



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

LORA IOT -RADION SOVELTUVUUS KÄYTETTYJEN TYÖKONEIDEN TIEDONSIIRTOON

Lassi Hasu

Opinnäytetyö
Elokuu 2017
Konetekniikka
Koneautomaatio



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Koneautomaatio

HASU, LASSI:

LoRa IoT -radion soveltuvuus käytettyjen työkoneiden tiedonsiirtoon

Opinnäytetyö 62 sivua
Elokuu 2017

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia LoRa-radiotekniikan soveltuvuutta lastinkäsittelylaitteiden tuottaman datan tiedonsiirtoon. LoRa on teollisen internetin sovelluksia varten kehitetty pitkän kantaman radiotekniikka. Tavoitteena oli löytää käyttötapauksia, joihin LoRa-tekniikka soveltuu etsittäessä kustannustehokasta radiotekniikkaa erityisesti käytettyihin lastinkäsittelylaitteisiin. Työn toimeksiantaja oli Cargotec Finland Oy:n Kalmar-liiketoimintayksikkö. Työn tutkimusmenetelmänä käytettiin laadullista tutkimusta, jota tuettiin käytännössä empiirisen tutkimuksen menetelmin. Tutkimuksessa LoRa-teknologiaa verrattiin muihin IoT-sovelluksissa tyypillisesti käytettyihin tiedonsiirtotekniikoihin. Opinnäytetyössä perehdyttiin tekniikan toimintaan ja suorituskykyyn, jo sovellettuihin käyttökohteisiin sekä testattiin teknologian toimintaa käytännössä vaihtelevissa rakennetuissa ympäristöissä.

Tähän asti lastinkäsittelylaitteiden langaton tiedonsiirto on tyypillisesti toteutettu WLAN- tai LTE-teknologian avulla. Uusia, erityisesti IoT-sovelluksiin suunniteltuja tiedonsiirtotekniikoita LoRa:n lisäksi ovat esimerkiksi ZigBee, Sigfox ja NB-IOT. Yhteistä näille teknologioille ovat pieni virrankulutus ja suhteellisen alhainen tiedonsiirtokapasiteetti. Näistä Sigfox ja NB-IOT kuuluvat pitkän kantaman radiotekniikoihin, ja niitä voidaan pitää varteenotettavina vaihtoehtoina LoRa-teknologialle.

LoRa-verkko noudattaa rakenteeltaan tähtitopologiaa. Päätelaitteet eivät ole kiinnittyneinä mihinkään tiettyyn tukiasemaan, vaan ovat liitettynä järjestelmään verkkoalustatasolla. Päätelaitteet lähettävät passiivisesti viestejä ja viestin vastaanottaneet tukiasemat välittävät viestit edelleen verkkoalustaan. Viestien tunnistus ja salauksen purku tapahtuvat verkkoalustassa. LoRa-tekniikan tiedonsiirtokapasiteetti vaihtelee 290 b/s:n ja 27 kb/s:n välillä olosuhteista riippuen. Lähetettävän hyötykuorman koosta riippuu, miten pitkä kantama voidaan saavuttaa – pienimmällä 51 tavun hyötykuormalla taajama-alueen ulkopuolella jopa yli 10 kilometrin kantama on mahdollinen.

Tutkimuksessa testattiin kahta erilaista LoRa-verkkoa: toimeksiantajan omaa yksityisverkkoa ja teleoperaattorin julkista verkkoa. Yksityisverkon testeissä saavutettiin parhaimmillaan 1,3 kilometrin kantama avarassa kaupunkiympäristössä hyötykuorman ollessa 72 tavua. Teleoperaattorin verkon todettiin olevan käyttökustannuksiltaan edullinen ja helposti laajennettavissa. Opinnäytetyön perusteella voidaan todeta LoRa-tekniikan soveltuvan käytettyjen lastinkäsittelylaitteiden tiedonsiirtotekniikaksi sovelluksissa, joissa viestien lähetysintervalli ei ole tiheä. Käyttökohteita voisivat olla esimerkiksi koneen käyttötuntien, tapahtumatietojen tai rengaspainearvojen kerääminen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

HASU, LASSI:
Feasibility of LoRa IoT Radio for Data Transmission in Used Equipment

Bachelor's thesis 62 pages
August 2017

The purpose of this thesis was to study the suitability of LoRa technology to be used as a wireless data transmission method in used cargo handling equipment. LoRa is a long-range radio technology designed especially for IoT applications (Internet of Things). The objective was to find out the applications where LoRa technology would be a feasible and cost-efficient retrofit data transfer method. The commissioner of this research was Cargotec Finland Oy. A qualitative study method was used here, supported by empirical study method in practice. LoRa technology was compared with other wireless data transfer methods typically used in IoT solutions. The functionality, performance and use cases were explored. LoRa-technology was tested in versatile urban environments.

The wireless data communication in cargo handling equipment is typically carried out by using WLAN or LTE technologies. New wireless technologies for IoT solutions, in addition to LoRa, are e.g. ZigBee, Sigfox and NB-IOT. Low power consumption and relatively low data transfer rate are mutual features for these technologies. Sigfox and NB-IOT are long range radio technologies and therefore considered to be competitors for LoRa radio.

LoRa network utilizes star topology. The end nodes are not dedicated to any particular gateway, they are connected to the system on the network platform instead. End nodes are sending messages passively and gateways forward the messages to the network platform. The messages are identified and decrypted in the network platform. The data transfer rate of LoRa network varies from 290 b/s to 27 kb/s depending on the circumstances. The size of the payload to be sent dictates the maximum radio coverage distance. With the smallest 51-byte payload a radio coverage of more than 10 km can be achieved in suburban environment.

Two kinds of LoRa networks were tested in this thesis: Cargotec's own private network and the public network provided by a teleoperator company. In the private network test, 1,3 kilometer radio coverage was achieved in an open urban environment with a payload of 72 bytes. The teleoperator's network was found to be affordable to use and simple to expand. LoRa technology was found to be a feasible data transfer method in applications with low sending interval. Feasible use cases could be e.g. the transfer of machine running hours, event information or tire pressure values.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TEOLLINEN INTERNET	7
2.1	Käytännön sovellukset terminaalien liiketoiminnassa.....	7
2.2	Langattomat tiedonsiirtotekniikat	8
2.2.1	Wireless Local Area Network.....	8
2.2.2	Personal Area Network	9
2.2.3	Wide Area Network	11
3	LORA	14
3.1	LoRa-teknologia yleisesti	14
3.2	Teknologia	15
3.2.1	Modulaatio	16
3.2.2	Signaali ja taajuuskaista	17
3.2.3	Verkkoarkkitehtuuri	18
3.2.4	Suorituskyky	19
3.2.5	Tietoturva	25
3.2.6	Päätelaitetyypit.....	25
3.3	Käytännön sovelluksia.....	26
3.4	Valmiit kaupalliset LoRa-verkot	28
4	LORA-TESTIT	30
4.1	Testilaitteistot.....	30
4.2	Yksityisverkko	33
4.2.1	Testi 1: Kaupunkiympäristö.....	33
4.2.2	Testi 2: Kaupunkiympäristö.....	36
4.2.3	Testi 3: Testiterminaali	39
4.2.4	Testi 4: Satamaterminaali.....	42
4.3	Teleoperaattorin verkko	46
4.3.1	Testi 5: Testiterminaali	47
4.3.2	Testi 6: Testiterminaali	49
4.3.3	Testi 7: Satamaterminaali.....	51
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	53
5.1	LoRa ja kilpailijat	53
5.2	Käyttökohteet.....	54
5.3	Verkko	55
5.4	Jatkotoimenpiteet	56
5.5	Itsearviointi	57
	LÄHTEET.....	59

LYHENTEET JA TERMIT

ADR	Adaptive Data Rate
CR	Code Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
csv	Comma-Separated Values
DTOA	Differential Time of Arrival
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things, esimeiden Internet
LE	Low Energy
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
NB-IOT	NarrowBand IoT
NFC	Near Field Communication
PAN	Personal Area Network
PoE	Power Over Ethernet
RSSI	Radio Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli Cargotec Finland Oy:n Kalmar-liiketoimintayksikön toimeksiannosta tutkia LoRa-radiotekniikan soveltuvuutta lastinkäsittelylaitteiden tuottaman datan tiedonsiirtoon. LoRa on avoimeen lähdekoodiin perustuva, esineiden väliseen kommunikointiin kehitetty langaton tiedonsiirtoteknologia (LoRa Alliance 2017). Tavoitteena oli löytää käyttötapauksia, joihin LoRa-tekniikka soveltuu etsittäessä kustannustehokasta pitkän kantaman radiotekniikkaa lastinkäsittelylaitteellisuuden tarpeisiin. Opinnäytetyössä perehdyttiin tekniikan toimintaan, käyttökohteisiin ja testattiin käytännössä LoRa-tekniikan toimivuutta ja luotettavuutta vaihtelevassa ja vaativassa rakennetussa ympäristössä. Testejä tehtiin kaupunki- ja taajamaympäristössä sekä satamaterминаalissa.

Työ pyrki selvittämään, onko LoRa käyttökelpoinen tekniikkaa sovellettavaksi eritoten käytettyjen lastinkäsittelylaitteiden tiedonsiirtoväylänä. Tällöin tärkeitä ominaisuuksia ovat erityisesti sekä päätelaitteen jälkiasennuksen että verkkoinfrastruktuurin rakentamisen vaivattomuus, päätelaitteiden muunneltavuus ja järjestelmän alhainen hinta.

Langattoman tiedonsiirron toteutustapa on yksi keskeisimmistä ratkaistavista ongelmista niissä IoT-sovelluksissa (Internet of Things), joissa tiedonsiirtokaapelointia ei voida käyttää. Erilaisia langattomia tiedonsiirtomenetelmiä on tarjolla lukuisia. Tämä tutkimus esittelee lyhyesti niistä merkittävimpiä ja vertaa niitä LoRa-tekniikkaan. Opinnäytetyössä tutkittiin, voidaanko LoRan avulla järjestää laitteiden vaatima tiedonsiirtotarve vaivattomammin, varmemmin ja edullisemmin verrattuna aikaisemmin käytössä olleisiin tekniikkoihin. Työssä selvitettiin, millaisiin käyttötapauksiin LoRa-tekniikka soveltuu.

Lastinkäsittelylaitteet toimivat tyypillisesti satamaterминаaleissa, joissa massiiviset teräsrakenteet – kuten merikonttipinot, satamanosturit tai laivat – vaikeuttavat langatonta tiedonsiirtoa merkittävästi. LoRa-tekniikan tulee täyttää samat tiedonsiirron laatuun ja turvallisuuteen liittyvät vaatimukset, kuin tähän asti käytössä olevien tiedonsiirtomenetelmienkin.

2 TEOLLINEN INTERNET

Teollinen Internet (Internet of Things, myöhemmin IoT) on merkittävä osa viimeisintä teollista murrosta, joka tuo mukanaan mittavia mahdollisuuksia yritysten tuottavuuteen, johtamiseen, liiketoimintamalleihin ja kilpailuun uusista markkinoista. IoT-ratkaisut mahdollistavat tietoverkkoon liitetystä tuotteista ja palveluista saadun tiedon hyödyntämisen ennen kokemattomalla tavalla. Joillakin toimialoilla lähitulevaisuuden muutokset voivat olla jopa dramaattisia: toisille murros on mahdollisuus, toisille uhka. (Ailisto, Mäntylä & Seppälä 2015, 7.)

Monet suomalaiset yritykset ovat olleet maailmanlaajuisesti edelläkävijöitä IoT:n hyödyntämisessä. Nämä yritykset ovat ennakkoluulottomasti käyttäneet IoT:n mahdollisuuksia palvella liiketoimintaansa ja asiakkaitaan. (Collin & Saarelainen 2016, 17.) Yhteiskunnallisesti IoT:n tehokas ja ennakkoluuloton hyödyntäminen voi parhaimmillaan luoda uusia työpaikkoja ja investointeja, tarjota yrityksillemme entistä paremmat maailmanlaajuiset toimintaedellytykset sekä auttaa niitä menestymään uudistuvilla teollisilla markkinoilla. Esimerkiksi Valtioneuvoston kanslia on määrittänyt IoT:n hyödyntämisen yhdeksi kärkiteemoistaan vahvistettaessa Suomen kilpailukykyä. (Ailisto ym. 2015, 1, 8.)

IoT-sovelluksille yhteistä kaikissa toimintaympäristöissä on anturitekniikka ja niistä saatava tieto. Verkkoon kytkettyjen antureiden tuottama datamassa voi tuoda tarkasteltavasta ilmiöstä esiin jotakin sellaista, mitä aiemmin ei ole voitu nähdä tarkasti. (Teollinen internet koskee kaikkia toimialoja 2016.) Saatua dataa hyödynnetään kuitenkin vielä hyvin vähän. Esimerkiksi McKinseyn tutkimusryhmän analysoimasta öljynporauslautan tuottamasta datasta vain alle yhtä prosenttia hyödynnettiin liiketoiminnassa (Aharon, Bisson, Bughin, Chui, Dobbs, Manyika & Woetzel 2015, 25).

2.1 Käytännön sovellukset terminaalien liiketoiminnassa

Datan kerääminen ja langattoman tiedonsiirron tarpeet terminaaliliiketoiminnassa vaihtelee suuresti. Täysin automatisoiduissa terminaaleissa koneiden kaikkien liiketekijöiden, sijainnin, anturidatan, tapahtumatietojen ja käskyjen on liikuttava mahdollisimman

nopeasti, jotta terminaalit voi toimia. Tietyissä kohteissa koneista kerätään pelkästään tapahtumatietoja, esimerkiksi nostojen määrää. Joissakin tapauksissa koneen käyttötunteja kerätään hyödynnettäväksi esimerkiksi huollon suunnittelussa. Erilaisten datasiirtotarpeiden vuoksi myös käytetyt tiedonsiirtotavat vaihtelevat. Automaattiterminaalissa datayhteyden on toimittava aina ja kaikkialla, viestiliikenteen viiveen tulee olla pieni eikä viestejä saa kadota. Automaattiterminaalissa tiedonsiirtoon käytetään yleisesti WLAN-tekniikkaa, muissa kohteissa LTE-mobiiliyhteyttä (Long Term Evolution, myös 4G). Automaattiterminaalissa dataliikenteen määrä on suuri, jolloin WLAN-taajuuksien ruuhkaisuus aiheuttaa usein ongelmia. Myös satamaan saapuvat voimakkaasti WLAN-verkotetut risteily- tai rahtialukset saattavat aiheuttaa ongelmia. (Keskinen 2017.)

Tyypillisesti dataa kerätään terminaalien toiminnallisuuksia tai asiakkaalle tarjottavaa palvelua varten. Pelkästään toiminnan kehittämistä tai data-analyysia varten tietoja ei juuri kerätä. Suurimmasta osasta rahtinkäsittelylaitteita ei Kalmarilla kerätä dataa lainkaan.

2.2 Langattomat tiedonsiirtotekniikat

Yleisesti IoT-sovelluksissa verkkoon kytkettäviä laitteita tai asioita on paljon tai ne ovat liikkuvia, jolloin kiinteitä verkkoyhteyksiä ei voida käyttää. Tällöin turvaututaan langattomiin tietoverkkoihin. Erilaisia langattomia IoT:n tarpeisiin soveltuvia verkkoteknologioita on runsaasti; suosituimmat tekniikat tällä hetkellä ovat Bluetooth, Wi-Fi ja ZigBee. Suurimmat erot eri teknologioiden välillä ovat niiden kantamassa, tiedonsiirtonepeudessa, verkon topologiassa ja virrankulutuksessa. (Collin & Saarelainen 2016, 171.) Tämä tutkimus keskittyy ainoastaan langattomiin tiedonsiirtotekniikoihin, joista seuraavassa esitellään tyypillisimpiä.

2.2.1 Wireless Local Area Network

WLAN-verkot, eli Wireless Local Area Network -verkot, ovat olleet pitkään yksi suosituimmista tavoista toteuttaa langaton tiedonsiirto. IEEE 802.11 -standardiin perustuva WLAN-tekniikka operoi joko 2,4 GHz:n tai 5 GHz:n taajuudella. 802.11-standardin

WLAN-verkot soveltuvat hyvin erityisesti sisätiloihin, sillä verkon tiedonsiirtokyky on suuri ja järjestelmän asentaminen sisätiloihin on vaivatonta ja edullista. (Collin & Saarelainen 2016, 172.) Esimerkiksi vuonna 2014 julkaistun 802.11ac-standardin suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus on 1,3 Gb/s (Intel 2017). Korkea taajuuskaista kuitenkin rajoittaa signaalin kantamaa merkittävästi: lisäksi viime vuosina voimakkaasti lisääntynyt WLAN-verkkojen käyttö on saanut aikaan 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueiden ruuhkautumista. (Choi, Choi & Sun 2013, 84.) IoT-ratkaisuiden kannalta 802.11-standardi on sisältänyt muitakin puutteita: teknologian virrankulutus on suuri ja erilaiset rakenteet vaikuttavat helposti signaalin kulkuun. (Collin & Saarelainen 2016, 172.)

Vuoden 2016 alussa julkaistu IEEE 802.11ah -standardi tuo kuitenkin merkittäviä parannuksia WLAN-teknologiaan IoT-sovellusten näkökulmasta. Myös WiFi HaLow -nimellä tunnettu standardi on suunniteltu nimenomaisesti esineiden väliseen tietoliikenteeseen. 802.11ah standardin verkolla saavutetaan aiempaa laajempi kantama, se läpäisee hyvin rakenteita ja kuluttaa lisäksi vähän virtaa. (Collin & Saarelainen 2016, 172.) Standardin teoreettinen suurin tiedonsiirtonopeus on 18 megabittiä sekunnissa (Vähimaa 2016). Tietoverkkoon voidaan liittää myös entistä enemmän laitteita ja sillä voidaan saavuttaa jopa kilometrin kantama. 802.11ah -standardia käyttävä verkko liikennöi alle 1 GHz:n rekisteröimättömillä taajuuksilla. (Collin & Saarelainen 2016, 172.) Alhaiseen virrankulutukseen pyrkiminen voi kuitenkin tuoda mukanaan ongelmia. Virrankulutuksen pienentämiseksi WLAN-päätelaitteita tulee syklittää lepotilassa, joka saa aikaan laitteiden reaktio- ja vasteaikojen pitenemistä. (Hunter 2016.)

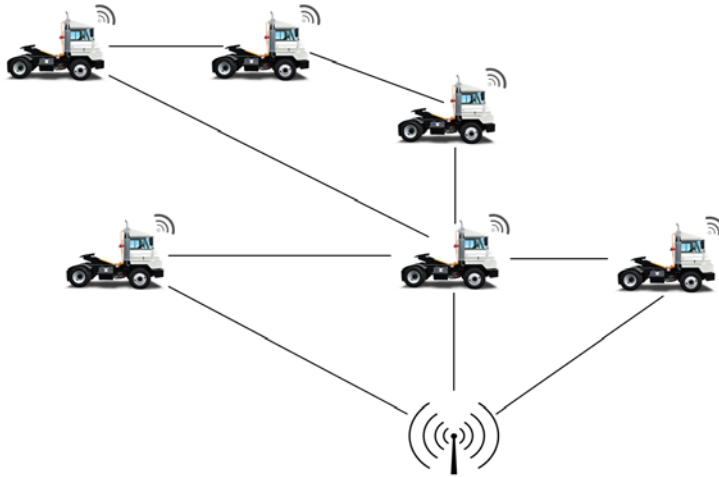
2.2.2 Personal Area Network

Personal Area Network (myöhemmin PAN) tarkoittaa tiedonsiirtoa henkilökohtaisten elektronisten laitteiden, kuten älypuhelisten, tablettitietokoneiden, näppäimistöjen tai kameroiden välillä. PAN-teknologioita ovat mm. Bluetooth ja Bluetooth LE, Near Field Communication (NFC) ja ZigBee. PAN-verkkojen kantama on tyypillisesti muutamia metrejä. (Gupta 2013, 3.)

Niin ikään IoT-sovellusten tarpeisiin kehitetty Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE) -tekniikka soveltuu hyvin kohteisiin, joissa vaaditaan erittäin alhaista virrankulutusta. Päätelaitteen Bluetooth LE -verkkoadapteri voidaan virroittaa esimerkiksi nappiparistol-

la tai valokennolla. Yksi Bluetoothin eduista on, että se on yleisyytensä vuoksi hyvin tuettu kaikissa yleisimmin käytettävissä käyttöjärjestelmissä, myös mobiililaitteissa. (Collin & Saarelainen 2016, 172) Bluetooth LE on suunniteltu sovelluksiin, joissa ei siirretä suuria tietomääriä tai joissa tiedonsiirtoon ei kulu merkittävän paljon aikaa. Perusajatus on, että laite muodostaa tarvittaessa yhteyden, lähettää tai vastaanottaa korkeintaan muutamia kilotavuja dataa, ja sulkee jälleen yhteyden. Yhteys on siis kytkettyä vain hetken kerrallaan, jonka vuoksi virrankulutus on huomattavasti pienempi verrattuna esimerkiksi alkuperäisen Bluetooth-standardin mukaisiin sovelluksiin, kuten langattomiin kuulokkeisiin. Bluetooth LE -tekniikka toimii 2,4 GHz:n taajuudella, ja sen suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus on n. 300 kb/s. Bluetooth LE -radion kuuluvuus on tyypillisesti 30–50 metrin luokkaa. (Gupta 2013, 131-135.)

ZigBee on vuonna 2004 julkaistu IEEE 802.15.4 -radiostandardiin perustuva tiedonsiirtoteknologia. Tiedonsiirto ja verkon rakenne perustuvat verkkoon kytkettyjen päätelaitteiden eli nooidien keskinäiseen viestintään. (Collin & Saarelainen 2016, 173-174.) ZigBee-standardin mukainen verkko liikennöi Euroopassa taajuudella 868 MHz yhdellä kanavalla, sekä taajuudella 2,4 GHz 16 kanavalla. Taajuudella 868 MHz tapahtuvan liikennöinnin suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus on 20 kb/s – liikennöitäessä 2,4 GHz:n taajuudella tiedonsiirtonopeus ylittää 250 kb/s:n. (Eady 2007, 4-5.) ZigBeen radiokantama on tyypillisesti joitakin kymmeniä metrejä, mutta sitä voidaan laajentaa mesh-verkkotopologian avulla yli 100 metriin. Mesh-topologiassa noodit ovat yhteydessä keskenään siten, että jokainen päätelaite on kytkettyneenä verkkoon vähintään kahta eri reittiä pitkin (kuva 1). Yhteydet nooiden välillä päivittyvät dynaamisesti, jolloin ne etsivät uuden yhteysreitit, jos joku noodeista esimerkiksi vikaantuu. Tämä lisää verkon vakautta ja luotettavuutta. (Mushtaq 2016.) Collinin ja Saarelaisen mukaan (2016, 174) ZigBee-tekniikan kiistattomia etuja ovat digitaalisten ZigBee-radiopiirien halpa hinta ja tekniikan erittäin pieni virrankulutus. Tekniikan heikkouksia ovat mm. hidas tiedonsiirtonopeus, huono tietoturva ja rajallinen yhteensopivuus muiden protokollien kanssa. Mesh-topologian hyödyntämisestä huolimatta yhteys voi kuitenkin olla epävakaa johtuen 2,4 GHz:n taajuuden ruuhkaisuudesta. (Collin & Saarelainen 2016, 174.)



KUVA 1. ZigBee-verkon mesh-topologia.

2.2.3 Wide Area Network

WAN, eli Wide Area Network on maantieteellisiä alueita yhdistävä tietoverkko. WAN-verkko voi olla joko kiinteä kaapelointia käyttävä verkko tai langaton verkko. Langattomia WAN-verkkopalveluita tarjoavat yleensä teleoperaattorit, mutta yritys voi myös itse omistaa käyttämänsä verkkoinfrastruktuurin. (Rouse 2016.) Collin ja Saarelainen (2016, 171, 178) jakavat WAN-verkot kahteen ryhmään: mobiiliverkkostandardeihin ja LPWAN-standardeihin (Low Power Wide Area Network).

Mobiiliverkkostandardeihin kuuluva LTE on matkaviestinverkko, joka on suunniteltu puhtaasti tiedonsiirron tarpeita ajatellen (Remy 2014, 32). LTE-verkon tiedonsiirtonopeus vaihtelee välillä 10-200 Mb/s verkosta päätelaitteelle, ja päätelaitteesta verkkoon välillä 3-40 Mb/s (Sonera). 4G-yhteys on tällä hetkellä tyypillinen ratkaisu teollisen internetin sovelluksissa, mutta ratkaisu on monesti yliampuva. Ei ole tarkoituksenmukaista siirtää ajoittain sensorilta tulevaa dataa verkkoyhteydellä, jonka tiedonsiirtonopeus riittäisi videokuvan siirtoon. (Ala-Paavola 2014.) LTE-teknologian kiistaton etu on hyvä saatavuus kaikkialla maailmassa. Haittoja mobiiliverkon tiedonsiirrossa ovat sim-korttihallinnointi ja päätelaitteiden sekä tiedonsiirron kallis hinta. 31.5.2017 päivitetyn mobiililaajakaistavertailun mukaan Suomessa toimivien Telian, Elisan, DNA:n ja Moi mobiilin mobiililaajakaistaliittymien keskihinta oli 20,70 euroa kuukaudessa (Mobiililaajakaistavertailu 2017). Muualla maailmassa dataliittymän hinnat ovat tyypillisesti kalliimpia (Penttinen 2016).

Matkaviestinverkkojen viidennen sukupolven 5G:n arvellaan mullistavan tiedonsiirron lähitulevaisuudessa. 5G-tekniikka mahdollistaa jopa 100-kertaisen tiedonsiirtonopeuden nykyiseen LTE-tekniikkaan verrattuna. Tiedonsiirron viive eli latenssi voi olla jopa alle 1 ms. Teknologian arvellaan olevan kaupallisessa käytössä 2020-luvulla. (Lehtiniitty 2017.)

Kesällä 2016 valmistunut LTE-standardi NB-IOT (NarrowBand IoT) on suunniteltu erityisesti esineidenväliseen kommunikointiin. Teknologia tähtää hyvään kuuluvuuteen sisätiloissa sekä päätelaitteiden alhaiseen hintaan ja pieneen virrankulutukseen. Teknologialla voidaan saavuttaa 250 kb/s tiedonsiirtonopeus. (Nokia 2017, 3, 7). NB-IOT hyödyntää käytöstä poistettuja entisiä GSM-taajuuksia, mutta se ei kuitenkaan ole osa varsinaista 4G/LTE-standardia (Collin & Saarelainen 2016, 176). Tämän vuoksi teknologia joutuu liikennöimään varsinaisten LTE-operaattorin taajuuskaistojen välisellä suojataajuudella. Tämä voi tulevaisuudessa koitua operaattoreille kalliiksi, jos liikenne alkaa kasvaessaan kuluttamaan resursseja matkaviestimille varatusta kapasiteetista taloudellisesti kannattavan matkapuhelinliikenteen kustannuksella. (Ray 2016.) Tutkimusta tehtäessä teknologia oli vasta käyttöönottovaiheessa eikä käytön hinnoittelutietoja ollut saatavilla.

Sigfox on LoRan tavoin LPWAN-kategoriaan kuuluva IoT-radiotekniikka. Samanniminen ranskalaisyhtiö rakentaa ja hallinnoi verkkoja eri maissa. Yhtiö aikoo laajentaa verkkonsa toimimaan yli 50 maassa vuoteen 2019 mennessä, joissa kaikissa verkkoa voidaan käyttää yhdellä ja samalla liittymäsopimuksella. Suomessa Sigfox-verkko avautui syyskuussa 2016. Teknologia käyttää tiedonsiirtoon erittäin kapeaa 100 Hz kaistanleveyttä, joka vähentää häiriöherkkyyttä. Sigfox-verkon kantama voi harvaan rakennetulla alueella olla kymmeniä kilometrejä. Viestien määrä on rajoitettu 140 viestiin vuorokaudessa ja viestien maksimikoko 12 bittiin. Kapeasta kaistasta johtuen tiedonsiirtonopeus on vain 100 bittiä sekunnissa. (Teollinen internet vaatii omat verkot 2016.) Suomessa verkon omistavan Connected Finlandin mukaan liittymien hinnoittelu tulee olemaan n. 1 euro anturia kohden vuodessa (Suomen ensimmäinen esineiden... 2016).

Yhteenvedo esitellyistä tiedonsiirtotekniikoista on esitettyinä taulukossa 1. Tiedonsiirtonopeudet ovat päätelaitteelta tukiasemalle.

TAULUKKO 1. Yhteenvedo langattomista tiedonsiirtotekniikoista.

	WLAN-tekniikat		PAN-tekniikat		WAN-tekniikat			
	WLAN 802.11ac	WiFi HaLow	Bluetooth LE	Zigbee	LTE/4G	Sigfox	NB-IOT	LoRa
kantama	50 m	1 km	< 50 m	< 100 m	> 10 km	30 km	15 km	15 km
max. tiedonsiirto	1,3 Gb/s	18 Mb/s	300 kb/s	20 kbps	40 Mb/s	100 b/s	250 kb/s	27 kb/s
virrankulutus	⚡⚡⚡	⚡	⚡	⚡	⚡⚡⚡	⚡	⚡	⚡
perustamiskustannus	€€	€	€	€	€€€	€	€	€
käyttökustannus	0	0	0	0	€€€	€	€	€

3 LORA

LoRaWAN on LPWAN-tyyppinen IoT:n tarpeisiin kehitetty tiedonsiirtoprotokolla. LoRaWAN-protokolla on luotu varsinaista LoRa-teknologiaa varten. Sekä verkkoprotokollan että fyysisen tason laitteiden kehittämisestä vastaa LoRa Alliance -kattojärjestö. (Semtech Corporation.) LoRa on tiedonsiirron fyysinen taso, joka tarkoittaa laitteita, signaalinkäsittelyä, modulaatiota ja varsinaista radiotietä. LoRaWAN taas tarkoittaa tiedonsiirtoprotokollaa ja järjestelmän arkkitehtuuria. (A technical overview of LoRa[®] and LoRaWAN[™] 2015, 4, 7). LoRa-teknologia yhdistää IoT-radioille tyypilliset ominaisuudet, pienen virrankulutuksen ja suojatun tiedonsiirtoyhteyden erittäin pitkään radiokantamaan. LoRa-laitteet on suunniteltu erityisesti akkukäyttöä vaativiin kohteisiin, ja niiden asentaminen on pyritty tekemään mahdollisimman helpoksi. (Semtech Corporation.)

LoRa sai alkunsa vuonna 2014 Zurichissa. Teknologiyhtiöt Semtech, Actility ja IBM yhdistivät voimansa LoRaMAC-projektissa, jonka tarkoitus oli ratkaista IoT-markkinoita askarruttaneet keskeiset langattoman tiedonsiirron ongelmat: tietoturva, energiatehokkuus, sijainnin seuranta ja helppo käyttöönotto. LoRa-teknologian ja LoRaWAN-protokollan kehityksestä vastaava LoRa Alliance perustettiin vuonna 2015, jolloin myös hankkeen nimi muutettiin muotoon LoRaWAN ja ensimmäinen LoRaWAN 1.0 spesifikaatio julkaistiin. (Semtech Corporation.)

3.1 LoRa-teknologia yleisesti

Yksi keskeisiä LoRa-teknologian piirteitä on sen avoimuus. LoRa-teknologia pohjautuu avoimeen lähdekoodiin, jolloin se on kaikkien vapaasti käytettävissä eikä käyttäjien tarvitse sitoutua tiettyihin laitevalmistajiin. LoRaWAN-protokolla on teollisen yhteelliittymän hallinnoima, ei yksittäisen yrityksen omistama. Kuka tahansa voi perustaa LoRa-verkon ilman erillistä lupaa, eikä oman verkon rakentamisesta tai ylläpidosta tarvitse maksaa käyttö- tai lisenssimaksuja. (Etteplan.)

Vaikka LoRa-teknologia kuluttaa erittäin vähän virtaa, silti yli 10 kilometrin radiokantaman saavuttaminen on mahdollista (Etteplan). Radiosignaalilla on hyvä rakenteiden

läpäisykyky rakennetussa ympäristössä ja sisätiloissa. LoRa-verkon tiedonsiirtokapasiteetti vaihtelee 290 b/s ja 27 kb/s välillä olosuhteista ja tilanteesta riippuen (A technical overview of... 2015, 13, 16). Paristokäyttöiset päätelaitteet, jotka lähettävät tietoa muutamia kertoja päivässä, voivat olla toimintakäykyisiä jopa 20 vuotta (Semtech Corporation).

LoRa-verkossa liikennöinti on kokonaisuudessaan kaksisuuntaista: jokaista verkkoon kytkettyä laitetta, joka kykenee lähettämään tietoa verkkoon, voidaan myös kontrolloida verkosta käsin. Tämä on tärkeä ominaisuus laitteiden liitettävyyden, verkon hallinnan tai verkkoon kytkettyjen toimilaitteiden toiminnan kannalta. (Semtech Corporation.) LoRaWAN-spesifikaation mukainen kaksisuuntainen tietoliikenne mahdollistaa saumattoman IoT-laitteiden yhteistoiminnan ilman, että monimutkaisia verkkoinfrastruktuureja tarvitsee rakentaa (LoRa Alliance.)

Sekä päätelaitteiden että verkkoinfrastruktuurin käyttöönotto ja laajentaminen on pyritty tekemään helpoksi. Verkko on mahdollista perustaa käyttäen kevyttä infrastruktuuria, ja sitä voidaan helposti laajentaa tarpeen mukaan tiedonsiirtonopeuden kasvattamiseksi ja uusien päätelaitteiden liittämiseksi. (A technical overview of... 2015, 9-10.)

LoRa-teknologia mahdollistaa myös päätelaitteen paikannuksen. Paikannus perustuu DTOA-tekniikkaan (differential time of arrival). Tekniikan avulla päätelaitteen sijainti voidaan tarvittaessa määrittää ”korttelin tarkkuudella” ilman erillistä paikannuslaitetta, kuten GPS-vastaanotinta. (Semtech Corporation.)

3.2 Teknologia

Tässä kappaleessa kerrotaan, miten LoRa ja LoRaWAN toimivat, tutkitaan järjestelmän kapasiteettia ja sitä, millaisilla teknisillä ratkaisuilla edellä kuvatut ominaisuudet on kyetty saavuttamaan.

3.2.1 Modulaatio

Modulaatio tiedonsiirtotekniikassa tarkoittaa radiosignaalin muokkaamista siten, että lähetettävä tieto saadaan siirrettyä ns. kantoaallon yhteydessä. Modulaatio on tarpeellista, koska matalataajuisia signaaleita on erittäin vaikea välittää Maan ilmakehässä – tiedon välittämiseen tarvitaan korkeataajuinen kantaalto. Kantaalto muokataan sellaiseen muotoon, että siitä on tulkittavissa haluttu viesti. (Tomasi 1998, 2–3.) Kantaallon taajuus ilmaisee signaalin taajuuden silloin, kun kantaaltoa ei moduloida, eli lähetettävää dataa ei ole. Kantaaltoa muokkaava moduloiva signaali eli ns. hyötysignaali on se tieto tai data, joka halutaan siirtää. (Latva 2005, 1.) Eri modulointimenetelmiä on useita, ja ne jaetaan kolmeen pääryhmään muunneltavan signaalin ominaisuuden perusteella. (Tomasi 1998, 2–3.) Eri signaalin modulaatioluokat ovat:

- amplitudimodulaatio
- taajuusmodulaatio
- vaihemodulaatio

Moduloitu signaali muutetaan takaisin alkuperäiseksi signaaliksi vastaanottimessa tai päätelaitteessa (Tomasi 1998, 3).

Langattoman tiedonsiirtojärjestelmän suorituskykyyn merkittävästi vaikuttava tekijä on käytettävä kaistanleveys. Hyötysignaalin – eli lähetettävän datan – kaistanleveys tarkoittaa lähetettävän signaalin suurimman ja pienimmän taajuuden erotusta. Hyötysignaalin kaistanleveys ilmaisee sen, miten paljon kantaaltoa poikkeutetaan sen perustaajuudesta. Yleisesti kaiken lähetettävän datan tulee mahtua kaistanleveyden sisään. Mitä suurempi kaistanleveys on, sitä enemmän siihen mahtuu dataa. (Tomasi 1998, 6-7.)

LoraWAN:n käyttämä modulaatio pohjautuu hajaspektritekniikkaa käyttävään CSS-modulaatioon (Chirp Spread Spectrum), jossa kantaalto on amplitudiltaan vakiota, mutta sen taajuutta muutetaan. Taajuutta kasvattamalla tai pienentämällä ajan muuttuessa haluttu viesti saadaan välitettyä vastaanottimeen. (Poole.) Hajaspektritekniikan erikoisuus muihin modulointimenetelmiin verrattuna on se, että signaalia levitetään tarkoituksella monin verroin leveämmälle taajuuskaistalle, kuin mitä lähetettävä hyötysignaali vaatii (Viterbi 1998, 1). Hajaspektritekniikalla moduloitu signaali sietää hyvin muita samalla taajuudella toimivia signaaleja. Hajaspektritekniikan vahvuuksia on myös sen

kyky sietää kohinaa ja signaalin monireitittymisestä aiheutuvaa häiriötä. Yksi syy hajapektritekniikan käyttöön on tietoturva: hakkerin on erittäin vaikea demoduloida signaalia, jos hänellä ei ole tiedossaan signaalin hajautuksessa käytettävää avainta tai täsmällistä signaalin ajoitustietoa. Mitä suurempi on hajautetun signaalin taajuuden ja siirrettävän datamäärän (bittinä sekunnissa) suhde, sitä paremmin signaali sietää edellä mainittuja häiriöitä. (Holmes 2013, 1–3.) Mitä pienempi on siirrettävän datan määrä, sen suurempi suhde on, ja sen paremmin signaali sietää häiriöitä.

Käytetyistä modulointimenetelmistä CSS-modulaatio kykenee tehokkaimmin hyödyntämään käytössään olevan taajuusalueen. (Nanotron Technologies GmbH.) CSS-modulaatio on ollut yleisesti käytössä sotilas- ja avaruusteknologiassa jo vuosikymmenten ajan, mutta LoRa on ensimmäinen tekniikkaa käyttävä edullinen kaupallinen sovellus (A technical overview of... 2015, 4). Ensimmäisenä tätä modulointitekniikkaa käytettiin 1940-luvun alussa sotilastutkissa (Nanotron Technologies GmbH).

3.2.2 Signaali ja taajuuskaista

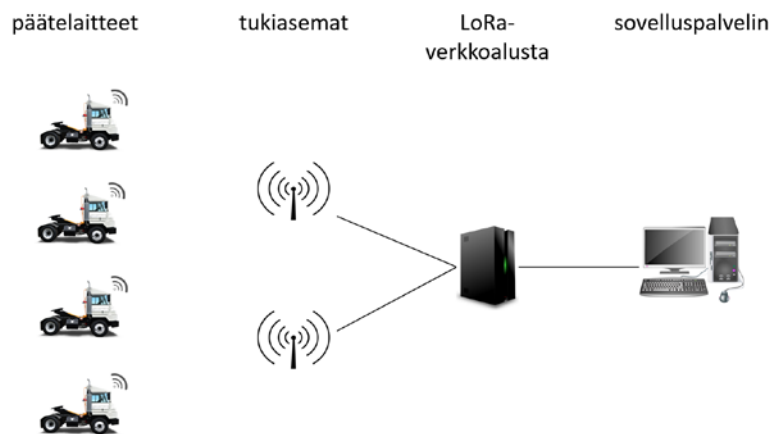
Euroopassa LoRa liikennöi taajuudella 868 MHz (A technical overview of... 2015, 7). 868 MHz on siis kantoaallon taajuus silloin, kun taajuutta ei moduloida lainkaan. LoRa kykenee muuttamaan käyttämänsä taajuuskaistaa sen mukaan, millainen datasiirron eli hyötysignaalin kaistanleveyden tarve ja yhteyden laatu kulloinkin on. Eri kaistanleveysvaihtoehtoja on 10, vaihdelleen 7,8 kHz:sta 500 kHz:iin. (Poole.)

Viestintäviraston määräyksen 15 mukaan kyseinen taajuusalue on Suomessa radioluovasta vapaa radioliikennöintiin laitteilla, joiden efektiivinen säteilyteho on pienempi tai yhtä suuri kuin 25 mW. Lisäksi liikennöivä laite saa olla lähettävässä tilassa enintään 1 % ajasta. (Määräys luvasta vapaiden... 2016, 1, 7.) Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että 60 sekunnin aikana LoRa-päätelaite saa lähettää dataa 0,6 sekunnin ajan (Maks lahti 2017). Myöskään kyseisillä taajuuksilla liikennöivien laitteiden hallussapitoon tai käyttöön ei tarvita erillistä lupaa. (Määräys luvasta vapaiden... 2016, 1, 7.) Saman määräyksen ja käyttöluvan piiriin kuuluvat mm. WLAN-laitteet (Viestintävirasto 2017). LoRa voidaan siis rinnastaa lupateknisesti WLAN-verkkoihin ja -laitteisiin: kuten aiemmin todettua, kuka tahansa saa perustaa LoRa-verkon ja liikennöidä verkossa.

3.2.3 Verkkoarkkitehtuuri

LoRaWAN-protokolla noudattaa rakenteeltaan tähtitopologiaa, jolloin jokainen päätelaitte on suoraan yhteydessä johonkin tukiasemista. Tähtitopologia mahdollistaa yksinkertaisen verkon rakenteen. Toisin kuin mesh-verkoissa, tähtitopologiaa hyödyntävän verkon päätelaitteet toimivat täysin itsenäisesti eivätkä välitä viestejä edelleen toisilleen, jolloin päätelaitteet ovat tekniikaltaan yksinkertaisia ja hinnaltaan edullisia. Tähtitopologia myös alentaa päätelaitteiden virrankulutusta. (Makslahti 2017.)

LoRaWAN-verkko koostuu päätelaitteista, tukiasemista, verkkoalustasta ja kerättyä dataa hyödyntävästä sovelluspalvelimesta (kuva 2). LoRa-tukiasemia ja verkkoalustaa yhdistää 4G-, Ethernet-, satelliitti- tai wifi-yhteys. (A technical overview of... 2015, 8.) Sovelluspalvelin voi olla esimerkiksi jokin pilvipalvelu, johon dataa kerätään (Kuukka 2017).



KUVA 2. LoRaWAN-arkkitehtuuri.

Kuten aiemmin todettua, LoRa-radioiden – päätelaitteiden ja tukiasemien – toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen: päätelaitteet lähettävät passiivisesti viestejä ilman tietoa siitä, onko yhtään tukiasemaa kuuluvuusalueella, ja mahdollisesti kantaman sisällä olevat tukiasemat välittävät viestin edelleen verkkoalustaan (Kuukka 2017). Päätelaitteet eivät siis ole kiinnittyneitä mihinkään tukiasemista, vaan ne ovat kytkettyinä järjestelmään verkkoalustatasolla. Tukiasema vain tunnistaa sille kuuluvan viestin ja välittää sen edelleen. Viestin lopullinen tunnistus tapahtuu verkkoalustalla, viestin salaus puretaan ja verkkoalusta välittää sen edelleen sovelluspalvelimelle. Kun verkkoalusta on tunnis-

tanut viestin, antaa se tukiasemalle käskyn kuitata viestin päätelaitteelle. (A technical overview of... 2015, 9.)

Koska tukiasemia on yleensä verkossa useita ja päätelaitteiden kantama on suhteellisen pitkä, monesti saman viestin havaitsee ja välittää verkkoalustaan useampi kuin yksi tukiasema. Identtiset viestit tunnistetaan verkkoalustassa, jolloin vain yksi niistä välitetään sovelluspalvelimelle. Tällaisessa tilanteessa verkkoalusta antaa kuittauskäskyn sille tukiasemalle, joka vastaanotti viestin voimakkaimmalla signaalilla. (Kuukka 2017.)

Koska päätelaitteet toimivat hyvin itsenäisesti eivätkä ne ole riippuvaisia tietystä tukiasemasta, soveltuu LoRaWAN erinomaisesti ratkaisuihin, joissa päätelaitteiden voidaan olettaa liikkuvan. Tukiasemanvaihtomenettelyä ei tarvita päätelaitteen liikkuaessa. (A technical overview of... 2015, 9.) Verkon laajentaminen on näin ollen helppoa: riittää pelkästään, kun samaan verkkoalustaan liitettyjen tukiasemien määrää lisätään, eikä päätelaitteille tarvitse erikseen tehdä tukiasemakohtaisia määrittämiä (Kuukka 2017).

3.2.4 Suorituskyky

LoRaWAN-verkon suorituskykyyn – tiedonsiirtonopeuteen, välitettävien viestien lukumäärään ja radiokantamaan – vaikuttavia tekijöitä on useita. Tekijät voidaan jakaa kahteen ryhmään: itse tekniikkaan liittyviin tekijöihin ja radioliikennemääräyksiin liittyviin tekijöihin.

Hajaspektrimodulaatioille ominainen, suuresti radioyhteyden laatuun vaikuttava attribuutti on ns. SF-arvo (spreading factor). Se vaikuttaa suuresti sekä verkon tiedonsiirtonopeuteen että radiokantamaan. Mitä korkeampaa SF-arvoa käytetään, sitä pidempi radiokantama saavutetaan. SF-arvon kasvattaminen pienentää suurinta mahdollista lähetettävän datan määrää ja kasvattaa puolestaan viestin lähetykseen kulunutta aikaa. (LoRa device developer guide 2016, 8.) LoRa-modulaation käyttämät SF-arvot ovat 6, 7, 8, 9, 10, 11 ja 12. Näistä SF-arvo 6 on erikoistapaus ja harvoin käytetty. (LoRa datasheet 2015, 27). Alinta mahdollista SF-arvoa kussakin toimintaympäristössä voidaan pitää verkon laadun mittarina (Kuukka 2017). Käytettävän SF-arvon perusteella määräytyy myös suurin mahdollinen lähetettävän hyötykuorman koko (MultiTech Developer Re-

sources... 2017.) Suurimmat mahdolliset hyötykuormat Euroopassa ovat esitettyinä taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Suurimmat mahdolliset hyötykuormat Euroopassa SF-arvoittain. (lähde: MultiTech Developer Resources...)

	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Suurin mahdollinen hyötykuorma (tavua)	242	242	115	51	51	51

Toinen merkittävä kapasiteettiin vaikuttava attribuutti on käytettävä kaistanleveys. Mitä suurempi on kaistanleveys, sitä suurempi voi olla lähetettävän datan määrä, mutta sitä pienempiä ovat lähetykseen kulunut aika ja radiokantama.

Kolmas kapasiteettiin vaikuttava tekijä LoRa-modulaation eräänlainen virheenkorjauskerroin, CR-arvo (code rate). CR-arvo on attribuutti, jota LoRa-tukiaseman modeemi käyttää havaitakseen ja korjatakseen lähetyksen aikana tapahtuneet virheet. Mitä suurempaa CR-arvoa käytetään, sitä paremmin yhteys sietää lähetyksenaikaisia virheitä, mutta sitä pienempi on tiedonsiirtokapasiteetti. CR-arvo voi saada lukuarvot 1, 2, 3 tai 4. (LoRa datasheet 2015, 27-28.)

Kun edellä kuvatut kolme attribuuttia tiedetään, nimellistiedonsiirtonopeus R_b (bitteinä sekunnissa) voidaan laskea kaavalla 1, jossa SF on SF-arvo, CR CR-arvo ja BW käytetty taajuuskaista (LoRa Modulation Basics 2015, 10).

$$R_b = SF \cdot \frac{\frac{4}{2^{SF}}}{\frac{4+CR}{BW}} \quad (1)$$

Näin ollen esimerkiksi lähetettäessä tyypillisellä 125 kHz:n taajuuskaistalla käyttäen SF-arvoa 10 ja CR-arvoa 1, nimellistiedonsiirtonopeudeksi saadaan

$$R_b = 10 \cdot \frac{\frac{4}{2^{10}}}{\frac{4+1}{125000}} \approx 977 \text{ bps}$$

Koska käytettävissä oleva aika on radiotaajuusmääräyksin voimakkaasti rajoitettu, eroaa tehollinen tiedonsiirtonopeus merkittävästi nimellistiedonsiirtonopeudesta. Tehollinen tiedonsiirtonopeus on Euroopassa n. kymmenesosa nimellistiedonsiirtonopeudesta.

(MultiTech Developer Resources...). Edellisen esimerkin arvoilla lasketut tiedonsiirtonopeudet ovat esitettyinä taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Nimellis- ja tehollistiedonsiirtonopeudet eri SF-arvoilla.

	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Nimellistiedonsiirtonopeus (b/s)	5 469	3 125	1 758	977	537	293
Tehollinen tiedonsiirtonopeus (b/s)	547	313	176	98	54	29

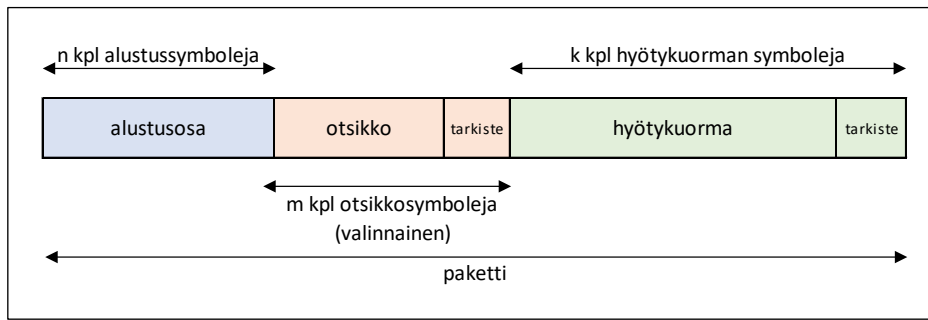
LoRa-modulaatiossa jokainen lähetettävä bitti muutetaan useiksi lastuiksi (engl. chip), jotka lähetetään kaavan 2 mukaisesti, jossa R_c on lastusekvenssi lastuina sekunnissa ja BW käytetty taajuuskaista.

$$R_c = BW \quad (2)$$

Näin ollen esimerkiksi 125 kHz:n taajuudella lähetetään 125 000 lastua sekunnissa. (LoRa Designer's Guide 2013, 4.)

Aiemmin todettiin, että LoRa-päätelaitteiden liikenne on rajoitettu radiotaajuusmääräyksin 1 %:iin käytettävissä olevasta ajasta. Jotta voimme arvioida teknologian todellista kapasiteettia, on laskettava paketin lähettämiseen kuluva aika. Ajan laskemiseksi tulee ensin ymmärtää, millaisia lähetettävät paketit ovat rakenteeltaan. Lastujen sijaan pakettia on nyt järkevämpää tarkastella symboleina.

Viesti koostuu kuvan 3 mukaisesti alustusosasta ja hyötykuormasta eli varsinaisesta viestistä, sekä valinnaisesta viestin otsikkotiedosta. Sekä otsikko että hyötykuorma sisältävät omat redundanssitarkisteensa, jolla viestin eheys tarkistetaan. (LoRa datasheet 2015, 29.)



KUVA 3. Paketin muodostuminen LoRa-modulaatiossa. (Lähde: LoRa datasheet 2015, muokattu)

Alustusosan avulla vastaanotin synkronoidaan tulevan datavirran kanssa. Otsikko sisältää tiedot hyötykuorman sisältämien tavujen määrästä, CR-arvon sekä tiedon siitä, mikäli valinnaista 16-bittistä redundanssitarkestusta halutaan käyttää hyötykuormalle. Tätä kutsutaan eksplisiittiseksi otsikointitavaksi. Tietyissä käyttötapauksissa, joissa edellä luetellut otsikon tiedot ovat ennalta tiedossa eivätkä ne käytännössä muutu, tiedonsiirto-kapasiteetin säästämiseksi otsikko voidaan myös jättää pois. Tätä kutsutaan implisiittiseksi otsikointitavaksi. Tällöin otsikon tiedot asetetaan käsin staattisiksi attribuuteiksi sekä päätelaitteeseen että tukiasemaan. Implisiittinen otsikointitapa on ainoa otsikointitapa, jolla SF-arvoa 6 voidaan käyttää. (LoRa datasheet 2015, 29-30.)

Kaavan 2 mukaan lastusekvenssin R_c arvo on yhtä suuri kuin käytetty taajuuskaista. Lastusekvenssi voidaan esittää myös kaavan 3 avulla. R_s on symbolisekvenssi symboleina sekunnissa ja SF SF-arvo. (LoRa Modulation Basics 2015, 10.)

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF} \quad (3)$$

Merkitään kaavat 2 ja 3 yhtä suuriksi ja ratkaistaan symbolisekvenssi R_s :

$$BW = R_s \cdot 2^{SF} \Leftrightarrow$$

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4)$$

Kaava 4 kertoo montako symbolia sekunnissa voidaan lähettää, jolloin yhden symbolin lähettämiseen kulunut aika, symboliaika T_s sekunteina voidaan laskea kaavan 5 avulla (LoRa Modulation Basics 2015, 10).

$$T_s = \frac{1}{R_s} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (5)$$

Alustusosan lähettämiseen kulunut aika voidaan nyt laskea kaavalla 6, jossa n on alustusosan symboleiden määrä (LoRa Modem Designers Guide 2013, 7):

$$T_{alustus} = (n + 4,25) \cdot T_s \quad (6)$$

Otsikon ja hyötykuorman symboleiden m ja k yhteismäärä lasketaan kaavan 7 avulla. Kaavassa PL on hyötykuorman koko tavuina, SF SF-arvo ja CR CR-arvo. H voi saada arvon 0 tai 1: H on 0 silloin kun eksplisiittinen otsikointitapa on käytössä ja 1 kun käytetään implisiittistä otsikointitapaa. (LoRa Modem Designers Guide 2013, 7.)

$$m + k = 8 + \max\left(\text{ceil}\left(\frac{8PL - 4SF - 20H + 44}{4SF}\right) (CR + 4), 0\right) \quad (7)$$

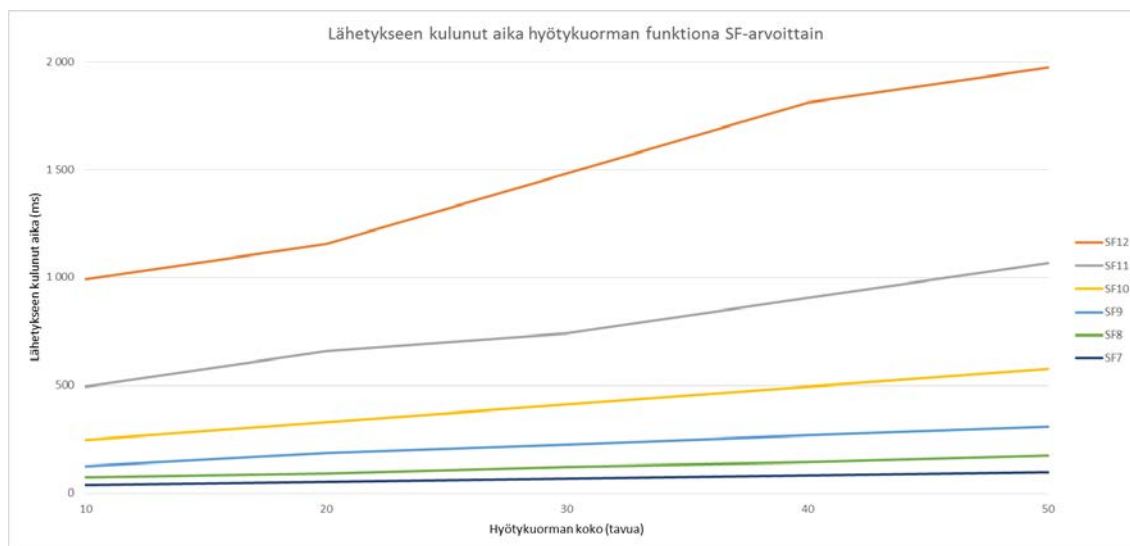
Otsikon ja hyötykuorman lähetykseen kulunut aika T_{o+h} sekunteina on tällöin kaavan 8 mukaisesti

$$T_{o+h} = (m + k) \cdot T_s \quad (8)$$

Näin ollen kaavan 9 mukaan koko paketin lähettämiseen kulunut aika $T_{paketti}$ sekunteina on

$$T_{paketti} = T_{alustus} + T_{o+h} \quad (9)$$

Kaavan 9 mukaan esimerkiksi tyypillisellä 125 kHz:n taajuudella paketin lähetykseen kulunut aika on n. 1483 ms käytettäessä SF-arvoa 12 ja n. 67 ms käytettäessä SF-arvoa 7. Näin ollen teoriassa SF-arvolla 7 voidaan lähettää 8 pakettia minuutissa ($\frac{600 \text{ ms}}{67 \text{ ms}} \approx 8,96$). Esimerkkilaskelmassa hyötykuorman koko on 30 tavua, alustusosan pituus 8 symbolia ja CR-arvo 1. Kuviosta 1 nähdään lähetykseen kulunut aika SF-arvoittain hyötykuorman ollessa 10-50 tavua edellisen esimerkin mukaisilla arvoilla.



KUVIO 1. Lähetykseen kulunut aika 125 kHz taajuuskaistalla.

Kun lähetykseen kulunut aika tiedetään, voidaan arvioida teknologian soveltuvuutta haluttuun tarkoitukseen. Laskelmia tarkastellessa on kuitenkin hyvä ymmärtää, että samalla taajuudella ja samalla SF-arvolla voidaan lähettää vain 1 viesti kerrallaan; mikäli päällekkäisiä lähetyksiä tapahtuu, paketit törmäävät eivätkä välity tukiasemalle (Adelantado, Vilajosana, Tuset-Peiro, Martinez, Melia-Segui & Watteyne 2017, 3). Törmäysten välttämiseksi voidaan käyttää ADR-ominaisuutta (Adaptive Data Rate), jolloin SF-arvoa ja taajuuskaistaa vaihdetaan tietyn mallin mukaisesti. ADR:n käyttö lisää järjestelmän kapasiteettia lyhentämällä lähetykseen käytettyä aikaa, jolloin myös samanaikaisen lähetyksen todennäköisyys pienenee. ADR tulee toteuttaa kuitenkin aina erikseen päätelaitetasolla eikä se ole oletuksena LoRa-WAN-arkkitehtuurin ominaisuus. (Ala-Paavola 2017). Kuviosta 1 voidaan selkeästi nähdä, millainen vaikutus käytetyllä SF-arvolla on kulutettuun lähetyksaikaan ja sen kautta verkon kapasiteettiin.

Yksi tukiasema kykenee välittämään enimmillään n. 700 000 viestiä vuorokaudessa (Makslanti 2017). Kuukan mukaan käytännössä tapahtuvien törmäysten määrää on kuitenkin vaikea arvioida. On kuitenkin selvää, että törmäyksistä johtuvia välittymättömiä viestejä alkaa ilmetä, mitä lähemmäs mennään tiheintä mahdollista lähetyksintervallia ja jos päätelaitteiden määrää samanaikaisesti lisätään. Toisaalta, mitä pienempää SF-arvoa voidaan käyttää, sitä vähemmän törmäyksiä tapahtuu (Kuukka 2017.) IEEE Communications Magazinessa julkaistussa tutkimuksessa laskettiin onnistuneen lähetyksen todennäköisyydeksi alle 15 %, kun päätelaitteita on yli 250 ja kun laitteet pyrkivät tiheimpään mahdolliseen lähetyksintervalliin (Adelantado ym. 2017, 5).

3.2.5 Tietoturva

Liikennöinti LoRaWAN-verkossa on todennettua. Kaikki liikenne verkossa salataan älykkään avainjärjestelmän avulla. (Semtech Corporation.) Vahva salaus varmistaa, että vain päätelaitteen haltialla on pääsy laitteen tuottamaan dataan, ja että yhteyden piirissä on juuri oikeat omistajalle kuuluvat laitteet (Etteplan).

LoRaWAN-protokollassa viestit suojataan kahdella eri turvatasolla, jossa viestien tunnistaminen ja salauksen purkaminen hoidetaan eri salausavaimilla. Verkkotason 32-bittisellä salausavaimella (network session key) varmistetaan pakettien eheys ja niiden päätyminen oikealle käyttäjälle. Varsinaisten viestien salaus puretaan sovellustasolla omalla, niin ikään 32 bitin mittaisella salausavaimellaan (application session key). Molemmat salausavaimet ovat päätelaittekohtaisia ja niiden avulla laitteet kiinnitetään tiettyyn verkkoalustaan. (LoRa device developer guide 2016, 22.) Tyypillisesti laitevalmistajat toimittavat salausavaimet sähköpostitse laitteiden hankkimisen jälkeen (Makslahi 2017). Päätelaitteen salausavaimet saa selville myös kytkemällä päätelaitteen tietokoneeseen samalla tavoin, kuin päätelaitteen asetuksetkin määritellään (LPN DI bridge user manual 2017, 4).

3.2.6 Päätelaitetyypit

LoRa-päätelaitteet jaetaan kolmeen ryhmään sen perusteella, miten ne kykenevät ottamaan vastaan kuittauksia verkosta.

Luokan A laitteet lähetettyään viestin siirtyvät ensin lepotilaan tietyksi ajaksi SF-arvosta riippuen, jonka jälkeen ne avaavat lyhyen ikkunan, jolloin ne voivat ottaa kuittausviestejä vastaan. Luokan A laitteet voivat ottaa vastaan vain ja ainoastaan kuittausviestejä, eivät muunlaisia viestejä verkosta. Esimerkiksi SF-arvolla 12 lepoaika on $1 \text{ s} \pm 20 \text{ } \mu\text{s}$. Mikäli tässä aikaikkunassa kuittausta ei tule, siirtyy laite taas samaksi ajaksi lepotilaan ja avaa sen jälkeen vielä toisen vastaanottoikkunan. Tämän jälkeen laite siirtyy lepotilaan kunnes se lähettää taas uuden viestin. Muina aikoina verkosta ei voida kommunikoida laitteen suuntaan. Luokan A laitteet ovat vähiten virtaa kuluttavia päätelaitteita, ja siksi laiteluokka A on yleisesti käytetty paristokäyttöä vaativissa tapauksissa.

Kaikkien LoRa-päätelaitteiden on täytettävä luokan A ominaisuudet. (Lora device developer guide 2016, 10.)

Laiteluokka B käyttää jaksottaista vastaanottoikkunaa. Laite avaa vastaanottoikkunan jatkuvasti toistuvalla syklillä huolimatta siitä onko laite lähettänyt viestiä vai ei. Laiteluokan B laitteet noudattavat samalla myös luokan A toimintatapaa: lähetyksen jälkeiset kaksi vastaanottoikkunaa ovat kuittausta varten, mutta muissa vastaanottoikkunoissa verkosta voidaan vastaanottaa myös muunlaista tietoa. Ikkunoiden välissä laite on le-vossa. Laiteluokalla saavutetaan parempi tavoitettavuus verkosta käsin kuin luokan A laitteilla, mutta se on silti energiatehokas. (Lora device developer guide 2016, 10.)

C-luokan laitteissa vastaanotto on päällä jatkuvasti. Laite tarkkailee tulevia viestejä kaikkina muina aikoina kuin lähettäessään viestiä tai odottaessaan kuittausta laiteluokan A määritysten mukaisesti. Tämä laitetyyppi kuluttaa laitetyypeistä eniten energiaa (Lora device developer guide 2016, 10.)

3.3 Käytännön sovelluksia

LoRa:n käyttökohteet vaihtelevat laajasti esimerkiksi ympäristöä havainnoivista lämpötila- tai ilmanlaatumittareista laitteiden kunnonvalvontaan, palohälyttimiin, putkiston virtausmittareihin ja ajoneuvojen ja eläinten paikantamiseen (LoRa technology is...). Espoossa VVO hyödyntää Digitan LoRa-verkkoa 200 vuokra-asunnon lämpötila- ja ilmankosteusmittaukseen paristokäyttöisillä antureilla (VVO otti IoT-anturiverkot Espooseen 2016). Irlannin suurimmassa satamassa Corkissa LoRa-verkkoa käytetään raitikonttien paikantamiseen ja lastin lämpötilan tarkkailuun. Paikannuksessa käytetään LoRa-tekniikan omaa paikannusominaisuutta eikä erillistä GPS-paikanninta tarvita. (Semtech LoRa geolocation used... 2016.) Viron Tartossa Fortumin asiakkaiden kaukolämmön kulutusta seurataan paristokäyttöisillä sensoreilla. Sama sensori tuottaa tiedon myös kaukolämpöputkistossa vallitsevasta lämpötilasta, kapasiteetista ja paineesta. (The first LoRaWAN remote... 2017.)

Seuraavassa on esiteltyä kaksi valmista LoRa-päätelaiteratkaisua, jotka voisivat sovel-tua käytettäväksi käytetyissä työkoneissa. Molemmat päätelaitteet toimivat 24 V jännit-teellä.



KUVA 4. WLT 310 -LoRa-lähetin. (Lähde: SKS Automaatio Oy)

SKS Automaatio Oy:n valmistamaan WLT 310 -lähettimeen voidaan kiinnittää Pt100- tai Pt1000-lämpötila-anturi, lämpöpari tai kosteusanturi, tai sillä voidaan siirtää jännite- tai virtasignaalin arvo. Laite valvoo asetettuja raja-arvoja ja lähettää viestin, kun raja-arvo ylittyy. (IoTKey®-lähetin WLT 310.) WLT 310 -lähetin on esitetty kuvassa 4. Laite voisi soveltua esimerkiksi koneen käyntiajan laskemiseen tai tapahtumatiedon välittämiseen kohteissa, joissa verkon laatu on hyvä ja koneet ovat koko ajan radiokan-taman sisällä. Laitteen teknisistä tiedoista ei löydy mainintaa, että laite tallentaisi mit-taamansa arvon siinä tapauksessa, jos viestin lähetys ei syystä tai toisesta onnistu.

Sveitsiläisen Comtac AG:n LPN S0/DI -LoRa-päätelaitteessa on kaksi digitaalista si-sääntuloa, joista laite laskee signaalien laskevien reunojen lukumäärää, ja lähettää lasku-reiden lukuarvot säädetyin väliajoin sovelluspalvelimelle. Laite lähettää samalla myös sisääntulojen tilan (1 tai 0) viimeisimmältä näytteenottohetkeltä sekä viimeisestä tilan muutoksesta kuluneen ajan. Laite tarkkailee sisääntuloja 10 ms välein – tilan tulee olla stabiili kaksi peräkkäistä näytteenottokertaa jotta se lasketaan. Päätelaite nollaa laskurit, kun se on vastaanottanut kuittauksen hyväksytysti tukiasemalta. (LPN DI bridge user manual 2017, 3, 5.) Päätelaite kuuluu LoRa:n laiteluokkaan C (LPN DI bridge technical data sheet 2017, 1).



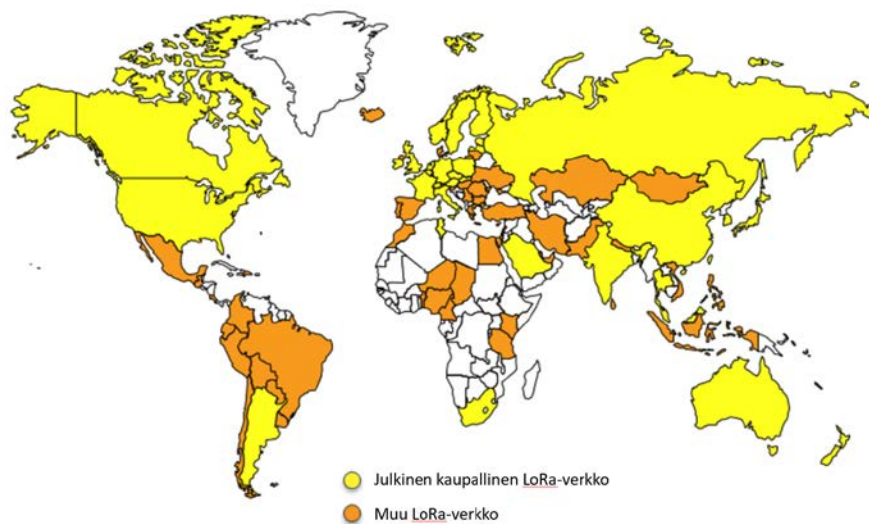
KUVA 5. Comtac LPN S0/DI -LoRa-päätelaite. (Lähde: thingspark.com)

Comtac LPN S0/DI on esitettyä kuvassa 5. Laitetta voitaisiin helposti käyttää tapahtumatiedon laskemiseen ja välittämiseen myös kohteissa, joissa koneet voivat olla osan aikaa radiokantaman ulkopuolella tai joissa viestien välittymistä ei muutoin voida taata. Yhtään tapahtumaa ei tällöin kuitenkaan pääse katoamaan, koska laskurit nollautuvat vain hyväksytyin lähetyksen jälkeen. Viimeisestä tilan muutoksesta kulunutta aikaa taas voitaisiin käyttää ajotuntimäärän laskentaan, kun koneesta saadaan signaali sen ollessa käynnissä: jos edellinen tilan muutos on ollut 0:sta 1:een, tiedetään koneen olevan käynnissä. Tarkka ajankohta voidaan laskea kuluneen ajan perusteella. Vastaavasti taas edellisen muutoksen oltua 1:stä 0:aan, tiedetään ajon päättyneen. Anturin hinta thingspark.com-verkkosivuston verkkokaupassa heinäkuussa 2017 oli 150 euroa.

3.4 Valmiit kaupalliset LoRa-verkot

Mikäli yritys ei halua itse rakentaa omaa LoRa-verkkoaan, on liikenne monissa maissa mahdollista ostaa paikalliselta teleoperaattorilta. Ari Kuukan mukaan LoRa näyttää tulleen jäädäkseen kansainvälisille tiedonsiirtomarkkinoille, sillä verkkoja rakennetaan nyt vauhdilla. (Kuukka 2017.) Suomessa julkisen LoRa-verkon ensimmäinen vaihe valmistui syksyllä 2016 ja se kattaa n. 85 % väestöstä (Digita rakentaa esineiden internetin... 2016). Suomessa hinnoittelu perustuu enimmillään n. euron suuruiseen anturikohtaiseen kuukausimaksuun viestiliikenteen määrästä riippuen. Suomessa verkkoinfrastruktuurin laajentaminen on tyypillisesti asiakkaille maksutonta. (Kuukka 2017.)

Vuoden 2017 aikana operaattoreille mahdollistuu ns. roaming-sopimusten solmiminen eri ulkomaisten teleoperaattoreiden kanssa, jolloin ulkomailla toimittaessa asiakkaan ei välttämättä tarvitse solmia uutta sopimusta paikallisen palveluntarjoajan kanssa. Tämän pitäisi helpottaa tekniikan hyödyntämistä ulkomailla, sillä tällöin asiakkaan laitteet toimivat suoraan paikallisessa verkossa kuten Suomessakin. Ulkomaille teleoperaattorin verkon laajentamisesta koituu asiakkaalle lisäkustannuksia, jotka koostuvat yleensä tukiasemien asennuskuluista, tukiasemapaikkojen vuokrista ja tukiasemien LTE-tiedonsiirtokuluista. (Kuukka 2017.) Kuvassa 6 ovat nähtävissä kattojärjestö LoRa-Alliancen mukaan maat, joissa julkisia kaupallisia verkkoja on saatavilla.



KUVA 6. Julkiset kaupalliset LoRa-verkot maailmassa heinäkuussa 2017. (Lähde: www.lora-alliance.org. Muokattu.)

4 LORA-TESTIT

Suoritetut testit voidaan jakaa kahteen ryhmään: omassa yksityisverkossa tehtyihin testeihin ja teleoperaattorin verkossa tehtyihin testeihin. Testit poikkesivat hieman toisistaan käytettyjen laitteiden ja verkon toiminnan osalta, joten testien tulokset on hyvä pitää erillään. Yksityisverkossa tehdyllä testillä tutkittiin radiokantamaa, luotettavuutta ja siten tekniikan soveltuvuutta terminaalitoiminnan tarpeisiin. Teleoperaattorin verkon testeillä tutkittiin edellisten lisäksi julkisen verkon toimivuutta, saatavuutta ja laajennettavuutta. Molemmissa testeissä tukiasemia sijoitettiin erilaisiin paikkoihin, jotka eivät välttämättä aina olleet optimaalisimpia mahdollisia. Tällä pyrittiin simuloimaan todellisia käyttötapauksia; todellisuudessa tukiasemat saatetaan joutua asettamaan paikkaan johon ne helpoiten ja pienimmin kustannuksin saadaan.

4.1 Testilaitteistot

Yksityisverkko luotiin ulkokäyttöön tarkoitetulla Multitech MTCDTIP-LEU1 -tukiasemalla, josta oli internet-yhteys 4G-modeemin avulla. Tukiasemaan kuului keskusyksikön lisäksi kaksi 4G-antennia, LoRa-antenni sekä PoE-injektori (Power Over Ethernet), josta tukiasema sai käyttöjännitteensä. Tukiasema oli IP68-suojattu. Tukiaseman käyttöönotto oli erittäin vaivatonta: tukiasemaan kytkettiin Ethernet-kaapeli, joka kytkettiin PoE-injektoriin, joka puolestaan kytkettiin 230 V verkkopistorasiaan. Pieniä ongelmia tietyissä tilanteissa aiheutti se, ettei tukiasemassa ollut minkäänlaisia merkkivaloja laitteen toiminnasta – laitteesta ei ulos päin voinut tietää, saako laite käyttöjännitteensä tai onko se kytkeytyneenä verkkoon. Tukiasema toimi kuitenkin pääsääntöisesti moitteitta, joissakin tilanteissa paikkatiedot eivät välittyneet ennen kuin tukiasema ja päätelaite käynnistettiin uudelleen. On kuitenkin mahdotonta sanoa, johtuiko ilmiö tukiasemasta vai päätelaitteesta. Tukiasema antennineen on esitettynä kuvassa 7.



KUVA 7. Multitech MTCDTIP-LEU1 -tukiasema antennineen.

Tukiasemassa käytettiin sisäistä verkkoalustaa. Tämä tarkoittaa, että tukiasema on suoraan yhteydessä sovelluspalvelimelle eivätkä eri tukiasemat tällöin pysty kommunikoi-
maan keskenään. Vaikka kyseinen tukiasema tukee ADR-ominaisuuden käyttöä, jossa verkkoalusta ohjaa päätelaitetta käyttämään taloudellisinta mahdollista taajuuskaistaa ja SF-arvoa, oli ominaisuus otettu pois käytöstä päätelaitteiden suunnittelun helpottamiseksi (Ala-Paavola 2017). Yksityisverkon testiä varten suunnitellut laitteistot kommunikoivat staattisella 125 kHz taajuudella sekä SF-arvolla 9. Käynnistyessään laitteet kiinnittyvät ensimmäiseksi lähetysignaalin havainneeseen tukiasemaan, eivätkä ne sen jälkeen kykene vaihtamaan tukiasemaa ennen kuin ne on käynnistetty uudelleen. (Rintala 2017.) Nämä ratkaisumallit poikkeavat siis aiemmin kuvatusta LoRaWAN-protokollasta.

Ajoneuvoihin kytkettävät päätelaitteet varustettiin GPS-paikantimella. Laite lähetti GPS-paikan ja -ajan 10 sekunnin välein. Hyötykuorman koko oli 72 tavua, jonka vuoksi korkeintaan SF-arvo 9 oli mahdollista käyttää. Tuloksia tarkasteltiin verkkoportaalista, jossa tukiaseman vastaanottaman signaalin voimakkuus voitiin nähdä kartalla. Verkkoportaalista oli myös mahdollista ladata testin aikana tallennetut tiedot csv-tiedostona myöhempää tarkastelua varten. Testin aikana yhtä päätelaitetta muutettiin työn helpottamiseksi siten, että sille voitiin syöttää käyttöjännite USB-akusta. Päätelaitteet oli varustettu ulkoisilla antennilla. Päätelaitteissakaan ei ollut laitteen toiminnasta viestiviä

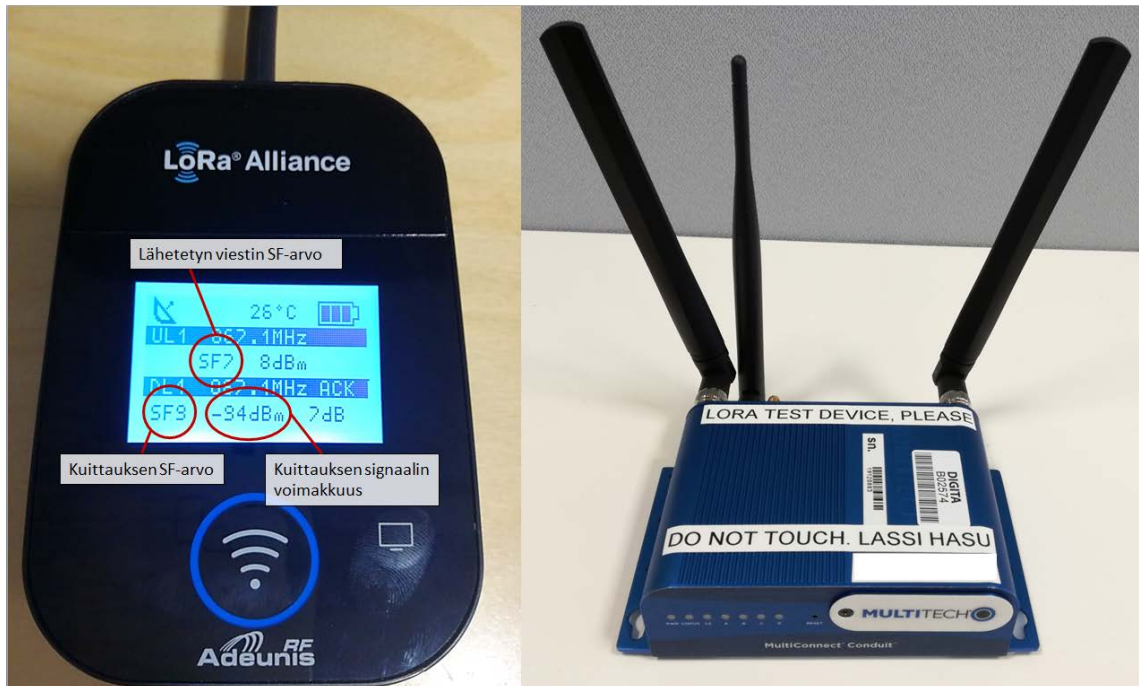
merkkivaloja. Laitteen toiminnan pystyi tarkistamaan vain pystyttämällä tukiasema ja avaamalla verkkoportaalin tietokoneella. Vielä hankalammaksi käytön teki se, että signaalipisteet ilmestyvät verkkoportaalin kartalle ja csv-tiedostoon vain, jos laite pystyi paikantamaan itsensä GPS:n avulla. Tästä johtuen päätelaitteita pystyi käyttämään hyödyksi ainoastaan paikoissa, jossa riittävä GPS-signaali oli saatavilla. Suoritetut testit olivat onnistumisensa kannalta epävarmoja ennen kuin tilannetta pääsi tarkastelemaan verkkoportaalista. Mobiilidatayhteydellä varustettu kannettava tietokone helpotti lopulta testien tekemistä. Ajoneuvoon tarkoitettu päätelaite sekä USB-virralla toimiva päätelaite ovat esitettyinä kuvassa 8.



KUVA 8. Vasemmalla ajoneuvoon tarkoitettu testipätelaite ja oikealla USB-virralla toimivaksi muunnettu testipätelaite.

Teleoperaattorin testissä käytettiin akkukäyttöistä Adeunis RF ARF8123AA -kenttätestilaitetta, jonka näytöltä voitiin lukea sekä laitteen lähettämän signaalin että tukiaseman lähettämän kuittauksen SF-arvot. Lisäksi laitteesta voitiin lukea kuittauksen signaalivoimakkuus, lähetettyjen viestien lukumäärä sekä epäonnistuneiden lähetysten lukumäärä. Niin kenttätestilaite kuin teleoperaattorin verkkokin tukevat ADR-ominaisuutta, jolloin kenttätestilaite käyttää verkkoalustan ja tukiaseman ohjaamana taloudellisinta eli nopeinta mahdollista SF-taajuuskaistayhdistelmää. Testilaitteen lähetysväli oli itse valittavissa laitteen asetuksista. Teleoperaattoriverkon testissä oli lisäksi

käytössä Multitech MTCDT-LEU1 -sisätukiasema verkon laajentamista varten. Kenttätestilaitte ja sisätukiasema näkyvät kuvassa 9.



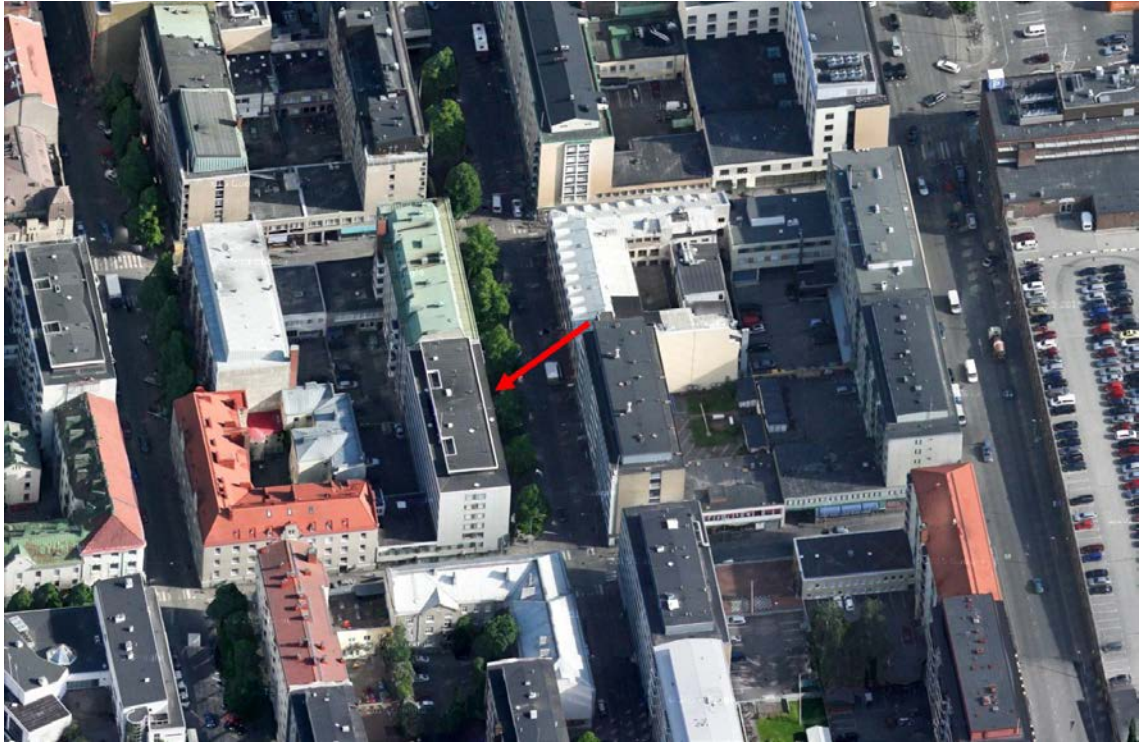
KUVA 9. Vasemmalla akkukäyttöinen Adeunis RF LoRa-kenttätestilaitte, oikealla Multitech MTCDT-LEU1 -sisätukiasema.

4.2 Yksityisverkko

Yksityisverkkoa koeteltiin kaikkiaan neljällä eri testillä erilaisissa ympäristöissä: kaupunkiympäristössä, testiterminaalissa ja satamaterminaaliosuhteissa.

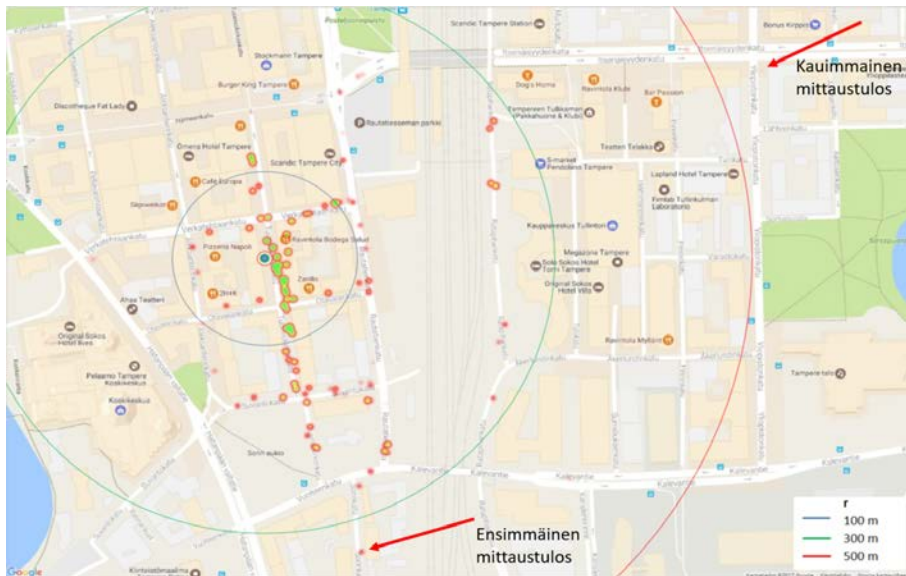
4.2.1 Testi 1: Kaupunkiympäristö

Ensimmäinen yksityisverkon testi suoritettiin tiiviisti rakennetussa kaupunkiympäristössä Tampereen keskustassa. Tukiaseman antenni sijoitettiin ydinkeskustassa sijaitsevan kerrostalon 5. kerroksen upotetun parvekkeen kaiteeseen n. 14 metrin korkeudelle. Antennia vastapäätä kadun toisella puolella idän suunnassa oli 7-kerroksinen kerrostalo, jossa oli lisäksi ullakkokerros. Antennin editse kulki katu pohjois-etelä-suunnassa. Antennin sijainti on merkitty kuvaan 10 punaisella nuolella.



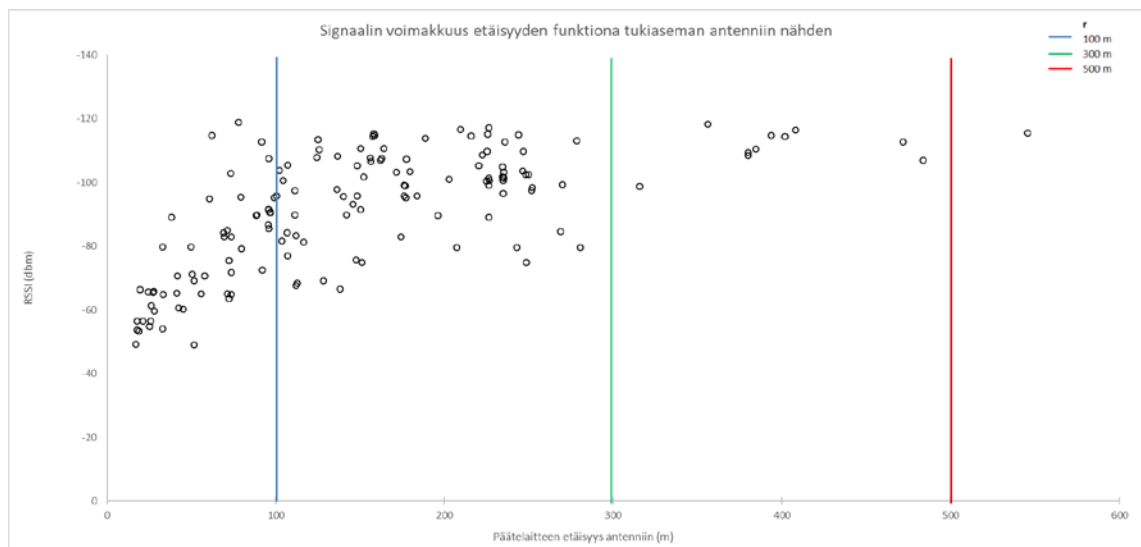
KUVA 10. Antennin sijainti testissä 1. (Lähde: Google Maps. Muokattu)

Yksi päätelaite sijoitettiin henkilöauton kojelaudalle. Testi aloitettiin radiokantaman ulkopuolelta Viinikan kaupunginosasta, josta testialueelle saavuttiin etelä-kaakon suunnalta, jonka jälkeen antennin ympäristössä ajettiin sattumanvaraisesti erilaisia reittejä. Kun antennin sijainti tiedettiin, voitiin kunkin mittauspisteen etäisyys antennista laskea Pythagoraan lauseen avulla. Ensimmäinen tukiaseman havaitsema signaali saatiin n. 350 metrin päästä antennista, kauimmainen signaali 545 metrin päästä. Kuvassa 11 vastaanotetut mittaukset näkyvät kartalla punaisella tai vihreällä värillä: vihreä tarkoittaa voimakasta signaalia, punainen heikkoa. Mitä voimakkaampi väri on, sitä voimakkaampi on signaali. Kuvaan on piirretty apuviivat 100, 300 ja 500 metrin säteellä antennista.



KUVA 11. Testin 1 mittaustulokset kartalla. (Lähde: LoRa-testijärjestelmä, muokattu)

Kuvasta 11 voidaan havaita, että signaali alkaa heiketä voimakkaasti heti antennin sijaintikorttelin länsipuolella, eivätkä kaikki lähetetyt paketit saavu perille. Kuviossa 2 mittaustulokset ovat esitettyinä signaalin voimakkuutena etäisyyden funktiona tukiaseman anteniin nähden. Signaalin voimakkuutta ilmaistaan tässä yksiköllä RSSI (Radio Signal Strength Indicator), joka kertoo signaalin vaimentumisen määrän lähettävän ja vastaanottavan antennin välillä. Mitä negatiivisempi luku on, sitä heikompi signaali on. RSSI:n yksikkö on desibelimetri, dbm. Kuvioon ovat merkittyinä myös samat apuviivat, kuin kuvaan 11.



KUVIO 2. Testin 1 mittaustulosten signaalivoimakkuus etäisyyden funktiona tukiaseman anteniin nähden.

Taulukossa 4 on nähtävissä yhteenvedo testin 1 tuloksista. Kadonneiden pakettien lukumäärä laskettiin tarkastelemalla vastaanotettujen pakettien aikaleimoja, kun päätelaitteen lähetysintervalli oli 10 sekuntia. Jos vastaanotettujen pakettien aikaero oli esimerkiksi 30 sekuntia, voitiin todeta kahden paketin jääneen välittymättä tukiasemalle. Huomioitavaa on, että yksityisverkon testissä onnistuneeksi lähetykseksi tulkitaan viesti, jonka tukiasema vastaanottaa. Tukiaseman kuittauksen perille menemistä ei testissä voitu havainnoida – kuittauksen läpimeno voi tietyissä käyttötapauksissa olla ratkaiseva ominaisuus.

TAULUKKO 4. Yhteenvedo testin 1 tuloksista.

Testi	Ilman lämpötila	Antennin sijaintikorkeus	Lähetettyjen pakettien	Vastaanotetu paketit		Kadonneet paketit		Max RSSI	Min RSSI	Keskim. RSSI	Max etäisyys	Min etäisyys	Kuvaus
				lkm	%	lkm	%						
1	6 °C	14 m	213	149	70,0 %	64	30,0 %	-49 dbm	-119 dbm	-91 dbm	545 m	17 m	Tiheästi rakennettu ympäristö

4.2.2 Testi 2: Kaupunkiympäristö

Testi 2 suoritettiin testiä 1 avarammassa kaupunkiympäristössä, jossa antenni oli sijoitettu Tampereen ammattikorkeakoulun kampusalueelle 3-kerroksisen rakennuksen katolle (kuva 12).



KUVA 12. Antennin sijainti testissä 2. (Lähde: Google Maps. Muokattu)

Antennin sekä kaakois-, lounais- että luoteispuolella oli sijoituspaikkaa korkeampia rakennuksia. Antennin sijoituspaikka valikoitui tukiaseman virransyötön perusteella

entisen hiukkaskeräinaseman sijainnin läheisyyteen. Tukiasema kiinnitettiin katolla olevaan kulkusiltaan ja antenni kulkusillan kaiteeseen kuvan 13 mukaisesti.



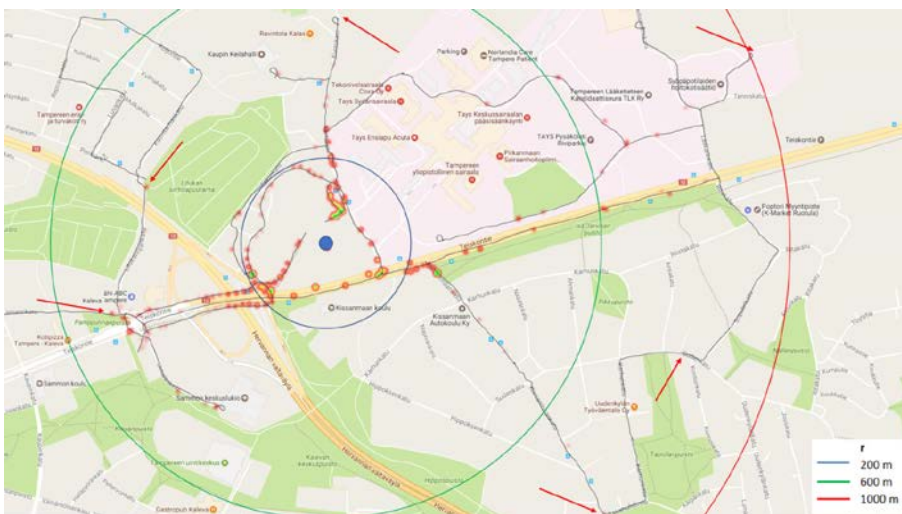
Kuva 13. Tukiaseman ja antennin sijoittelu testissä 2.

Testi 2 suoritettiin kahdella päätelaitteella: akkukäyttöisellä päätelaitteella jalan tehtävää testiä varten ja ajoneuvoon kiinnitettävällä päätelaitteella etäälle ulottuva testiä varten. Tällä kerralla antenni sijoitettiin henkilöauton korin ulkopuolelle sivupeiliin kuvan 14 mukaisesti.



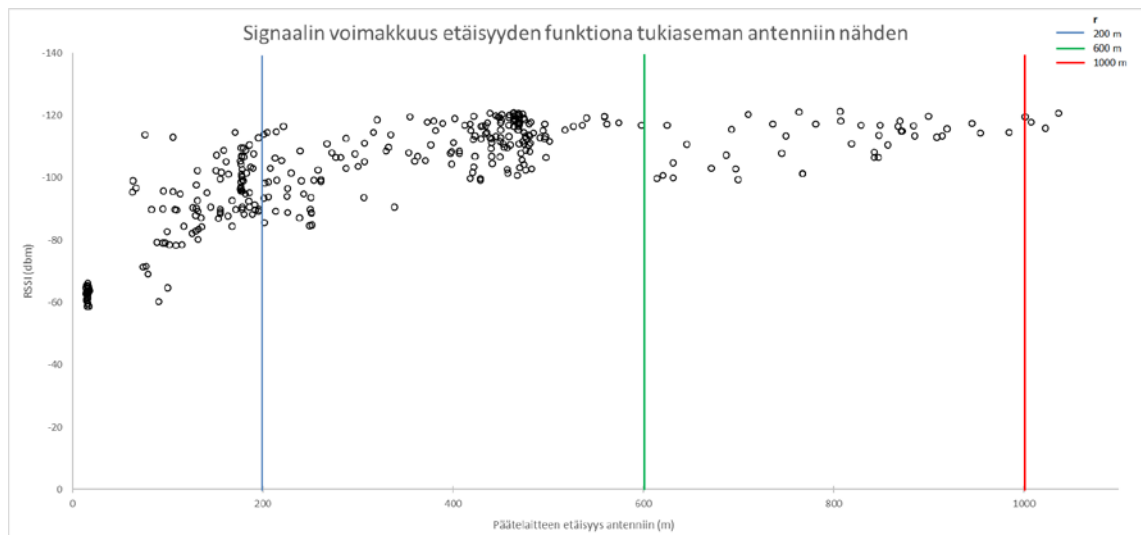
Kuva 14. Henkilöautoon kiinnitetyn päätelaitteen antennin sijoittelu.

Testissä kuljettiin ensin jalkaisin kampusalueella ja sen jälkeen henkilöautolla lähiympäristössä. Mittaustulokset kartalla ovat nähtävissä kuvassa 15. Kuvaan on tällä kertaa merkitty myös kuljettu reitti harmaalla viivalla. Kuvassa on apuviivat 200, 600 ja 1000 metrin säteellä sekä kauimmat signaalin havaintopisteet eri ilmansuunnissa merkittyinä punaisilla nuolilla.



KUVA 15. Testin 2 tulokset kartalla. (Lähde: LoRa-testijärjestelmä, muokattu)

Kuvasta 15 voidaan todeta, että kuvassa 12 näkyvä antennin luoteispuolella sijaitseva kampuksen päärakennus estää signaalin kulkeutumisen luoteeseen arviolta 200:ta metriä kauemmas. Sen sijaan koilliseen signaali kantaa antennin sijoituskorkeutta huomattavasti korkeampien sairaalarakennusten taakse. Kuviossa 3 ovat esitettyinä testin 2 mitaustulosten signaalin voimakkuudet etäisyyden funktiona tukiaseman antenniin nähden.



KUVIO 3. Testin 2 mittaustulosten signaalivoimakkuus etäisyyden funktiona tukiaseman antenniin nähden.

Taulukossa 5 on esitettyä yhteenveto testin 2 tuloksista.

TAULUKKO 5. Yhteenveto testin 2 tuloksista.

Testi	Ilman lämpötila	Antennin sijaintikorkeus	Lähetettyjen pakettien	Vastaanotetu paketit lkm	%	Kadonneet paketit lkm	%	Max RSSI	Min RSSI	Keskim. RSSI	Max etäisyys	Min etäisyys	Kuvaus
2	12 °C	12 m	460	346	75,2 %	114	24,8 %	-59 dbm	-121 dbm	-102 dbm	1036 m	15 m	Avara rakennettu ympäristö

4.2.3 Testi 3: Testiterminaali

Testi 3 toteutettiin kahdessa osassa Kalmarin testikentän tuntumassa. Testi tehtiin käyttäen kahta eri tukiaseman antennin korkeutta, jolloin kannettavalla päätelaitteella kuljettiin sama reitti molemmille testin osille. Ensimmäisessä osassa antenni oli sijoitettuna n. 1,5 metrin korkeudelle (testi 3a), toisessa n. 9 metrin korkeudelle (testi 3b). Antennin sijainti on merkitty keltaisella nuolella ja kuljettu reitti punaisella viivalla kuvaan 16, testin osien välillä ainoastaan antennin korkeutta muutettiin. Kuvaan on myös merkitty

alueella olleet rahtikontit ja muut esteet, joita karttapalvelussa ei ollut näkyvissä. Testin 3 ympäristöä voidaan pitää terminaaliympäristölle tyypillisenä.



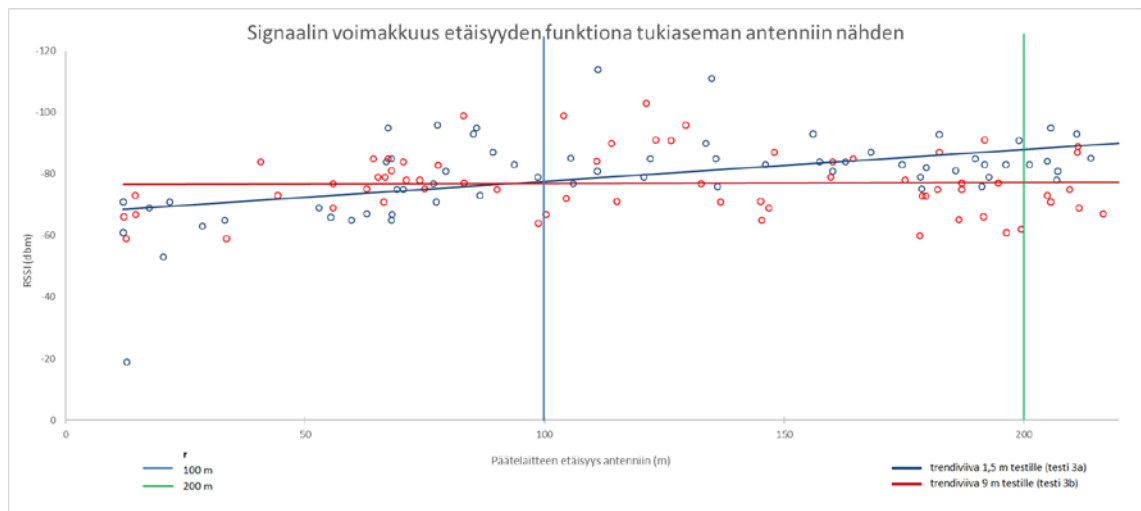
KUVA 16. Antennin sijainti ja kuljettu reitti testissä 3. (Lähde: Google Maps, muokattu)

Molempien testin osien mittauspisteet ovat nähtävissä kuvassa 17. Nyt pisteet ovat merkittyinä satelliittikartalle. Karttaan on lisäksi merkitty apuviivat 100 ja 200 metrin säteelle antennista.



KUVA 17. Testin 3 tulokset kartalla. (Lähde: LoRa-testijärjestelmä, muokattu)

Kuviossa 4 testin 3a tulokset ovat esitettyinä sinisellä ja testin 3b tulokset punaisella värillä. Kuvioon on 100 ja 200 metrin apuviivojen lisäksi merkitty trendiviivat kummallekin testille. Kuvioista voidaan havaita, että antennin ollessa sijoitettuna 9 metrin korkeudelle ei signaalin voimakkuus tilastollisesti juuri muutu etäisyyden muuttuessa testin 3 etäisyyksillä.



KUVIO 4. Testin 3 mittaustulosten signaalivoimakkuus etäisyyden funktiona tukiaseman antenniin nähden.

Taulukossa 6 on esitettyä yhteenveto testin 3 tuloksista. Saaduista tuloksista voidaan nähdä, että kadonneiden pakettien osuus oli hieman pienempi antennin ollessa sijoitettuna 9 metrin korkeuteen. Samoin sekä huonoin että keskimääräinen signaalivoimakkuus olivat parempia tukiaseman antennin ollessa 9 metrin korkeudessa kuin tukiaseman antennin ollessa 1,5 metrin korkeudessa. Testin erot ovat kuitenkin tilastollisesti hyvin pieniä.

TAULUKKO 6. Yhteenveto testin 3 tuloksista.

Testi	Ilman lämpötila	Antennin sijaintikorkeus	Lähetettyjen pakettien	Vastaanotetu paketit		Kadonneet paketit		Max RSSI	Min RSSI	Keskim. RSSI	Max etäisyys	Min etäisyys	Kuvaus
				lkm	%	lkm	%						
3a	16 °C	1,5 m	78	65	83,3 %	13	16,7 %	-19 dbm	-114 dbm	-80 dbm	222 m	13 m	Testikenttä / pienteollisuusalue
3b	16 °C	9 m	76	66	86,8 %	10	13,2 %	-53 dbm	-103 dbm	-77 dbm	220 m	12 m	Testikenttä / pienteollisuusalue

4.2.4 Testi 4: Satamaterminaali

Testi 4 suoritettiin terminaalitraktorein operoitivassa satamaterminaalissa, jossa lastataan RoRo-aluksia. Terminaalissa käytetään Terberg-terminaalitraktoreita, joilla kuljetaan puoliperävaunuja laivaan ja sieltä ulos. Satama-alue on pinta-alaltaan vajaan 18 hehtaarin suuruinen. Ajoneuvopäätelaitteet asennettiin kahteen terminaalitraktoriin siten, että koneen sytytysvirran ollessa päällä päätelaitteet kytkeytyvät päälle. Päätelaitteet sijoitettiin traktorin ohjaamon alapuolella sijaitsevaan sähkökaappiin ja antennit oikeanpuoleisen peilimaston päähän ja ne ovat merkittyinä keltaisella kuvassa 18.



KUVA 18. Vasemmalla Terberg-terminaalitraktorin sähkökaappi ja ajoneuvopäätelaite, oikealla antennin sijoituspaikka.

Tukiasema ja sen antenni sijoitettiin konesuojaan, jossa terminaalitraktoreita säilytetään. Sijoituspaikka valikoitui sähkön saannin ja kiinnitysmahdollisuuksien perusteella. Konesuoja on avoin luoteissuuntaan, kaakkoissuuntaan vastassa on betoniseinä ja kevytrakenteinen varastohalli. Testissä lastattava rahtialus sijaitsi antennista etelään karttapalvelun mukaan n. 70-200 metrin päässä koillis-lounaissuuntaisesti. RoRo-aluksen ajorampille antennista oli matkaa n. 70 metriä. Tukiaseman ja aluksen sijainnit ovat esitettyinä kuvassa 19.



KUVA 19. Tukiaseman antennin ja rahtialuksen sijainti. (Lähde: LoRa-testijärjestelmä, muokattu)

Testissä suoritettiin aluksen täysimittainen purku ja lastaus valmistelutöineen n. 6 tunnin aikana molemmilla traktoreilla. Testin tulokset kartalla ovat nähtävissä kuvassa 20 – kuvaan on merkitty apuviivat 100 ja 200 metrin säteelle tukiaseman antennista.



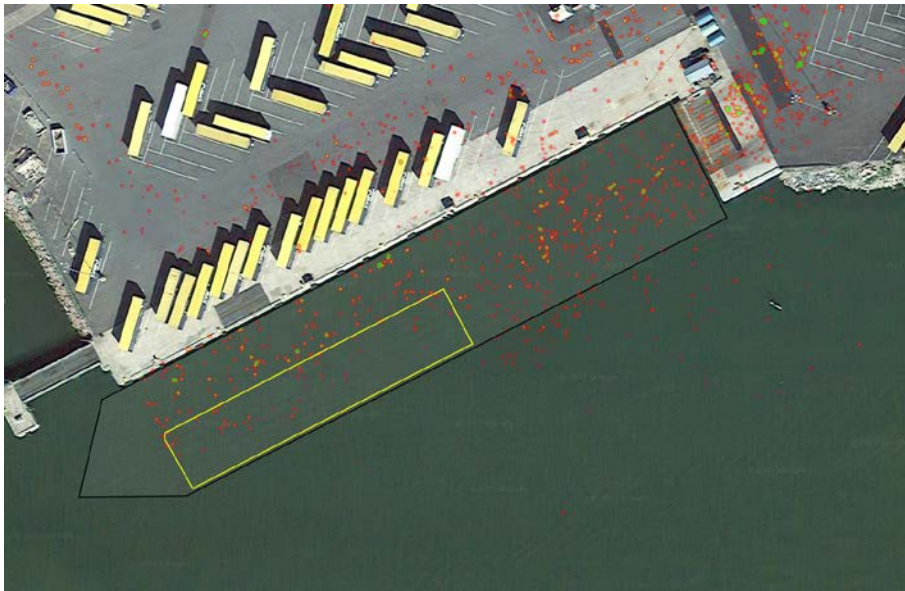
KUVA 20. Testin 4 tulokset kartalla.

Kuvaa tulkittaessa on ymmärrettävä, että laivassa on lastiruuman lisäksi ulkokansi, joka niin ikään lastattiin puoliperävaunuilla. Perävaunut kuljetetaan yläkannelle ramppia pitkin, joka sijaitsee aluksen vasemmalla puolella ja ulottuu perästä aluksen puoleen väliin asti (kuva 21). Kuvasta 20 ei näin ollen voida tietää, mitkä näytteet ovat tulleet laivan sisältä ja mitkä sen ulkokannelta. Sitä ei myöskään voida tulkita muista tuloksista. Signaalipisteiden osalta kuva 20 on täysin suodattamaton – kuvasta havaitaan, miten aluksen sisällä GPS-signaalin tarkkuus saattaa heiketä ja osa pisteistä siirtyä epätodelliseen paikkaan.



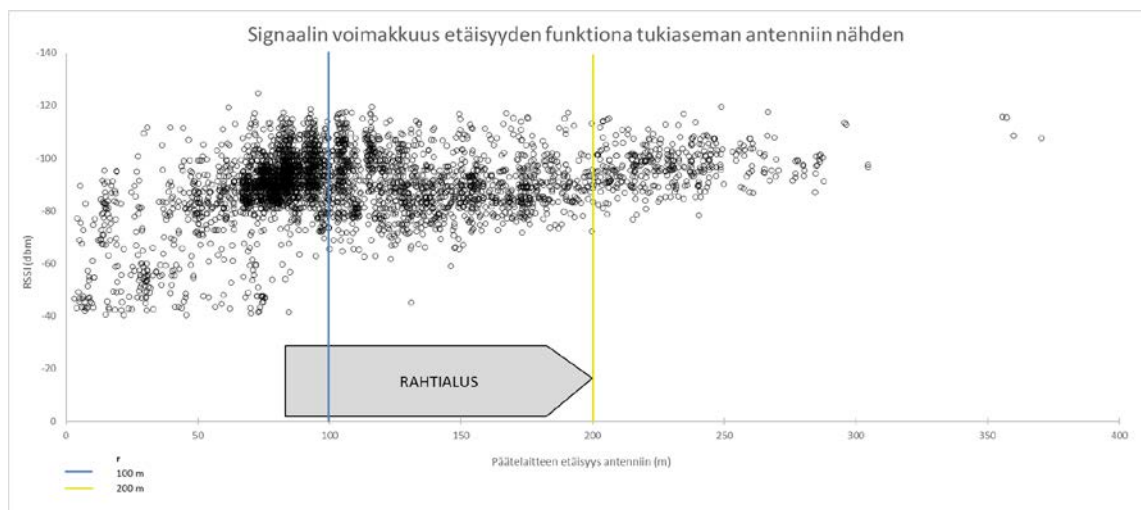
KUVA 21. Testissä lastattu rahtialus. (Lähde: shipspotting.com)

Kuvassa 22 on lähemmin tarkasteltuna alue, jossa alus testihetkellä sijaitti. Kuvasta huomataan, että signaalipisteitä on vähemmän aluksen keulan ja vasemman laidan neljänneksellä, kuin muualla laivassa. Alue on merkitty kuvaan keltaisella. Voi olla, että kyseiseen osaan laivaa on todellisuudessa ajettu traktorilla vähemmän tai ei lainkaan. Toinen syy voi olla, että syystä tai toisesta päätelaitteet kadottavat GPS-signaalinsa kyseisessä osassa laivaa, jolloin pisteitä ei voida sijoittaa kartalle eivätkä mittaustulokset ole muissakaan laskemissa mukana. Kolmas ja todennäköisin syy lienee kuitenkin se, että signaalit eivät kantaudu päätelaitteen ja tukiaseman välillä, sillä alue on laivassa kauimmaisimpana tukiasemasta.



KUVA 22. Signaalipisteet aluksen sisältä lähemmin tarkasteltuina.

Kuviosta 5 voidaan tarkastella radiosignaalin voimakkuutta etäisyyden muuttuessa testissä 4. Kuvaan ovat merkittynä 100 ja 200 metrin apuviivat sekä harmaalla alueella laivan sijainti. Kuviosta voidaan huomata, että mittauspisteet vähenevät mentäessä rampilta kohti aluksen keulaa. Kuviota 5 tarkasteltaessa tulee muistaa, että se esittää signaalivoimakkuudet tukiaseman antennista kaikkiin ilmansuuntiin, ei pelkästään laivan suuntaan.



KUVIO 5. Testin 4 mittaustulosten signaalivoimakkuus etäisyyden funktiona tukiaseman antenniin nähden.

Testin 4 tärkeimmät tunnusluvut ovat esitettyinä alla taulukossa 7. Tulosten perusteella laiva ei tuota lisää pakettihäviötä, sillä kadonneiden pakettien osuus on alle 14 % – sa-

maa luokkaa kuin testissä 3b. Tähän testiin saatiin lisäaineistoa verkkoportaalien ylläpitäjältä, minkä vuoksi GPS-signaalin puuttumisesta johtuvat pakettihäviöt voitiin jättää pois laskuista. Vaikka tukiaseman antenni saatiin sijoitettua melko lähelle lastattavaa laivaa, on antennin sijoittelussa silti paljon parantamisen varaa. Tuomalla antenni ulos konesuojasta ja nostamalla sitä ylempäs tulosten voidaan olettaa paranevan.

TAULUKKO 7. Testin 4 mittaustulokset.

Testi	Ilman lämpötila	Antennin sijaintikorkeus	Lähetettyjen pakettien	Vastaanotetu paketit lkm %	Kadonneet paketit lkm %	Max RSSI	Min RSSI	Keskim. RSSI	Max etäisyys	Min etäisyys	Kuvaus
4	18 °C	1,5 m	4433	3821 86,2 %	612 13,8 %	-40 dbm	-125 dbm	-90 dbm	370 m	5 m	Satamaterminaali

Taulukossa 8 ovat esitettyinä yhteenvedot kaikista yksityisverkon testeistä. Testejä 3a, 3b ja 4 yhdistää se, että niissä ei etsitty pisintä mahdollista kantamaa, eli tarkoituksenmukaisesti kuljettu kantaman ulkopuolelle. Tämä vaikuttaa niin pakettihäviöön kuin RSSI-arvoihin, kun testejä 3a, 3b ja 4 verrataan testeihin 1 ja 2.

TAULUKKO 8. Yhteenvedo yksityisverkon testien tuloksista.

Testi	Ilman lämpötila	Antennin sijaintikorkeus	Lähetettyjen pakettien	Vastaanotetu paketit lkm %	Kadonneet paketit lkm %	Max RSSI	Min RSSI	Keskim. RSSI	Max etäisyys	Min etäisyys	Kuvaus
1	6 °C	14 m	213	149 70,0 %	64 30,0 %	-49 dbm	-119 dbm	-91 dbm	545 m	17 m	Tiheästi rakennettu ympäristö
2	12 °C	12 m	460	346 75,2 %	114 24,8 %	-59 dbm	-121 dbm	-102 dbm	1036 m	15 m	Avara rakennettu ympäristö
3a	16 °C	1,5 m	78	65 83,3 %	13 16,7 %	-19 dbm	-114 dbm	-80 dbm	222 m	13 m	Testikenttä / pienteollisuusalue
3b	16 °C	9 m	76	66 86,8 %	10 13,2 %	-53 dbm	-103 dbm	-77 dbm	220 m	12 m	Testikenttä / pienteollisuusalue
4	18 °C	1,5 m	4433	3821 86,2 %	612 13,8 %	-40 dbm	-125 dbm	-90 dbm	370 m	5 m	Satamaterminaali

4.3 Teleoperaattorin verkko

Teleoperaattorin verkkoa testattiin ensin kahdessa eri osassa testiterminaaliolosuhteissa kulkemalla kenttätestilaitteen kanssa sama reitti kuin testissä 3. Testin 5 tarkoituksena oli testata päätelaitteen ADR-ominaisuutta ja järjestelmän mukautuvuutta silloin, kun kentän voimakkuutta muutetaan. Testissä 6 testattiin verkon toimintaa päätelaitteeseen asetetulla kiinteällä SF-arvolla. Testien lähtötiedot ovat esitettyinä taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Testien 5 ja 6 lähtötiedot.

	Testin tunnus						
	5a	5b	5c	6a	6b	6c	6d
SF	ADR	ADR	ADR	12	10	8	7
Tukiaseman sijainti	ei tukiasemaa	A	B	B	B	B	B

Tukiasemien sijainnit ovat esitettyinä kuvassa 23.

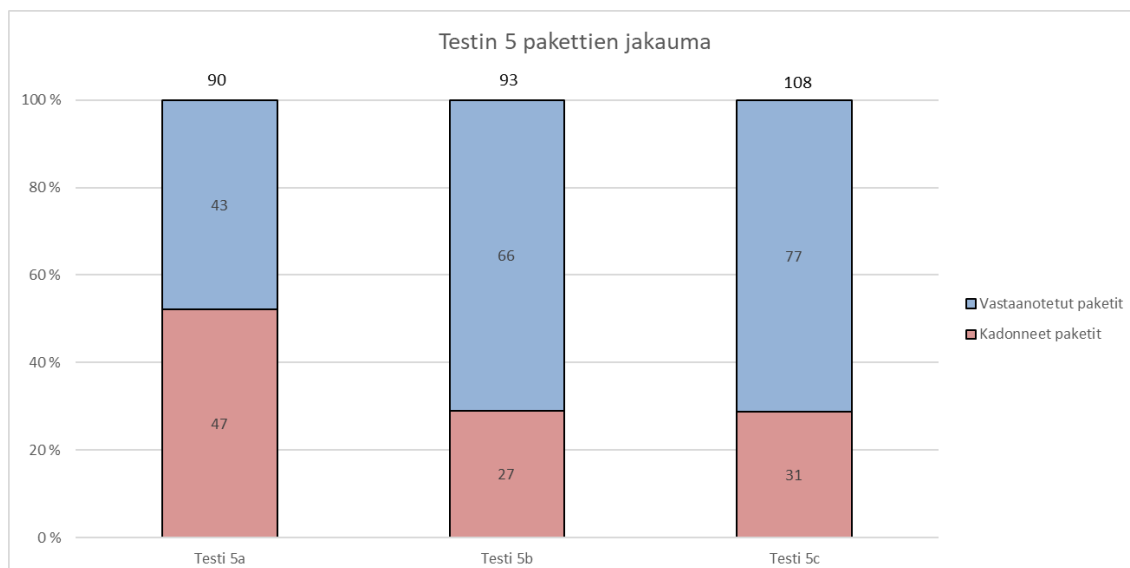


KUVA 23. Testien 5 ja 6 reitti ja tukiasemien sijainnit. (Lähde: Google Maps, muokattu)

4.3.1 Testi 5: Testiterminaali

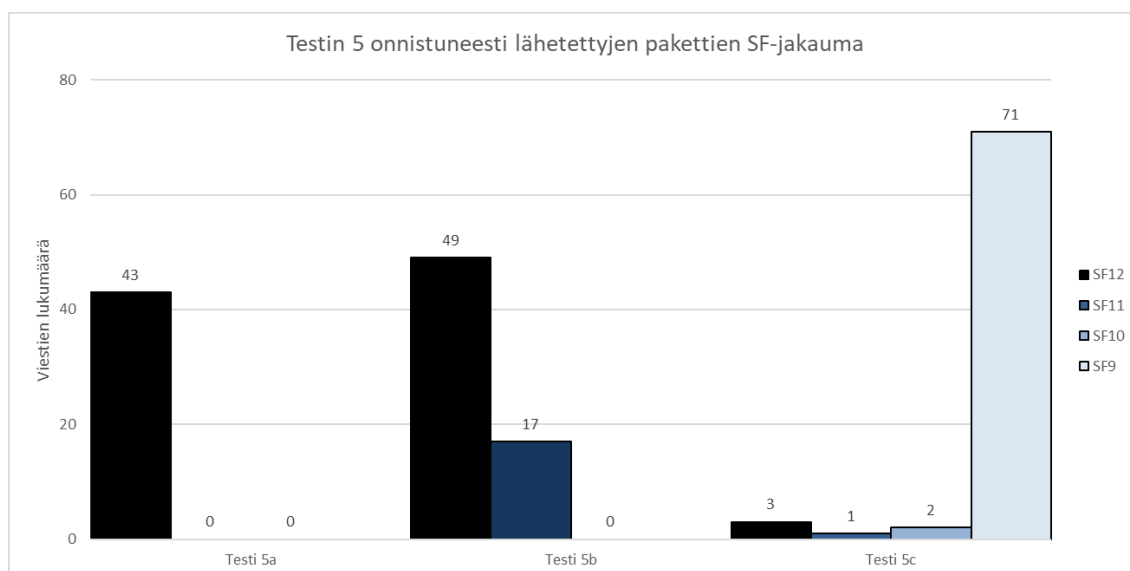
Testissä 5a testattiin teleoperaattorin verkkoa jo olemassa olevalla telekommunikaatiomastoin luodulla verkolla. Testissä 5b taas tutkittiin verkkoa laajentamalla se alueelle sisätukiaseman avulla tukiaseman ollessa rakennuksen sisällä ensimmäisessä kerroksessa. Testissä 5c tukiasemaa käytettiin rakennuksen sisällä kolmannessa kerroksessa edellistä lähempänä testialuetta.

Testeissä kirjattiin ylös lähetettyjen pakettien ja onnistuneiden lähetysten lukumäärät. Tässä teleoperaattoritesti eroaa yksityisverkon testistä – onnistunut lähetys on lähetys, josta kenttätestilaite saa kuittauksen tukiasemalta. Lisäksi testissä kirjattiin ylös kuittaussignaalin lähettämiseen käytetty SF-arvo, sillä se kuvaa parhaiten verkon laatua kussakin testin pisteessä. Tulosten mukaan testin aikana verkko käytti kuittausten lähettämiseen SF-arvoja välillä 9–12. Kuviosta 6 on tulkittavissa testin 5 pakettien jakauma: pakettien lukumäärät ovat merkittyinä kuvaajan palkkeihin.



KUVIO 6. Testin 5 lähetettyjen pakettien jakauma.

Kuviosta voidaan tulkita, että kadonneitten pakettien lukumäärä arviolta tippuu kahteen kolmannekseen, kun sisätukiasema tuodaan testialueelle. Tukiaseman sijainnilla ei silti näyttäisi olevan suurta merkitystä, sillä sekä testissä 5b että testissä 5c n. 30 % lähetetyistä paketeista katoaa. Tilanne näyttäytyy kuitenkin toisenlaisessa valossa, kun tarkastellaan eri testeissä käytettyjä SF-arvoja. Testin aikana käytettyjen SF-arvojen jakaumat ovat esitettyinä kuviossa 7.



KUVIO 7. Testin 5 onnistuneesti lähetettyjen viestien lukumäärät SF-arvoittain.

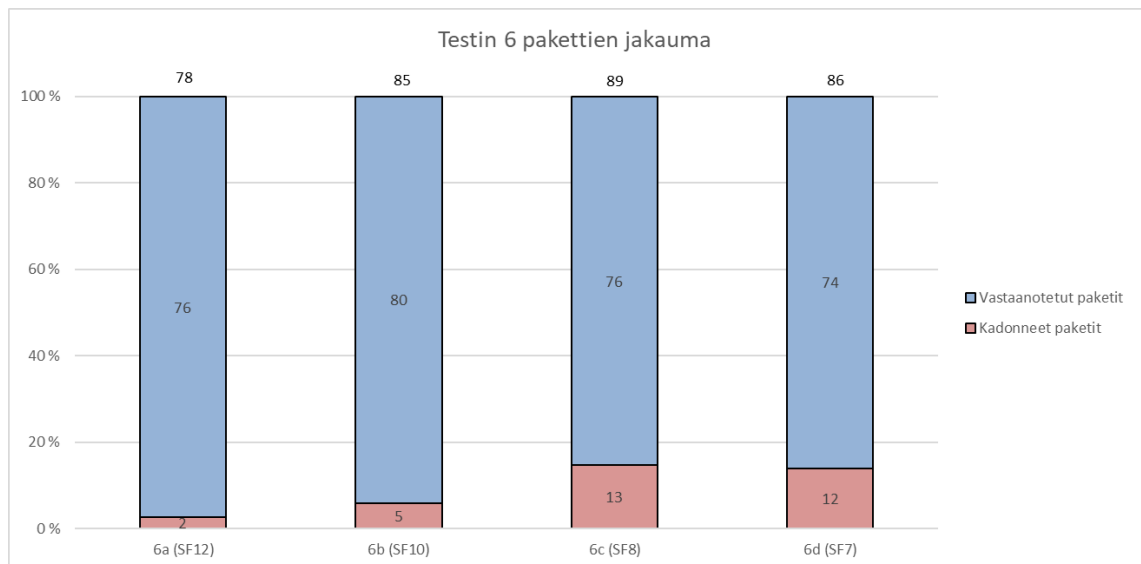
Kuviosta 7 havaitaan, että tukiaseman siirtäminen kaksi kerrosta ylemmäs ja testiä 5b lähemmäs testialuetta parantaa merkittävästi alueella vallitsevan verkon laatua. Testeissä 5a ja 5b kuittaukset kenttätelaitteeseen välitettiin pääsääntöisesti käyttäen SF-arvoa

12, kun taas testissä 5c SF-arvoa 9 käyttäen. Yhteyden tiedonsiirtokapasiteetti käytettäessä SF-arvoa 9 on kolminkertainen verrattuna siihen, jos verkko käyttää SF-arvoa 12. Vastaavasti viestin lähetykseen kulunut aika laskee kolmannekseen, jos käytetään SF-arvoa 9 SF-arvon 12 sijaan.

Likimain yhtä suuri kadonneiden pakettien osuus testeissä 5b ja 5c selittyy osittain kenttätestilaitteessa käytössä olevasta ADR-ominaisuudesta, joka tunnetusti verkon ohjaamana optimoi verkon käyttöä. Paketteja voi kadota, jos esimerkiksi verkko on käskenyt testilaitetta tarkkailemaan kuittauksia SF-arvolla 8, mutta päätelaite liikkuu viestien välillä sille epäedullisempaan asemaan, jossa SF-arvo 8 ei enää olekaan kantaman kannalta riittävä. Näin kuittaus jää saapumatta perille. Testilaitte havaitsee, ettei se vastaanottanut kuittausta, siirtyy tarkkailemaan ylempää SF-arvoa ja lähettää viestin uudelleen. Sama voi tapahtua myös lähetettävän viestin osalta. Päätelaitesovelluksen toteutuksesta riippuu, miten kadonneen viestin tai kuittauksen tilanteessa laite käyttäytyy. Testissä käytetyn laitteen kohdalla laite saattoi joutua lähettämään saman viestin jopa kolmesti, ennen kuin oikea SF-arvo löytyi ja laite sai lähetettyä viestin ja vastaanotettua kuittauksen.

4.3.2 Testi 6: Testiterminaali

Testissä 6 testireitti kuljettiin neljästi käyttäen päätelaitteessa kiinteää SF-arvoa taulukon 8 mukaisesti. Nyt siis verkko ei ohjaa laitteen toimintaa. Laite osaa silti tarvittaessa käydä tarkistamassa käyttämäänsä SF-arvoa suuremman arvon, jos kuittausta ei kuulu. Testin aikana huomattiin, että laite kykenee kasvattamaan myös lähetyksen SF-arvoa yhdellä pykälällä määritetystä, jos kuittausta ei saada. Testin 6 lähetettyjen pakettien jakaumat lukumäärineen ovat nähtävissä kuviosta 8.



KUVIO 8. Testin 6 lähetettyjen pakettien jakauma.

Kuviosta 8 voidaan nähdä, että miltei kaikki lähetykset onnistuivat käytettäessä SF-arvoa 12. Testin 6 mukaan SF-arvojen 8 ja 7 välillä ei ole juurikaan eroa pakettien läpimenossa. Tilastollisesti testin 6 tulosten erot eivät ole merkittäviä eikä pitkälle meneviä johtopäätöksiä voida tehdä. Sen sijaan kun verrataan testejä 5c ja 6 voidaan todeta ADR-ominaisuuden todella tuottavan kadonneita paketteja tai kuittausviestejä. Testissä 5c lähetetyistä paketeista kuittaus jäi saapumatta n. 30 %:n viesteistä, kun sama luku testissä 6 oli suurimmillaan n. 15 %.

Teleoperaattorin verkkoa ja sisätukiasemaa testattiin myös rakennusten sisällä: Kalmar Tampereen TCC:n toimistorakennuksessa ja 60-luvulla rakennetussa asuinkerrostalossa. Toimistorakennuksessa kuvan 49 mukaisista tukiaseman sijoituspaikoista saatiin kummastakin vähintään SF9-tasoinen peitto kaikkialle kaikkiin kerroksiin ensimmäisestä viidenteen. Myös kellarikerroksesta saatiin onnistunut lähetykset muutamasta kohdasta SF-arvolla 12, muttei kaikkialta. Asuinkerrostalossa viidennestä kerroksesta luotu verkko ulottui katutasosta kahdeksannen kerroksen ullakolle vähintään SF9-tasoisena. Myös tässä testissä suurimpaan osaan kellarikerrosta peitto saatiin SF-arvolla 12.

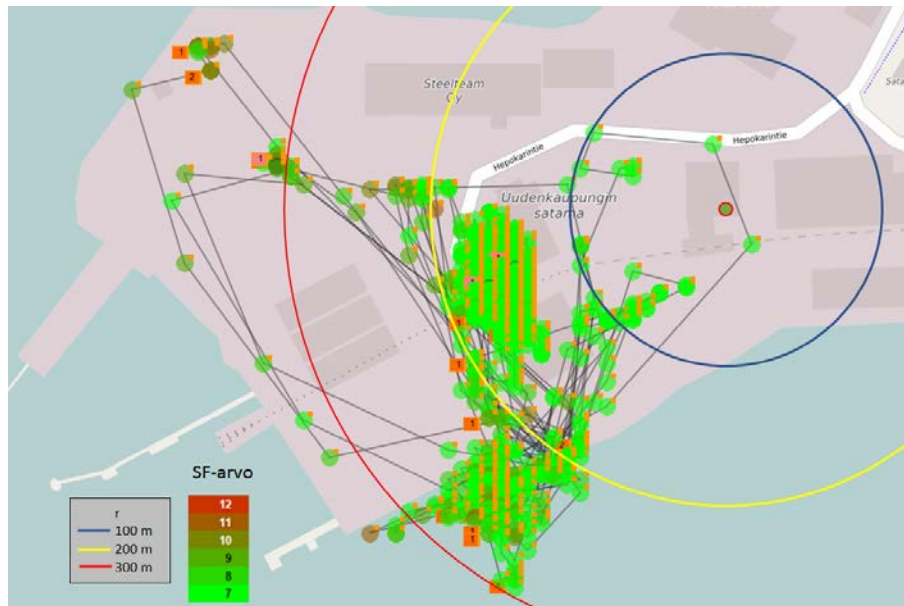
4.3.3 Testi 7: Satamaterminaali

Teleoperaattorin verkkoa testattiin satamaterminaalissa samanaikaisesti testin 4 kanssa. Testeissä 5 ja 6 käytetty sisätukiasema sijoitettiin huoltohalliin sataman itäosassa (kuva 25). Aiemmin käytetty kenttätestilaite sijoitettiin varavirtalähteellä varustettuna terminaali-traktorin sähkökaappiin (kuva 24). Testilaitteen ADR-ominaisuus oli kytkettynä päälle virran säästämiseksi lähetyksintervallin ollessa 20 sekuntia. Traktori oli sama, johon oli asennettuna myös yksityisverkon testissä käytetty päätelaite.



KUVA 24. Kenttätestilaite ja varavirtalähde merkittynä keltaisella.

Tällä kertaa testituloksista pyydettiin operaattorilta verkkoalustan rekisteröimät mittaus-tulokset, jotka testilaite oli lähettänyt. Kuvassa 25 nähdään tulokset sijainnin mukaan: ympyrän väri kertoo käytetyn SF-arvon lähetettäessä päätelaitteelta verkon suuntaan. Kuvasta huomataan, että kirjatuihin signaaleihin hyvin suuri osa on kyetty välittämään käyttämällä SF-arvoja 7–9. Kuvaan 25 on merkitty myös tukiaseman sijainti ja kehä- apuviivat 100, 200 ja 300 metrin välein.



KUVA 25. Testin 7 mittaustulokset kartalla. (Lähde: Digita Oy)

Tuloksista selviää mm. se, kuinka monta kertaa lähetys on epäonnistunut ADR-ominaisuuden takia, jolloin testilaite on lähettänyt saman viestin uudelleen. Tiedoista ilmenee myös, mikäli viesti on jäänyt kokonaan välittymättä tukiasemalle. Yllättävää tuloksissa oli kadonneiden pakettien alhainen määrä. Viestien osuus, jotka päätelaite oli joutunut lähettämään uudelleen, oli 5,4 %. Kaksi viestiä ei saapunut lainkaan tukiasemalle. Testin tulosten yhteenveto on nähtävissä taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Testin 7 tulosten yhteenveto.

	Ilman lämpötila	Antennin sijaintikorkeus	Lähetettyjen pakettien lkm	Vastaanotetu pakettit		ADR:n takia kadonneet pakettit		Kokonaan kadonneet pakettit		Max RSSI	Min RSSI	Keskim. RSSI	Kuvaus
				lkm	%	lkm	%	lkm	%				
Testi 7	18 °C	1,5 m	4122	3899	94,6 %	221	5,4 %	2	0,0 %	-67	-120	-101,7	satamaterminaali

Tuloksista voidaan päätellä, että todellisuudessa ADR-ominaisuus oikein toteutettuna estää tehokkaasti viestien katoamisen. ADR voi kuitenkin todennäköisesti aikaansaada sen, että viestin lähetys viivästyy säädetyistä intervallista.

Edellä kuvattujen testien lisäksi teleoperaattorin verkkoa testattiin ympäri Tamperetta. Tulosten perusteella telekommunikaatiomastoin luodun verkon perustaminen ja käyttökelpoisen IoT-verkon aikaansaaminen ovat vielä kesken. Kaupunkialueella miltei kaikki viestit kulkivat SF-arvolla 12, mikäli kuittaus onnistuttiin saamaan. Tampereen ydin-keskustassa oli havaittavissa melko laaja katvealue.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia LoRa-radiotekniikan soveltuvuutta tiedonsiirtomenetelmäksi eritoten käytettyihin lastinkäsittelylaitteisiin, joissa ei ennestään ole langatonta tiedonsiirtoväylää. Tällöin tärkeitä ominaisuuksia ovat päätelaitteiden, verkkoinfrastruktuurin ja tiedonsiirron edullinen hinta, päätelaitteiden asennuksen ja käyttöönoton helppous sekä verkkoinfrastruktuurin käyttöönoton vaivattomuus. Tavoitteena oli löytää käyttötapauksia, joihin LoRa-tekniikka soveltuu. Opinnäytetyössä tutkittiin LoRa-tekniikan toimivuutta, luotettavuutta ja radiokantamaa, sekä julkisen kaupallisen verkon saatavuutta ja laajennettavuutta. LoRa-tekniikkaa verrattiin ominaisuuksiltaan muihin tyypillisesti käytettyihin IoT-tiedonsiirtoratkaisuihin.

5.1 LoRa ja kilpailijat

Vartenotettavimpia vaihtoehtoja LoRa:lle ovat muut WAN-tyyppiset tiedonsiirtomenetelmät. Näistä nykyisin käytössä oleva LTE-yhteys on järeän tiedonsiirtokapasiteetin vuoksi yliampuva ja kallis, joskin hyvin saatavilla. Taulukossa 11 on esitettyä esimerkkilaskelma WAN-tyyppisten ratkaisujen vuosittaisista käyttökustannuksista konetta kohden, kun koneeseen on kytkettynä neljä anturia ja käyttökohteessa dataa kerätään kymmenestä koneesta. LTE-tiedonsiirron kustannukseksi on arvioitu 20 euroa kuukaudessa. NB-IOT on jätetty pois vertailusta, koska sen hinnoittelutietoja ei ollut saatavilla.

TAULUKKO 11. Esimerkkilaskelma WAN-tekniikoiden vuosittaisista käyttökustannuksista.

LTE/4G*	Sigfox	Lora yksityisverkko**	LoRa teleoperaattorin verkko
240 €	4 €	24 €	48 €
* olettaen, että kaikki anturitieto lähetetään saman päätelaitteen kautta			
** 1 tukiasema, jonka tiedonsiirto toteutettu LTE:llä, tiedonsiirtokustannus jyvitetty koneille			

Käyttökustannuksiltaan Sigfox on selvästi edullisin. LoRa-yksityisverkon voidaan katsoa olevan ilmainen käyttää, jos tukiasemat ovat kiinni verkossa WLAN:n tai kiinteän verkon välityksellä eikä datasiirron hintaa tällöin huomioida. Käytännössä kuitenkin usein yhteys on toteutettu LTE:n avulla verkon rakentamisen helpottamiseksi, kuten tämänkin tutkimuksen testeissä. Mikäli toimintaympäristö on kovin laaja ja tarvitaan

useampi tukiasema, konekohtainen käyttökustannus luonnollisesti nousee. Järjestelmässä kiinni olevien työkoneiden määrän lisääntyessä konekohtainen kustannus laskee.

Sigfoxin puolesta puhuu LoRaakin helpompi käyttö ulkomailla, sillä roamingmenettelyä ei ole, vaan sama liittymä toimii kaikkialla. LoRaan verrattuna Sigfox häviää kapasiteetissa, sillä suurin sallittu viestin koko on 12 tavua ja suurin lähetystiheys n. 10 minuuttia. On huomattava, että tämän tutkimuksen yksityisverkkotestissä käytettyjen päätelaitteiden 72 tavun hyötykuormaa ei olisi voitu välittää Sigfoxin avulla. Mikäli yritys perustaa LoRa-yksityisverkon, on koko tiedonsiirto tällöin yrityksen hallussa, eivätkä teleoperaattorin mahdolliset muutokset liiketoiminnassa tai hinnoittelussa aiheuta riskiä. Toisaalta silloin tarvitaan verkkoteknologiaosaamista sekä verkon ylläpito- ja huoltovalmiutta, ellei näitä palveluja osteta muualta.

5.2 Käyttökohteet

LoRa soveltuu käytettyjen lastinkäsittelylaitteiden langattomaan tiedonsiirron toteuttamiseen käyttötapauksissa, joissa tiedonsiirron latenssilla ei ole suurta merkitystä. Käyttökohteeksi voi olla esimerkiksi tapahtumatiedon, kuten nostojen määrän kerääminen kohteissa, joissa tiedon ei tarvitse olla käytettävissä reaaliajassa. LoRa on oiva tiedonsiirtotapa tähän, jos riittää, että nostojen määrä päivittyy sovelluspalvelimelle esimerkiksi minuutin välein tai harvemmin. Tämä voidaan toteuttaa helposti päätelaitteella, jossa on laskuri – laskuri nollautuu, kun viesti on välitetty onnistuneesti. Tieto saadaan pienin varauksin siirrettyä myös rahtialuksen sisältä, kunhan tukiasema sijoitetaan hyvin.

Toinen toimiva käyttötapaus voisi olla koneen ajotuntien kerääminen langattomasti. Ajotuntien nykyistä helpompaan keräämiseen on kova tarve erityisesti huoltosopimusliiketoiminnan alueella. Nykyisin kullakin alueella toimivan huoltohenkilöstön on matkustettava erikseen tarkistamaan koneilla ajatut tunnit ja suunniteltava huolto sen mukaan. Huoltosopimuskohteet voivat olla maantieteellisesti hajallaan, jolloin teleoperaattorin verkon käyttö on perusteltua. Laskenta voitaisiin todennäköisesti toteuttaa kappaleessa 3.3 esitetyn kaltaisella päätelaitteella, joka laskee sisääntulon tilan muutoksia ja niistä kulunutta aikaa. Toinen vaihtoehto olisi rakentaa laite, joka analogisen käyntituntimittarin tavoin laskisi aikaa jona sen läpi kulkee signaali. Laskuriin tuotaisiin signaali silloin, kun kone on käynnissä. Kolmas ja kaikkein yksinkertaisin ratkaisu on lähettää koneen

käydessä mikä tahansa viesti halutuun väliajoin sovelluspalvelimelle, jossa saapuneiden viestien aikaleimojen perusteella lasketaan koneen käyntiaika. Kun viestejä saapuu vähintään tietyin väliajoin, tiedetään koneen olevan käynnissä. Mahdolliset radiokantamatkatveista johtuvat erot todelliseen käyntiaikaan voidaan eliminoida esimerkiksi tulkitsemalla koneen käyvän, jos aikaleimojen ero on enintään 5 minuuttia.

Muita LoRa:n käyttökohteita käytettyjen kontinkäsittelylaitteiden alueella voisivat olla rengaspainetiedon siirtäminen, kontin punnitustiedon siirtäminen tai GPS-paikkatiedon välittäminen tapauksissa, joissa tieto ei ole kriittinen laitteen tai terminaalin toiminnan kannalta. Tulee muistaa, että erityisesti teleoperaattoriverkossa päätelaitemäärän lisääntyessä törmäyksistä johtuvien pakettihäviöiden todennäköisyys kasvaa. LoRa ei sovellu automaatiojärjestelmien ohjaukseen tai säätöön, sillä esimerkiksi jo vaatimattoman 20 tavun viestin lähettämisessä parhaalla mahdollisella SF-arvolla 7 latenssi on yli 50 millisekuntia. LoRa soveltuu tiedonsiirtoväyläksi sitä paremmin, mitä pidempi on yksittäisen päätelaitteen viestin lähetysväli. ADR-ominaisuuden avulla voidaan tehokkaasti estää viestien katoaminen; ADR-ominaisuus myös tehostaa radiotien käyttöä. Sovellusta suunniteltaessa on hyvä ymmärtää, että lähetyksenaikaista pakettihäviötä voi ilmetä.

5.3 Verkko

Käyttökohteesta riippuu paljolti se, millaista verkkoa kannattaa käyttää. Mitä tärkeämpää on jokaisen viestin kulkeutuminen tai mitä tiheämmin viestejä halutaan lähettää, sitä tärkeämpää on panostaa verkon laatuun, eli alimpaan mahdolliseen SF-arvoon. Tuomalla alueelle lisää tukiasemia saadaan SF-arvoa laskettua ja kapasiteettia kasvatettua. Ari Kuukan mukaan kaksi tukiasemaa riittää hyvin luomaan laadukkaan verkon suuremman terminaaliiin. Kappaleessa 5.2 kuvattuihin käyttötapauksiin voi riittää jopa operaattorin telemastoin luoma verkko.

Oman verkon rakentaminen terminaaliiin voi tulla kysymykseen, jos päätelaitteita on paljon, niiden lähetysintervallin halutaan olevan tiheä ja halutaan mahdollisimman suuri verkon kapasiteetti. Tällöin voidaan olla varmoja, että muu liikenne ei häiritse terminaaliiin liikennettä; teleoperaattorin verkko saattaa aina välittää myös muiden käyttäjien liikennettä. Omaa verkkoa suunniteltaessa on kuitenkin huomioitava verkkoinfrastruktuurin perustamiskustannukset – myös verkkoalusta tulee rakentaa.

Teleoperaattorin verkon hyödyntämistä tukee käyttöönoton ja käytön vaivattomuus. Perustamiskustannuksia ei käytännössä ole, ja vikatilanteista vastaa operaattori. Operaattori tarjoaa verkkoalusta sekä vastaa verkon arkkitehtuurista ja saatavuudesta. Käyttäjyryityksen tarvitsee ainoastaan rakentaa integraatio operaattorin verkkoalustan ja oman sovelluspalvelimen välille. Teleoperaattorin verkon käyttöön voi kuitenkin sisältyä jonkinasteinen riski: muutokset operaattorin liiketoiminnassa tai taloudellisessa tilanteessa voivat vaikuttaa verkon ja palvelun saatavuuteen. Saman riskin voidaan kuitenkin arvioida sisältyvän mihin tahansa teleoperaattorilta ostettuun palveluun, esimerkiksi mobiilidataliittymään.

5.4 Jatkoimenpiteet

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että LoRa on soveltuva teknologia edellä kuvattuihin ja luonteeltaan samantyyppisiin käyttötapauksiin. Sen vuoksi testejä on hyvä jatkaa ja siirtää painopiste teleoperaattorin verkon hyödyntämiseen. Testiterminaalissa voidaan testata erityyppisiä päätelaiteratkaisuja heti, kun integraatio operaattorin verkkoalustan ja yrityksen oman pilvipalvelun väliin on saatu rakennettua. Laadukas verkko saadaan luotua alueelle nykyisellä laitteistolla.

Ensimmäiset testit tehdään jo hankitulla Comtac LPN S0/DI -pätelaitteella. Lisäksi tulee selvittää kustannukset alihankintana toteutettavasta ajotuntitiedon laskentaan ja lähetykseen tarkoitettu päätelaitteesta. On tärkeää pyrkiä pitämään laite mahdollisimman yksinkertaisena, jotta tutkimuksen alussa asetettu tavoite edullisesta tiedonsiirto-ratkaisusta toteutuu. Kun on aloitettu yksinkertaisella laitteella ja se on todettu toimivaksi, voidaan harkita vaativampia ratkaisuja. Testivaiheessa projektin kustannukset muodostuvat testattavien päätelaitteiden hinnoista. Kun ajotuntien laskenta saadaan toimimaan, voidaan testiä laajentaa pilotiksi oikeaan terminaaliin. Teleoperaattori järjestää alueelle verkon, mikäli sitä ei valmiina ole.

Jos verkon laajennustarpeita – eli tukiasemien asennuksia – ilmenee itse terminaali-alueelle, tulee laajennus suunnitella huolella. On tärkeää huolehtia oikeanlaisesta kommunikaatiosta asiakkaalle. Asiakkaan kanssa käytävistä neuvotteluista on sovittava yhteistoiminnassa kyseisen alueen huoltopäällikön, teleoperaattorin edustajan ja Kalmar

Tampere TCC:n henkilöstön kanssa, jotta oikea tieto välittyy. Joissakin tapauksissa voi riittää, että alueelle tuodaan sisätukiasema esimerkiksi huoltohalliin, josta käsin riittävä peitto saadaan alueelle. Tämän tutkimuksen testit osoittavat sen olevan mahdollista. Koska kiinteitä asennuksia ei terminaali-infraan tällöin tarvita, ei asiakasta välttämättä tarvitse informoida asiakasta lainkaan.

Yleisesti on hyvä pohtia myös sitä, tarvitseeko toteutettavan sovelluksen olla välttämättä asiakkaalle myytävä tuote, vai voiko se joissakin tapauksissa olla Kalmarille hyödyllinen työkalu, joka asiakkaalle tarjotaan maksutta. Etenkin ajotuntien keräämisen osalta asiaa olisi hyvä pohtia, voisiko sovelluksen nähdä lisäarvoa tuottavana oman toiminnan kehittämisenä.

5.5 Itsearviointi

Teorian osalta opinnäytetyö onnistui hyvin. Perusymmärrys LoRa-tekniikan toiminnasta, ominaisuuksista ja suorituskyvystä saavutettiin. Projektin loppuvaiheessa suomalaiselta LoRa-operaattorilta saatu tuki tiettyjen yksityiskohtien selvittämisessä oli avainasemassa. Heidän organisaatiollaan oli paras tietämys tekniikan toimivuudesta käytännön sovelluksissa.

Myös käytännön testien osalta opinnäytetyö onnistui hyvin. Testejä päästiin tekemään monipuolisesti ja kaikki halutut testit tehtiin. Haastavimmaksi testeissä koettiin sijoituspaikan löytäminen ulkotukiasemalle, jossa oli saatavilla sähkövirtaa. Lopulta testit kuitenkin onnistuttiin tekemään jopa ilman henkilönostimia ja rakennuksiin tehtäviä läpivientejä.

Yksityisverkon testilaitteissa havaitut puutteet tai ratkaisut tosin hankaloittivat monesti testien tekemistä. Laitteiden ominaisuuksien määrittämisessä olisi tullut olla nykyistä täsmällisempi, kun testilaitteistoa tilattiin. Päätelaitteisiin olisi pitänyt asentaa käyttöjännitteen merkkivalo ja vähintään yksi päätelaitteista olisi pitänyt alun perin rakentaa akkukäyttöiseksi. Päätelaitteissa olisi tullut myös käyttää sisäistä muuntajaa, joka muuntaa työkonen 24 voltin jännitteen elektroniikan käyttämäksi 5 voltin jännitteeksi.

Aikataulullisesti opinnäytetyössä oli haasteita. Osaltaan siihen vaikuttivat testilaitteiden toimituksen viivästyminen miltei kahdella kuukaudella, osaltaan opinnäytetyön tekijän kiire ja varsinainen ansiotyö yhtiön muilla osastoilla. Terminaalitestin järjestämisessä oli myös hankaluuksia. Asian hoitaminen useiden välikäsien kautta vei aikaa ja aiheutti jopa väärinkäsityksiä. Testivierailua satamaterminaaliin oli vaikea järjestää, koska vastuussa olevalla huoltoteknikolla oli vastuullaan muitakin asiakkaita ja hänen aikataulunsa saattoivat kiireellisten töiden vuoksi muuttua useasti.

LÄHTEET

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melià-Seguí, J. & Wattey-nem T. 2017. Understanding the Limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine.
- Aharon, D., Bisson, P., Bughin, J., Chui, M., Dobbs, R., Manyika, J. & Woetzel, J. 2015 The Internet of things: mapping the value beyond the hype. McKinsey & Company.
- Ailisto, H., Mäntylä, M. & Seppälä, T. 2015. Suomi – Teollisen Internetin Piilaakso. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 4/2015. Valtioneuvoston kanslia.
- Ala-Paavola, J. 2014. LoRa - the modem killer? Blogi: Embedded Experience. Julkaistu 21.11.2014. Luettu 2.2.2017.
- Buyya, R. & Dastjerdi, A. 2016. Internet of Things. Cambridge: Morgan Kaufmann.
- Choi, M., Choi, S. & Sun, W. 2013. IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz. Journal of ICT Standardization, Vol. 1. River Publishers.
http://riverpublishers.com/journal/journal_articles/RP_Journal_2245-800X_115.pdf
- Collin, J. & Saarelainen, A. 2016. Teollinen internet. Helsinki: Talentum.
- Digita rakentaa esineiden internetin mahdollistavan verkon koko Suomeen. 2016. Digita. Tiedote. http://www.digita.fi/yrityksille/digita_news_-artikkelit/iot-verkko_laajenee_koko_suomeen
- Dunkels, A., Vasseur, J. 2010. Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet. Burlington: Elsevier Inc.
- Eady, F. 2007. Hands-On ZigBee : Implementing 802.15.4 with Microcontrollers. Oxford: Elsevier Inc.
- Etteplan. Hello LoRa! Päivitetty 5.9.2016. Luettu 8.2.2017. <http://lora.etteplan.io/>
- Frank, R. 2013. Understanding Smart Sensors. Boston/Lontoo: Artec House.
- Gupta, N. 2013. Inside Bluetooth Low Energy. Boston/Lontoo: Artec House.
- Holmes, J. 2013. Spread Spectrum Systems for GNSS and Wireless Communications. Boston/Lontoo: Artec House.
- Hunter, J. 2016. HaLow Is The Natural Next Step In The Evolution Of IoT. Crunch Network, julkaistu 10.2.2016. Luettu 31.1.2017.
<https://techcrunch.com/2016/02/10/what-the-halow/>
- Intel. 2017. Different Wi-Fi Protocols and Data Rates. Julkaistu 7.4.2017. Luettu 11.7.2017. <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/network-and-ii-o/wireless-networking/000005725.html>

- IoTKey®-lähetin WLT 310. SKS Automaatio Oy. Verkkosivu. Luettu 18.7.2017.
<http://www.skssensors.fi/tuotteet/iotkeyr-tuotteet-ja-palvelut/iotkeyr-lahetin/>
- Keskinen, A. 2017. Henkilökohtainen tiedonanto. 5.7.2017. Kalmar TCC Tampere.
- Kuukka, A. Director of IoT Services, Digita. 2017. Puhelinpalaveri 13.6.2017.
- Latva, L. 2005. Radiotekniikan lyhyt oppimäärä. Luentomateriaali. Luettu 15.2.2017.
<https://l1atva.kapsi.fi/rakurssi/RTLL2005-4p.pdf>
- Lehtiniitty, M. 2017. 5G-verkko avautuu jo kesällä. Mobiili.fi. Julkaistu 23.2.2017. Luettu 15.7.2017. <http://mobiili.fi/2017/02/23/5g-verkko-avautuu-jo-kesalla/>
- LoRa Alliance™. 2015. A technical overview of LoRa and LoRaWAN. San Ramon: LoRa Alliance.
- LoRa Alliance™. LoRa Alliance™ Technology. Luettu 20.1.2017.
<https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>
- LoRa Designer's Guide. 2013. Semtech Corporation. Luettu 23.6.2017.
http://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf
- LoRa device developer guide. 2016. Orange. Luettu 10.7.2017.
<https://partner.orange.com/wp-content/uploads/2016/04/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>
- LoRa Modulation Basics. 2015. Semtech Corporation. Luettu 23.6.2017.
<http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
- LoRa Technology Is Connecting Our Smart Planet. Semtech Corporation. Verkkosivu. Luettu 18.7.2017. <http://www.semtech.com/wireless-rf/internet-of-things/lora-applications/briefs>
- LPN DI bridge technical data sheet. 2017. Comtac AG. Tekninen spesifikaatio. Julkaistu 28.2.2017. Luettu 10.7.2017.
<https://drive.google.com/file/d/0B6TBYAxODZHHOXpVeGJhSTRYbm8/view>
- LPN DI bridge user manual. 2017. Comtac AG. Käyttöohje. Julkaistu 19.5.2017. Luettu 10.7.2017.
<https://drive.google.com/file/d/0B6TBYAxODZHHOHpmVGdNeVFzb0k/view>
- Makslahti, J. Indesmatech ApS. Luento. IoT-seminaari ja -messut 29.3.2017. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Mobiililaajakaistavertailu. 2017. Verkkosivusto. Päivitetty 31.5.2017. Luettu 15.7.2017.
<http://www.puhelinliittymat.fi/mobiililaajakaista-mokkula-ja-nettitikku-vertailu/>
- MultiTech Developers Resources >> Introduction to LoRa. Multi-Tech Systems, Inc. Verkkosivu. Luettu 1.7.2017.
<http://www.multitech.net/developer/software/lora/introduction-to-lora/>

Mushtaq, N. 2016. Zigbee in Home Automation. CCTV institute. Julkaistu 5.11.2016. Luettu 2.2.2017. <http://cctvinstitute.co.uk/zigbee/>

Nanotron Technology GmbH. Nanotron's Technology. Luettu 12.2.2017. http://nanotron.com/EN/CO_techn-css.php

Penttinen, N. 2016. Tässä Suomi on maailman ykkönen: 4,3 GB kuukaudessa. Kauppalehti. Verkkoartikkeli. Julkaistu 24.2.2016. Luettu 6.7.2017. <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/tassa-suomi-on-maailman-ykkonen-4-3-gb-kuukaudessa/P4aEjrLm>

Poole, I. LoRa Physical Layer & RF Interface. Radio-electronics.com. Luettu 12.2.2017. <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/rf-interface-physical-layer.php>

Ray, B. 2016. CTO. Link Labs. An Overview Of Narrowband IoT (NB-IoT). Verkkoartikkeli. Julkaistu 27.7.2016. Luettu 11.7.2017. <https://www.link-labs.com/blog/overview-of-narrowband-iot>

Remy, J. 2014. LTE Standards. Lontoo/Hoboken: ISTE Ltd.

Rintala K. Etteplan Oy. Kokous XX.4.2017

Rouse, M. 2016. Definition: WAN (wide area network). SearchEnterpriseWAN. Päivitetty 10/2016. Luettu 2.2.2017. <http://searchenterprisewan.techtarget.com/definition/WAN>

Teollinen internet koskee kaikkia toimialoja. 2016. Saarelainen, A. Alma talent pro. Verkkoartikkeli. Julkaistu 20.9.2016. Luettu 22.1.2017. <https://pro.almatalent.fi/pro-uutiset/teollinen-internet-koskee-kaikkia-toimialoja/>

Teollinen internet vaatii omat verkot. 2016. Saarelainen, A. TiVi. Verkkoartikkeli. Julkaistu 19.11.2016. Luettu 15.7.2017. http://www.tivi.fi/Kaikki_uutiset/esineiden-internet-vaatii-omat-verkot-6600635

Suomen ensimmäinen esineiden internetin operaattori aloittaa. 2016. Saarelainen, A. TiVi. Verkkoartikkeli. Julkaistu 1.9.2016. Luettu 10.7.2017. http://www.tivi.fi/Kaikki_uutiset/suomen-ensimmainen-esineiden-internetin-operaattori-aloittaa-6578589

Semtech Corporation. What is LoRa? Luettu 2.2.2017. <http://www.semtech.com/wireless-rf/internet-of-things/what-is-lora/>

Semtech LoRa geolocation used in Ireland's second busiest port to track shipping assets. 2016. Semtech Corporation. Tiedote. Julkaistu 1.12.2016. Luettu 18.7.2017. <http://www.semtech.com/Press-Releases/2016/Semtech-LoRa-Geolocation-Used-in-Ireland%E2%80%99s-Second-Busiest-Port-to-Track-Shipping-Assets.html>

Sonera. 3G ja 4G matkapuhelinverkkojen tekniikka. Luettu 2.2.2017. <https://www.sonera.fi/asiakastuki/ohjeet/3G-ja-4G-matkapuhelinverkkojen-tekniikka?id=80f38c3f-e08c-4d17-b112-031e749d4674>

The first LoRaWAN remote energy monitoring solution in Estonia. 2017. Nordic Automation Systems. Tiedote. Julkaistu 25.4.2017. Luettu 18.7.2017.
<http://www.nasys.no/about/news/first-lorawan-remote-heating-energy-monitoring-solution/>

Tomasi, W. 1998. Electronic communications systems. New Jersey: Prentice-Hall.

Viestintävirasto. 2017. Määräys 15 luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä. Internetsivu. Julkaistu 10.2.2013. Päivitetty 2.1.2017. Luettu 18.2.2017
<https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/laitmaarayksetpaatokset/maaraykset/maaraykset15luvastavapaidenradiolahettimienyhteistaajuuksistajakaytosta.html>

Viestintävirasto. 2016. Viestintävirasto 15 AK/2016 M: Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä. Julkaistu 22.12.2016.
https://www.viestintavirasto.fi/attachments/maaraykset/Maarays_15AK.pdf

Viterbi, A. 1998. CDMA: principles of spread spectrum communication, 7. painos. Addison Wesley Longman, Inc.

VVO otti IoT-anturiverkot Espooseen. 2016. Uusiteknologia.fi. Verkkoartikkeli. Julkaistu 9.5.2016. Luettu 18.7.2017. <https://www.uusiteknologia.fi/2016/05/09/digita-tuot-iot-anturiverkot-espooseen/>

Vähimaa, A. 2016. WLAN-verkkoihin 3 uutta standardia – näin nopeus ja kantama muuttuvat. Mikrobitti 8/2016. Julkaistu 24.10.2016. Luettu 11.7.2017.
<https://www.mikrobitti.fi/2016/10/wlan-verkkoihin-3-uutta-standardia-nain-nopeus-ja-kantama-muuttuvat/>

WiFi Alliance®. 2016. WI-Fi Alliance introduces low power, long range Wi-Fi HaLow™. Lehdistöiedote 4.1.2016. Luettu 31.1.2017.
<http://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-low-power-long-range-wi-fi-halow>