



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# ILMALAITTEEN VARANAVIGOINTIJÄRJESTELMÄN VALINTA

Anssi Lipponen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2019  
Konetekniikka  
Lentokonetekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

LIPPONEN, ANSSI:  
Ilmalaitteen varanavigointijärjestelmän valinta

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 15 sivua  
Huhtikuu 2019

---

Opinnäytetyön tilasi imatralainen RumbleTools Oy. Yritys on korkean teknologian yritys, ja se kehittää autonomisia robotteja ja niiden lisäjärjestelmiä. Yrityksen tarpeena oli kartoittaa ja vertailla soveltuvia teknologioita robottidroonin varanavigaatiojärjestelmäksi. Varajärjestelmä parantaisi robotin turvallisuutta ja mahdollisuuksia palata laskeutumisalustalle vikatilanteissa. Käytännön testausta ei tässä opinnäytetyössä suoritettu, vaan teknologioita analysoitiin ja vertailtiin niistä valmiiksi löytyneiden tietojen ja muiden tahojen tutkimusten perusteella.

Soveltuvimmaksi tekniikaksi suositeltiin LoRaWAN-verkkoa ja sitä hyödyntäviä erilaisia päätelaitteita. LoRaWAN oli kaikista vaihtoehdoista tarkoitukseen parhaiten soveltuva ja monipuolisin. Kyseisen tekniikan katsottiin täyttävän järjestelmälle annettuja tavoitteita odotetusti. Järjestelmän vaatimuksina oli kyky toimia sisä- ja ulkotiloissa. Toimintaetäisyys pitäisi olla ainakin useita satoja metrejä riippuen sovelluskohteesta. Vähävirtaisuus ja luotettavuus olivat myös tärkeitä ominaisuuksia järjestelmälle.

Opinnäytetyön suosituksesta olisi saanut luotettavamman ja kattavamman, jos käytännön testejä olisi otettu työhön mukaan. Kattava käytännön testaus olisi vienyt paljon aikaa, eikä sitä olisi kiireellisen aikataulun vuoksi pystytty suorittamaan kaikille vertailussa olleille teknologioille. Suositeltua tekniikkaa ja sen ominaisuuksia testataan ja kehitetään eteenpäin yrityksen toimesta. Tällä tavalla voidaan järjestelmään liittyviä tietoja pitää paremmin salassa.

## ABSTRACT

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

LIPPONEN, ANSSI:  
Drone Backup Navigation System

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 15 pages  
April 2019

---

The purpose of this thesis was to research and compare different solutions for a drone's backup navigation system. This thesis was made for RumbleTools Oy, which is a high technology company that specializes in robotics and software development. The backup navigation system would improve the drone's safety and the chances of the drone to return to the landing pad in case of a malfunction. The technologies were only compared on paper and practical testing was left out of this thesis.

LoRaWAN network protocol and end-devices which utilize it, were chosen as the most applicable technology for this purpose. LoRaWAN was also chosen because it was a very flexible technology and it offered the best suited qualities for this type of system. Requirements set for the system were the ability to function in both indoors and outdoors. A large operating range of at least several hundred meters, depending on the operation area. Low power consumption and reliability were also important qualities for the system.

The decision to choose LoRaWAN network for this kind of a system, could have been more reliable and comprehensive if practical testing had been included in the thesis. Comprehensive practical testing of the different technologies would have taken too much time and could not be included in this thesis. The testing and further development of the system using LoRaWAN will likely be concluded later privately.

---

Key words: drone, RFID, IoT, navigation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	YLEISTÄ.....	6
	2.1 Yrityksestä.....	6
	2.2 Käyttökohde.....	7
	2.3 Lähtökohta.....	7
3	RFID .....	9
	3.1 RFID Tekniikka .....	9
	3.2 Lukija.....	10
	3.3 Tunnisteet yleisesti.....	11
	3.4 Passiiviset tunnisteet .....	12
	3.5 Aktiiviset tunnisteet .....	13
	3.6 Semi-aktiiviset tunnisteet .....	14
4	TEOLLINEN INTERNET.....	15
	4.1 Yleistä.....	15
	4.2 LoRaWAN.....	15
	4.3 ZigBee .....	18
	4.4 WLAN.....	19
5	TOTEUTUS.....	21
	5.1 Tekniikoiden vertailu .....	21
	5.2 Valinta .....	22
6	POHDINTA .....	24
	LÄHTEET .....	25
	LIITTEET.....	26
	Liite 1. Geolocation Whitepaper .....	26

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä RFID ja IoT teknologioihin ja tehdä suositus, mikä teknologia soveltuisi parhaiten droonin varanavigaatiojärjestelmäksi. Työn toimeksiantajana toimi RumbleTools Oy.

Tarve tällaiselle järjestelmälle esiintyi koska sellaista ei ole kaupallisesti saatavilla ja yrityksen autonominen drooni suorittaa hätälaskun, jos sen päänavigointi järjestelmä lakkaa toimimasta. Varajärjestelmällä halutaan estää turhat hätälaskut ja lisätä droonin turvallisuutta. Varajärjestelmä mahdollistaa myös droonin palaamisen tehtävältä.

Työhön valitut teknologiaehdotukset tulivat yrityksen kautta. Yrityksellä oli visioita, miten teknologioita voisi hyödyntää ja soveltaa mahdollisessa varajärjestelmässä. Kyseisiin teknologioihin perehtyminen ja niiden vertailu suoritettiin tässä raportissa. Vertailua suoritettiin vain sen informaation perusteella mitä teknologioista löydettiin eri lähteistä. Tämän katsottiin olevan nopeampi ratkaisu, kuin aloittaa testaamaan kaikkia potentiaalisia teknologioita käytännössä.

## 2 YLEISTÄ

### 2.1 Yrityksestä

Opinnäytetyön tilaajana on startup -yritys nimeltä RumbleTools. RumbleTools on korkean teknologian yritys, jonka ydinosaimista on prosessien automatisointi robotiikan ja ohjelmistokehityksen avulla. RumbleTools Oy on perustettu vuonna 2016 Imatralla. Yrityksen liikevaihtoluokka on n. 0,2 – 0,4 milj. euroa. Liikevaihto ei ole vielä kovin suurta, mutta se kasvaa koko ajan. Liikevaihdon suuruus on hyvin tavallisella tasolla ja heijastaa hyvin kasvavaa startup-yritystä. (RumbleTools.fi) (RumbleTools Oy)

Yritys on kehittänyt autonomisen robottidrooniratkaisun teollisuuden erilaisiin tarpeisiin. RumbleToolsin kehittämä autonominen robottidrooni kykenee suorittamaan seuraavanlaisia tehtäviä

- tehdasalueen valvonta
- ihmisten ohjaus hätätilanteissa
- visuaalinen kunnossapitovalvonta
- lämpökameratarkastukset
- päästöjen havainnointi
- materiaalikasojen tilavuusmittaukset
- tilastoitavan datan keräys.

Lentävä robotti tuo tehtaille lisää mahdollisuuksia ja parantaa niiden turvallisuutta. Robotti mahdollistaa työskentelyn ihmiselle vaarallisessa tai vaikeasti saavutettavassa ympäristössä. Etuna on myös robotin kyky kerätä tieto nopeasti, antaa ajantasaisempaa tilannetietoa ja näistä muodostuvia kustannussäästöjä. (RumbleTools.fi)

RumbleTools on myös kehittänyt autonomiselle robotilleen ainutlaatuisen telakointiaseman. Asema mahdollistaa robotin operointikyvyn vuorokauden ympäri. Robotin laskeutuessa asemaansa, asema huoltaa robotin ja vaihtaa siihen uuden akun ja lataa vanhat akut. Aseman avulla robotti kykenee lentämään koska tahansa ja kaikki tapahtuu automaattisesti. (RumbleTools.fi)

## 2.2 Käyttökohde

Navigaatiojärjestelmän olisi tarkoitus toimia dronissa varanavigaatiojärjestelmänä. Pääasiassa droni lentäisi ulkotiloissa hyödyntäen GNSS-järjestelmää. GNSS tulee sanoista Global Navigation Satellite System ja sillä viitataan kaikkiin paikallisiin tai globaaleihin satelliittipaikannusjärjestelmiin esimerkiksi GPS ja Galileo. GNSS ei kuitenkaan ole täysin luotettava, minkä takia varajärjestelmä tarvitaan. Dronin menettäessä GNSS signaalin se tekee välittömästi hätälaskun siihen pisteeseen, minkä yläpuolella se on. Tämän ominaisuus voi aiheuttaa vaaratilanteita ja vahingoittaa laitteistoa tai ihmisiä, jos droni esimerkiksi törmää laskeutuessaan johonkin. Varajärjestelmän lähtökohtana on saada lennolla oleva droni mahdollisimman lähelle lähtöpaikkaansa ilman GNSS-järjestelmän apua ja estää sitä tekemästä hätälaskua hallitsemattomasti.

Järjestelmää käytettäisiin ulkotilassa lentävissä koptereissa ja sisätilakoptereissa. Ulkotiloissa se olisi varajärjestelmän roolissa ja sisätiloissa sitä käytettäisiin yhdessä muiden järjestelmien kanssa. Sisätiloissa GNSS-järjestelmät eivät toimi, joten niitä ei voida hyödyntää. Pieni sisätiloissa lentävä kopteri saattaa kuitenkin olla liian heikko nostamaan tarvittavaa laitteistoa tai järjestelmän tarkkuus ei vain yksinkertaisesti riitä sisätiloissa liikkumiseen. Tämä on kuitenkin vain arvailua, mikä selviää paremmin käytännön testeissä.

Järjestelmältä ei odoteta yhtä hyvää navigointitarkkuutta, kuin GNSS:ltä, mutta mitä lähemmäs ja mitä pienemmällä virhemarginaalilla toimitaan sen parempi. Järjestelmän tarkoitus on saada robotti karkeasti takaisin haluttuun paikkaan, jos GNSS signaali menetetään. Sisätiloissa muut järjestelmät auttavat lentämistä ja parantavat dronin toimintakykyä. Tällöin lentäminen ei ole vain yhden järjestelmän varassa.

## 2.3 Lähtökohta

Työn lähtökohtana on etsiä tietoa erilaisista teknologioista, jotka voisivat soveltuva käytettäväksi dronin järjestelmässä. Teknologioita ja niiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta vertaillaan. Sopivinta tekniikkaa suositellaan yritykselle, joka luultavasti lähtee kehittämään järjestelmää sen avulla. Eri tekniikoita vertaillaan vain niistä löytyvien tietojen perusteella, eikä erillisiä käytännön testejä suoriteta tässä vaiheessa. Soveltuvinta tekniikkaa lähdetään testaamaan käytännössä ja sen soveltuvuutta kyseiseen tarkoitukseen tutkitaan

lisää. Käytännöntestaus ja itse järjestelmän rakentaminen eivät tule sisällymään tähän opinnäytetyöhön. Suuri osa järjestelmän rakentamisesta on koodausta ja sen tekee yrityksen koodari tai se suoritetaan alihankintana.

Järjestelmän vaatimuksina ovat mahdollisimman hyvä tarkkuus, pieni koko ja paino, luotettavuus sekä toimintavarmuus. Tekniikkaa käytetään varajärjestelmässä, jonka tulisi toimia varmasti silloin, kun GNSS signaali menetetään. Tekniikan pitää toimia myös ulko- ja sisätiloissa ja pieni virran kulutus on myös tärkeää.



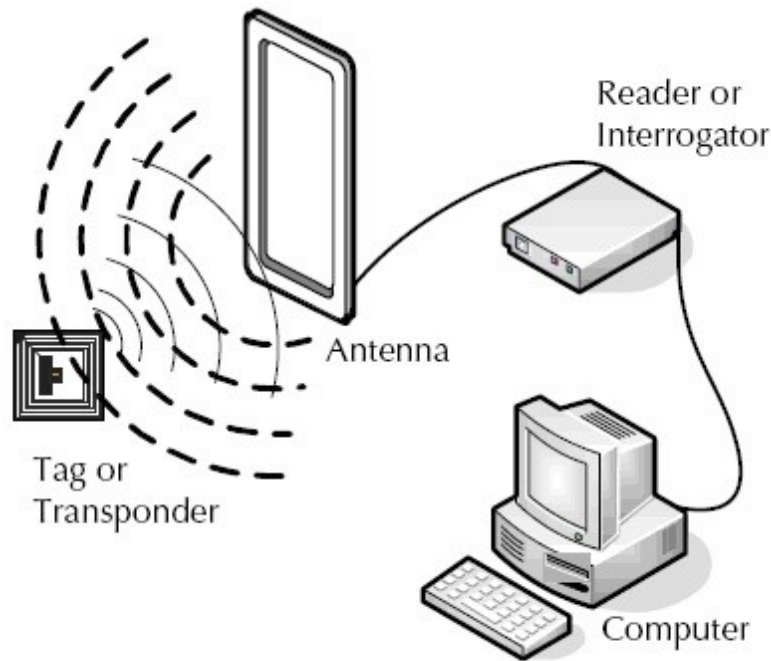
## 3 RFID

### 3.1 RFID Tekniikka

RFID (englanniksi Radio Frequency Identification) on yleisnimitys radiotaajuuksilla toimiville tekniikoille. Tällaisia tekniikoita käytetään esimerkiksi tuotteiden ja asioiden havainnointiin, tunnistamiseen ja yksilöintiin. Toiminta perustuu tiedon tallentamiseen ja lukemiseen RFID-tunnisteesta erillisellä lukijalla radioaaltojen avulla. (RFIDLab Finland ry.)

Riippuen käyttökohteestaan ja tarkoituksestaan RFID-tunnisteet ovat langallisia tai langattomia muistilaitteita. Tunnisteisiin tallennetaan tietosisältö, ne kiinnitetään haluttuihin kohteisiin ja niitä luetaan RFID-lukijoilla. Lukija voi tarvittaessa päivittää tunnisteeseen tietoja ja välittää luettua tietoa eteenpäin erilaisille taustajärjestelmille. (RFIDLab Finland ry.)

RFID-tekniikkaa voi soveltaa hyvin laajasti. Sitä käytetään usein samanlaisissa kohteissa kuin viivakoodeja. RFID eroaa viivakoodista kuitenkin siten, että sen lukemiseen ei tarvita suoraa näköyhteyttä ja RFID-tunnisteen sisältämää tietoa voidaan muuttaa jälkikäteen. Viivakoodi on tulostuksen jälkeen muuttumaton. RFID-tekniikkaa on jo pitkään hyödynnetty erilaisissa kulkukorteissa, avaimissa sekä asioiden seurannassa. (RFIDLab Finland ry.)



KUVA 1. RFID-järjestelmä (www.epc-rfid.info\_rfid)

RFID-järjestelmä koostuu lukijasta, tunnistesta ja informaatiota käsittelevästä tietokoneesta. Kuvassa 1 RFID laitteisto on kuvattuna. Kuvassa lukijan antenni on eritelty omaksi kokonaisuudeksi. Toimintaperiaate perustee lukijan lähettämään radiosignaaliin. Signaalin avulla siirretään tietoa lukijasta tunnisteseen ja päinvastoin. Lukijan radiosignaali aktivoi tunnisteen ja tunniste lähettää omat tietonsa takaisin lukijalle. Tunnisteita on pääsääntöisesti kahta eri tyyppiä: passiivisia ja aktiivisia. Niiden toiminta eroaa toisistaan hiukan, mutta peruseriaate on sama. (Lehpamer. 2012, 131.)

### 3.2 Lukija

RFID-lukija koostuu lähetin-vastaanotinmoduulista, signaaliprosessorista ja sen ohjain yksiköstä, antennista ja sarjaportista. Lukija on vastuussa tunnistella olevan datan keräämisestä ja välittämisestä eteenpäin tietokoneelle, joka pystyy tulkitsemaan dataa. Lukijan ominaisuudet ja sille asetetut vaatimukset myös yleensä määrittävät käytettävän radiotaajuuden. Lukija tuottaa radiosignaalin, joka indusoi energian tunnisteen antenniin. Tämä pätee kuitenkin vain silloin, kun käytössä on passiivisia tunnisteita. Lukijan on aistittava muutoksia sen oman antennin luomassa elektromagneettisessa kentässä, jotta se voi kommunikoida tunnisteen kanssa. (Lehpamer. 2012, 131.) (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007. 79.)

Lukijat ja tunnisteet toimivat pääsääntöisesti neljällä taajuusalueella sovelluksesta ja käyttökohteesta riippuen.

- LF (Low Frequency 30 – 300 kHz) RFID 125 – 134 kHz
- HF (High Frequency 3 – 30 MHz) RFID 13,56 MHz
- UHF (Ultra High Frequency 300 – 3000 MHz) RFID 865 – 928 MHz
- UHF RFID 2,45 GHz.

Yleisesti voi ajatella, että mitä pienemmällä taajuusalueella lukija ja tunniste operoivat, sitä lyhyempi lukuetaisyys on. Tämä pätee kuitenkin vain passiivisilla tunnisteilla ja kun ei oteta huomioon muita tekijöitä. Lukuetaisyyteen vaikuttaa kuitenkin moni eri tekijä. Esimerkiksi käytettävä tunnisteiden tyyppi, taajuus, antennikoko, lukijan teho, ympäristöstä aiheutuvat häiriöt ja tunnisteiden asento. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 73-78.) (RFID- Teknologia.)

Lukijat voivat olla kannettavia käsikäyttöisiä työkaluja tai esimerkiksi maahan tai seinään kiinnitettäviä isokokoisia komponentteja. Lukija voi olla myös portti, jonka läpi tunniste kulkee matkallaan esimerkiksi tuotantolinjaston läpi. (Lehpamer. 2012, 172.)

### 3.3 Tunnisteet yleisesti

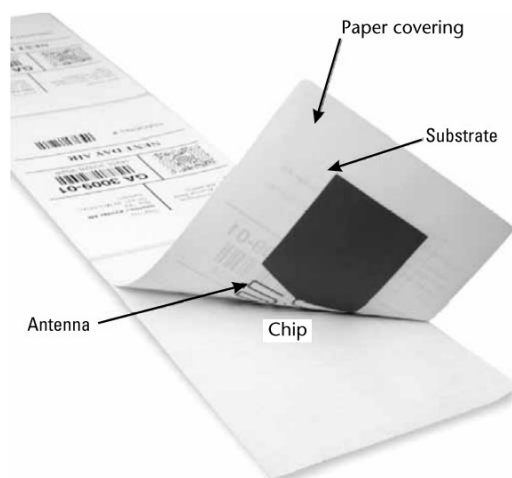
RFID-tunnisteet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: passiivisiin ja aktiivisiin tunnisteisiin. Tunnisteet voivat olla malliltaan eri kokoisia ja muotoisia ja niiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Tunnisteet ovat hyvin tilanne ja tarkoitus kohtaisia ja siksi ei ole yhtä tunnistetta, joka pystyisi kaikkeen. Kaikki tunnisteet rakentuvat ainakin 3 osasta: antennista, mikropiiristä ja sidosmateriaalista, jolle antenni ja mikropiiri on rakennettu. Tunnisteiden antennin tarkoituksena on vastaanottaa lukijan lähettämät signaalit ja vastata niihin kommunikoinnin mahdollistamiseksi. Sidosmateriaali voi olla elastista tai jäykkää, mikä mahdollistaa erilaisten ja monipuolisten tunnisteiden valmistuksen. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 61.)

Mikropiiri toimii tunnisteiden aivoina ja muistuttaa mitä tahansa tietotekniikan mikropiiriä. Tunnisteiden piiri on kuitenkin paljon yksinkertaisempi ja sen tarkoitus on yleensä vain lähettää tunnisteiden uniikki tunnus eteenpäin. Jos tunnisteeseen on kytketty muita komponentteja esimerkiksi antureita, piiri välittää myös niiden keräämän informaation eteenpäin. Usean tunnisteiden samanaikaisen lähettämisen estämiseksi on mikropiiriin sisällytetty myös lähetysalgoritmi. Algoritmin avulla estetään useamman kuin yhden tunnisteiden

lähetyksen samanaikaisesti ja pienennetään virhelukujen mahdollisuutta. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 62.)

### 3.4 Passiiviset tunnistet

Passiiviset RFID-tunnistet ovat kaikista yleisimpiä ja halvimpia. Niitä esiintyy esimerkiksi kulkukorteissa ja pakettien seurannassa. Passiivisissa tunnistetissa ei ole omaa virtalähdettä ja ne saavat virtansa lukijan muodostamasta sähkömagneettisesta kentästä. Tunnisteen lukuetaisyys on pienempi kuin aktiivisella tai semi-aktiivisella tunnistetella. Passiivisen tunnisteen lukuetaisyys on suoraan verrannollinen tunnisteen antennin kokoon. Mitä suurempi tunnisteen antenni on, sitä enemmän energiaa siihen voi induoitua lukijan magneettikentästä. Passiiviset tunnistet ovat yleensä kooltaan pieniä, mikä rajoittaa niiden antennien kokoa ja huonontaa lukuetaisyyttä. Optimoimalla tunnisteen kokoa voidaan sen lukuetaisyys maksimoida ilman, että kokoa tarvitsee kasvattaa liikaa. Kuvassa 2 on passiivinen tunniste, joka on valmistettu kahden paperin väliin. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 66.)



KUVA 2. Passiivinen tunniste ( Lehpamer. 2012)

Passiiviset tunnistet toimivat kahdella eri tavalla. LF- ja HF taajuusalueiden tunnistetissa lukijan muodostama sähkömagneettinen kenttä induoi tunnisteen antenniin sähkövirran. Virran avulla tunnisteen mikropiiri kykenee lähettämään oman tietonsa takaisin lukijalle. Passiiviset UHF-taajuusalueella toimivat tunnistet heijastavat radioaaltoja takaisin lukijalle. Tunnisteen antenni vastaanottaa lukijan radioaaltoja ja heijastaa ne takaisin sisällyttäen heijastettuihin aaltoihin omat tietonsa. Tekniikkaa kutsutaan nimellä takaisinsironta (engl. Backscatter). (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 62.) (RFID- Teknologia.)

### 3.5 Aktiiviset tunnistet

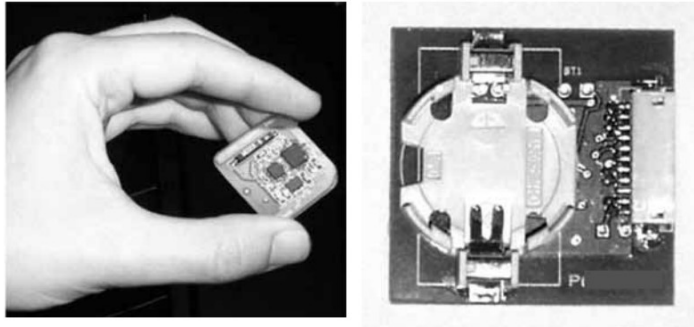
Aktiiviset tunnistet sisältävät oman virtälähteesä. Virtälähde mahdollistaa tunnisteen monipuolisemman ja joustavamman toiminnan. Virtälähteen ansiosta tunnisteeseen voidaan liittää erilaisia ulkoisia komponentteja esimerkiksi lämpötila- tai liikeseensoreita. Sensoreiden antamaa informaatiota voidaan näin lukea tunnisteesesta lukijalla. Sisäinen virtälähde myös mahdollistaa suuremmat lukuetaisyudet muihin tunnisteesiin verrattuna. Aktiivisen tunnisteen signaali pystyy tehokkaammin läpäisemään eri materiaaleja, mutta ne ovat suurempia ja kalliimpia kuin passiiviset tunnistet. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 63.)

Aktiivinen tunniste voidaan asettaa lähettämään omaa signaaliaan halutun aikajakson välein tai jatkuvasti. Jakso voi esimerkiksi olla pituudeltaan muutamista sekunneista useampiin minuutteihin. Aktiivinen tunniste voi esimerkiksi toimia radiomajakkana (engl. beacon) tai transponderina. Radiomajakka lähettää omaa signaaliaan tietyn ajan välein. Radiomajakka tyylistä toteutusta käytetään esimerkiksi reaaliaikaisissa paikannusjärjestelmissä. Transponderi-tyyppinen tunniste herää sen vastaanottaessa signaalin lukijalta. Transpondereita voidaan hyödyntää esimerkiksi tietulleissa. Lentokoneiden transponderit eli toisiotutkavastaimet toimivat myös samalaisella periaatteella. Koneen transponderin vastaanottaessa tutkalta signaalin, se automaattisesti lähettää lennonjohdolle siihen asetetun nelinumeroisen koodinsa ja mahdollisia lisätietoja. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 100.)

Tunnisteeseen voidaan liittää erilaisia komponentteja, mutta lisätyt komponentit kuitenkin kasvattavat tunnisteen virrankulutusta ja näin ollen myös sen kokoa. Virtälähteen takia aktiivisilla tunnisteesilla on lyhyempi käyttöikä, kuin passiivisilla tunnisteesilla. Tunnisteen käyttöikä voi vaihdella suuresti riippuen siihen liitetyistä toiminnoista, lähetystiheydestä ja lähetyksen voimakkuudesta. Yleensä aktiivisten tunnisteesiden käyttöikä on useita vuosia ja tunnisteen paristot on mahdollista vaihtaa uusiin. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 63.)

Aktiiviset tunnistet ovat ideaaleja paikkoihin, joissa esiintyy elektromagneettista häiriötä, sillä niiden lähettämä signaali on voimakkaampi kuin muilla tunnisteesilla. Sisäisen virtälähteen takia aktiiviset tunnistet ovat pienimmilläänkin noin kolikon kokoisia ja yli

50 kertaa suurempia, kuin pienimmät passiiviset tunnisteen. Esimerkki pienestä aktiivisesta tunnisteen ja sen koosta kuvassa 3. Aktiiviset tunnisteen pystyvät varastoimaan enemmän informaatiota kuin muut tunnisteen ja ne pystyvät myös tallentamaan lukijan lähettämää informaatiota. (Lehpamer. 2012, 158.)



KUVA 3. Aktiivinen tunnisteen. (Lehpamer. 2012)

### 3.6 Semi-aktiiviset tunnisteen

Semi-aktiiviset tunnisteen ovat passiivisen ja aktiivisen tunnisteen sekoitus. Semi-aktiivinen tunnisteen sisältää oman virtalähteen. Tunnisteen ei kuitenkaan ole jatkuvasti toiminnassa, ellei se havaitse lukijan muodostamaa magneettikenttää. Havaittuaan lukijan luoman kentän, tunnisteen herää ja alkaa toimia kuten aktiivinen tunnisteen. Semi-aktiivisen tunnisteen lukuetaisyys on huonompi, kuin aktiivisen koska se tarvitsee lukijan sähkömagneettisen kentän kytkeytyäkseen päälle. Kun tunnisteen on aktivoitu, sen sisäinen virtalähde voi antaa virtaa myös muille komponenteille esimerkiksi antureille. Tunnisteen voi herättyään lähettää antureiden keräämää tietoa lukijalle. Semi-aktiivisen tunnisteen akunkesto on parempi kuin aktiivisen, sillä se lähettää tietoa vain, kun lukija kuulustelee sitä.

Tunnisteen voi myös toteuttaa siten, että sen sisältämä akku antaa virtaa vain tunnisteen mikropiirille. Tässä tapauksessa tunnisteen voi käyttää kaiken lukijan sähkömagneettikentästä saaman energian lähettämiseen, parantaen näin lukuetaisyttä. Tällaista tunnistetta kutsutaan semi-passiiviseksi tunnisteenksi. Se kutustaanko tunnistetta semi-aktiiviseksi tai semi-passiiviseksi on myös hyvin valmistaja kohtaista. Eri valmistajien semi-aktiiviset tunnisteen voivat toimia hiukan eri tavalla, vaikka molemmat valmistajat kutsuvat tunnistettaan samalla nimellä. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 68.)

## 4 TEOLLINEN INTERNET

### 4.1 Yleistä

Internet of Things (IoT) eli esineiden ja asioiden internet tai teollinen internet on nimitys teknologialle, jossa fyysiset laitteet tai asiat liitetään antureilla ja sensoreilla verkkoon. Verkkoon liitetyt laitteet aistivat ympäristöönsä ja jakavat keräämäänsä tietoa verkon yli toisille laitteille ja/tai tietokoneille älykkäästi. Kytkemällä erilaisia laitteita verkkoon, niitä voidaan ohjata, seurata ja mitata verkon yli. Hyödyntämällä teollista internettiä voidaan parantaa tehokkuutta, alentaa kustannuksia ja synnyttää uusia toimintamalleja ja tapoja. (IoT ja Teollinen internet) (Tuominen. 2015)

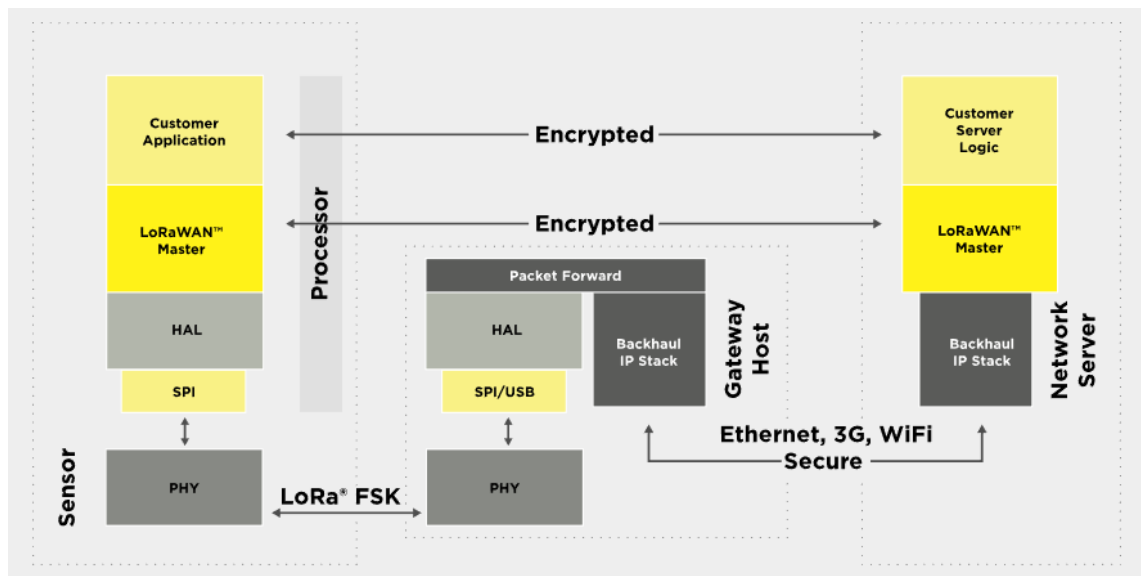
Teollisen internetin verkkona voi toimia esimerkiksi LAN-lähiverkko, Zigbee-tietoliikenneverkko tai laajaverkko eli WAN (Wide Area Network). Esimerkki laajaverkosta on kansainvälinen LoRaWAN-tiedonsiirtoverkko, joka on tarkoitettu nopeaan, langattomaan ja vähätehoiseen tiedonsiirtoon. LoRa on avoin standardi, joka muodostuu LoRa-päätelaitteista ja -reitittimistä sekä taustalla toimivista palvelimista ja sovelluksista. (Mikä on LoRaWAN?)

### 4.2 LoRaWAN

LoRaWAN on langaton LPWAN (Low Power Wide Area Network). Sen kehittämistä hallinnoi LoRa Alliance -järjestö. Järjestöön kuuluu satoja yrityksiä maailmanlaajuisesti esimerkiksi Cisco, IBM ja suomalainen Digita. LoRa tulee sanoista Long Range. Verkko on suunniteltu yhdistämään langattomasti paristokäyttöisiä laitteita ja tarjoaa kaksisuuntaista tiedonkulkua laitteista tietokoneelle ja toisinpäin. (Mikä on LoRaWAN?) (What is the LoRaWAN™ Specification?)

LoRAWAN-verkko voidaan rakentaa joko alueellisesti tai koko maanlaajuisesti. Alueellinen verkko voi kattaa tietyn alueen tai vain yhden rakennuksen. Verkkoarkkitehtuuri toteutetaan usein star-of-stars topologiana, jossa yhdyskäytävänä toimii ns. läpinäkyvä silta. Tämä tiedonsiirtosilta toimii päätelaitteiden eli antureiden ja keskusverkkopalvelimen välillä. LoRaWAN-päätelaitteet ovat täysin erossa internetistä, koska ne eivät käytä IP-protokollaa. LoRaWAN soveltuu hyvin tapauksiin, joissa lähetettävät datamäärät ovat

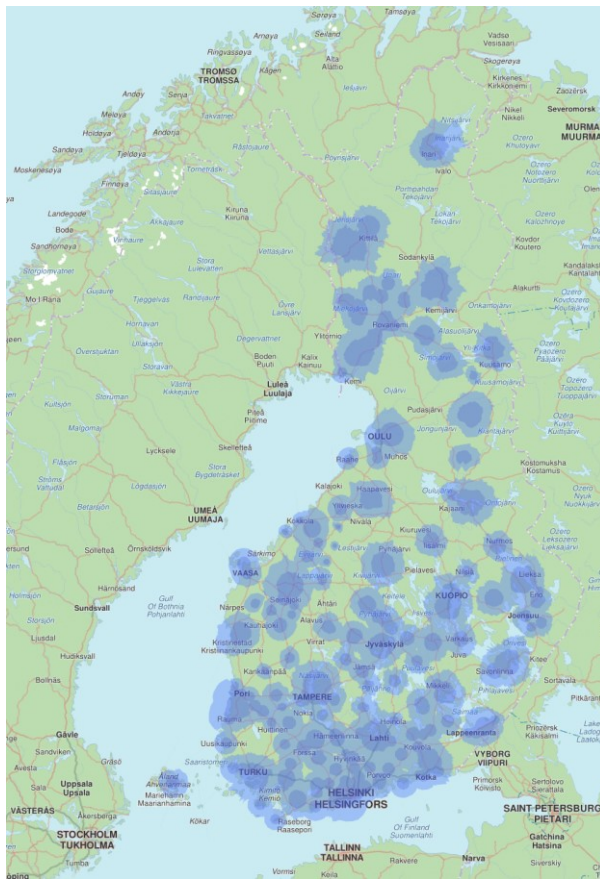
pieniä ja lähetysetäisyys on jopa useita kymmeniä kilometrejä. Kuva 4 esittää LoRaWAN-verkon ja päätelaitteen välistä toimintaa ja se havainnollistaa niiden välistä kommunikaatiota paremmin. Kuvassa päätelaite on vasemmalla ja keskusverkkopalvelin oikealla. (Mikä on LoRaWAN?) (What is the LoRaWAN™ Specification?)



KUVA 4. LoRaWAN-verkon toiminta. (LoRa Alliance)

Suomessa LoRa-verkon kattavuus on melko hyvä ja siitä vastaa suomalainen yritys nimeltä Digita. Digita rakentaa verkolle mastoja Suomessa. Se tarjoaa myös yrityksille asiantuntijapalveluita ja apua IoT:n liittyvissä asioissa. Digita myös tarjoaa verkon kattavuudesta kartan, joka on kuvassa 5. Kartassa vaalean siniset alueet kuvaavat ulkokuuluvuutta ja tummansiniset alueet sisäkuuluvuutta.





KUVA 5. LoRaWAN kattavuus Suomessa. (Digita)

## Päätelaitteet

LoRa-verkkoa hyödyntäviä antureita ja päätelaitteita on markkinoilla useisiin erilaisiin tarkoituksiin. Sovelluksia on katuvalojen valvonnasta roskasäiliöiden täyttymisen tarkkailuun ja porojen seurantaan. Laitteita on eri taajuuksille ja niitä on mahdollista muokata käyttötarkoituksen mukaisiksi. Päätelaitteita on kolmea eri luokkaa A, B ja C. (Mikä on LoRaWAN?)

## A-Luokka

A-luokan päätelaitteet pystyvät kaksisuuntaiseen kommunikointiin ja jokaista lähetystä seuraa kaksi lyhyttä vastaanottoikkunaa, jolloin laite voi vastaanottaa komentoja tarvittaessa. Tämä perustuu ALOHA-tyyppiseen protokollaan, jota käytetään myös RFID-laitteissa. A-luokan päätelaite on vähävirtaisin, koska sen kommunikointi palvelimen kanssa on säädetty minimiin. Laite vastaanottaa viestejä palvelimelta vain silloin, kun se on itse lähettänyt viestin. (Mikä on LoRaWAN?)

## **B-Luokka**

B-luokan laitteet ovat A-luokan kanssa samanlaisia, mutta niihin on lisätty ajastetut vastaanottoapaikat. Laitteen saadessa reitittimeltä aikasynkronisoidun viestin laite herää, ja avaa oman vastaanottoikkunansa. Tämän ansiosta myös palvelin tietää, koska laite on hereillä. B-luokan laitteet kuluttavat enemmän virtaa, kuin A-luokan laitteet. Virrankulutus ei ole kuitenkaan niin suuri, että B-luokan päätelaitteita ei voisi toteuttaa paristokäyttöisinä. (Mikä on LoRaWAN?) (What is the LoRaWAN™ Specification?)

## **C-Luokka**

C-luokan laitteissa vastaanottoapaikat on maksimoitu, jolloin laitteet kykenevät vastaanottamaan viestejä lähes jatkuvasti. Päätelaitteen vastaanottoikkuna sulkeutuu vain siinä tapauksessa, kun laite itse lähettää. Näin mahdolliset viiveet saadaan minimoitua. Luokan C laitteet soveltuvat parhaiten paikkoihin, joissa niiden virran saanti on taattu. Paristokäyttöisten laitteiden vaihtaminen väliaikaisesti luokasta A luokkaan C on myös mahdollista.

### **4.3 ZigBee**

ZigBee on tietoliikenneverkko, joka perustuu IEEE 802.15.4-2003 standardiin. Standardi on ollut käytössä valmistumisvuodestaan 2003 alkaen. ZigBee on lyhyen kantaman WPAN-verkko (Wireless Personal Area Network). ZigBee on yleisesti käytössä teollisuudessa ja kodin älyratkaisuissa, joissa esimerkiksi älyvalot voidaan liittää toisiinsa ZigBee -verkon avulla. (Mundy. 2015.)

ZigBee-verkko on vähävirtainen lyhyen kantaman verkko. Se ei kuitenkaan pysty suuriin nopeuksiin. Verkon maksiminopeus on 250 Kbps ja taajuus voi olla esimerkiksi 2.4 GHz. ZigBee on hitaampi kuin muut suositut langattomat standardit esimerkiksi Wi-Fi ja Bluetooth. Pienen virrankulutuksen ansiosta ZigBee-verkossa toimivat paristokäyttöiset laitteet toimivat jopa vuosia ilman paristojen vaihtoa. (Mundy. 2015.)

Pienen virrankulutuksen takia ZigBee-tuotteet pystyvät lähettämään signaaliaan vain 10 – 50 metrin päähän. Signaali on myös heikko ja sen voimakkuuteen vaikuttavat herkästi erilaiset esteet ja ympäristön häiriöt. Etenkin vesi vaikuttaa signaalin voimakkuuteen hyvin paljon. ZigBee-laitteet kuitenkin pystyvät välittämään eteenpäin toistensa signaaleja.

Näin verkon kattavuutta saadaan jatkettua suuremmalle alueelle. Yhden laitteen vaurioitessa, koko verkko ei myöskään kaadu. (Mundy. 2015.)

### **ZigBee-tunnisteet**

ZigBee-tunnisteet toimivat ZigBee-verkossa. Tunnisteet kommunikoivat keskenään ja verkkoon liitetyn tietokoneen kanssa. Erillistä lukijaa ei tarvita, kuten RFID-sovelluksissa, vaan tieto siirtyy tunnisteelta tunnisteelle ja lopulta tietokoneelle. Tunnisteilla on hyvä akunkesto, ne ovat pienikokoisia ja edullisia.

## **4.4 WLAN**

WLAN (Wireless Local Area Network) -tuotteista käytetään yleensä nimitystä Wi-Fi. Wi-Fi on kuitenkin Wi-Fi Alliancen tavaramerkki. WLAN on kaikkein yleisin langaton lähiverkkotekniikka ja sitä esiintyy niin kodeissa kuin teollisuudessakin. Se perustuu IEEE 802.11 standardiin.

WLAN standardi 802.11b toimii 2,4 GHz taajuudella ja kykenee maksimissaan 11 Mbps datasiirtonopeuteen. Standardi 802.11a toimii 5 GHz taajuudella ja kykenee maksimissaan 54 Mbps tiedonsiirtonopeuteen. Tämä on moninkertainen 802.11b standardin maksimi nopeuteen. WLAN-tekniikka kehittyy koko ajan ja sille kehitetään erilaisia standardeja jatkuvasti.

### **WLAN tunnisteet**

Tunnisteet, jotka kommunikoivat toistensa kanssa käyttäen 802.11x protokollaa ovat Wi-Fi tunnisteita. Jokaisella tunnisteella on oma IP-osoitteensa, jonka perusteella se voidaan tunnistaa verkossa. Verkossa jokainen langaton yhteyspiste toimii samankaltaisessa roolissa, kuin RFID-lukijat. Yhteyspisteet luovat verkon, jonka avulla tieto siirtyy tunnisteilta tietokoneelle. WLAN tunnisteilla on etuna sen käyttämä yleinen verkko. Kohteeseen ei silloin välttämättä tarvitse virittää uusia rinnakkaisverkkoja, jota tunnisteet käyttäisivät.

WLAN -verkon käyttö mahdollistaa minkä tahansa IP-osoitteen omaavan laitteen seuraamisen. Periaatteessa mikä tahansa WLAN -verkkoa hyödyntävä laite toimii tunnisteena. WLAN tunnisteiden huonoina puolina on kuitenkin suuri virran kulutus. Tunnisteet käyt-

tävät IP-osoitteita. Jos tunnisteita on paljon, osoitteiden hallinta voi olla hankalaa. Tunnisteet voivat myös kuormittaa yrityksen WLAN-verkkoa, jolloin sen käyttö hankaloituu. (Banks, Hanny, Pachano, Thompson. 2007, 89.)

## 5 TOTEUTUS

### 5.1 Tekniikoiden vertailu

Järjestelmän tulisi toimia ulkona ja jopa satojen metrien matkalla. Tämän takia Zigbee -laitteet voidaan jättää pois pelistä. Zigbee laitteiden signaali ei ole kovinkaan voimakas ja se on pääsääntöisesti tarkoitettu sisätilakäyttöön. Zigbee laitteiden käyttämään signaalin taajuusalueeseen vaikuttaa voimakkaasti myös vesi. Tämän takia se ei välttämättä toimi ulkotiloissa samalla tavalla ja yhtä tehokkaasti, kuin sisätiloissa. Ulkona sade tai järvet/lammet voivat haitata laitteiden lähettämää signaalia ja aiheuttaa toimintaepävarmuutta.

LoRAWAN-verkkoa käyttävät IoT -laitteet kykenevät hyödyntämään paikannuksessa joko GPS signaalia tai sen omaa geolocation toimintoa. Geolocation on LoRaWAN-laitteissa oleva toiminto, joka mahdollistaa niiden paikantamisen ilman GPS signaalia. Paikannus tapahtuu joko RSSI (Received Signal Strength Indication) eli vastaanotetun signaalin voimakkuuden havaitsemisella tai TDOA (Time Difference of Arrival) eli vertaamalla vastaanotetun viestin aikaa nykyiseen aikaan ja laskemalla siitä viestin kulkema matka. Menetelmistä RSSI on karkeampi ja kykenee vain n. 1000 – 2000 metrin tarkkuuteen, kun taas TDOA pystyy 20 – 200 metrin tarkkuuteen. Molemmissa tavoissa paikannus tapahtuu käyttämällä päätelaitteen ja verkon mastojen välistä kommunikaatiota. TDOA:n tarkkuus paranee mitä enemmän mastoja laitteella on käytettävissä, mutta se ei kuitenkaan parane huomattavasti enää tietyn pisteen jälkeen. Tarkan sijainnin mittaamiseen tarvitaan vähintään 3 mastoa. Tämä käy ilmi liitteestä 1, jossa on kerrottu LoRaWAN-verkon geolocation toiminnosta ja verrattu sitä esimerkiksi lähiverkkopaikannukseen ja gps:ään.

WLAN-verkkoa pystytään myös hyödyntämään paikannuksessa. Erilaisia menetelmiä on monenlaisia. WLAN paikannuksessa voidaan käyttää myös samoja menetelmiä kuin muissa geolocation järjestelmissä esimerkiksi RSSI ja TDOA ovat mahdollisia. Lähiverkkopaikannuksen hyviä puolia ovat siitä koituvat suhteellisen pienet kustannukset ja hyvä tarkkuus. Lähiverkolla suoritettava paikannus tarvitsee kuitenkin paljon tukiasemia olakseen tarkka. Lähiverkkopohjaisen järjestelmän virrankulutus on myös suurempi, kuin esimerkiksi RFID tunnisteilla ja LoRaWAN päätelaitteilla. Paikannusjärjestelmä saattaa

myös ruuhkauttaa yrityksen verkkoa. Lähiverkko ei myöskään ole kovin vahva vaihtoehto ulkokäyttöön syrjäisellä seudulla. Tiheään asutetulla alueella asia on toisin, sillä järjestelmä voi hyödyntää yleisiä ja yksityisiä tukiasemia. (Li, Quader, Dempster. 2008)

Alkuperäisessä visiossa RFID lukijaa ja aktiivisia tunnisteita haluttiin käyttää saman tyyppisesti kuin lentokoneiden ja laivojen NDB (Non-directional beacon) majakoita. Ajatuksena oli, että aktiivinen tunniste lähettää signaalia, jonka dronissa oleva lukija havaitsee. Droni lähtisi näin ollen lentämään sen tunnisteeseen suuntaan, jonka signaalin se havaitsee. Aiheesta ei kuitenkaan löytynyt hyödyllistä tietoa sen mahdollisuuksista ja mahdollisista olemassa olevista toteutuksista. Samankaltaisia ratkaisuja oli toteutettu passiivisilla tunnisteilla, mutta ne oli tehty maassa kulkeville roboteille ja niiden toimintaperiaate oli hiukan erilainen. Tämä oli syy sille, että ei haluttu lähteä tutkimaan onko RFID teknologian soveltaminen tällaiseen tarkoitukseen mahdollista tai kannattavaa. Ei haluttu ottaa riskiä ja lähteä käytännössä testaamaan erilaisia laitteita tietämättä lopputuloksesta yhtään mitään.

## 5.2 Valinta

Parhaiten soveltuvaksi tekniikaksi navigointijärjestelmään päädyttiin valitsemaan LoRaWAN-verkkoa hyödyntävä IoT ratkaisu. Se tuntui kaikista vaihtoehtoista vahvimmalta, monipuolisimmalta ja toteuttamiskelpoisimmalta. LoRaWAN verkolla ja sitä hyödyntävillä päätelaitteilla on paljon hyviä ominaisuuksia ja niistä löytyi kattavaa tietoa helposti. Etenkin LoRa-verkon laaja kattavuus Suomessa ja mahdollisuus rakentaa pienempiä paikallisverkkoja olivat tärkeitä ominaisuuksia, jotka mahdollistaisivat sen käytön dronin sisä- ja ulkotilavigoinnissa. Päätelaitteiden mahdollisuus kommunikoida reitittimien kanssa jopa useiden kymmenien kilometrien etäisyydellä oli myös LoRa-verkon suuri etu.

LoRa-verkon avulla tehty TDOA paikannuksen tarjoama tarkkuus on n. 20 – 200 metriä, mikä on riittävän hyvä. WLAN-verkkoa hyödyntävillä laitteilla tarkkuus olisi ollut parempi, mutta lähiverkon katsottiin olevan hiukan huonompi ulkotila navigointiin. WLAN-tukiasemia olisi joutunut asettamaan todennäköisesti paljon tiheämmin, jotta olisi saatu muodostettua tarpeeksi laaja verkko. WLAN-laitteiden suurempi virrankulutus ei myöskään ollut eduksi dronille, joka operoi akun avulla.

LoRa-verkon ominaisuuksien katsottiin olevan hyvin soveltuvat toteuttamaan sellainen järjestelmä, joka mahdollistaa droonin lentämisen takaisin lähtöpisteeseensä, kun se menettää GNSS signaalin. WLAN-verkkoa hyödyntävät laitteet olivat myös vahva vaihtoehto, mutta niiden käyttö ulkotiloissa ja lähiverkon laajuus vaikuttivat valintaan. Haluttiin sellainen teknologia, joka toimisi suurillakin etäisyyksillä ulkotiloissa.

## 6 POHDINTA

Työssä vertailtiin muutamaa eri teknologiaa ja lopulta esitettiin suositus, joka sopisi tapauksen järjestelmään parhaiten. Parhaimmaksi tekniikaksi todettiin LoRaWAN-verkkoa hyödyntävät laitteet ja lopullinen järjestelmä tullaan todennäköisesti rakentamaan sen avulla. LoRa-verkko ja sitä hyödyntävät päätelaitteet katsottiin soveltuvan parhaiten dronin varanavigointijärjestelmäksi ja niiden katsottiin soveltuvan parhaiten ulko- että sisätilakäyttöön. Molempiin tapauksiin haluttiin samaa tekniikkaa hyödyntävä järjestelmä, jotta järjestelmät olisivat mahdollisimman yhteneviä ja samanlaisia. Tämä helpottaa esimerkiksi järjestelmien rakentamista, huoltoa ja päivittämistä. Myös dronit ovat näin enemmän yhteneviä ja käytettävien järjestelmien määrä ei kasva ylivoimaisen suureksi.

Työ onnistui hyvin. Ongelmat esiintyivät vain lähinnä RFID teknologian tiedonhaussa ja tämän takia kyseistä tekniikkaa ei haluttu lähteä tutkimaan syvemmin. Jos jo tehtyjä raportteja RFID tekniikalla toteutetuista navigointi- tai suunnistusjärjestelmistä drooneille olisi löytynyt, oltaisiin voitu olla halukkaampia lähteä kokeilemaan sen soveltamista käytännössä. Kuitenkin uskon, että LoRa-verkolla toteutettava järjestelmä on yhtä hyvä, ellei jopa parempi ratkaisu. Järjestelmän lopullinen suorituskyky ja ominaisuudet alkavat hahmottua kuitenkin vasta, kun saadaan ensimmäinen toimiva versio järjestelmästä valmiiksi. Silloin myös selviää, oliko LoRa-päätelaitteet hyvä valinta.

Suoritettu vertailu tehtiin vain sen tiedon perusteella, jota löydettiin lähinnä netin kautta eri lähteistä. Vertailusta olisi saanut huomattavasti kattavamman ja laadukkaamman, jos kyseisiä teknologioita olisi ollut aikaa ja resursseja testata käytännössä. Tulosten perusteella olisi saanut paljon realistisemmän kuvan kunkin teknologian mahdollisuuksista ja soveltuvuudesta suunnitteilla olevaan järjestelmään.



## LÄHTEET

Banks, J., Hanny D., Pachano, M., A., Thompson, L., G. 2007. RFID Applied. Hoboken. Wiley.

Digita. N.d. IoT-palvelut. Luettu 07.03.2019. <https://www.digita.fi/yrityksille/iot>

Digita. N.d. Mikä on LoRaWAN? Luettu 07.03.2019. [https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika\\_on\\_lorawan](https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika_on_lorawan)

Digita. N.d. Digitan IoT LoRaWAN-verkon peittokartta. Tulostettu 07.03.2019. [https://www.digita.fi/yrityksille/iot/iot\\_lorawan-verkon\\_peittokartta](https://www.digita.fi/yrityksille/iot/iot_lorawan-verkon_peittokartta)

Itewiki. N.d. IoT ja Teollinen internet. Luettu 07.03.2019. <https://www.itewiki.fi/opas/iot-ja-teollinen-internet/>

Lehpamer, H. 2012. RFID design principles. 2. painos. Artech House.

Li, B., Quader, I., J., Dempster, A., G. 2008. On outdoor positioning with Wi-fi. Journal of Global Positioning Systems. International Association of Chinese Professionals in Global Positioning Systems 7 (1), 18-26.

LoRa Alliance. N.d. What is the LoRaWAN Specification? Luettu 07.03.2019. <https://lora-alliance.org/about-lorawan>

LoRa Alliance. 2018. Geolocation whitepaper. Tulostettu 07.03.2019. [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/geolocation\\_whitepaper.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/geolocation_whitepaper.pdf)

Mundy, J. 2015. What is ZigBee? ZigBee Alliance and ZigBee 3.0 Explained. Luettu 07.03.2019. <https://www.trustedreviews.com/news/what-is-zigbee-2920890>

RumbleTools Oy. N.d. Ratkaisumme. Luettu 07.03.2019. <https://www.rumbletools.fi/fi/ratkaisumme/>

RFID Lab Finland ry. N.d. Mitä on RFID? Luettu 07.03.2019. <http://www.rfid-lab.fi/rfid-teknologia/mita-on-rfid/>

Tuominen, M. 2015. Teollinen internet tuo mahdollisuuksia. joita voit hyödyntää nyt heti. Luettu 07.03.2019. <https://www.ecraft.com/fin/blog/2015/9/2/teollinen-internet-tuo-mahdollisuuksia>

## LIITTEET

## Liite 1. Geolocation Whitepaper

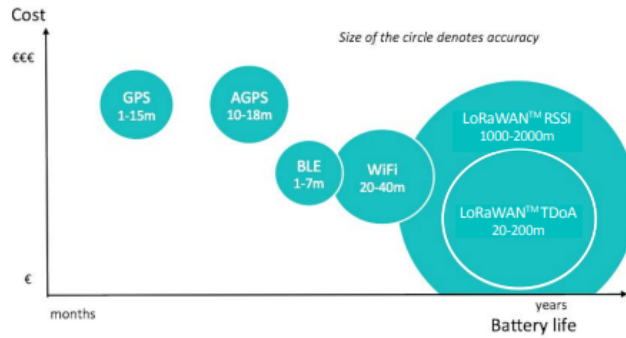


## 1 INTRODUCTION

LoRaWAN™ infrastructure provides a geolocation solution for low-power wide-area networks (LPWANs), enabling a wide range of applications requiring location determination for battery-powered endpoints. The geolocation functionality is supported by any existing LoRaWAN end-devices, eliminating additional cost and requiring no additional processing power.

## 2 AUDIENCE

The audience for this whitepaper is LoRaWAN service providers, enterprises and end-device manufacturers intending to develop applications leveraging LoRaWAN geolocation capabilities. This paper will describe the technical capabilities of LoRaWAN geolocation, highlight application use cases that are suited to LoRaWAN geolocation, and provide several deployment case studies.



**LoRaWAN TDOA/RSSI**

- Lowest cost solution. Works natively with any LoRaWAN sensor
- LoRaWAN enables long battery life use cases
- TDOA: 20-200m accuracy range depending on conditions
- RSSI: 1000-2000m accuracy

**WiFi Location**

- Cost efficient solution for outdoor and indoor solution
- Accuracy increases with hotspot density

**BLE**

Requires a BLE beaconing system  
Indoor solution

**GPS/AGPS**

- 1 GPS adds \$5-\$10 to the BOM
- Most accurate but power consuming solution
- AGPS brings battery consumption improvement

Figure 3-1: Comparison of Geolocation Technologies

### 3 GEOLOCATION TECHNOLOGY COMPARISON

The graphic above provides a visual comparison of cost vs. accuracy vs. battery life of several geolocation technologies.

As represented in Figure 3-1, the LoRaWAN™ protocol provides two methods for geolocation determination: Received Signal Strength Indication (RSSI) based, for coarse positioning, or Time Difference Of Arrival (TDOA), for finer accuracy. This paper will discuss TDOA, which is particularly well suited for applications requiring low-cost, battery-powered end-devices with positioning accuracies in the 20m to 200m range.

Rural deployments with clear line of sight and recommended gateway-deployment geometry will achieve accuracies near the lower end of the scale. Multipath issues inherent in urban and dense urban environments will provide accuracies toward the higher end of the scale. In general, accuracy improves as operators densify their gateway networks.

Best power efficiency is achieved for end-devices requiring infrequent location determination (days or weeks). These end-devices are typically stationary or infrequently moving assets implemented as Class A. The geolocation capability for these end-devices comes at no additional bill of materials (BOM) cost. Mobile assets requiring more frequent position determination will transmit more frames, consume more power, increase end-device costs (e.g., batteries) and will often need to be implemented as Class B or Class C end-devices. Usage of a higher data rate (say SF7) will help bound the increased power needs.

The focus of this paper is outdoor, wide-area geolocation. It should be noted, however, that the LoRaWAN community is investigating various techniques to provide indoor accuracies of 10m or better (100m gateway density, improved clock sources, etc.). This would compete favorably with indoor WiFi Angle of Arrival (AOA) techniques providing 1m to 3m accuracies.

## 4 THE LoRaWAN™ GEOLOCATION CAPABILITY

This section provides a technical overview of LoRaWAN TDOA geolocation and error factors impacting accuracy.

### 4.1 Architecture

A LoRaWAN end-device can be located if uplink transmissions from the device are received by three or more gateways. These uplink transmissions need not be specific transmissions for geolocation; they may be typical LoRaWAN application data frames. Several gateways simultaneously receive the same uplink message, and the end-device location is determined using multilateration techniques. The multilateration process is shown in Figure 4-1.

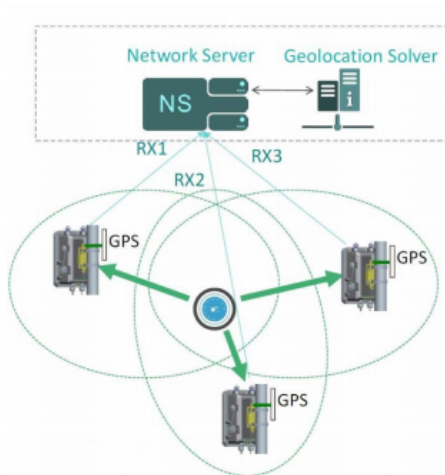


Figure 4-1: Geolocation Architecture

There is no additional hardware required on the end-device beyond its LoRaWAN interface. Gateways do require accurate time synchronization; this is currently achieved with GPS at the gateways (or any means available to synchronize gateway clocks to within a few tens of nanoseconds). Each received uplink frame is accurately time-stamped by the gateway. This time stamp is forwarded to the

network server as part of a frame's metadata, which also includes signal level, signal-to-noise ratio and frequency error.

The network server sorts multiple receptions of the same frame, groups all the metadata including the timestamps for this frame, and requests a geolocation computation from the geolocation solver. The elementary geolocation solver function is to compute, for a given frame, the difference in time of reception seen by pairs of gateways. This time difference measures proximity of the end-device to one gateway of the pair compared with the other. When the TDOA is known for a pair of gateways, the end-device can be placed on a hyperbola. With<sup>(3)</sup> several such time differences, the end-device can be placed on several hyperbolae. The end-device is positioned at the intersection of these hyperbolae.

The accuracy of the position fix depends on several factors:

- Propagation environment and multipath
- Gateway deployment geometry and density
- Position determination algorithm used by the geolocation solver
- Quality of gateway's time synchronization
- End-device dynamics and configuration

### 4.2 Impact of Propagation Errors

In a multipath-free environment, LoRaWAN geolocation performance is limited by the gateway's clock accuracy. Conductive geolocation testing typically achieves better than 3m accuracy with signal levels 25dB above sensitivity. At sensitivity level, noise degrades performance to 60m. Within these constraints, accuracy rarely depends on the received signal level.

In the presence of multipath, given the system bandwidth limitation of 125 KHz, signal paths are often indistinguishable. Only the average channel delay can be estimated. In some cases the direct signal path is not present, introducing a delay offset into the frame timestamps, as only reflection paths are seen. Figure 4-2 shows the statistics of timestamp errors for different propagation scenarios. These are measurements taken from mobile vehicle testing with timestamp errors estimated using GPS. The urban case has fewer data points than the others (2,000 vs. 10,000), which explains the worse-looking curve. The average distance from vehicle to gateway is 1.5km.

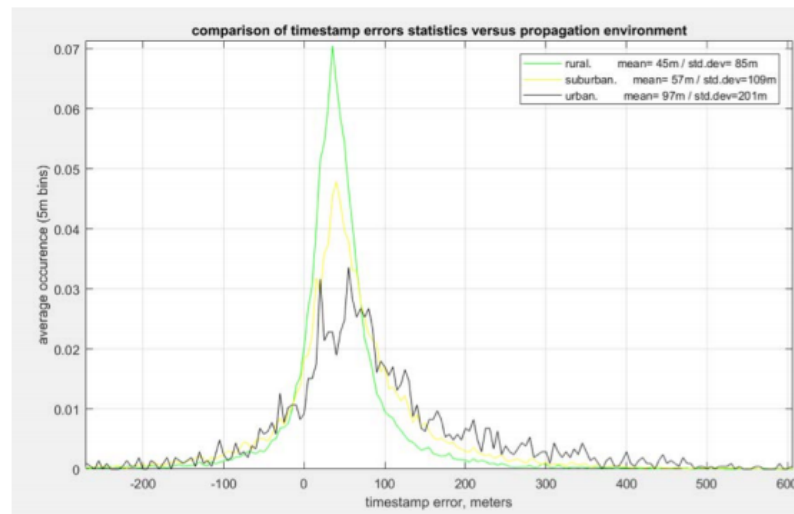


Figure 4-2: Statistics of Timestamp Errors

On average, the timestamps are late. Note that the timestamp errors may be negative, but they are never smaller than  $-1/\text{bandwidth}$  (never lower than the basic resolution of the system).

We can classify the timestamp errors with a bias, which is the average error, and a spread around this average. Bias increases and spread widens as the propagation environment degrades.

There are various ways to mitigate timestamp errors.

- Repetition of frames at different frequencies
- Antenna diversity at the gateway (typically two antennas)
- Higher-density gateway deployment, which increases the number of available samples (frame receptions) and increases the chance of line-of-sight measurements, thus increasing the accuracy of the TDOA
- Lower latency frame timestamping at the gateway
- Incorporation of out-of-band propagation error corrections to mitigate multipath (simulations, predictions, calibration or fingerprinting)

The geolocation solver is designed to mitigate multipath. The solver selects a candidate set of timestamps to be processed, ignoring the rest. The solver then aggregates the remaining data and solves for the end-device location.

Multipath propagation fundamentally limits the accuracy of the system, but gateway-deployment geometry also plays a significant role.

#### 4.3 Impact of Deployment Geometry

As with other radio navigation systems (e.g., GPS, LORAN), the accuracy of a LoRaWAN geolocation position fix depends on the placement of the gateways vs. the end-device. The metric used to determine the quality of gateway placement is the Geometric Dilution Of Precision (GDOP), which is a measure of the "goodness" of the receiving gateway's relative geometry.



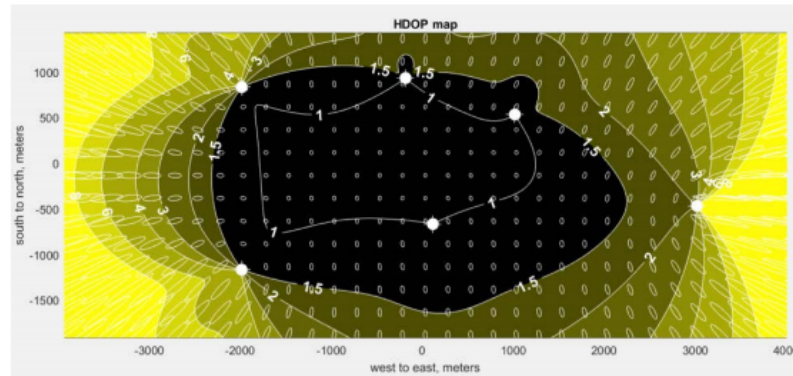


Figure 4-3: HDOP Map

Each time difference computed by the geolocation solver defines a hyperbolic curve<sup>(6)</sup>. Hyperbolas are open curves, so their intersections can lead to error amplification when the end-devices to be located are not well positioned vs. the receiving gateways.

GDOP captures this error amplification factor, which depends solely on geometry: gateway locations vs. end-device locations. For position fixing in two dimensions, we compute Horizontal DOP (HDOP). When the HDOP is 1, there is no amplification of errors; if the gateways show an uncertainty of, say, 60m on the timestamps (i.e., 200 nanoseconds), the final uncertainty of geolocation will be 60m. With an HDOP of 2, the final uncertainty will be 120m. HDOP can even be lower than 1 if high gateway density is achieved.

Figure 4-3 is an example of an HDOP map simulating a deployment of six gateways. The gateways are represented with red stars and the HDOP is shown as contour zones.

In the middle zone, HDOP is >1 and increases to >8 toward the sides. Outside the polygon formed by the gateways, HDOP increases very quickly. High HDOP significantly degrades geolocation accuracy.

White uncertainty zones are represented at regular spacings, depicting both the amplitude of the position error as well as the orientation of the error (greater along the radial pointing to the center of the polygon). Note the east side of the map where, even inside the gateway polygon, HDOP reaches 2 with

larger errors along the north-south axis. This is due to low gateway density along that axis.

Note that closer gateway placement does not always provide for better geolocation performance; what matters most is a regular gridded pattern for gateway placement. Location accuracy will be better at the middle of a square of four gateways, compared with the middle of a rectangle.

For small-scale or trial geolocation deployments, it is highly recommended to compute HDOP and optimize gateway positions accordingly. Poor performance outside the coverage polygon should be treated as a consequence of geometry.

#### 4.4 Impact of Time Errors

Quality of GPS reception also impacts accuracy. For mobile service providers, gateways deployed close to cellular sites may experience periodic blockage of GPS; therefore, special antennas should be used. Gateways mounted on low rooftops or billboards in urban locations can also suffer from the "urban canyon" effect of fewer satellites in view.

When GPS reception is of good quality, the time base error is on the order of 25ns (<10m). GPS is not a significant source of geolocation error for deployments unable to approach this 10m accuracy. But when very dense LoRaWAN networks are deployed, improving gateway clock accuracy can further improve geolocation accuracy.

#### 4.5 Filtering Improves Accuracy

Depending on the application, it is possible to filter the output results of the geolocation solver to provide better accuracy. For example, if the end-device is known to maintain a fixed position, time averaging can be applied to derive the location. Kalman filtering is a more generic technique that can estimate both location and speed from noisy observations (a version of Kalman is used in most positioning systems). In the case of LoRaWAN geolocation, as the pre-filtered position estimates are sparse and noisy, the filter has a strong impact on performance. Geolocation performance is improved if the filter knows to apply a specific end-device speed profile. This information comes from general knowledge of the end-device (stationary, mobile, etc.) and is application specific.

Another use of application-specific knowledge is a map-matching filter. If, for instance, the end-devices are to be moved between warehouses, the filter will first classify end-devices as stationary or moving. If the end-device is stationary, it can be assumed to be located at one of the warehouses. If the end-device is moving, it will be located on a road.

Being optimized for low power operation, LoRaWAN duty-cycle limitations apply in some regions such that an end-device will only transmit a limited number of frames each day. This limitation is an aspect of all LoRaWAN communication in such regions and is not specific to geolocation messaging. The practical implication is that fixed or nomadic devices will be much better located than moving devices, as several frames can be aggregated to provide a filtered location estimate.

## 5 DEPLOYMENT CASE STUDIES

### 5.1 Port of Barcelona (Actility/Cisco)

An obvious use case for LoRaWAN geolocation is vehicle tracking. GPS-based vehicle tracking has been available for several years, but the technology is not widely deployed due to complexity of vehicle installation. A typical deployment of GPS for positioning and cellular for reporting is relatively power hungry and requires connection to the vehicle battery.

A new generation of low-power trackers, based on LoRaWAN TDOA geolocation, is now available.

At Mobile World Congress 2017, Actility and Cisco installed six IR829/IXM LoRaWAN gateways to cover the ZAL Port of Barcelona with a dedicated LoRaWAN network. The ZAL management group provides security, maintenance and general services to companies within the port.

The network deployed at the port covers an area of 0.43km<sup>2</sup>. The six gateways were spaced 400m to 600m apart, ensuring good coverage in this suburban-type area. Three-story metallic buildings were typical. There are no high points in the area for antenna mounts, so the antennas were deployed directly on the rooftops (a suboptimal configuration).

Abeeway Master Trackers were installed on the maintenance vehicles. For the most power-efficient geolocation, the trackers operate in LoRaWAN TDOA mode. Assisted GPS reporting using LoRaWAN uplink is also available for use cases requiring better accuracy (sub 10m) and less concern for power consumption. The trackers provide 50x battery savings vs. typical AGPS/GSM trackers and a five-year lifetime on C-type batteries (24 fixes per day). Installation is simple: The trackers are self-powered, so they were screwed, glued or tied to the vehicles.

The Abeeway ApyApp application was used by ZAL Port to monitor the vehicles' activity on-site.

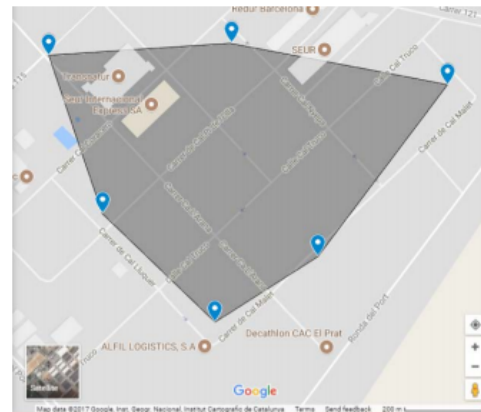


Figure 5-1: Gateway Locations in ZAL Port of Barcelona

In the ZAL Port use case, the application must compute how much time each vehicle has spent in front of each building (i.e., how long it has been parked). The buildings in the logistics area are quite sparse; vehicles are parked >80m from buildings and most often parked for periods varying between 20 minutes and 12 hours. Parked vehicle tracking is a prime application for TDOA-based geolocation; trackers reporting once every 10 minutes are easily located with 60m to 80m accuracy. The geolocation servers can perform averaging over multiple frames when the vehicles are parked and are able to detect when the vehicles start to move again. Figure 5-2 presents the position accuracy achieved for stationary (parked) vehicles.

It is also possible to determine the approximate real-time position of moving vehicles using TDOA. We have measured that a moving vehicle can be tracked to an average precision of 171m. This was adequate to assess in which general direction the vehicle was heading, to understand if it was headed to its next servicing location or back to maintenance parking at the end of the day. In-transit accuracy is less important for this use case, as geolocation is mainly used to trigger alerts when a vehicle enters or exits a designated geo-fenced area. Figure 5-3 presents the accuracy achieved for moving vehicles.

#### 5.2 Issy-les-Moulineaux/Boulogne (Actility/Cisco)

Cisco and Actility have deployed five IXM LoRaWAN gateways near Paris to validate LoRaWAN geolocation capabilities. The gateways cover the urban environment of Issy-les-Moulineaux and Boulogne. Ethernet or cellular gateway backhaul is employed. The testbed is operational 24 hours a day, enabling stationary and mobile test nodes to generate messaging that is recorded for geolocation tools and application development.

The deployed network covers a perimeter of ~1.6km<sup>2</sup>. The four gateways are spaced 900m to 1300m apart, forming a pentagon. A fifth gateway, Boulogne, was later added for future test scenarios.

The area contains commercial, municipal and residential buildings mixed with more open environments such as the Seine River, parks and a stadium. Antennae are mounted at heights of 60m to 126m. The high-point (Épinettes, in Figure 5-4) provides maximum long-distance coverage, but ground-level coverage sometimes suffers. As the landscape is hilly, more gateways are required to insure optimum geolocation capability (all end-devices heard by at least three gateways).

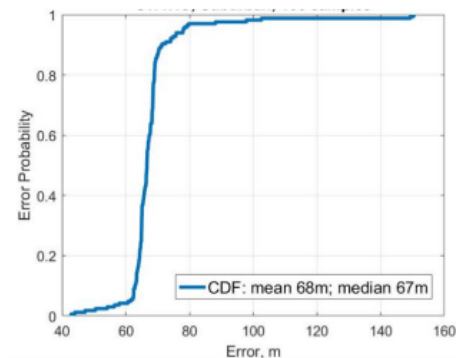


Figure 5-2: ZAL Port TDOA Position Accuracy, Stationary (Parked) Vehicles

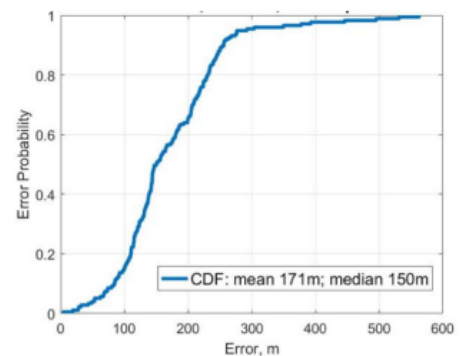


Figure 5-3: ZAL Port TDOA Position Accuracy, Moving Vehicles



Stationary asset geolocation testing was performed using Adeunis V2 Field Test devices configured to uplink every 20 seconds. Eight uplinks were factored into the geolocation solution. The end-devices were configured with a “stationary” profile, with Adaptive Data Rate enabled and a mixture of acknowledged and non-acknowledged uplinks.

Accuracies of 75m to 115m (with approximate standard deviation of 25m) were achieved for end-devices placed at various locations within the area bounded by the gateways (good HDOP). Accuracy degrades to upwards of 400m outside the area perimeter (poor HDOP). These results are consistent with the ZAL Port findings in Barcelona. A typical positioning plot is provided in Figure 5-5.

Testing of additional gateway geometries, stationary end-devices and mobile end-devices is ongoing.



Figure 5-4: Issy-les-Moulineaux/Boulogne Deployment



Figure 5-5: Paris Stationary Geolocation Sample

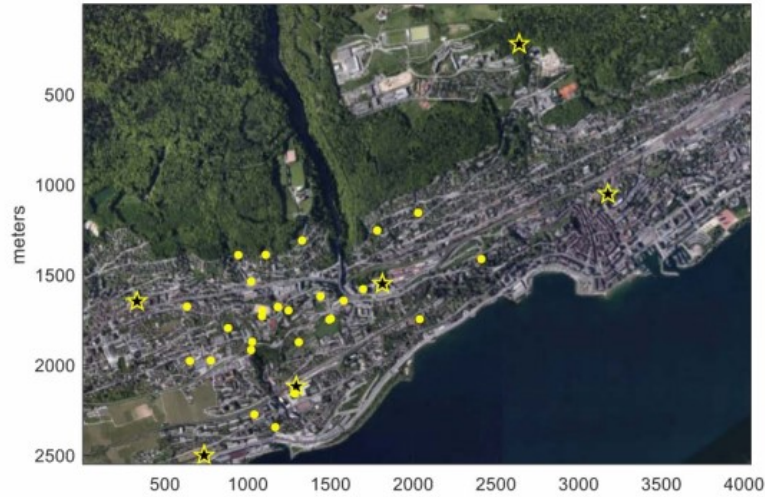


Figure 5-6: Neuchâtel Stationary Geolocation Sample

**5.3 Neuchâtel (Semtech)**

Semtech is testing LoRaWAN geolocation in the urban environment of Neuchâtel, Switzerland. The city contains many hills and is situated between a lake and a mountain. This makes it a difficult case from a GDOP perspective. There is also long delay multipath from the hills. Figure 5-6 shows the six gateways and the 30 stationary, outdoor testing points.

Figure 5-7 presents the cumulative distribution function of geolocation performance for various numbers of LoRaWAN frames received from the 30 test points. With a single frame, the median accuracy is around 150m, and taking eight frames improves accuracy to 80m. No filter is applied.

Several tests have been carried out at different data rates: SF7, SF10 and SF12. Performance was strictly identical among them, demonstrating that multipath and GDOP are the dominant factors for performance. Note the worst performance coincides with poor GDOP: with eight frames, the 90th-percentile performance is only 205m.

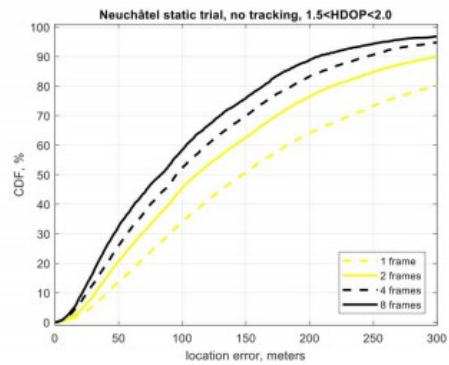


Figure 5-7: Neuchâtel Geolocation Performance

#### 5.4 Mkomazi National Park (Semtech/Kerlink)

The Internet of Life and the ShadowView Foundation are developing LoRaWAN trackers to protect endangered black rhinos in the reserve of Mkomazi National Park, Tanzania with the technical support of Semtech and Kerlink. The LoRaWAN non-GPS trackers are smaller and less expensive, consume less power, are impervious to poachers equipped with GPS jammers, and enable more frequent geolocation reports compared with the GPS trackers they are designed to replace. A first LoRaWAN tracker has been implanted directly into the rhino horn last September and enables the park's security personnel to strategically position themselves to monitor the rhinos.

The rhinos' sanctuary is a fenced area spanning 50 square kilometers. Four geolocation-enabled Kerlink gateways have been deployed to cover the area. The distance between gateways is between 4km and 10km. The geolocation accuracy is better than 50m,

and in some cases better than 20m.

Figure 5-8 shows examples of tracker geolocation plots, each point using four frames to compute a location. The first two figures have a median error of 40m, and the corresponding test points are in an area with a HDOP higher than 2. The third point has a HDOP of 1.5. The exact location of test points and gateways cannot be made public. The network will be optimized for better HDOP inside the sanctuary, and deployments in other natural parks are already planned. Other smart park applications used by the park management include solar-powered trackers installed on vehicles to track the whereabouts of personnel and tourists in high-risk areas.

Figure 5-9 shows the performance for a single-frame geolocation estimate, which is also better than 50m but shows more variations than in the four-frames case.

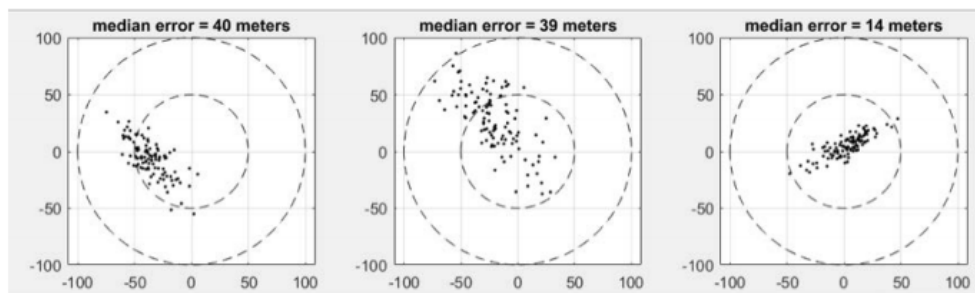


Figure 5-8: Mkomazi Geolocation Trial Plots, Four Frames

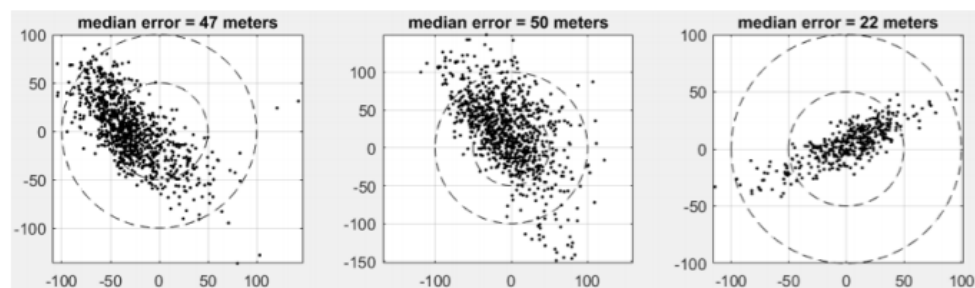


Figure 5-9: Mkomazi Geolocation Trial Data, Single Frame





**5.5 Bouygues Construction (Objenious/Sagemcom)**  
Construction logistics, vehicle fleet management and waste management are promising vertical markets for the Internet of Things (IoT). Objenious (Bouygues Telecom) and Sagemcom together developed Bouygues Construction’s Ubsol solution, providing construction waste tracking from trucks as they transit between their loading and unloading sites.

The Ubsol solution supports the “Grand Paris” regional master plan, which is designed to transform the Paris metropolitan area (Paris proper plus 130 surrounding suburbs and communities) into a 21st century city. It is estimated that the project will generate more than 43 million tons of construction waste.

Each truck is equipped with a Siconia™ multisensor end-device. End-device data transmission is triggered by a motion sensor, and loading/unloading is sensed using a gyroscope. The link below provides a video of the use case:

<https://youtu.be/TcFXi1ABfDk>

For the sake of benchmarking LoRaWAN geolocation, some of the trucks have been equipped with GPS sensors. The GPS traces are compared with the LoRaWAN geolocation trace. As seen in Figure 5-10, the traces match very closely.

Statistical performances (CDF) have been obtained through months of daily traffic collection. The geolocation performance result for the Ubsol solution is presented in Figure 5-11. A median accuracy of 136m was achieved.



Figure 5-10: GPS Compared With LoRaWAN TDOA Trace

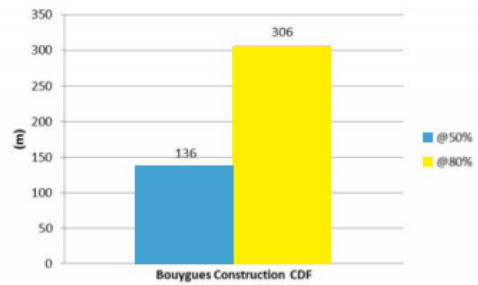


Figure 5-11: Statistical Accuracy Performance (CDF) of the Ubsol Solution



Figure 5-12: LoRaWAN Geolocation Positioning of Hand Trucks in Downtown Paris

**5.6 Paris (Objenious/Sagemcom)**

Asset management for urban settings presents several challenges: the environment is multipath rich, and non-line-of-sight propagation is typical.

Objenious and Sagemcom have deployed many Siconia™ devices to track the position of (normally) stationary hand trucks (a.k.a. “rolls”) in downtown Paris. Geofencing notifications are triggered when a hand truck reports it has left a designated area.

Figure 5-12 illustrates the LoRaWAN geolocation position estimates for these end-devices, as well as the gateway locations, in downtown Paris.

Key performance indicators (KPI) for geolocation of these end-devices are given in Figure 5-13. CDF (upper left) and PDF (histogram, upper right) of the position accuracy are provided (mean: 57m, std: 18m), together with the location error (bottom left). The Instantaneous Inter-Site Distance (ISD; bottom right) seen from the end-device at each time sample is an indicator of the network density.

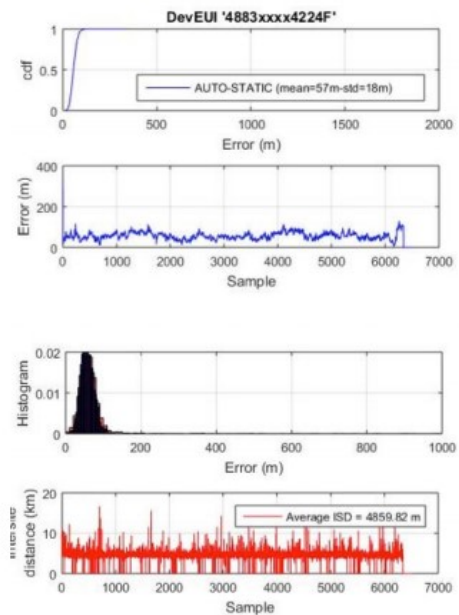


Figure 5-13: Fixed Device Performance (Accuracy CDF, ISD), Downtown Paris

Figure 5-14 presents instantaneous HDOP influence of the network layout on geolocation accuracy.

Prior to gateway deployment, static GDOP should be assessed as explained in section 4.3, taking into account the entire set of gateways available to the deployment area. Figure 5-15 illustrates GDOP obtained from a stationary end-device (in red) in the deployment area.

For the same stationary end-device, Figure 5-16 presents the end-device's measured radio environment (mean RSS) vs. end-device distance from gateways. Clearly for locations outside the corridor formed by the dense gateways, HDOP values are much higher than those obtained for locations aligned with the gateway corridor.

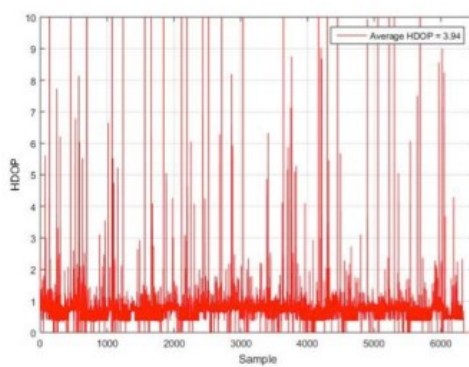


Figure 5-14: Instantaneous HDOP-Fixed Device, Downtown Paris

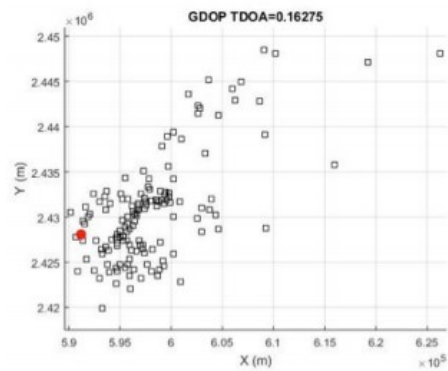


Figure 5-15: GDOP Estimate of a Stationary End-device (Red) Within the Gateway Deployment

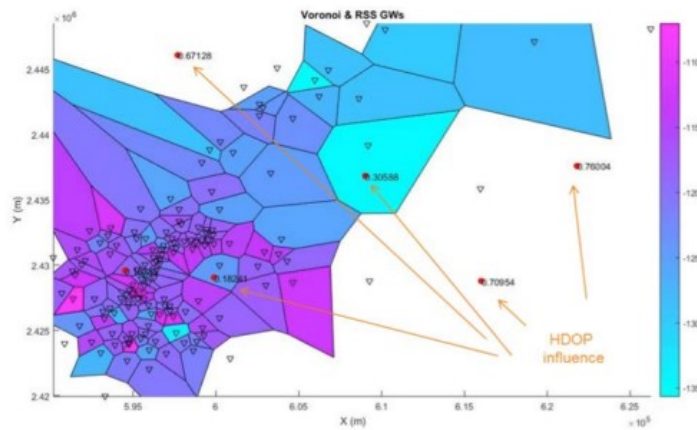


Figure 5-16 HDOP Influence vs. End-device Position From GWs



**5.7 Thoirgné-Fouillard (Kerlink/Semtech)**

Kerlink is offering geolocation-ready stations in its Wirnet IBTS range supporting location-based services (LBS). These new stations provide fine timestamps (using Semtech's license) that can be used for geolocation purposes. A TDOA ranged-based solver has been developed and integrated into a proprietary LBS solution.

Kerlink also set up a few test platforms around the world in various environments and conditions (rural area, semi-urban, urban) to assess and optimize the performance of the solver, especially its calculation accuracy and location precision. One testbed is installed at Thoirgné-Fouillard (Kerlink HQ) where it operates permanently. Four gateways are installed around the city and several end-devices have been placed in fixed positions. The solver calculates the position as it receives a message in near real-time, and then returns the result to a dashboard for mapping display.

Figure 5-17(a) and (b) shows the deployed network and the estimated positions obtained for an end-device. An analysis of HDOP (Figure 5-17(c)) allows us to understand the precision of the results. In addition, its information is used in a Kalman filter for post processing. The CDF, given for this end-device in Figure 5-17(d), shows an accuracy of 32m at 50%, 43m at 70%, and 62m at 90%.



Figure 5-17: (a) Thoirgné-Fouillard LoRaWAN network testbed (b) estimated positions for a stationary end-device

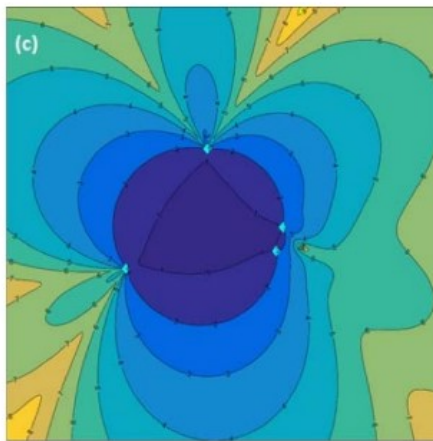


Figure 5-17: (c) HDOP

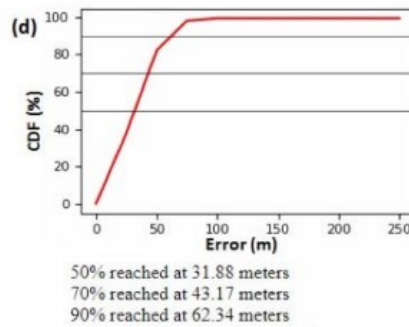


Figure 5-17: (d) CDF



## 6 LoRaWAN™ GEOLOCATION TAKEAWAYS

Summarizing the discussions above:

- LoRaWAN TDOA geolocation is able to provide positioning accuracies of 20m to 200m.
- Benefits of LoRaWAN geolocation are achievable with long-lived, battery-powered Class A end-devices at zero additional BOM cost.
- Mitigation of multipath errors and sound gateway-placement geometry will provide accuracies approaching 20m.
- LoRaWAN TDOA geolocation is particularly well suited for application such as:
  - Geo-fencing. Has a normally stationary asset moved? (anti-theft for construction sites, utility yards, airport, campuses, etc.).
  - Tracking slow-moving assets requiring infrequent position updates (people, pets, livestock herds, vehicles, etc.), particularly applicable to smart agriculture and smart cities use cases.
- LoRaWAN TDOA geolocation may not be well suited for use cases such as:
  - Real-time mobile-asset tracking. Higher frequency positioning fixing means more power consumption, usage of Class C end-devices, etc.
  - High-dynamics asset tracking.
  - High-precision positioning (sub-meter ... at least using the current gateway spacing and clock sources).
- The LoRaWAN protocol can be used as the transport layer for use cases requiring GPS capabilities.

### FOOTNOTES

- i. Simplified for two-dimensional positioning. In general, for three dimensions, the time difference defines a hyperboloid.
- ii. Simplified for two-dimensional positioning. In general, for three dimensions, the time difference defines a hyperboloid.