuksen testaamiseen tarvittiin maantieteellinen sijainti, joka olisi vähintään kolmen yhdyskäytävän kantoalueella ja lisäksi mittapisteiden tulisi sijaita mieluiten mahdollisimman lähellä nykyistä asuinseutua Keski-Pohjanmaan ja



Kuva 6.3: Työssä käytetty LoRa-päätelaite

Pohjois-Pohjanmaan rajalla. Mittauspaikkojen tuli olla tarkasti samoja joka mittauskerralla, jolloin voitaisiin verrata eri menetelmien tarkkuutta toisiinsa. On kuitenkin huomioitava, että tismalleen samanlaisia mittausolosuhteita ei saada eri mittauskerroille, sillä samoilla mittauspaikoilla pelkästään sääolosuhteet aiheuttavat vaihtelevuutta mittausarvoihin[58]. Saman mittauskerran GPS- ja LoRa-koordinaatit saatiin yhdellä ja samalla laitteella samaan aikaan, jolloin näiden osalta mittausvirheitä pystyttiin minimoimaan.

Sopivan mittauspaikan löytäminen lähiseudulta osoittautui haastavaksi, sillä yhdyskäytäviä ei ollut Keski-Pohjanmaan alueella kovin tiheään ja niiden tuli olla noin 15 kilometrin etäisyydellä päätelaitteesta, jotta paikannus saataisiin suoritettua. Kokkolassa yhdyskäytäviä löytyi kaksi ja Kälviän keskustassa yksi, minkä lisäksi Alavetelistä löytyi kaksi yhdyskäytävää (ks. taulukko 6.2). Sopivan paikan löytämiseksi suoritettiin ympäri Kokkolan aluetta useita alustavia testauksia, jotta nähtäisiin, pystyttäisikö paikannusta suorittamaan. Apuna sopivan paikan löytämisessä hyödynnettiin myös Thingparkin Network Survey-palvelua sekä Digi-tan LoRaWAN-peittokarttaa[19]. Mittaukset suoritettiin lopulta Rimmissä (ks. kuva 6.5), joka sijaitsee Kokkolassa Vitsarin ja Kotkamaan välisessä ympäristössä noin 10

kilometrin päässä Kokkolan keskustasta. Ympäristö on suhteellisen harvaan asuttua havumetsän peittämää aluetta, jota rikkoo peltoalueet. Virallisiksi mittauspisteiksi valikoitui lopulta kolme mittauspaikkaa (ks. taulukko 6.1).

Kokkolan ympäristössä suoritettujen paikannusmittausten lisäksi saatiin mitaustuloksia Turun keskustassa otetuista LoRaWAN-paikannuksista, koska siellä yhdyskäytäviä oli tiheämmässä kuin ensisijaisella mittausalueella Kokkolassa, jolloin saataisiin paremmalla todennäköisyydellä mittausdataa. Mika Silvennoinen suoritti mittaukset kahtena eri päivänä useammasta kohteesta, joista virallisiksi mittauspisteiksi valikoitui Kokkolan mittausten tapaan kolme paikkaa. Seuraavaksi esitellään lyhyesti kaikki kuusi Kokkolan ja Turun mittauspaikat.

Mittauspaikka A (ks. kuva 6.4) sijaitsi Hakkuuaukion laidalla Rimmintien varressa. Paikan luonteesta johtuen puustoa ei ollut kumpaankaan suuntaan mittauspaikasta nähden.

Mittauspaikka B (ks. kuva 6.4) sijaitsi Kotkamaantien ja Klapurintien risteyksessä. Mittauspaikkaa ympäröi tiheä havumetsä.

Mittauspaikka C (ks. kuva 6.4) sijaitsi Rimmissä junaradan varressa alikulun yläpuolella. Radan toisella puolella oli pienimuotoista asutusta ja toisella puolella rataa alkoi metsäalue. Mittauspaikalla alue oli kuitenkin puuton.

Mittauspaikka D sijaitsi Turun keskustassa Aurajoen ylittävän sillan päässä, Itäisen Rantakadun vieressä.

Mittauspaikka E sijaitsi Turun keskustassa Aurasillan kupeessa.

Mittauspaikka F sijaitsi Turun keskustassa Aurajoen ylittävän sillan toisessa päässä, Läntisen Rantakadun varrella.



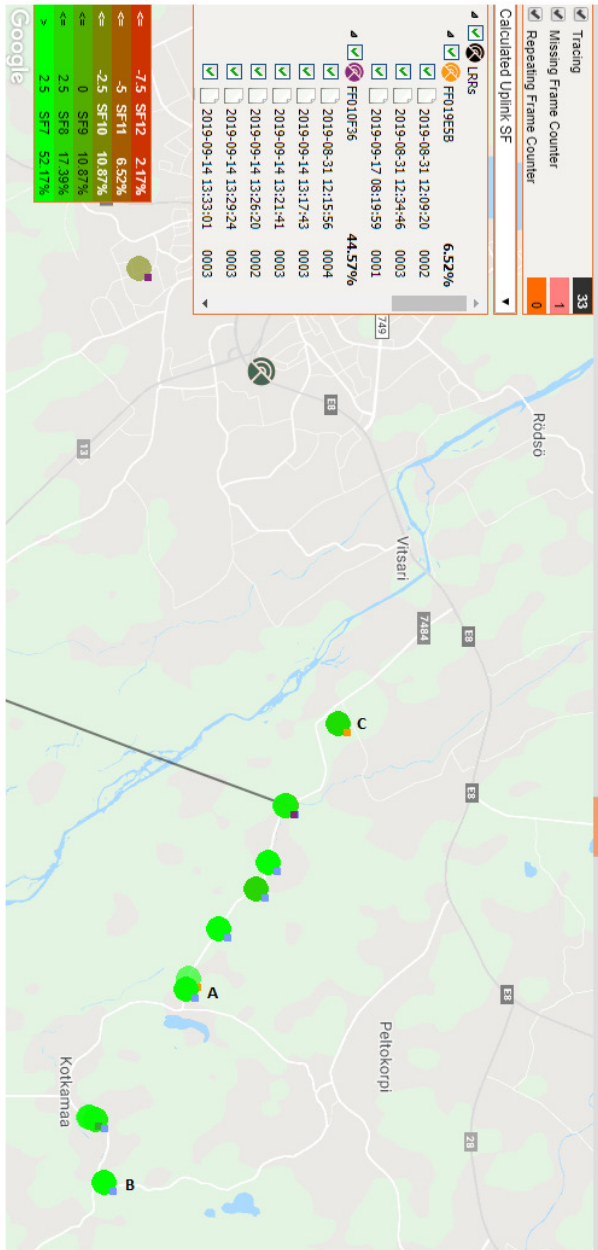
Kuva 6.4: Kokkolan mittauspaikat: Ylhäällä mittauspaikka A, alhaalla vasemmalla mittauspaikka B ja alhaalla oikealla mittauspiste C

## 6.2 LoRa-paikannuksen toteutus

Jokaisessa mittapisteessä paikannus aloitettiin käynnistämällä päätelaite ja antamalla sen ottaa ensimmäinen mittausta itsestään. Tämän jälkeen suoritettiin samassa paikassa yhdestä kahteen uusintamittausta painamalla laitteen mittaussäädintä, jolloin laite aloitti paikannuksen uudestaan välittömästi. Paikannuksen yhteydessä LoRa-päätelaitteen ruudulla näkyi signaalin voimakkuus, käytetty SF-arvo, lähetettyjen viestien määrä, sekä GPS-koordinaatit. LoRaWAN-paikannuksen ja GPS-paikannuksen ero saatiin selvittämällä näiden antamat koordinaatit ja mittaamalla etäisyys Google Maps-palvelun mittaustyökalulla. Ilmoitettu mittausero ei ole täten tarkoin mahdollinen, mutta koska LoRa-paikannuksen mittausero pyörii pienimmilläänkin kymmenissä metreissä, joten mittauseron suuruusluokka tulee tarpeeksi hyvin selville.

LoRa-paikannuksen testauspäivät olivat Kokkolassa 31.8.2019 ja 17.9.2019. Ensimmäisenä mittauspäivänä sää oli pilvinen mutta poutainen. Toisena mittauspäivänä sää oli niin ikään pilvinen ja aamulla oli satanut, mutta mittausten aikana sää pysyi poutaisena. Ensimmäisenä mittauspäivänä käytettiin TDOA RSSI-mittaussuunnitelmaa, kun taas toisena mittauspäivänä hyödynnettiin TDOA no ADR tuning-mittaussuunnitelmaa. Alun perin oli tarkoituksena suorittaa mittaukset myös käyttämällä TDOA no ADR tuning SF10-12-mittaussuunnitelmaa, mutta koska niin ikään pelkästään TDOA:han pohjautuva TDOA no ADR tuning-mittaussuunnitelma ei onnistunut paikantamaan sijaintia lainkaan, jätettiin mittausta tämän osalta tekemättä. Pitkälti tämän vuoksi suoritettiin Turussa lisämittauksia, jotta nähtäisiin TDOA-mittauksen toimivuutta ja eri mittaussuunnitelmien tarkkuuksien eroavuuksia.

Mittaukset Turussa suoritettiin 30.9.2019 (kuva 6.6) ja 6.10.2019 (kuva 6.7). Turun mittauksissa käytettiin sekä TDOA RSSI- että TDOA no ADR tuning-mittaussuunnitelmia. Turun mittauksissa huomattiin, että GPS antoi aavistuksen oikeasta sijainnista poikkeavia tuloksia kun sitä verrattiin tarkasti tiedettyyn maantieteelliseen paikkaan. Koska paikan tarkkoja koordinaatteja ei ole tiedossa, käytettiin GPS-tietoa referenssipisteenä tiedostaen että se ei välttämättä vastaa aivan tarkasti oikeaa sijaintia.



Kuva 6.5: Mittauspaikat A, B ja C Kokkolassa

### 6.3 Mittaustulokset

Useista Kokkolan ympäristössä suoritetuista mittauksista huolimatta tulokset osoittautuivat pettymyksiksi. Keski-Pohjanmaalla LoRa-yhdyskäytävien määrä ja sijoittuminen eivät ole paikannuksen kannalta optimaalisia, joten paikkoja joissa vähintään kolme yhdyskäytävää olisi ollut kantaman päässä ei löytynyt useista etsintäkerroista huolimatta. Ainoastaan TDOA RSSI tarjosi laskettuja sijainteja (ks. taulukko 6.3), mutta joka kerralla koordinaatit osoittivat kauas oikeasta sijainnista. Useimmiten laskettu sijainti oli kartalla lähellä jotain yhdyskäytävää. Pelkällä TDOA-mittauksella toimineet mittausten menetelmät TDOA no ADR tuning ja TDOA no ADR tuning SF10-12 eivät puolestaan antaneet minkäänlaista paikannustietoa, joten TDOA-mittaus ei tällöin ollut onnistunut. Täten TDOA RSSI mittasi RSSI-perustaisesti ja luultavasti tästä syystä mittaustulokset olivat kaukana oikeasta sijainnista. Kuten luvuissa 5.1 ja 5.3.3 oli kerrottu, aikaisemmissa tutkimuksissa parantelemattoman RSSI-paikannuksen mittausrvirhe oli kilometrien suuruusluokassa, joten kovin hyvää paikannustulosta ei voitu tällä mittaustavalla odottaakaan. Tämän lisäksi yhdyskäytävien sijainnit eivät olleet geometrian kannalta ideaaleja, koska Kokkolan ja Alavetelin yhdyskäytävät sijaitsivat suhteellisen lähellä toisiaan. Laitteessa ollut GPS-paikannin sai sijainnin kohtuullisen lähelle mittauspistettä. Mittauspaikan ympäristöllä oli luultavasti väliä ainakin laitteen saavuttamien yhdyskäytävien määrässä, sillä suhteellisen pienelläkin maantieteellisellä alueella niiden määrä vaihteli yllättävän paljon, kuten Turussa TDOA no ADR tuning-mittauksessa mittauspaikekojen D ja E tapauksessa, jossa mittapaikka D yhteydessä havaittiin vain kolme yhdyskäytävää ja E:n tapauksessa peräti seitsemän (ks. taulukko 6.5).

Turusta saadut mittaustiedot olivat huomattavasti parempia LoRaWAN-paikannuksen analysointia varten (ks. taulukot 6.4 ja 6.5), sillä kaupungin keskustan alueella oli viisi yhdyskäytävää lyhyen kantaman päässä. Täten kumpanakin mittauspäivänä saatiin jokaiseen pisteeseen riittävästi yhdyskäytäviä paikannusta varten. Valikoidut paikannuksen tulokset vaihtelivat muutamasta kymmenestä metrillä vaajaan pariin sataan metriin, mutta näiden tulosten ulkopuolella löytyi huomattavasti huonompiakin mittausten paikannustarkkuuksia. Eri mittausten menetelmien tarkkuuksissa ei ollut suuria eroavuuksia, vaikkakin TDOA ilman ADR:ää tuotti prosentuaalisesti enemmän mittaustuloksia alle 200 metrin päähän GPS:n antamasta sijainnista (TDOA no ADR tuning 39,47% ja TDOA RSSI 34,12%, (kuvat 6.6 ja 6.7), kun taas TDOA RSSI-mittaussuunnitelmalla saatiin kaikkein tarkimmat mittaustulokset.

Taulukko 6.1: Mittauspaikat

	GPS-koordinaatit	Kuvaus
Paikka A	63.8247 23.334833	Hakkuuaukion laita
Paikka B	63.8142 23.393	Risteys Kotkamaantien päässä
Paikka C	63.843617 23.2625	Junaradan varsi
Paikka D	60.446767 22.264667	Aurajoen ylittävän sillan pää Turussa
Paikka E	60.4484 22.270333	Aurasillan pää Turussa
Paikka F	60.447317 22.264	Aurajoen ylittävän sillan vastakkainen pää Turussa

vot (TDOA RSSI 27,21m ja TDOA no ADR tuning 97,39m, taulukot 6.4 ja 6.5). Tämän lisäksi on huomioitava, että TDOA RSSI-mittausmenetelmän sessioissa saatiin huomattavasti enemmän mittaustuloksia kuin "TDOA no ADR tuning-mittausmenetelmällä.

Taulukoissa 6.4 ja 6.5 näkyvät sekä GPS:n antamat verrokkikoordinaatit että LoRaWAN-paikannuksen perusteella saadut koordinaattitiedot, jolloin on saatu sijaintien välinen erotus kuvaamaan mittaustarkkuutta. GPS:ää on käytetty referenssiarvona tietäen, että sekään ei ole täysin tarkka sijainti. Lisäksi taulukoista löytyvät havaittujen yhdyskäytävien määrä, lähimmäksi arvioidun yhdyskäytävän paikkatieto RSSI-arvoineen, sekä kolmen lähimmäksi arvioidun yhdyskäytävän lasketut etäisyydet päätelaitteeseen. Kuten taulukoista näkee, RSSI-arvo indikoi etäisyyttä yhdyskäytävään, jolloin lähempänä päätelaitetta ollut yhdyskäytävä on saanut useimmiten paremman RSSI-arvon. Mutta kuten aikaisemmin on todettu, siirtotiellä olevat häiriöt voivat vääristää RSSI-arvoja, jolloin oikeasti lähempänä oleva yhdyskäytävä on saattanut saada huonomman RSSI-arvon kuin kauempana oleva yhdyskäytävä, useimmiten signaalin tiellä olevien esteiden takia. Ja kuten seuraavassa kappaleessa tullaan huomaamaan, eivät lähimmäksi arvioidut yhdyskäytävät ole välttämättä oikeasti lähimpänä päätelaitetta, johtuen mittausmenetelmien tavasta arvioida lähimpänä olevat yhdyskäytävät.

### 6.3.1 Pohdintoja mittaustuloksista

Kuten mittaustuloksista selvisi, paikantaminen LoRaWAN-verkon avulla Kokkolan seudulla ei onnistunut. Tähän on helppo keksiä useitakin eri tekijöitä. Ensiksi-kin LoRaWAN-yhdyskäytävien määrä Keski-Pohjanmaan alueella on vielä nykyi-



Taulukko 6.2: Mittausalueen yhdyskäytävät

	GPS-koordinaatit	Kuvaus
Yhdyskäytävä A	63.833809 23.162704	Kokkolassa Yliopistokeskuksen rakennuksen päällä
Yhdyskäytävä B	63.83736 23.119688	Kokkolassa vanha vesitorni keskustassa
Yhdyskäytävä C	63.861092 23.424862	Kälviällä vesitornin luona
Yhdyskäytävä D	63.735004 23.504702	Alavetelissä saarukassa 1. yhdyskäytävä
Yhdyskäytävä E	63.735191 23.505096	Alavetelissä saarukassa 2. yhdyskäytävä, ei GPS:ää

Taulukko 6.3: LoRan paikannustulokset TDOA/RSSI-menetelmällä

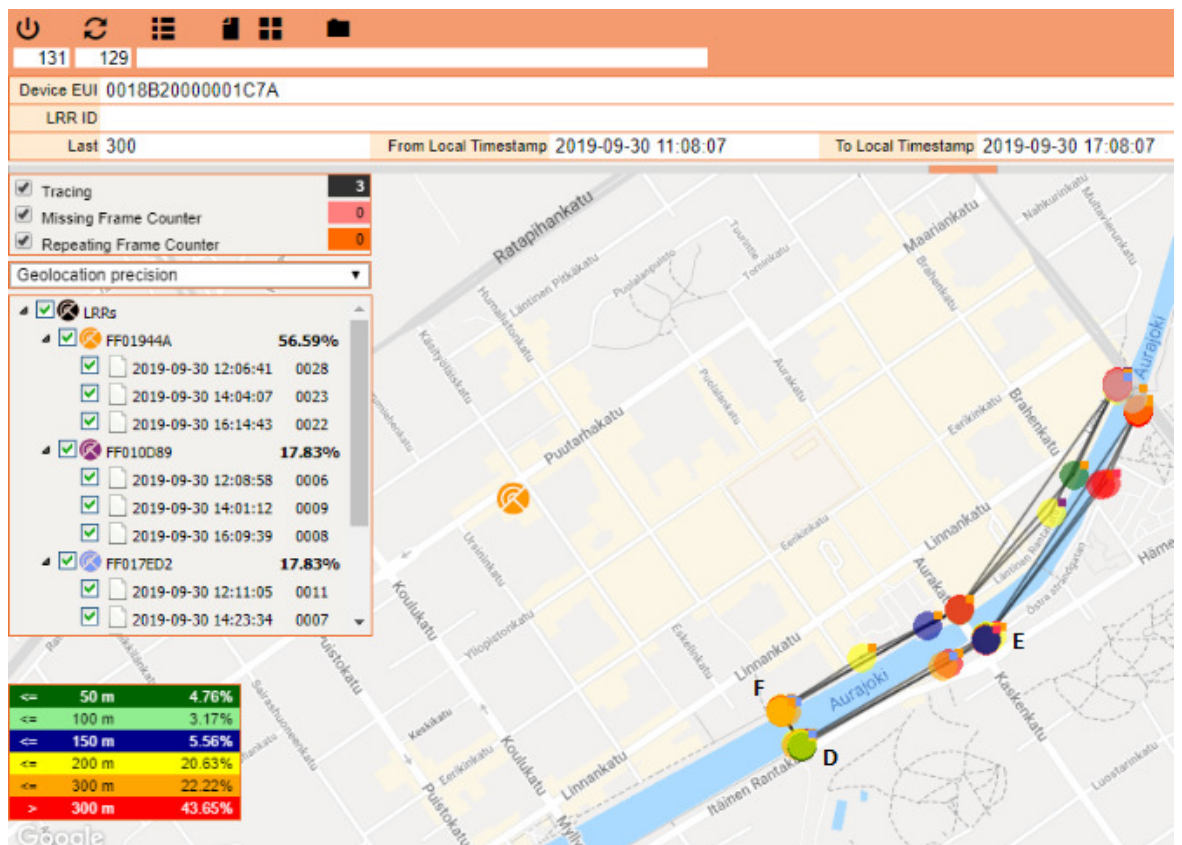
	Paikkatieto	Yhdyskäytävien lkm	Paikka-estimaatti	Erotus GPS:ään(m)	Lähimmän yhdyskäytävän RSSI (dBm)	Lähin yhdyskäytävä	Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)	2. Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)	3. Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)
Paikka A	63.8247 23.334833	4	63.73513 23.504967	13000	-111	63.861092 23.424862	5994	13000	13010
Paikka B	63.814133 23.393	5	63.735867 23.505127	10300	-104	63.735191 23.505096	10375	10370	5450
Paikka C	63.843617 23.2625	5	63.860832 23.424944	8190	-107	63.861057 23.424923	8201	16950	16950

Taulukko 6.4: LoRan paikannustulokset TDOA/RSSI-menetelmällä Turussa

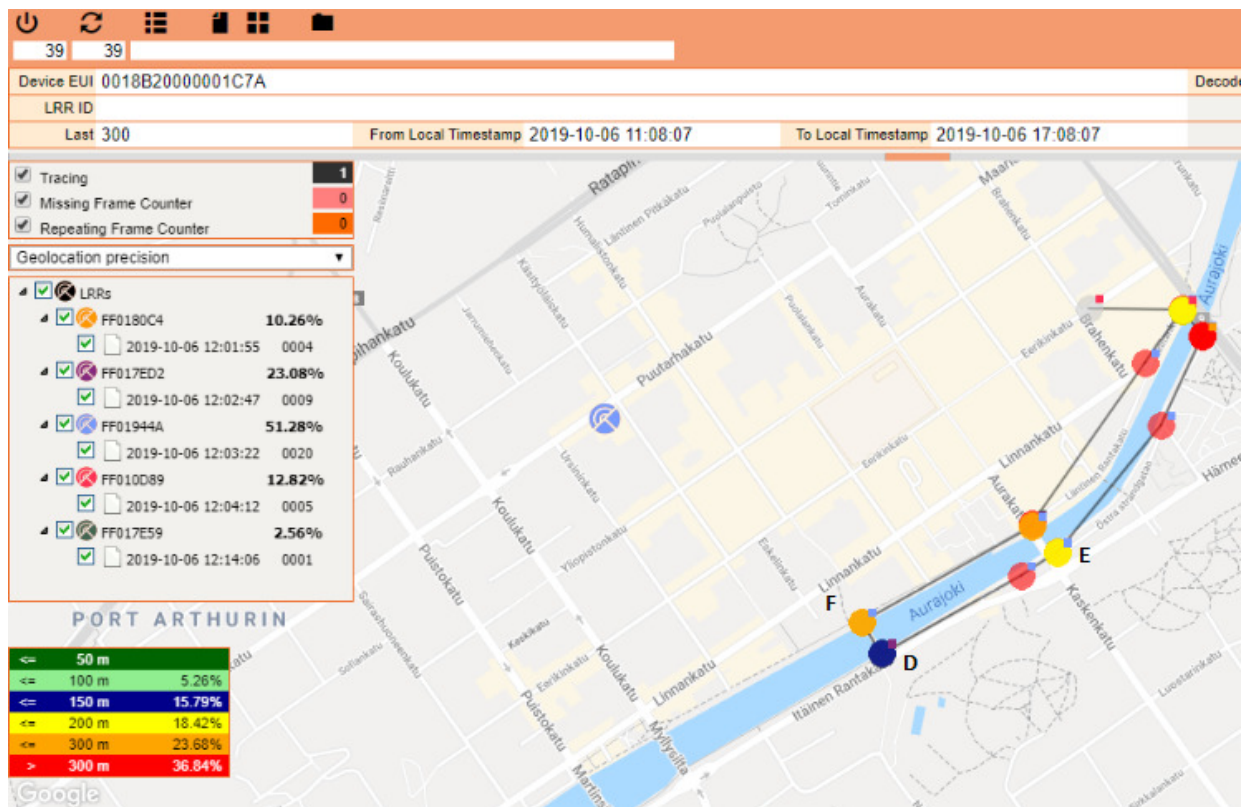
	Paikkatieto	Yhdyskäytävien lkm	Paikka-estimaatti	Erotus GPS:ään(m)	Lähimmän yhdyskäytävän RSSI (dBm)	Lähin yhdyskäytävä	Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)	2. Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)	3. Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)
Paikka D	60.446767 22.264667	4	60.44695 22.264997	27,21	-96	60.450527 22.255791	385,73	642	2850
Paikka E	60.4484 22.270333	4	60.448322 22.268389	106,79	-107	60.443741 22.26811	533	2400	3400
Paikka F	60.447317 22.264	4	60.447784 22.260723	187,19	-94	60.443741 22.26811	458	573,56	3750

Taulukko 6.5: LoRan paikannustulokset TDOA ilman ADR:ää-menetelmällä Turussa

	Paikkatieto	Yhdyskäytävien lkm	Paikka-estimaatti	Erotus GPS:ään(m)	Lähimmän yhdyskäytävän RSSI (dBm)	Lähin yhdyskäytävä	Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)	2. Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)	3. Lähin yhdyskäytävä etäisyys(m)
Paikka D	60.446783 22.264667	3	60.445988 22.263731	102,2	-93	60.443729 22.268118	389	2480	3710
Paikka E	60.447283 22.264	7	60.448086 22.264709	97,39	-98	60.443729 22.268118	456	576,94	3740
Paikka F	60.448417 22.270333	6	60.447758 22.267624	165,69	-91	60.450527 22.255716	836	534,29	2400



Kuva 6.6: Mittauspaikat D, E ja F Turussa TDOA/RSSI-menetelmällä



Kuva 6.7: Mittauspaikat D, E ja F Turussa TDOA ilman ADR:ää-menetelmällä

sellään varsin pieni, minkä lisäksi ne sijaitsevat varsin etäällä toisistaan. Tämä on sinänsä hyvin ymmärrettävää, sillä LoRaWAN-verkko on ollut Suomessa vasta lyhyen aikaa ja harvat yhdyskäytävät on sijoitettu siten, että maanlaajuinen kattavuus toteutuisi. Tällöin paikantaminen ei ole etusijalla yhdyskäytävien sijoittelun suhteen.

Toiseksi mittauspaikkojen maasto ei ollut kaikkein ideaalein paikannuksen onnistumisen kannalta. Mittauspaikat sijaitsivat usein korkean puuston tai jonkin muun merkittävän esteen läheisyydessä, jolloin tarkkoja paikannustuloksia olisi muutenkin ollut haasteellista saada. Kuten aikaisemmin on todettu, myös GNSS ei ole omimmillaan puuston ollessa tiellä. Toisaalta myös paikannustekniikan kannalta haasteellisissa ympäristöissä kuuluu testata, sillä tuolloin myös näiden puutteet ja rajoitteet tulevat selvimmän esiin.

Näiden lisäksi eräs merkittävä paikannuksen epäonnistumiseen vaikuttanut asia selvisi otettuani yhteyttä Digitaan asian tiimoilta. Nimittäin kaikissa Digitan LoRaWAN-yhdyskäytävissä ei ole GNSS-paikanninta, jolloin niiden käyttäminen TDOA-pohjaiseen paikannukseen on täysin hyödytöntä. Kävi myös ilmi, että yksi Kokkolan mittausalueen yhdyskäytävistä oli juuri tällainen, joten TDOA-paikannuksen epäonnistuminen johtui ainakin osittain tästä. Suurin osa Digitan yhdyskäytävistä on kyllä varustettu GNSS-paikantimilla, mutta mikäli sellainen osuu alueelle, jossa yhdyskäytäviä on muutenkin harvakseltaan, on paikannuksen epäonnistuminen entistä todennäköisempää.

Eräs kiinnostava yksityiskohta liittyi päätelaitteen saavuttamien yhdyskäytävien määrään. Thingparkin palvelussa näkyi mittauspaikkojen kohdalla useiden kymmenien kilmoterien päässä olevia yhdyskäytäviä, kasvattaen kuulevien yhdyskäytävien määrää kyseisen mittauspaikan kohdalla. Ilmeisesti päätelaite kykeni saavuttamaan ihanteellisella paikalla kauempanakin olevia yhdyskäytäviä, joista se sai RSSI- ja SNR-arvot paikannuksen arvioimista varten TDOA/RSSI-mittausmenetelmässä. Esimerkiksi Kokkolan alueen mittauksissa päätelaite havaitsi vajaan 40 kilometrin päässä olevan Kannuksen yhdyskäytävän ja Turun mittauksissa puolestaan Raision asema näkyi saavutettujen yhdyskäytävien määrässä.

Kuten aiemmin todettiin TDOA/RSSI-mittausmenetelmä valikoi yhdyskäytä-

vänsä siten, että parhaimman RSSI-arvon antava yhdyskäytävä valikoidaan lähimmäksi yhdyskäytäväksi ja loput tarvittavat yhdyskäytävät ovat puolestaan ne, jotka ovat lähinnä lähimmäksi arvioitua yhdyskäytävää. Täten mittauksiin ei välttämättä valikoidu ne yhdyskäytävät, jotka olisivat oikeasti lähimpänä päätelaitetta. Tämä myös näkyi mittaustuloksissa, joissa lähimmäksi RSSI-arvon perusteella arvioitu yhdyskäytävä ei aina ollutkaan se joka oli lähimpänä päätelaitetta tai kolmas yhdyskäytävä ollut aina se kaukaisin kolmesta yhdyskäytävästä.

Kaikki tämä ei kuitenkaan tarkoita että LoRaWAN-pohjainen paikannus olisi jatkossakin poissuljettu mahdollisuus vaikkapa Keski-Pohjanmaan alueella. LoRaWAN-verkkoa on tarkoitus laajentaa lähivuosina entisestään sijoittamalla niitä tiheämpään, jolloin paikannuksen onnistumisen todennäköisyys kasvaa. Lisäksi keskusteluissa tuli selville myös se, että Digitan tarkoitus on varustaa myös loputkin yhdyskäytävät GNSS-paikantimilla, jotta jokainen niistä voisi jatkossa toimia LoRaWAN-paikannuksen apuna.

Turussa kaupunkialueella suoritettut mittaukset puolestaan osoittivat, että LoRaWAN-paikannus toimii, kunhan yhdyskäytäviä on alueella tarpeeksi paljon tarpeeksi lähellä. Mittaustuloksista selvisi kuitenkin myös sekin, että LoRaWAN-paikannuksen tarkkuus heittelehti varsin paljon suhteellisen lähekkäin suoritetuissa mittauksissa ja pääsääntöisesti paikannustarkkuus heitti yli sata metriä GNSS-paikantimen antamasta sijainnista.

### **6.3.2 Analyysi LoRaWAN-paikannuksen virheistä**

Koska LoRaWAN-paikannus antoi jopa Turun keskustassa lähekkäisissäkin paikoissa toisistaan paljonkin eroavia tuloksia, kuten kuvassa 6.8 näkyy ja Keski-Pohjanmaalla suoritettujen mittausten tulokset olivat käyttökelvottomia, on hyvä pohtia muutamia syitä mistä LoRaWAN-paikannuksen virheet saattavat johtua. Virheen määrän vaikuttavia tekijöitä on ainakin kolme: Etäisyyden mittauksesta aiheutuvat virheet, referenssipisteiden eli paikannuksessa käytettävien yhdyskäytävien sijoittuminen toisiinsa nähden sekä yhdyskäytävien sijainnin tarkkuus.

Tyypillinen paikannusvirhettä aiheuttava tekijä on luonnollisesti etäisyyden mittauksen aiheuttama virhe. Erilaiset esteet ja häiriösignaalit aiheuttavat virhettä niin RSSI-arvoihin kuin signaalin kulku-aikaan, kuten aikaisemmin tässä työssä ollaan

huomattu. On hyvin mahdollista, että kaksi eri etäisyydellä olevaa yhdyskäytävää ovatkin RSSI-signaalin tai kulkuajan perusteella yhtä lähellä tai peräti kauempana oleva yhdyskäytävä näyttäisi olevan lähempänä. Tämä näkyi myös mittauksissa, sillä aina lähimmäksi arviotu yhdyskäytävä ei ollut kartan perusteella noodia lähimpänä.

Toinen virhetyyppi on geometrinen virhe, eli valittujen referenssiasemien sijainti toisiinsa ja paikannettavaan noodiin nähden. Kuten aikasemmin selvisi Digitan paikannusratkaisun käyttäessä RSSI:tä lähimmäksi yhdyskäytäväksi valikoitui se jonka RSSI-arvo oli paras eikä se joka oli lähimpänä. Tämän lisäksi muut referenssiasemat valikoituvat sen perusteella, kuinka lähellä nämä olivat lähintä yhdyskäytävää. Tässä tapauksessa referenssiasemat eivät valikoidu kaikkein optimaalisimmalla tavalla ja mikäli yhdyskäytävät ovat sijoittuneet joko lähekkäin tai samaan tasoon paikannettavaan noodiin nähden lopputuloksena voi olla pahasti väärään paikkaan osoittava sijainti. Kuvassa 6.8 näkyvässä esimerkissä kaksi Turun mittauspistettä olivat 10 metrin etäisyydellä toisistaan ja erot lähimpien yhdyskäytävien ja paikannustarkkuuden osalta ovat huomattavia, sillä Thingparkin Geolocation Solver-sovelluksen paikannustarkkuutta metreissä laskeva Geoloc Precision-arvo on toisessa paikassa 157 ja toisessa 300. Geoloc Precision-arvossa otetaan huomioon mittausvirheen ja kohinan vaikutus sekä yhdyskäytävien spatiaalinen sijoittuminen josta lasketaan paikannuksen laskettujen koordinaattien virhe.

Kolmantena syynä paikannusvirheille aiheutuu yhdyskäytävien epätarkasta sijainnista. Jos yhdyskäytävien tarkkaa sijaintia ei ole tiedossa, on näiden käyttäminen paikannukseen käytännössä mahdotonta. Tämä ei tosin ollut ongelma työssä suoritetuissa mittauksissa, sillä käytettyjen referenssipisteiden sijainti oli tiedossa.

Näitä edellä mainittuja virheitä voidaan parantaa muutamilla tavoilla. Etäisyyden mittauksessa ilmenee virhettä jatkossakin, käyttipä mitä menetelmää hyvänsä, mutta käyttämällä lähtökohtaisesti vähiten mittausvirhettä tuottavaa menetelmää eli TDOA:ta virheet olisivat minimaalisempia. RSSI on tietyistä eduista huolimatta lähtökohtaisesti varsin epätarkka, joten sen käyttöä olisi vältettävä, ellei käytössä ole jotain tarkkuutta selvästi parantavaa algoritmia. Geometriset virheet korjautuisivat paitsi yhdyskäytävien määrää lisäämällä ja niiden sijoittelua parantelemalla, myös ottamalla käyttöön fiksummin toimivia algoritmeja. Edes optimaalisella yh-

Dev EUI	DevAddr	Dev LAT	Dev LONG	Geoloc LAT	Geoloc LONG	Geoloc Precision	Local Timestamp	
0018B20000001C7A	E0026E75	60.446817	22.2645	60.445477	22.263624	157	2019-09-30 14:29:40	
UPLINK								
Frame Counter		Logical Channel			Real SF	GW Count		
20		LC4			9	7		
LRR Id	LRR LAT	LRR LONG	Distance	RSSI	SNR	Calculated SF	Noise + Interferer power	ESP
FF010D89	60.447033	22.332239	3719	-114	-0.75	SF9	-116.7	-117.401474
FF017ED2				-94	-1	SF9	-96.5	-97.53902
FF0180C4				-108	-2	SF9	-110.1	-112.12443
FF01944A				-89	-3	SF10	-90.8	-93.76435
FF01774D				-116	-8.25	SF12	-116.6	-124.85556
FF017E61				-114	-10	SF12	-114.4	-124.413925
FF018943				-115	-12	SF12	-115.3	-127.265724
PAYLOAD (Adeunis LoRaWan FTD)								
Header	BTN1 was triggered							
Temperature	19 °C							
Latitude	60.446817							
Longitude	22.2645							
Qualite	58							

Dev EUI	DevAddr	Dev LAT	Dev LONG	Geoloc LAT	Geoloc LONG	Geoloc Precision	Local Timestamp	
0018B20000001C7A	E0026E75	60.446817	22.264667	60.444141	22.264071	300	2019-09-30 12:34:36	
UPLINK								
Frame Counter		Logical Channel			Real SF	GW Count		
21		LC3			9	8		
LRR Id	LRR LAT	LRR LONG	Distance	RSSI	SNR	Calculated SF	Noise + Interferer power	ESP
FF01944A	60.450527	22.255791	639	-91	15	SF7	-106.1	-91.13521
FF017ED2				-100	11	SF7	-111.3	-100.331955
FF0180C4				-108	0	SF9	-111	-111.0103
FF017E61				-109	-8	SF12	-109.6	-117.63892
FF010D89				-106	-8	SF12	-106.6	-114.63892
FF019C2D				-111	-9.75	SF12	-111.4	-121.187256
FF01787E				-110	-11	SF12	-110.3	-121.331955
FF017E59				-115	-12	SF12	-115.3	-127.265724
PAYLOAD (Adeunis LoRaWan FTD)								
Header	BTN1 was triggered							
Temperature	19 °C							
Latitude	60.446817							
Longitude	22.264667							

Kuva 6.8: Kahden lähekkäisen Turun mittauspaikan paikannustiedot

dyskäytävien sijoittelulla ja tiheydellä virhettä saattaa ilmetä, mikäli referenssipisteet valitaan lähimmän yhdyskäytävän ympärillä olevien referenssipisteiden perusteella. Jos algoritmi kykenisi valikoimaan referenssipisteet geometrisesti järkevämmiin perusteisiin, vaikka itse algoritmistakin tulisikin monimutkaisempi, saataisiin paikannuksen onnistuminen todennäköisemmäksi. Kaikkien yhdyskäytävien varustaminen GPS-paikantimilla on puolestaan varsin helppo keino korjata yhdyskäytävien epätarkan sijainnin ongelmat ja Digitan verkossa nämä ollaan korjaamassa lähitulevaisuudessa.

### 6.3.3 Analyysi LoRaWAN-paikannuksen käyttökelpoisuudesta

Tässä tutkimuksessa on käyty perusteellisesti läpi LoRa-paikannuksen teoreettista taustaa, LoRa-paikannuksesta tehtyjä vertaisarvioituja tutkimuksia ja lopuksi suoritettu omia mittauksia aiheeseen liittyen. Näiden pohjalta voidaan suorittaa arviota LoRa-paikannuksen käyttökelpoisuudesta nyt ja tulevaisuudessa. Pohdintoja esitetään myös LoRa-paikannuksen toimivuudesta Suomen olosuhteissa.

Luvussa 5.3 läpikäytyjen aikaisempien tutkimusten ja tässä gradussa suoritettujen mittausten perusteella LoRaWAN-paikannus kykenee paikantamaan riittävällä tarkkuudella, jos tarkkuuden ei tarvitse olla kymmenien metrien säteellä oikeasta arvosta. Aikaisemmat tutkimukset ovat näyttäneet, että LoRaWAN-paikannus kykenee parhaimmillaan alle sadan metrin päähän halutusta pisteestä. On myöskin huomioitava, että myöskään GNSS-paikannus ei ole täsmällisen tarkka, vaan myös senkin antamassa paikkatiedossa on kymmenien metrien heittoa oikeaan arvoon, riippuen mittausympäristöstä.

Toimiakseen paikannustarkoituksessa LoRaWAN-verkon tulee kuitenkin olla riittävän tiheään ja oikein sijoiteltu, jotta paikannuksesta olisi mitään iloa. Koska Suomen LoRaWAN-verkko on ensisijaisesti rakennettu mahdollisimman kattavaksi, tarkoittaa se sitä, että tällä hetkellä LoRa-pohjainen paikannus on käyttökelvoton suurimmassa osassa Suomea. Parhaimmillaan paikannusta voidaan hyödyntää suurien kaupunkien alueella, jossa yhdyskäytäviä on tiheämmässä.

Sekä gradun yhteydessä suoritettujen mittausten, että aikaisemman tutkimuksen perusteella on varsin selvää, että TDOA on mielekkäin etäisyyden mittaamisen



keino. RSSI-pohjaiset mittausten virhe on niin suuri, että sillä ei ole paikannuskäytössä mitään käyttöä. Erilaisilla algoritmeilla RSSI-pohjaista etäisyysmittaustan voidaan parantaa huomattavasti, mutta tuolloinkaan näiden menetelmien tarkkuus ei ole ollut TDOA-pohjaisten mittausten menetelmien tasolla.

## 7 Johtopäätökset

Vaikka satelliittipaikannus, joista GPS on ilmeisin esimerkki, onkin monessa suhteessa erittäin hyvä paikannusmenetelmä nyt ja tulevaisuudessa, on muillekin paikannusmenetelmille tilausta, kuten tässä dokumentissa on tullut esille. Langattomassa verkoissa ja niiden radioissa hyödynnetyt paikannusmenetelmät tarjoavat tällä hetkellä potentiaalisimman vaihtoehdon satelliittipaikannuksen vaihtoehdoksi ja erityisesti laajemmille maantieteellisille alueille ovat pitkän kantaman langattomat verkot ja niiden paikannusmenetelmät kiinnostava vaihtoehto. LPWAN-tekniologioiden tuoreuden ja useiden eri kilpailevien vaihtoehtojen vuoksi on hankala sanoa, mitkä nykyisistä pitkän kantaman radioteknologioista ovat jatkossakin laajamittaisesti käytössä ja täten käyttökelpoisia paikannukseen. Tutkimuksen keskiössä oleva LoRa vaikuttaa hyvältä vaihtoehdolta pitkän kantamansa vuoksi, minkä lisäksi se on saanut jalansijaa maailmalla oikeasti käytössä olevana radiotekniikkana. Tämän lisäksi on huomautettava, että radiotekniikoiden erilaisten kantamien ja ominaisuuksien vuoksi useammankin tekniikan rinnakkaiselo on täysin luontevaa. Kuten aikaisemmin huomattiin, pelkästään pitkän kantaman radiotekniikoissa oli ominaisuuksien puolesta merkittäviä eroja.

Varsinainen tutkimusaihe, LoRa-radion hyödyntäminen paikannuksessa, tuotti vaihtelevia tuloksia. Kokkolassa mittauksissa paikannustulokset jäivät hyödyttömiksi, sillä LoRa-verkko Keski-Pohjanmaan alueella oli liian harvassa toimiakseen paikannuskäytössä. Toisaalta Turussa suoritettut mittaukset ja gradua varten läpikäyty vertaisarvioidut tutkimukset osoittivat, että LoRa-paikannuksella päästään parhaimmillaan varsin hyväänkin tarkkuuteen. LoRan hyödyntämisessä paikannustarkoitukseen on monia etuja verrattuna lähtökohtaiseen paikannusmenetelmään eli GNSS:ään. Vaikka mittaustarkkuudessa LoRa häviääkin GNSS:lle, on sillä vastapainoksi etuina edullisuus ja pieni virrakulutus minkä lisäksi lisälaitteita ei tarvitse hankkia paikannusta varten LoRa-radion ollessa itsessään paikannusväline. Jotta LoRa-paikannus yleistyisi, edellyttää se uusien LoRa-yhdyskäytävien rakentamista riittävän lähelläkin toisiaan ja geometrisesti järkevästi sijoiteltuna. Tämä asettaa vielä haasteita Suomessa nykyisellä yhdyskäytävien tiheydellä, mutta Digi-

tan mukaan LoRa-verkkoa ollaan lisäämässä juurikin paikannusta silmälläpitäen, kunhan verkko alkaa olla kattava koko maan laajuudessa.

Koska LoRa-paikannusta on tutkittu vasta muutaman vuoden ajan, on aiheessa vielä paljon läpikäytävää. Kattava eri etäisyydenmittausmenetelmien vertailu LoRan yhteydessä olisi erittäin hyödyllinen. Tämän lisäksi eri mittausalgoritmien vaikutuksesta LoRa-paikannuksen tarkkuuteen löytyy tehtävää, sillä useita eri vaihtoehtoja on jo nyt kehitelty ja uusia algoritmeja kehitellään jatkuvasti. LoRa-verkon kehittyessä voidaan myös eri puolella Suomea suorittaa paikannusmittauksia, niin kaupungeissa kuin harvaanasutummilla seuduilla. LoRa-verkon tihentyessä voidaan tehdä testauksia myös paikannuksen kannalta hankalammissa paikoissa, jolloin nähtäisiin kuinka paljon paikannus kärsii tästä. LoRan lisäksi myös muut lyhyen ja pitkän kantaman verkot ovat potentiaalisia paikannustutkimuksen kohteita kuten LoRan kilpailevat tekniikat Sigfox ja NB-IoT.

Lopputuloksena saatiin tutkimus, jossa käytiin läpi kohtalaisen kattavasti LoRa-paikannuksen nykytilanne ja kehityskohteet. Lisäksi pääasiallisen tutkimuksen ohessa saatiin kokoon laaja paketti niin lyhyen kuin pitkän kantaman verkoista. Toivottavasti dokumentin yleiskatsauksesta on hyötyä tuleville lopputyön tekijöille tiiviinä tietopakettina langattomien verkkojen paikannuksesta.

## Lähteet

- [1] Cisco wireless gateway for lorawan datasheet. URL <https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/wireless-gateway-lorawan/index.html>, viitattu 28.1.2019.
- [2] Cdma/ca - carrier sensing multiple access / collision avoidance. URL <https://www.mpirical.com/glossary/cdma-ca-carrier-sensing-multiple-access-collision-avoidance>, viitattu 20.2.2020.
- [3] Field test device. URL <https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-868-915-2/>, viitattu 31.5.2019.
- [4] Field test device user guide version v1.2.2. URL [https://www.adeunis.com/wp-content/uploads/2017/08/FTD\\_LoRaWAN\\_EU863-870\\_UG\\_FR\\_GB\\_V1.2.2-1.pdf](https://www.adeunis.com/wp-content/uploads/2017/08/FTD_LoRaWAN_EU863-870_UG_FR_GB_V1.2.2-1.pdf), viitattu 4.6.2019.
- [5] Lora geo server. URL <https://www.loraserver.io/lora-geo-server/overview/>, viitattu 29.1.2019.
- [6] Lora geo server requirements. URL <https://www.loraserver.io/lora-geo-server/install/requirements/>, viitattu 29.1.2019.
- [7] Lorawan adaptive data rate. URL <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adr.html>, viitattu 31.7.2019.
- [8] Lorawan gateways. URL <https://tektelic.com/iot/lorawan-gateways/>, viitattu 28.1.2019.
- [9] Mikä on lorawan? URL [https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika\\_on\\_lorawan](https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika_on_lorawan), viitattu 4.6.2019.
- [10] Sigfox for m2m and iot. URL <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/sigfox/what-is-sigfox-basics-m2m-iot.php>, viitattu 16.4.2019, viitattu 29.1.2019.
- [11] Wanesy geolocation solution. URL <https://www.kerlink.com/iot-solutions-services/geolocation-solution/>, viitattu 29.1.2019.

- [12] Wi-fi certification. URL <https://www.wi-fi.org/certification>, viitattu 2.6.2018.
- [13] Wirnet ibts. URL <https://www.kerlink.com/product/wirnet-ibts/>, viitattu 28.1.2019.
- [14] Actility ja lähetysverkko-operaattori digita ottaneet koekäyttöön lora-verkon, 12 2015. URL [https://www.digita.fi/medialle/tiedotteet/vanhemmat/2015/actility\\_ja\\_lahetysverkko-operaattori\\_digita\\_ottaneet\\_koekayttoon\\_lora-verkon.4293.news](https://www.digita.fi/medialle/tiedotteet/vanhemmat/2015/actility_ja_lahetysverkko-operaattori_digita_ottaneet_koekayttoon_lora-verkon.4293.news), viitattu 29.7.2019.
- [15] Digita rakentaa esineiden internetin mahdollistavan verkon koko suomeen, 2016. URL [https://www.digita.fi/yrityksille/digita\\_news\\_artikkelit/iot-verkko\\_laajenee\\_koko\\_suomeen](https://www.digita.fi/yrityksille/digita_news_artikkelit/iot-verkko_laajenee_koko_suomeen), viitattu 9.4.2018.
- [16] Actility thingpark geolocationsolution trial pack, 2017. URL [https://www.actility.com/wp-content/uploads/Downloads/White\\_papers/LoRaWAN\\_Geolocation\\_Trial\\_Pack\\_03\\_WEB.pdf](https://www.actility.com/wp-content/uploads/Downloads/White_papers/LoRaWAN_Geolocation_Trial_Pack_03_WEB.pdf), viitattu 27.8.2019.
- [17] Sigfox technical overview, 2017.
- [18] Cdma/ca definition and explanation of the method, 08 2019. URL <https://www.ionos.co.uk/digitalguide/server/know-how/csmaca-carrier-sense-multiple-access-with-collision-avoidance/>, viitattu 6.2.2020.
- [19] Digita iot-peittoalueet, 06 2019. URL <https://digitaiot.navici.com/>, viitattu 4.6.2019.
- [20] ABDULQADER HUSSEIN, A., RAHMAN, T., JA LEOW, C. Performance evaluation of localization accuracy for a log-normal shadow fading wireless sensor network under physical barrier attacks. *Sensors* 15, 12 (2015), 30545–30570.
- [21] ADELANTADO, F., VILAJOSANA, X., Tuset-PEIRO, P., MARTINEZ, B., MELIA-SEGUI, J., JA WATTEYNE, T. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications magazine* 55, 9 (2017), 34–40.
- [22] AERNOUTS, M., BERKVEN, R., VAN VLAENDEREN, K., JA WEYN, M. Sigfox and lorawan datasets for fingerprint localization in large urban and rural areas. *Data* 3, 2 (2018), 13.

- [23] ALRAJEH, N. A., BASHIR, M., JA SHAMS, B. Localization techniques in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9, 6 (2013), 304628.
- [24] ARAS, E., RAMACHANDRAN, G. S., LAWRENCE, P., JA HUGHES, D. Exploring the security vulnerabilities of lora. *Julkaisusarjassa 2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF)* (2017), IEEE, 1–6.
- [25] AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T., JA TOWNSLEY, W. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors* 16, 9 (2016), 1466.
- [26] BACHRACH, J., JA TAYLOR, C. Localization in sensor networks. *Handbook of sensor networks: Algorithms and Architectures 1* (2005), 277–289.
- [27] BAÑOS-GONZALEZ, V., AFAQUI, M. S., LOPEZ-AGUILERA, E., JA GARCIA-VILLEGAS, E. Ieee 802.11 ah: A technology to face the iot challenge. *Sensors* 16, 11 (2016), 1960.
- [28] BENAZZOUZ, O., PINHEIRO, L. M., MATIAS, L. M., AFILHADO, A., HEROLD, D., JA HAINES, S. S. Accurate ocean bottom seismometer positioning method inspired by multilateration technique. *Mathematical Geosciences* 50, 5 (2018), 569–584.
- [29] BURATTI, C., CONTI, A., DARDARI, D., JA VERDONE, R. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors* 9, 9 (2009), 6869–6896.
- [30] CASTELLS-RUFAS, D., GALIN-PONS, A., JA CARRABINA, J. The regulation of unlicensed sub-ghz bands: Are stronger restrictions required for lpwan-based iot success? *arXiv preprint arXiv:1812.00031* (2018).
- [31] CATTANI, M., BOANO, C., JA RÖMER, K. An experimental evaluation of the reliability of lora long-range low-power wireless communication. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 6, 2 (2017), 7.
- [32] CHAITANYA, D. E., GANESH, L., JA RAO, G. S. Performance analysis of hyperbolic multilateration using circular error probability. *Procedia Computer Science* 85 (2016), 676–682.

- [33] CHALLOO, R., OLADEINDE, A., YILMAZER, N., OZCELIK, S., JA CHALLOO, L. An overview and assessment of wireless technologies and co-existence of zigbee, bluetooth and wi-fi devices. *Procedia Computer Science* 12 (2012), 386–391.
- [34] CHANDRA, A., BISWAS, S., GHOSH, B., BISWAS, N., BRANTE, G., JA SOUZA, R. D. Energy efficient relay placement in dual hop 802.15. 4 networks. *Wireless personal communications* 75, 4 (2014), 1947–1967.
- [35] CHEON, J., HWANG, H., KIM, D., JA JUNG, Y. Ieee 802.15. 4 zigbee-based time-of-arrival estimation for wireless sensor networks. *Sensors* 16, 2 (2016), 203.
- [36] CHOI, W., CHANG, Y.-S., JUNG, Y., JA SONG, J. Low-power lora signal-based outdoor positioning using fingerprint algorithm. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 11 (2018), 440.
- [37] COLLOTTA, M., PAU, G., TALTY, T., JA TONGUZ, O. K. Bluetooth 5: A concrete step forward toward the iot. *IEEE Communications Magazine* 56, 7 (2018), 125–131.
- [38] COMMITTEE, L. A. S., ET AL. Lorawan geolocation whitepaper. *LoRa Alliance, January* (2018), 2018–04.
- [39] DJUKNIC, G. M., JA RICHTON, R. E. Geolocation and assisted gps. *Computer* 34, 2 (2001), 123–125.
- [40] FARGAS, B. C., JA PETERSEN, M. N. Gps-free geolocation using lora in low-power wans. *Julkaisusarjassa 2017 global internet of things summit (Giots)* (2017), IEEE, 1–6.
- [41] FINK, A., JA BEIKIRCH, H. Analysis of rss-based location estimation techniques in fading environments. *Julkaisusarjassa 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation* (2011), IEEE, 1–6.
- [42] FINNEGAN, J., JA BROWN, S. A comparative survey of lpwa networking. *arXiv preprint arXiv:1802.04222* (2018).
- [43] GARELLO, R., SAMSON, J., SPIRITO, M., JA WYMEERSCH, H. Peer-to-peer cooperative positioning. *Inside Gnss* (2012).

- [44] GARELLO, R., SAMSON, J., SPIRITO, M. A., JA WYMEERSCH, H. Peer-to-peer cooperative positioning part ii: Hybrid devices with gnss & terrestrial ranging capability. *Inside GNSS* 7, 4 (2012), 56–64.
- [45] GOLDONI, E., PRANDO, L., VIZZIELLO, A., SAVAZZI, P., JA GAMBA, P. Experimental data set analysis of rssi-based indoor and outdoor localization in lora networks. *Internet Technology Letters* 2, 1 (2019), e75.
- [46] GOURSAUD, C., JA GORCE, J.-M. Dedicated networks for iot: Phy/mac state of the art and challenges.
- [47] HALFACREE, G. Lora alliance releases lorawan 1.1 standard, 11 2017. URL <https://abopen.com/news/lora-alliance-releases-lorawan-1-1-standard/>, viitattu 11.4.2018.
- [48] HASAN, M., THAKUR, J. M., JA PODDER, P. Design and implementation of fhss and dsss for secure data transmission. *International journal of signal processing systems* 4, 2 (2016), 144–149.
- [49] HUIRCÁN, J. I., MUÑOZ, C., YOUNG, H., VON DOSSOW, L., BUSTOS, J., VIVALLO, G., JA TONEATTI, M. Zigbee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 2 (2010), 258–264.
- [50] JAWAD, H., NORDIN, R., GHARGHAN, S., JAWAD, A., JA ISMAIL, M. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors* 17, 8 (2017), 1781.
- [51] JIN, B., XU, X., JA ZHANG, T. Robust time-difference-of-arrival (tdoa) localization using weighted least squares with cone tangent plane constraint. *Sensors* 18, 3 (2018), 778.
- [52] KANNAN, A. A., FIDAN, B., MAO, G., JA ANDERSON, B. D. Analysis of flip ambiguities in distributed network localization. *Julkaisusarjassa 2007 Information, Decision and Control* (2007), IEEE, 193–198.
- [53] KIM, B., JA HWANG, K.-I. Cooperative downlink listening for low-power long-range wide-area network. *Sustainability* 9, 4 (2017), 627.
- [54] KIM, S., JA YOO, Y. Contention-aware adaptive data rate for throughput optimization in lorawan. *Sensors* 18, 6 (2018), 1716.



- [55] KNIGHT, M., JA SEEBER, B. Decoding lora: Realizing a modern lpwan with sdr. *Julkaisusarjassa Proceedings of the GNU Radio Conference* (2016), vol. 1.
- [56] KRISHAN, R., JA LAXMI, V. Ieee 802.11 wlan load balancing for network performance enhancement. *Procedia Computer Science* 57 (2015), 493–499.
- [57] LAOUDIAS, C., MOREIRA, A., KIM, S., LEE, S., WIROLA, L., JA FISCHIONE, C. A survey of enabling technologies for network localization, tracking, and navigation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20, 4 (2018), 3607–3644.
- [58] LUOMALA, J., JA HAKALA, I. Effects of temperature and humidity on radio signal strength in outdoor wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (2015), IEEE, 1247–1255.
- [59] MARDENI, R., JA OTHMAN, S. N. Efficient mobile asset tracking and localization in zigbee wireless network. *Journal of Advances in Computer Networks* 3, 1 (2015), 1–6.
- [60] MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F., JA MEYER, F. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ict express* (2018). *Press.[Google Scholar]* (2017).
- [61] MILLER, R. Lora security: Building a secure lora solution. *MWR Labs Whitepaper* (2016).
- [62] MOTLAGH, O., TANG, S., ISMAIL, N., JA RAMLI, A. A review on positioning techniques and technologies: a novel ai approach. *Journal of Applied Sciences* 9, 9 (2009), 1601–1614.
- [63] NAZIR, U., SHAHID, N., ARSHAD, M., JA RAZA, S. H. Classification of localization algorithms for wireless sensor network: A survey. *Julkaisusarjassa 2012 International conference on open source systems and technologies* (2012), IEEE, 1–5.
- [64] PATWARI, N., ASH, J. N., KYPEROUNTAS, S., HERO, A. O., MOSES, R. L., JA CORREAL, N. S. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal processing magazine* 22, 4 (2005), 54–69.
- [65] PAUL, A., JA SATO, T. Localization in wireless sensor networks: a survey on algorithms, measurement techniques, applications and challenges. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 6, 4 (2017), 24.

- [66] PETÄJÄJÄRVI, J., MIKHAYLOV, K., PETTISSALO, M., JANHUNEN, J., JA IINATTI, J. Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13, 3 (2017), 1550147717699412.
- [67] PLETS, D., PODEVIJN, N., TROGH, J., MARTENS, L., JA JOSEPH, W. Experimental performance evaluation of outdoor tdoa and rss positioning in a public lora network. *Julkaisusarjassa 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (2018), IEEE, 1–8.
- [68] PODEVIJN, N., PLETS, D., TROGH, J., MARTENS, L., SUANET, P., HENDRIKSE, K., JA JOSEPH, W. Tdoa-based outdoor positioning with tracking algorithm in a public lora network. *Wireless Communications and Mobile Computing 2018* (2018).
- [69] RAY, B. Lora localization, 6 2016. URL <https://www.link-labs.com/blog/lora-localization>, viitattu 5.6.2018.
- [70] RAZA, U., KULKARNI, P., JA SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19, 2 (2017), 855–873.
- [71] RONDÓN, R., GIDLUND, M., JA LANDERNÄS, K. Evaluating bluetooth low energy suitability for time-critical industrial iot applications. *International Journal of Wireless Information Networks* 24, 3 (2017), 278–290.
- [72] RONG, P., JA SICHITIU, M. L. Angle of arrival localization for wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2006 3rd annual IEEE communications society on sensor and ad hoc communications and networks* (2006), vol. 1, Ieee, 374–382.
- [73] SALMAN, N., RASOOL, I., JA KEMP, A. H. Overview of the ieee 802.15. 4 standards family for low rate wireless personal area networks. *Julkaisusarjassa 2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems* (2010), IEEE, 701–705.
- [74] SAYED, A. H., JA YOUSEF, N. R. Wireless location. *Wiley Encyclopedia of Telecommunications* (2003).
- [75] SINGH, S. P., JA SHARMA, S. Range free localization techniques in wireless sensor networks: A review. *Procedia Computer Science* 57 (2015), 7–16.

- [76] SINHA, R. S., WEI, Y., JA HWANG, S.-H. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. *Ict Express* 3, 1 (2017), 14–21.
- [77] SORNIN, N., JA YEGIN, A. Lorawan 1.1 specification. *LoRa Alliance* (2017).
- [78] TALL, H., CHALHOUB, G., JA MISSON, M. Implementation and performance evaluation of ieee 802.15. 4 unslotted csma/ca protocol on contiki os. *Annals of Telecommunications* 71, 9-10 (2016), 517–526.
- [79] TARRÍO, P., BERNARDOS, A. M., JA CASAR, J. R. An energy-efficient strategy for accurate distance estimation in wireless sensor networks. *Sensors* 12, 11 (2012), 15438–15466.
- [80] TWAVE TECHNOLOGIES. *SMOVE: LoRaWAN Accelerometer*, 2017.
- [81] VAQUERIZO-HDEZ, D., MUÑOZ, P., F BARRERO, D., ET AL. A low power consumption algorithm for efficient energy consumption in zigbee motes. *Sensors* 17, 10 (2017), 2179.
- [82] VIJAY, B., JA MALARKODI, B. Improved qos in wlan using ieee 802.11 e. *Procedia Computer Science* 89 (2016), 17–26.
- [83] WANG, J., GHOSH, R. K., JA DAS, S. K. A survey on sensor localization. *Journal of Control Theory and Applications* 8, 1 (2010), 2–11.
- [84] ZAFARI, F., GKELIAS, A., JA LEUNG, K. A survey of indoor localization systems and technologies. arxiv 2017. *arXiv preprint arXiv:1709.01015*.
- [85] ZHANG, A., YE, X., JA HU, H. Point in triangle testing based trilateration localization algorithm in wireless sensor networks. *TIIIS* 6, 10 (2012), 2567–2586.