

Henri Hosionaho

LORAWANIN HYÖDYNTÄMINEN DATAN KERUUSSA

Kandidaatintutkielma
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Staff Scientist Joonas Sääe
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Henri Hosionaho: LoRaWANin hyödyntäminen datan keruussa
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Toukokuu 2023

Langattoman tiedonsiirron kehitys on ollut esineiden internet (engl. Internet of Things, IoT) -sovellusten yleistymisen taustalla hyvin merkittävässä roolissa. IoT-laitteita käytetään yhä monipuolisemmin eri sovelluksissa, minkä vuoksi internetiin liitettävien laitteiden määrän on ennustettu kasvavan lähitulevaisuudessa merkittävästi. Tämä on ollut merkittävänä motivaationa uusien verkkotekniikoiden kehittämiseksi.

IoT-laitteet asettavat niitä varten suunnitelluille verkkotekniikoille haasteita rajoittuneiden resurssiansa vuoksi. Tämän vuoksi verkkotekniikat tulee monesti pitää hyvin yksinkertaisina, jolloin monia verkkotekniikoille tyypillisiä ominaisuuksia joudutaan karsimaan. Työssä käsiteltävässä LoRaWAN-verkkotekniikassa on haluttu pitkän kantaman lisäksi saavuttaa hyvin matala virrankulutus, mikä lisää haasteita entisestään.

Työssä perehdytään tarkemmin kyseisen verkkotekniikan teknisiin ominaisuuksiin, sekä pohditaan kuinka ne vaikuttavat sen suorituskykyyn ja soveltuvuuteen. LoRaWANissa on monia verkkotekniikan suorituskykyä parantavia ominaisuuksia, mutta erityisesti siirtotien varauskerroksen (engl. Media Access Control, MAC) toteutus aiheuttaa tekniikalle rajoitteita. Merkittävin MAC-kerroksesta aiheutuva rajoite on LoRaWANin huono skaalautuvuus.

Työssä suoritettiin mittaukset Suomen LoRaWAN-verkosta vastaavan Digitan verkolle. Mittauksessa havaittiin LoRaWANin suoriutuvan hyvin pidemmilläkin etäisyyksillä. Samalla kuitenkin huomattiin verkkotekniikan rajoittavia tekijöitä. Näistä merkittävimpiä oli päätelaitteiden lähettämien pakettien katoaminen. Verkkotekniikka kuitenkin suoriutui hyvin sille suunnatusta tehtävästä, sensoridatan välittämisestä palvelimelle, mikä havainnollistaa kuinka eri käyttötarkoituksiin soveltuvinta verkkotekniikkaa valittaessa on ymmärrettävä tekniikoiden ominaisuudet ja rajoitteet.

Avainsanat: LoRa, LoRaWAN, IoT-verkkotekniikka, esineiden internet, langattomat sensoriverkot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

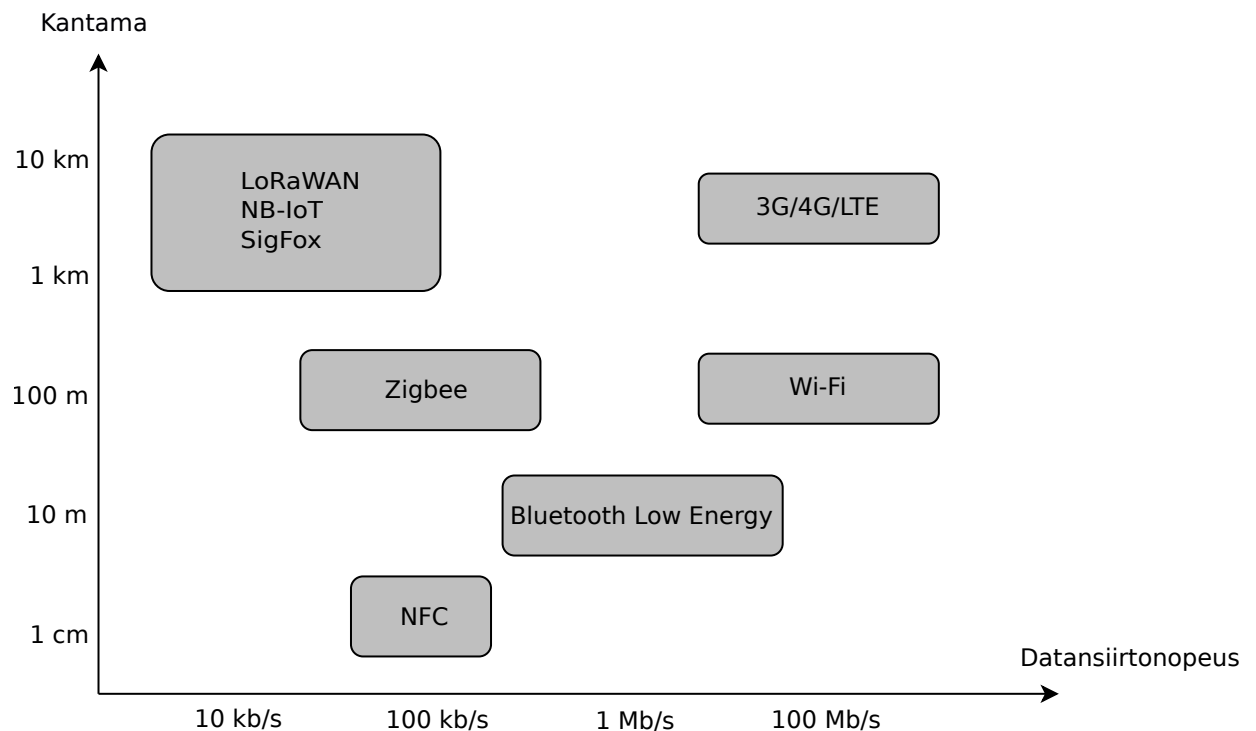
1.	Johdanto	1
2.	LoRA-radiotekniikka	3
2.1	Modulaatio	3
2.2	Kehysrakenne	5
2.3	Kuuluvuus	5
3.	LoRaWAN-verkkotekniikka	7
3.1	LoRaWANin rakenne	7
3.2	Ominaisuudet	8
3.3	Käytettävät verkot	10
3.4	Liittyminen verkkoon	10
4.	Datankeruu LoRaWANilla	12
4.1	LoRaWAN-sovellukset	12
4.2	Digitan LoRaWAN-verkon testaus	12
4.3	Mittaustulokset	13
4.4	Pakettien katoaminen	16
5.	Yhteenveto	18
	Lähteet	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABP	Aktivointi yksilöimällä, (engl. Activation By Personalization)
ADR	Adaptiivinen datansiirtonopeus, (engl. Adaptive Data Rate)
CR	Korjausbittien hyötysuhde, (engl. Code Rate)
CRC	Jaksollinen eheystarkastus, (engl. Cyclic Redundancy Check)
CSS	Viserryshajaspektritekniikka, (engl. Chirp Spread Spectrum)
IoT	Esineiden internet, (engl. Internet of Things)
LoRa	Pitkän kantaman radiotekniikka, (engl. Long Range radio communication technique)
LoRaWAN	Pitkän kantaman verkkotekniikka, (engl. Long Range Wide Area Network)
LPWAN	Matalan virrankulutuksen alueverkko, (engl. Low-Power Wide Area Network)
MAC	siirtotien varauskerros, (engl. Media Access Control)
OTAA	Ilman yli aktivointi, (engl. Over-The-Air Activation)
SNR	Signaali-kohinasuhde, (engl. Signal to Noise Ratio)
WLAN	Langaton lähiverkkotekniikka, (engl. Wireless Local Area Network)

1. JOHDANTO

Esineiden internet (engl. Internet of Things, IoT) on ollut yksi tämän vuosikymmenen puhutuimmista aiheista tietotekniikan alalla. Mitä moninaisimpien laitteiden yhdistäminen internettiin on ollut yhä suuremmassa kasvussa, ja samalla sovelluskohteiden määrä on lisääntynyt vauhdilla. Monesti sovelluskohteiden tietoliikenneteknologioiksi ovat riittäneet vanhemmat 1990-luvulla julkaistut teknologiat, kuten esimerkiksi Bluetooth ja Wi-Fi. Kuitenkin älylaitteiden jatkuva yleistyminen ja leviäminen uusiin ympäristöihin on luonut uusia haasteita joihin kyseiset teknologiat eivät ole kyenneet vastaamaan. Esimerkkejä teknologioiden rajoittavista tekijöistä ovat muun muassa virrankulutus, kantama ja verkkotopologia. Kasuvat markkinat ja vaadittavien teknologioiden puute ovat lopulta ajaneet yritykset uusien langattomien verkkoteknologioiden kehitykseen. Kuvassa 1.1 on esitelty käytetyimpiä IoT-verkkotekniikoita.



Kuva 1.1. Nykyisiä langattomia IoT-teknologioita luokiteltuna datansiirtonopeuden ja kantaman mukaan [19] [2].

Tässä työssä perehdytään vuonna 2015 julkaistuun LoRaWAN-verkkoprotokollaan, joka keskittyy ominaisuuksissaan erityisesti pitkään kantamaan ja matalaan virrankulutukseen. Muita LoRaWANin kaltaisia matalan virrankulutuksen alueverkko-protokollia (engl. Low Power Wide Area Network, LPWAN) ovat esimerkiksi NB-IoT ja Sigfox. LPWAN-tekniikoille yksi tyypillinen piirre on protokollien yksinkertaisuus. Tämä johtuu erityisesti edullisesti tuotettujen IoT-laitteiden vajaista resursseista, minkä vuoksi ne eivät kykenisi tukemaan monimutkaisempia protokollia. Myös laitteiden akkukäyttöisyydestä johtuva rajallinen sähkövirran saatavuus pakottaa karsimaan protokollien ominaisuuksia. Tämä aiheuttaa monesti rajoitteita verkkotekniikoille.

Työn tarkoituksena on käydä tarkemmin läpi LoRaWANin hyödyntämiä tekniikoita, sekä arvioida mitä rajoitteita verkkoprotokolla asettaa käytettäville sovelluksille. Lisäksi pohditaan vaihtehtoisia toteutustapoja erityisesti LoRaWANin siirtotien varauskerrokselle (engl. Media Access Control, MAC). LoRaWANin käyttöä ja ominaisuuksia havainnollistetaan työn lopussa esitellyillä mittauksilla.

2. LORA-RADIOTEKNIikka

LoRa (lyhenne sanoista "long range") on Semtechin kehittämä radiotekniikka, jonka merkittävimpiä ominaisuuksia ovat hyvä kuuluvuus pitkillä matkoilla sekä pieni datansiirtonopeus ja virrankulutus [18]. Radiotekniikka on suunniteltu käytettäväksi erityisesti akkukäyttöisissä IoT-sovelluksissa.

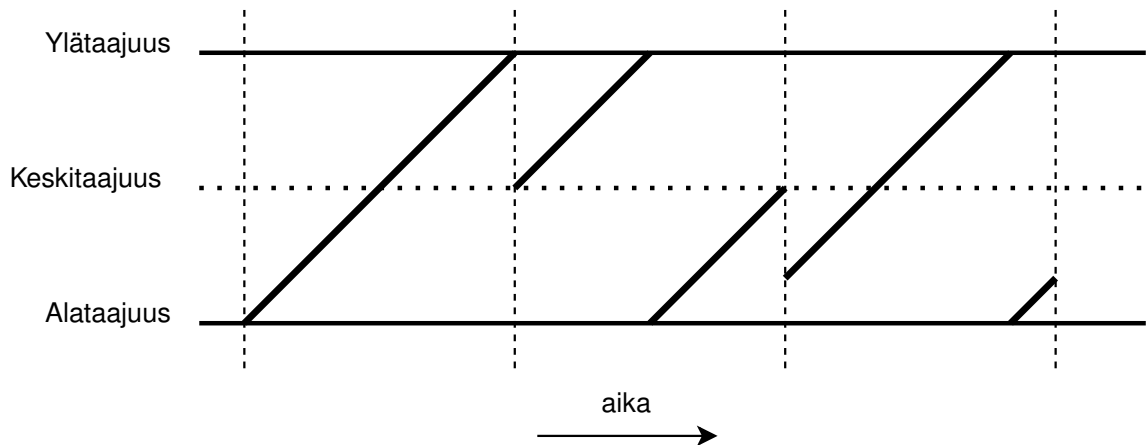
2.1 Modulaatio

Tietoliikennesignaaleilla halutaan monesti välittää dataa paikasta toiseen. Jotta signaaliin saataisiin sisällytettyä dataa, on sitä muokattava jollain ennalta sovitulla tavalla. Yleisimpiä tapoja tälle ovat taajuuden ja amplitudin muokkaaminen lähetettävän datan mukaisesti [18].

Digitaalista dataa varten kehitetyissä modulaatiotekniikoissa on usein mahdollista lähettää yksittäisten bittien sijaan *symboleita*. Tätä varten tarvitaan *symboliaakkosto*. Symboliaakkostossa jokaista mahdollista bittisekvenssiä vastaa jokin symboli. Näin on mahdollista muokata signaalia bittien sijasta symboleiden mukaan ja samalla voidaan saavuttaa suuremmat datansiirtonopeudet.

LoRa käyttää modulaatiotekniikkanaan viserryspajaspespektrotekniikkaa (engl. Chirp Spread Spectrum, CSS) [18]. Tekniikassa lähetettävän signaalin taajuutta vaihdellaan ylä- ja alataajuuden välillä kuvan 2.1 mukaisesti. Taajuus ei lähetettäessä pysy missään vaiheessa samana, vaan jatkuvasti joko kasvaa tai pienenee. Jokaisen symbolin alussa lähtötaajuus valitaan symbolin mukaan ja sitä kasvatetaan, kunnes saavutetaan ylätaajuus. Tämän jälkeen lähetettävä taajuus palaa alataajuudeksi ja kasvaa lähtötaajuuden suuruiseksi ja symboli päättyy [16]. Ylä- ja alataajuus riippuvat käytettävästä kaistanleveydestä ja kanavasta.

CSS-tekniikan merkittävimmät edut ovat häiriönsietoisuus ja matala virrankulutus [18]. Monet LoRan ominaisuuksista onkin saavutettu juuri modulaatiotekniikan avulla. Häiriönsieto saavutetaan erityisesti hajaspektrotekniikalla, jossa symboli on hajautettu taajuudessa. Tämä antaa suojaa erityisesti monitiehäipymiselle, jossa tietyt signaalin taajuudet voivat vaimentua merkittävästi ennen vastaanottoa. Radiotekniikoissa joudutaan kuitenkin monesti tekemään kompromisseja saavutettavien ominaisuuksien suhteen. LoRan



Kuva 2.1. Kolme esimerkkiä LoRan CSS-symbolista.

tapauksessa kuuluvuutta on kasvatettu datansiirtonopeuden kustannuksella. Artikkelissa [20] on osoitettu, kuinka kantaman parantamiseksi joudutaan radiotekniikoissa pienentämään datansiirtonopeutta. LoRan datansiirtonopeus kanavaa kohden on 0,3 kbps – 50 kbps käytettävistä parametreista riippuen [3]. Näin pienellä datansiirtonopeudella on mahdollista saavuttaa hyvä kuuluvuus matalillakin lähetystehoilla.

Modulaatioissa yhtenä muuttujana on hajautuskerroin (engl. Spreading Factor, SF). Hajautuskertoimen arvo määrittää symbolin keston ajallisesti. Mitä suurempi kerroin, sitä enemmän symboli leviää ajassa. Suurempi hajautuskertoimen arvo tarkoittaa siis pienempää datansiirtonopeutta, mutta toisaalta parantaa häiriönsietokykyä ja kohinansietoa [16]. Muuttujan suuruutta onkin hyvä vaihdella esimerkiksi käytettävän kaistanleveyden ja kuuluvuuden mukaan. LoRassa hajautuskertoimen arvoa voidaan vaihdella välillä 7–12 [16]. LoRassa eri hajautuskertoimilla lähetetyt symbolit eivät artikkelin [16] perusteella ole täydellisen ortogonaalisia. Kuitenkin artikkelin mukaan riittävän hyvällä lähetystehon säätelyllä eri hajautuskertoimen symboleja voidaan lähettää päällekkäin.

LoRa hyödyntää virheenkorkauskoodina Hamming-koodia. Hamming-koodi lisää dataan bittejä virheiden korjaamiseksi varten. Korjausbittien määrän säätelyä varten LoRaan on määritetty muuttujaksi korjausbittien hyötysuhde (engl. Code Rate, CR). Esimerkiksi hyötysuhteen arvo 4/5 tarkoittaa, että jokaista neljää databittiä kohden lisätään yksi korjausbitti [8]. Korjausbittien määrän kasvattaminen helpottaa virheiden havaitsemista, mutta toisaalta vähentää viestin hyötydatan osuutta.

Euroopassa LoRa käyttää lisensoimatonta 863–870 MHz EU868-kaistaa [3]. Yleisin käytävä kaistanleveys on 125 kHz, mutta spesifikaation [3] mukaan on myös mahdollista käyttää yli 336 kHz kaistanleveyttä suurimmille datansiirtonopeuksille. Koska etenemisvaimennus on kaavan (2.1) mukaisesti kääntäen verrannollinen aallonpituuteen, ei LoRa kärsi yhtä voimakkaasti etenemisvaimennusta kuin esimerkiksi 2,4 GHz kaistaa käyttävät lähiverkkotekniikat. EU868-kaista ei kuitenkaan ole Euroopassa kaupallisessa käytössä, joten muista sovelluksista johtuvat häiriöt eivät ole poissuljettuja. Tämän lisäksi kaistaa

rajoittaa käyttöjaksorajoitus (engl. duty cycle), joka on EU868-kaistalla alle yhden prosentin [3]. Tämä tarkoittaa, että laite saisi tunnin aikana käyttää yhtä kanavaa enintään 36 sekuntia.

2.2 Kehysrakenne

LoRassa viestit alkavat purskeella (engl. preamble). Tämän tarkoitus on mahdollistaa vastaanottavan laitteen synkronoituuminen lähettäjän kesken [14]. Taulukossa 2.1 on LoRan fyysisen kerroksen kehysrakenne tarkemmin esiteltynä.

Taulukko 2.1. LoRan kehysrakenne. Tehty artikkelin [14] perusteella.

PHY frame	Preamble	Header	Header CRC	Payload	Payload CRC
size	Min. 4.25 symbols	2 Bytes	2 Bytes	Max. 255 bytes	2 bytes

LoRan fyysisen kerroksen kehys on pyritty suojaamaan bittivirheiltä usealla menetelmällä. Fyysisen kerroksen otsikkokenttä ja hyötykuorma koodataan erikseen omilla korjausbittien hyötysuhteilla. Taulukon 2.1 mukaisesti jaksolliseen eheystarkastukseen (engl. Cyclic Redundancy Check, CRC) on varattu molemmille kentille kaksi tavua. CRC:n käyttäminen mahdollistaa lähetykskanavassa tapahtuneiden bittivirheiden havaitsemisen vastaanoton yhteydessä [13].

Payload kenttä sisältää LoRan MAC-kerroksen datan, sekä mahdollisen hyötydatan. Vaihtoehtoisesti hyötykuormakentä sisältää Join-Request- tai Join-Accept -viestit verkkoon liittymisen yhteydessä. Laitteen liittymisestä verkkoon kerrotaan enemmän kappaleessa 3.

Taulukossa 2.1 näkyy, kuinka LoRan fyysisen kerroksen kehukseen mahtuu enintään 255 tavun hyötykuorma. Arvot on kuitenkin määritetty aluekohtaisesti, ja esimerkiksi Euroopassa hyötykuormaa voi fyysisellä kerroksella olla 230 tavua ja sovelluskerroksella 222 tavua [10]. Kun tähän yhdistää taajuuskaistan yhden prosentin käyttöjakso rajoitteen, huomataan datansiirtonopeuden olevan LoRa:ssa hyvin rajoittunut. LoRaWANin rajoitteita käsitellään enemmän luvussa 3.

2.3 Kuuluvuus

Artikkelissa [12] Petäjäjärvi et al. mittasivat LoRan kuuluvuutta Oulussa. Maalla tehtyjen mittausten perusteella viiden kilometrin kantama voidaan saavuttaa 80 % pakettien toimitusvarmuudella. Merellä tehdyissä mittauksissa saavutettiin peräti 30 kilometrin kantama.

Kuuluvuuteen vaikuttavat useat eri tekijät. Olennaisin näistä on kuitenkin etäisyys. Etäisyyden aiheuttama signaalin vaimeneminen voidaan laskea hyödyntämällä esimerkiksi

vapaan tilan vaimennuksen kaavaa. Kaavaa käytettäessä oletetaan lähettimen säteilevän signaalia tasaisesti kaikkiin suuntiin, sekä lähettimen ja vastaanottimen välisen tilan olevan esteetön. Kaavan avulla saadaan lähettimestä tietyn etäisyyden päässä kulkevan signaalin ja lähetetyn signaalin tehojen suhde [7]. Etenemisvaimennus voidaan laskea Friisin lähetysyhtälöstä [4] johdettulla kaavalla:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (2.1)$$

Kaavassa λ on signaalin aallonpituus ja d lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys. P_t ja P_r ovat puolestaan voimakkuudet lähetetylle ja vastaanotetulle signaalille.

Vastaanottimet pystyvät vastaanottamaan hyvinkin matalatehoisia signaaleja. Näin ol- len signaalin teho ei itsessään ole välttämättä kiinnostavin arvo kuuluvuutta mitattaes- sa. Enemmän hyötyarvoa saadaan, kun tiedetään kuinka hyvin vastaanotettua signaalia voidaan tulkita. Yksi keino tähän on verrata vastaanotetun signaalin tehoa taustakohinan tehoon. Saadusta arvosta käytetään nimitystä signaali-kohinasuhde (engl. Signal to Noi- se Ratio, SNR). Arvon laskemiseen käytetty kaava voidaan ilmaista yksinkertaistettuna

$$SNR = \frac{P_s}{P_n}, \quad (2.2)$$

jossa P_s on signaalin ja P_n kohinan teho watteina ilmaistuna. Kohina summautuu vastaa- notettavaan signaaliin pääasiassa antennissa ja ilmakehässä olevien vapaiden elektro- nien sekä molekyylien lämpöliikkeestä ja on luonteeltaan hyvin nopeasti vaihtelevaa [22]. Langattomassa tietoliikenteessä käytetään arvon ilmoittamisessa käytännön syistä ylei- sesti logaritmista asteikkoa, jolloin yksikkönä käytetään desibeliä.

Kohina vaikuttaa signaalin taajuuskomponentteihin epälineaarisesti. Tämä tarkoittaa sig- naalin muodon muuttumista aikatasossa, jolloin signaalin tulkitseminen, eli demodulointi, on vaikeampaa. On mahdollista arvioida systeemille matalin mahdollinen SNR-arvo, jol- la signaalia kyetään demoduloimaan riittävällä tarkkuudella. Tähän vaikuttaa esimerkiksi käytettävä modulaatiotekniikka [17]. Esimerkiksi WLAN:ia käytettäessä teknologian suo- rituskyky laskee merkittävästi SNR-arvon laskiessa alle 20 desibelin [17].

3. LORAWAN-VERKKOTEKNIikka

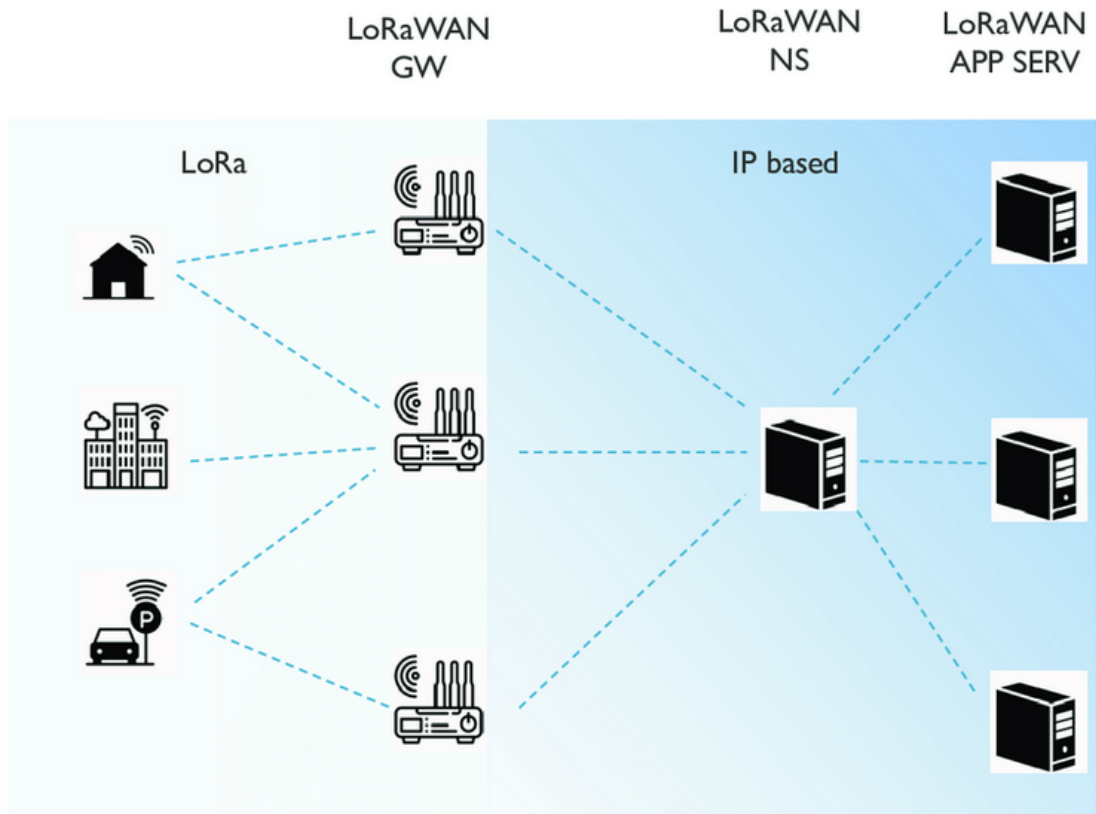
LoRaWAN on verkotekniikka, joka hyödyntää fyysisellä kerroksella LoRa-radiotekniikkaa [1]. LoRaWAN määrittää verkkotekniikan ylimmät kerrokset, kuten esimerkiksi siirtotien varauskerroksen. Näin LoRaWAN mahdollistaa LoRaa käyttävien päätelaitteiden yhdistämisen yhtenäiseksi verkoksi ja määrittää kuinka verkon laitteiden tulee kommunikoida keskenään.

3.1 LoRaWANin rakenne

LoRaWAN-verkko muodostuu useista päätelaitteista jotka liikennöivät suoraan LoRaWAN-yhdyskäytävälle (engl. gateway, GW). Yhdyskäytävät keskittävät viestit verkkopalvelimelle (engl. Network Server, NS), joka on yhteydessä sovelluspalvelimiin (engl. Application Server, AS). LoRaWANin verkkotopologia on esitelty Kuvassa 3.1. Erityisen huomionarvoista topologiassa on verkkopalvelimen läsnäolo. Esimerkiksi WLAN-verkkoissa vastaavaa laitetta ei ole ja yhdyskäytävät kommunikoivat suoraan palvelimille. Verkkopalvelimen käyttö kuitenkin yksinkertaistaa päätelaitteiden ja yhdyskäytävien toimintaa, mikä on IoT-laitteiden kohdalla hyvin suotavaa.

LoRaWAN määrittää jokaiselle verkon laitteelle omat tehtävänsä. Yhdyskäytävän rooli on nimensä mukaisesti toimia päätelaitteen ja verkkopalvelimen välisenä yhdyskäytävänä. Yhdyskäytävänä toimiva laite kykenee vastaanottamaan ja purkamaan päätelaitteen lähettämät ylälinkin viestit ja välittämään ne verkkopalvelimelle. Laite kykenee myös lähettämään päätelaitteelle verkkopalvelimelta tulevat alalinkin viestit [10]. Liikenne yhdyskäytävältä verkkopalvelimelle voidaan toteuttaa esimerkiksi TCP/IP-verkkotekniikkaa hyödyntäen. Alalinkin suuntaisesti liikennöidessä protokollana käytetään LoRaa. Yhdyskäytävän ei kuulu lukea tai tulkita sen läpi kulkevia viestejä.

Verkkopalvelin sijaitsee tähtitopologisen verkon keskellä. Sen tärkein tehtävä on huolehtia päätelaitteiden MAC-kerroksesta. Toisin sanoen verkon käytön merkittävin säätely tehdään verkkopalvelimen kautta. Palvelin kykenee esimerkiksi säätämään laitteiden datansiirtonopeutta ADR-tekniikkaa hyödyntämällä. Tärkeimpänä tehtävänä palvelin kuitenkin välittää päätelaitteiden lähettämät ylälinkin paketit oikeille sovelluspalvelimille [10].



Kuva 3.1. LoraWANin topologia [6].

Liittymispalvelin (engl. Join Server, JS) on topologiassa päätelaitteiden näkökulmasta verkkopalvelimen toisella puolella. Sen tehtävä on päätelaitteiden ilman yli tehtävän (engl. Over-The-Air) aktivoinnin hallinnointi ja istuntoavainten luominen. Tätä varten palvelimen tulee varastoida päätelaittekohtaisia parametreja, kuten laitteen sovelluspalvelimen osoite [10].

Sovelluspalvelimet voivat olla kolmansien osapuolten ylläpitämiä. Näiden palvelimien tehtävä on tuottaa halutut palvelut loppukäyttäjille [10], esimerkiksi päätelaitteelta tulleen datan välittäminen asiakkaalle internetin ylitse.

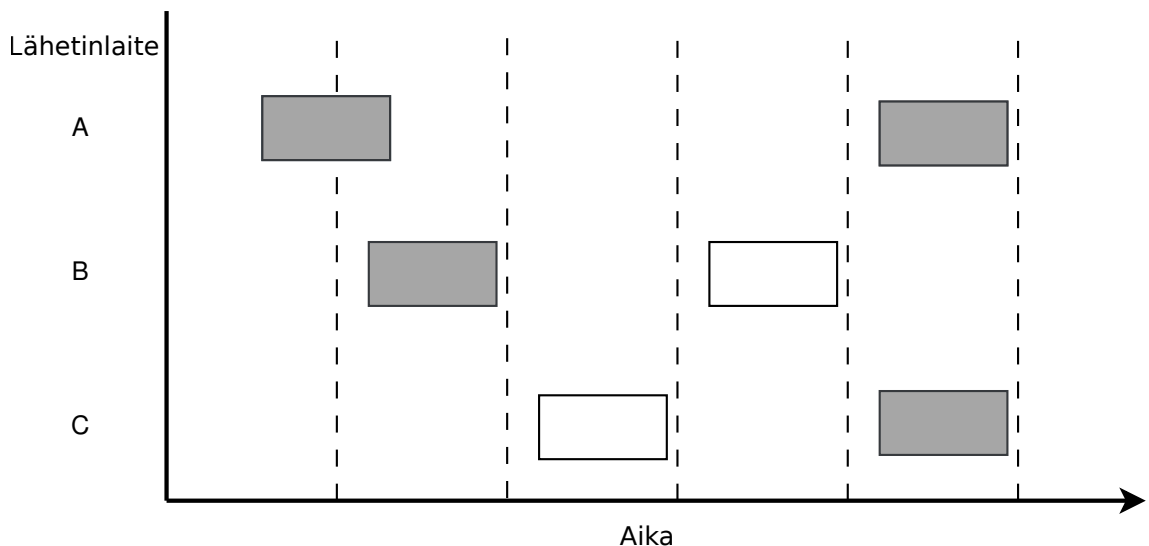
3.2 Ominaisuudet

LoRaWANiin on määritetty päätelaitteille kolme mahdollista luokkaa. Luokkien A, B ja C päätelaitteet noudattavat erilaisia MAC-kerroksen toteutuksia. Näistä luokan A toteutus on yksinkertaisin ja kuluttaa kaikista vähiten virtaa, kun B- ja C-luokkien laitteille on puolestaan toteutettu ominaisuuksia, jotka esimerkiksi mahdollistavat tiheämmän alalinkin liikennöinnin laitteelle. Tässä työssä käsitellään enimmäkseen luokkaa A.

Virrankulutuksen minimoimiseksi LoRaWANissa on jouduttu karsimaan tietoverkoille tyyppisiä ominaisuuksia. Yksi keino virrankulutuksen minimointiin on lähetys- ja kuuntelu-

jaksojen minimointi. A-luokan päätelaite vastaanottaa viestejä vain muutaman sekunnin ajan ylälinkin lähetyksen jälkeen [10]. Tästä johtuen tietoliikenne on hyvin asymmetristä ja päätelaitteiden tarkka kontrolointi on hyvin haastavaa.

LoRaWANissa ei myöskään ole toteutettu päätelaitteiden lähetyksen aikataulutusta. Verkko-tekniikoissa tästä vastaa yleensä MAC-protokollat. LoRaWANin MAC-protokolla perustuu hyvin yksinkertaiseen ALOHA-protokollaan [15][1]. ALOHA:ssa laitteet saavat aloittaa lähettämisen mielivaltaisina hetkinä, jolloin protokollaa käytettäessä ei kyetä välttämään pakettien törmäämisiltä. Törmäyksen tapahtuessa sanomat saapuvat vastaanottajalle samanaikaisesti, jolloin niitä ei välttämättä kyetä tulkitsemaan oikein. Tällöin vastaanottaja voi esimerkiksi pyytää laitteet lähettämään pakettinsa hetken kuluttua uudelleen. ALOHA-protokollaa ja pakettien törmäystä on havainnollistettu kuvassa 3.2. Kuvan harmaalla merkatut sanomat menevät ajassa toisensa kanssa päällekkäin, jolloin on tapahtunut sanomien välinen törmäys.



Kuva 3.2. ALOHA-protokolla havainnollistettuna kolmella lähteinlaitteella.

LoRaWANissa on kuitenkin toteutettuna ominaisuuksia jotka parantavat pakettien vastaanoton todennäköisyyttä. Verkkotekniikassa on mahdollista määrittää paketin vastaanottaminen vahvistettavaksi. Tällöin esimerkiksi yhdyskäytävän tulisi lähettää vahvistusviesti päätelaitteelle tällaisiksi määritetyistä ylälinkin paketeista. Jos päätelaite ei vastaanota vahvistusviestiä, voi se toteuttaa uudelleenlähetyksen. Toistettavien uudelleen lähetyksen määrää voidaan rajoittaa spesifikaatiossa [10] määritetyn laskurin "NbTrans" avulla, jolloin voidaan välttää verkon turha ruuhkauttaminen tilanteissa joissa yhteys on pidemmän aikaa katkenneena.

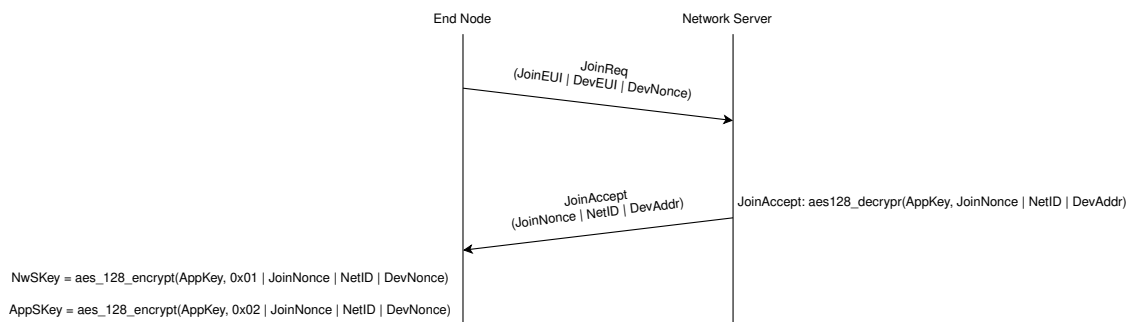
3.3 Käytettävät verkot

Suomessa lähes koko maan kattavaa julkista LoRaWAN-verkkoa operoi Digita [9]. Koska LoRa käyttää lisensoimattomia taajuuksia, voi kuitenkin kuka tahansa hankkia oman yhdyskäytävän ja yhdistää tämän runkoverkkoon. Näin esimerkiksi yritykset voivat rakentaa yksityisiä verkkoja omiin tarkoituksiinsa ja samalla taata paremmat kuuluvuudet haluamillaan alueilla. Myös julkisen ja yksityisen verkon yhdistelmän käyttäminen on mahdollista. Yhdistelmästä LoRa-alliance on käyttänyt nimitystä hybridiverkko [11].

3.4 Liittyminen verkkoon

Laitteen liittymistä verkkoon edeltää aina laitteen tunnistautuminen ja aktivointi. Aktivoinnin tarkoituksena on määrittää laitteelle osoite, sekä 128 bitin pituiset AES-algoritmin salausavaimet NwkSKey ja AppSKey. NwkSKey on päätelaitteen ja verkkopalvelimen välinen, kun taas AppSKey on laitteen ja sovelluspalvelimen välille [10]. Kahdella erillisellä avaimella mahdollistetaan kehyksen ja hyötykuorman erillinen salaus, jolloin esimerkiksi verkkopalvelin ei kykene tulkitsemaan sovelluspalvelimelle lähetettyä hyötykuormaa.

Aktivointiin on kaksi tapaa: ilman yli aktivointi (engl. Over-The-Air Activation, OTAA), kuvassa 3.3, ja aktivointi yksilöimällä (engl. Activation By Personalization, ABP). OTAA:ssa laite pyytää liittymistä Join-Request -viestillä. Viesti sisältää arvon JoinEUI, jonka perusteella verkkopalvelin ohjaa viestin oikealle liittymispalvelimelle. Viestin eheyden varmistamiseen on käytetty JS:n ja päätelaitteen välistä AppKey:tä. Toinen olennainen viestiin kuuluva parametri on laitteet globaalisti yksilöivä DevEUI [10].



Kuva 3.3. LoRaWANin OTAA [10] mukaan.

Jos liittymispalvelin hyväksyy liittymispyynnön, se vastaa viestiin Join-Accept -viestillä. Viesti sisältää laitteelle määritetyn osoitteen DevAddr, sekä parametrejä joiden avulla päätelaite voi laskea NwkSKey:n ja AppSKey:n kuvan 3.3 mukaisesti. Viesti on salattu AppKeyllä [10]. Jos laitteen liittyminen verkkoon halutaan estää, ei Join-Accept -viestiä lähetetä.

Aktivointi yksilöimällä, eli ABP, on OTAA:n verrattuna hyvin yksinkertainen. Siinä kappaleen alussa määritetyt avaimet, NwkSKey ja AppSKey, ovat ohjelmoitu laitteelle etukä-

teen. Kuitenkin päätelaite ei kykene liittymään uusiin verkkoihin ja käyttää jatkuvasti samoja avaimia, jolloin korkeamman tietoturvan sovelluksissa OTAA:n käyttäminen on suositeltavaa [10].

4. DATANKERUU LORAWANILLA

Tässä kappaleessa pohditaan tarkemmin LoRaWANin soveltuvuutta datan keruuseen. Kappaleessa on esitelty työtä varten suoritettut mittaukset, ja pohdittu saatujen tulosten merkitystä. Näiden tulosten, sekä työssä aiemmin esiteltyjen ominaisuuksien perusteella pohditaan LoRaWANin rajoitteita ja ongelmia. Lopuksi esitellään havaittujen ongelmien korjaamiseksi annettuja parannusehdotuksia.

4.1 LoRaWAN-sovellukset

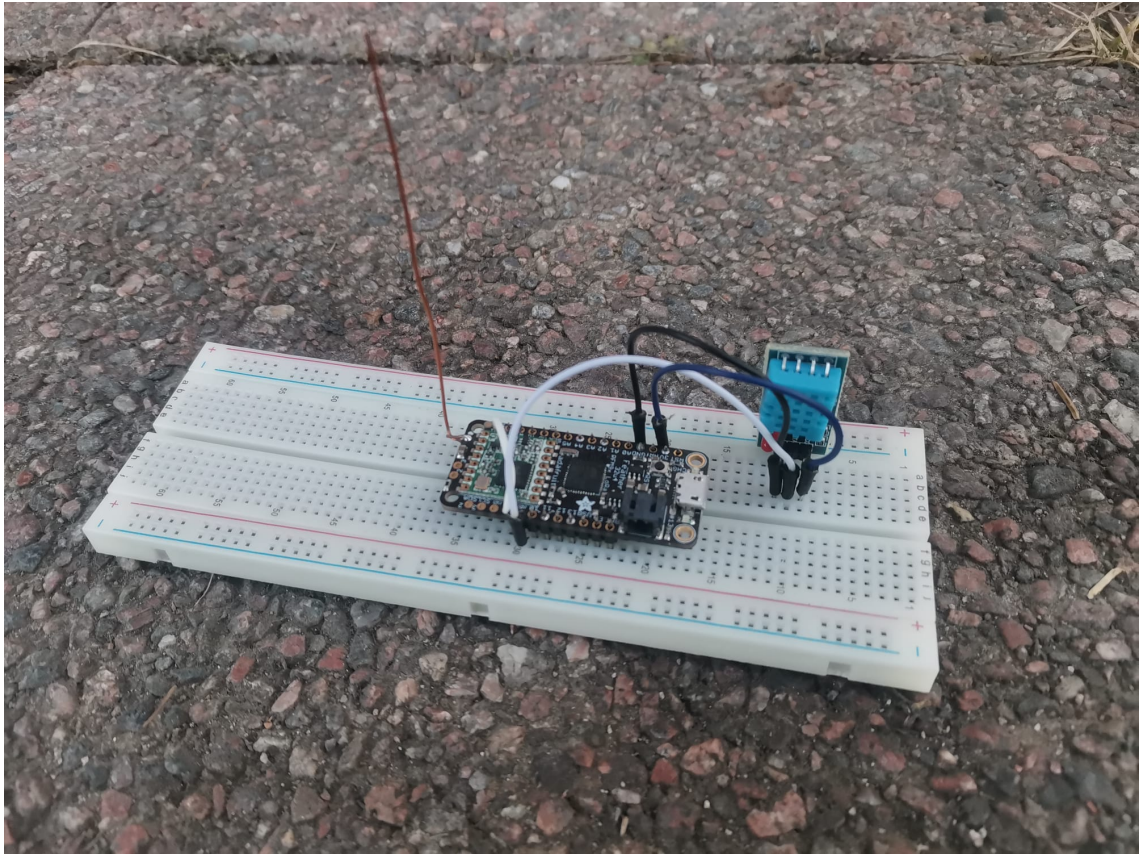
Rajoittuneen datansiirtonopeuden vuoksi LoRaWANilla ei kyetä siirtämään suurempia tietorakenteita järkevästi. Tästä johtuen LoRaWAN ei sovellu useampiin käytetyimpiin IoT-sovelluksiin, kuten esimerkiksi musiikin suoratoistoon tai videokuvan siirtoon. On kuitenkin olemassa paljon käyttökohteita joissa pieni virrankulutus ja hyvä kantama nousevat verkkotekniikan kannalta tärkeään asemaan. Esimerkki tällaisesta käyttökohteesta on sensoridatan kerääminen IoT-laitteilta. Kerätyn sensoridatan avulla voidaan seurata ja mitata esimerkiksi lämpötilaa, kosteutta, laitteiden sijaintia tai koneiden käyttöasteita.

Artikkelissa [5] tutkittiin LoRaWANin hyödyntämistä kastelujärjestelmissä. Tutkimusasetelmassa päätelaitteet oli sijoitettu maanpinnan alle, josta ne keräsivät dataa maan kosteudesta. Kerätty mittaustiedot lähetettiin lopulta LoRaWANia hyödyntäen yhdyskäytävälle. Sääntiedotuksia, sensoridataa ja pilvilaskentaa hyödyntäen päätelaitteiden suorittamaa kastelua kyettiin säätelemään olosuhteiden mukaisesti. Kyseisessä sovelluksessa korostuvat LoRaWANin vahvimmat ominaisuudet; hyvä kuuluvuus, sekä pienen virrankulutuksen mahdollistama päätelaitteiden pitkä elinikä.

4.2 Digitan LoRaWAN-verkon testaus

Työtä varten suoritettiin kokeilu Digitan ylläpitämälle LoRaWAN-verkolla. Kokeilun tarkoituksena oli havainnollistaa verkkotekniikan käyttämistä ja tuoda esille tekniikan ominaispiirteitä. Lähetinlaitteina käytettiin kahta Adafruitin Feather 32u4 mikrokontrolleripiiriä, joihin oli integroituna RFM9x LoRa -moduulit. Kuvan 4.1 mikrokontrolleripiiriin (laite 1) kytkettiin lämpötilaa ja kosteutta mittaava DHT11-sensori, jolla kerätty lämpötiladata lähetettiin mikrokontrollerin avulla Digitan LoRaWAN-verkkoon. Toiseen mikrokontrolleripiiriin

(laite 2) ei liitetty sensoria vaan se lähetti dataa laitteen akun jännitearvoista.



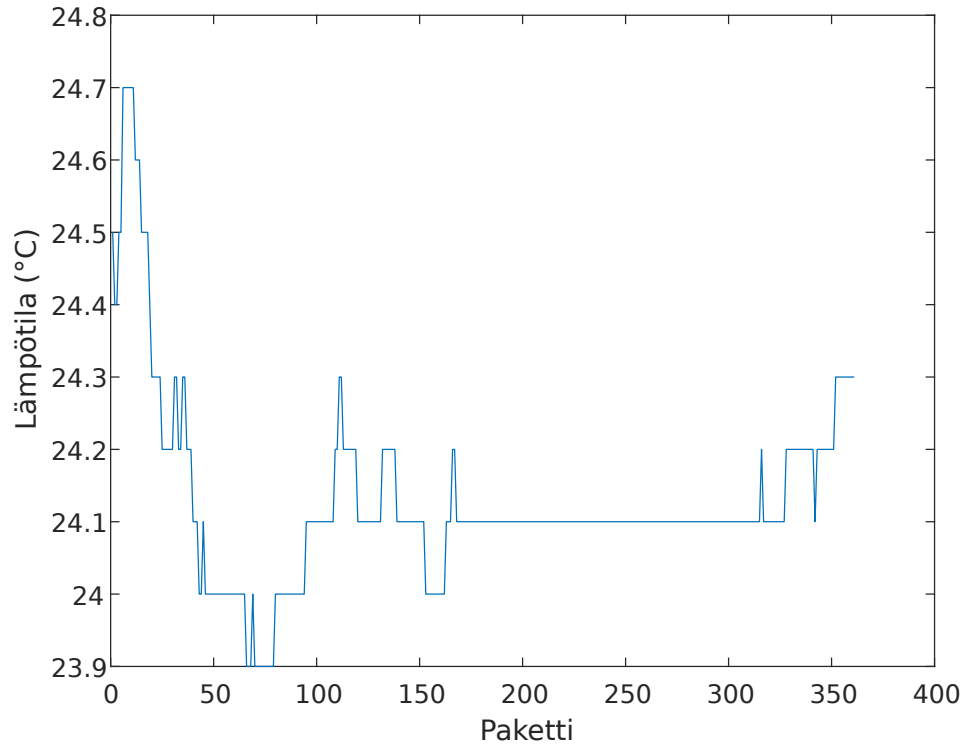
Kuva 4.1. Mittauksessa käytetty lähetinlaite ja sensori.

Molemmat laitteet liitettiin verkkoon ABP:lla. Sensoridataa lähettävä laite 1 käytti mittausten ajan hajautuskertoimen arvoa 7, ja laite 2 arvoa 12. Näin kyetään vertailemaan mitattavia parametreja eri hajautusarvojen käytön välillä. Mittausten ajan laitteet olivat sisätiloissa noin kymmenen senttimetrin etäisyydellä toisistaan. Laitteet ohjelmoitiin lähettämään 120 sekunnin välein kaistan käyttöjaksorajoitetta noudattaen. Näin 15 tuntia kestäneen mittauksen aikana laitteet ehtivät teoriassa lähettämään 450 pakettia. Määrä on hyvin rajallinen, joten mittaustulokset voivat sisältää pientä vääristymää. Tuloksista kuitenkin selviää, kuinka verkkotekniikan ominaispiirteet realisoituvat käytännössä. Mittausdata kerättiin Digitan LoRaWAN-verkossa alustana käyttämän Thingpark Wireless:in avulla. Alusta tarjoaa tietoa esimerkiksi vastaanotettujen ylälinkin lähetysten voimakkuuksista ja signaali-kohinasuhteista.

4.3 Mittaustulokset

Mittausten päätyttyä saatu sensori- ja mittausdata kerättiin Thingparkin palvelimelta. Laitteelta 1 oli kertynyt mittausten ajalta palvelimelle 360 ylälinkin pakettia, joka on 90 pakettia vähemmän kuin mitä laitteen tuli teoriassa jakson aikana lähettää. Laitteelta 2 puolestaan kerättiin paketteja 361 kappaletta. Pakettien numeroinnin perusteella laitteen yksi lähet-

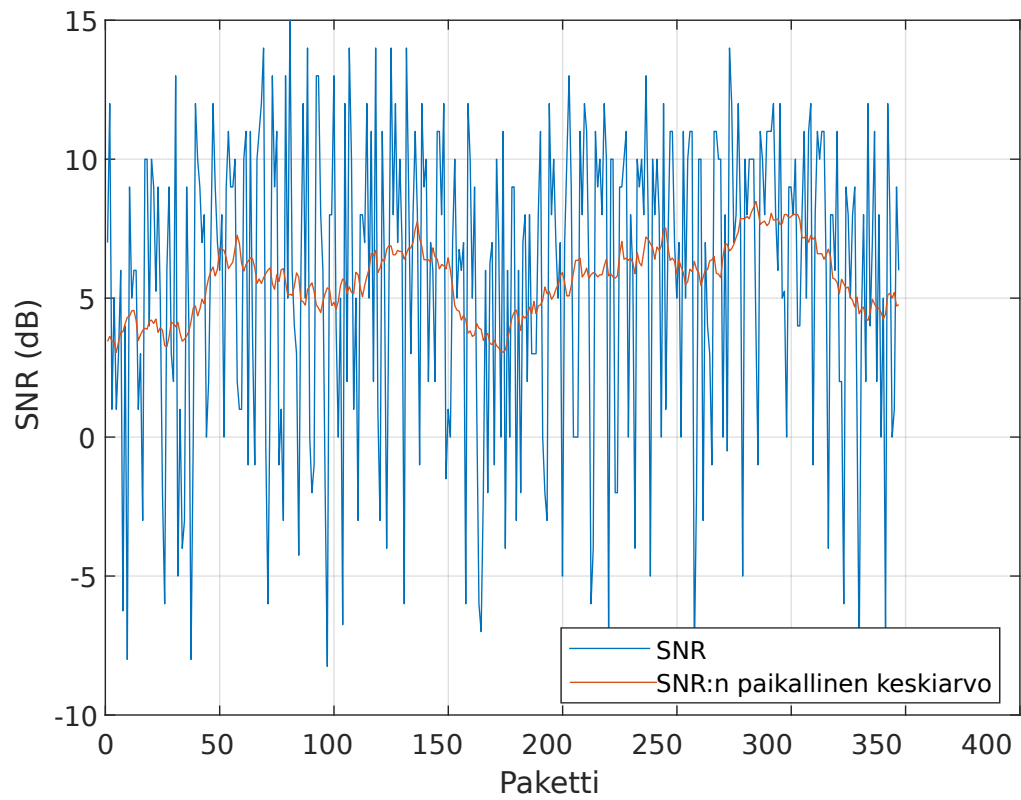
tämistä paketeista katosi 74 kappaletta ja laitteen kaksi paketeista 54 kappaletta. Näin ollen pakettihävikkien arvot olivat 17 ja 13 prosenttia. Laitteelta 1 saatu lämpötiladata on esitetty Kuvassa 4.2.



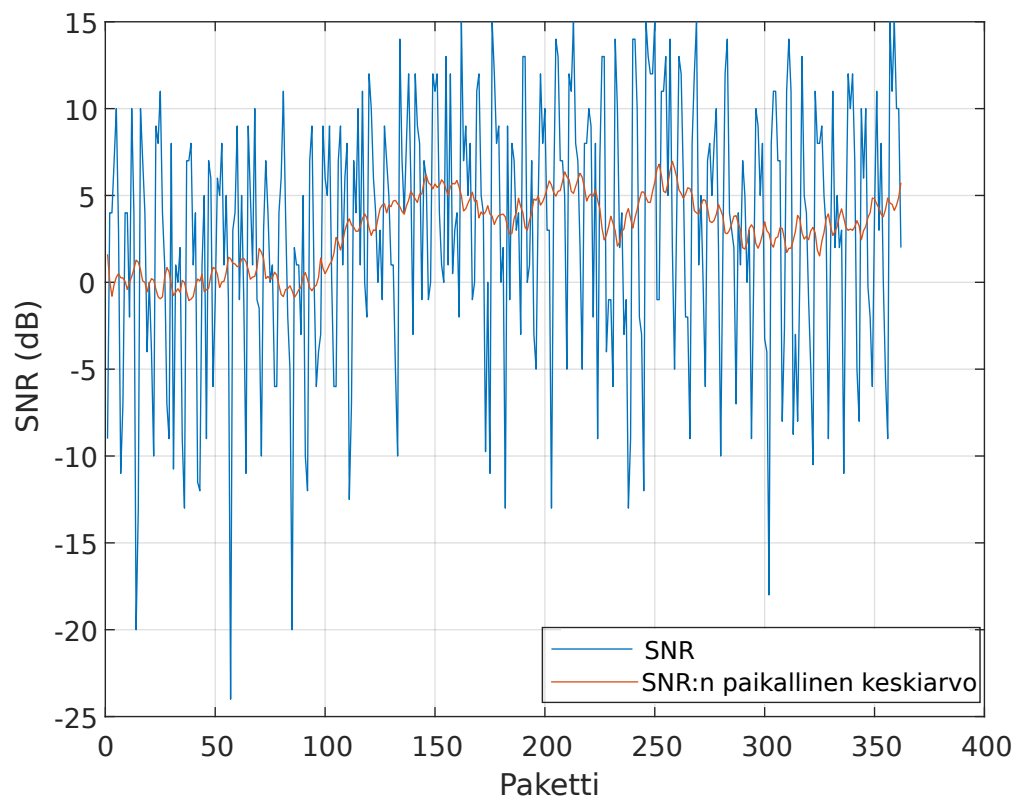
Kuva 4.2. Yhdyskäytävien laitteelta 1 vastaanottama lämpötiladata.

Hajautuskertoimen arvolla 12 paketit saatiin lähetettyä yhdyskäytävälle yli 20 kilometrin etäisyydeltä. Mittaustulosten perusteella voidaan tulkita suuremman hajautuskertoimen käyttämisen parantavan lähetysten kuuluvuutta. Kuvista 4.4 ja 4.3 voidaan huomata, kuinka yhdyskäytävien vastaanottamien lähetysten SNR-arvot vaihtelevat eri paketeilla. Hajautuskertoimen ollessa 12 arvot vaihtelevat välillä -25–15 dB, kun taas kertoimen 7 kohdalla arvot ovat välillä -10–15 dB. Ero selittyy ainakin osittain suurempien hajautuskertoimien paremmasta kohinan sietokyvystä [16].

Hajautuskertoimella 12 SNR:n arvo oli keskimäärin 13,4 dB ja hajautuskertoimella seitsemän 12,7 dB. Ero kuvaajiin piirrettyjen paikallisten keskiarvojen ja edellä mainittujen arvojen välillä johtuu laskutavasta. Paikallinen keskiarvo on laskettu suoraan logaritmisia arvoja käyttäen. Lineaarisia arvoja käytettäessä, ja datamäärän ollessa pieni, yksittäiset logaritmiset ääriarvot aiheuttavat keskiarvoon hyvin suuren poikkeaman, jolloin arvolle ei välttämättä kannata antaa niin suurta painoarvoa.



Kuva 4.3. Yhdyskäytävien mittaamat SNR-arvot ylälinkin paketeille SF:n arvolla 7.



Kuva 4.4. Yhdyskäytävien mittaamat SNR-arvot ylälinkin paketeille SF:n arvolla 12.

Edellisen kohdan lisäksi hajautuskertoimien välillä oli ero vastaanottavien yhdyskäytävien lukumäärissä. Pienemmän hajautuskertoimen kohdalla paketteja vastaanotti keskimäärin noin viisi yhdyskäytävää vähemmän kuin suuremman hajautuskertoimen tapauksessa. Laitteen 1 kohdalla paketteja vastaanotti keskimäärin neljä yhdyskäytävää ja laitteen 2 tapauksessa yhdeksän. Kolmas havaittu ero hajautuskertoimien välillä oli ilma-ajan pituus (engl. air time). Laitteen 1 kohdalla arvo oli keskimäärin 0.051 sekuntia ja laitteen 2 tapauksessa 1.3 sekuntia. Molemmissa tapauksissa hyötykuorman koko oli neljä tavua.

4.4 Pakettien katoaminen

Pakettien häviämisen mahdollisuus LoRaWANissa on yksi sen soveltuvuutta rajaavista tekijöistä. Esimerkiksi suurempien tiedostojen paloittelu ja lähettäminen useassa osassa olisi teknologialla hyvin haastavaa. Myös viiveherkkää (engl. delay-sensitive) sensoridataa vaativissa sovelluksissa aiheutuisi tästä ongelmia. LoRaWANissa toteutettu lähetysten kuittausmekanismi on yksi keino vähentää pakettien katoamista, mutta sekään ei poista ongelmaa täydellisesti.

Mahdollisia syitä pakettien katoamiselle on useita. Yksi mahdollinen vaihtoehto on useamman eri paketin saapuminen yhdyskäytävälle samanaikaisesti, kun käytettävät taajuudet ovat päällekkäiset. Tällöin sanomat menevät päällekkäin, jolloin yhdyskäytävä ei enää välttämättä saa selvää pakettien taajussisällöistä. Tätä tilannetta kutsutaan tietoliikennetekniikassa törmäykseksi (engl. collision).

Monesti verkkotekniikoissa on MAC-kerroksella toteutettuna ominaisuuksia, jotka ehkäisevät törmäyksiä ja niiden vaikutuksia. Ominaisuuksien toteuttaminen tekee kuitenkin monesti protokollista raskaita, mikä ei puolestaan ole suotuisaa resursseiltaan rajoituksille IoT-laitteille suunnatulle LoRaWANille. LoRaWANin kohdalla suurin vastuu onkin jaettu verkkopalvelimille, jotka esimerkiksi pyrkivät ohjaamaan laitteet käyttämään mahdollisimman laajasti eri kanavia. Tämän lisäksi verkkopalvelimet kykenevät säätelemään päätelaitteiden hajautuskertoimia ADR-mekanismien avulla [10]. Laitteiden hajautuskertoimien käytöllä onkin suuri vaikutus kanavien ruuhkautumiseen. Saatujen mittaustulosten mukaan hajautuskertoimen kasvattaminen voi pidentää ilma-ajan pituutta jopa 25-kertaiseksi. Ilma-ajan kasvaminen lisää huomattavasti törmäyksien todennäköisyyttä ja tällöin vähentää merkittävästi kanavan läpi vastaanotettujen pakettien lukumäärää päätelaitteiden lukumäärän kasvaessa. LoRaWANin suorituskykyä suuremmilla päätelaitteiden lukumäärillä on tutkittu artikkelissa [1], jossa skaalautuvuus on osoitettu yhdeksi LoRaWANin heikkoudeksi. Kyseiseen ongelmaan on esitelty ratkaisuna LoRaWANin MAC-kerroksen muokkaamista paremmin skaalautuvaksi.

Artikkelissa [15] on esitetty, kuinka LoRaWANissa voitaisiin hyödyntää aika-ajattua ALOHA-protokollaa. Protokollassa laitteiden lähetysajankohdat noudattavat annettua sykliä, mikä artikkelin mukaan kasvattaisi verkkotekniikan välityskykyä (engl. throughput) vähintään

kaksinkertaiseksi. Lisäksi aikaajattu ALOHA (engl. Slotted ALOHA) olisi artikkelin mukaan vielä riittävän yksinkertainen yltääkseen LoRaWANin virransäästövaatimuksiin.

Artikkelissa [21] on puolestaan tutkittu kuuntelu ennen lähetystä -mekanismin (engl. Carrier Sense Multiple Access, CSMA) hyödyntämistä LoRaWANissa simulaation avulla. CSMA:ssa laitteet varmistavat kuuntelulla kanavan vapauden ennen lähettämistä. Tällöin vältetään paremmin pakettien törmäämiseltä. Kyseistä mekaniikkaa hyödyntävien laitteiden ei ETSI:n (European Telecommunications Standards Institute) mukaan tarvitse noudattaa kanavan käyttörajoitteita. Artikkelissa tehtyjen simulaatioiden mukaan CSMA:n käyttö parantaisi LoRaWANin suorituskykyä jopa 7-kertaiseksi 10 000 päätelaitteen kohdalla. Näin suurilla laitemäärillä myös virrankulutus väheni nykyiseen LoRaWANiin verrattuna.

5. YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin LoRaWANin ominaisuuksia ja niiden vaikutusta verkkotekniikan suorituskykyyn eri sovelluksissa. Näitä ominaisuuksia kyettiin havainnollistamaan ja tuomaan esille työssä suoritettujen mittausten avulla. Näissä mittauksissa todensimme LoRan hajautuskertoimen kasvattamisen parantavan kuuluvuutta mutta samalla pidentävän sanomien ilma-aikaa. Tämän lisäksi mittaustulokset osoittivat pakettien katoamisen olevan mahdollista LoRaWANia käytettäessä. Korkeampien hajautuskertoimien käyttö ja uudelleen lähetykset olisivat yksi keino pakettihävikin lieventämiseksi, mutta tällöin rajoittavaksi tekijäksi nousisi taajuuskanavien ruuhkautuminen päätelaitteiden lukumäärän kasvaessa.

LoRaWAN toimii hyvänä esimerkkinä, kuinka verkkotekniikoita suunnitellessa on hyvin haastavaa saavuttaa useampaa ominaisuutta samanaikaisesti. LoRaWAN on onnistunut virrankulutuksen alentamisessa ja kuuluvuudessa erinoimaisesti. Kuitenkin verkkotekniikassa on samalla jouduttu karsimaan paljon muita ominaisuuksia. Suurimmat puutteet LoRaWANissa ovat datansiirtonopeus sekä yksinkertainen MAC-kerros.

LoRaWAN toimii kuitenkin hyvin sovelluksissa joihin se on alunperin tarkoitettu. Yhtenä esimerkkinä on datan keruu IoT-laitteilta - mitä myös havainnollistettiin työssä suoritetuilla mittauksilla. Vastaavanlaisissa käyttökohteissa LoRaWAN mahdollistaa asioita joihin vanhemmat verkkotekniikat eivät kyeneet. Näin verkkoteknologia on luonut paljon uusia mahdollisuuksia hyödyntää jatkuvasti kehittyvää laskentateknologiaa sekä siviili- että yrityskohteissa.

LÄHTEET

- [1] Ferran Adelantado et al. "Understanding the Limits of LoRaWAN". *Communications Magazine* 55.9 (2017), s. 36–38. DOI: 10.1109/mcom.2017.1600613.
- [2] Min Chen et al. "Narrow Band Internet of Things". *IEEE Access* 5 (2017), s. 20557–20577. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2751586.
- [3] D.Kjenda. "RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters" (2021), s. 21, 25–26.
- [4] Harald Friis. "A Note on a Simple Transmission Formula". *Proceedings of the IRE* 34 (1946), s. 254–256.
- [5] Iván Froiz-Míguez et al. "Design, implementation, and empirical validation of an IoT smart irrigation system for fog computing applications based on Lora and Lorawan sensor nodes" (2020), s. 1–33.
- [6] Jetmir Haxhibeqiri et al. "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application". *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, Vol.18 (11), p.3995 18 (2018), s. 5. DOI: 10.3390/s18113995.
- [7] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas". *IEEE Std 145-1993* (1993), s. 14. DOI: 10.1109/IEEESTD.1993.119664.
- [8] Liando Jansen et al. "Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large-scale Measurement Study". *ACM transactions on sensor networks* (2019), s. 6–40.
- [9] *LoRaWAN*. <https://www.aalto.fi/fi/palvelut/lorawan>. Viitattu 12.4.2023.
- [10] "LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification (TS001-1.0.4)" (2020).
- [11] *LoRaWAN® Networks: Your LPWAN Network Your Way*. <https://lora-alliance.org/private-networks/>. Viitattu 24.3.
- [12] Juha Petajajarvi et al. "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology". Teoksessa: *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. 2015, s. 55–59. DOI: 10.1109/ITST.2015.7377400.
- [13] W. W. Peterson ja D. T. Brown. "Cyclic Codes for Error Detection". *Proceedings of the IRE* 49.1 (1961), s. 228–235. DOI: 10.1109/JRPROC.1961.287814.
- [14] C. Pham ja M. Ehsan. "Dense Deployment of LoRa Networks: Expectations and Limits of Channel Activity Detection and Capture Effect for Radio Channel Access" (2021), s. 3. DOI: 10.3390/s21030825.
- [15] Tommaso Polonelli et al. "Slotted ALOHA on LoRaWAN - Design, Analysis, and Deployment". *arXiv.org* (2019).

- [16] Brecht Reynders ja Sofie Pollin. "Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication". Teoksessa: *Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*. 2016, s. 1–5. DOI: 10.1109/SCVT.2016.7797659.
- [17] A.S. Saakian. *Radio wave propagation fundamentals*. 2011, s. 323.
- [18] Pradeeka Seneviratne. *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks*. Berkeley, CA : Apress : Imprint: Apress, 2019.
- [19] Miljan Sikimić et al. "An Overview of Wireless Technologies for IoT Network". Teoksessa: *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. 2020, s. 1–6. DOI: 10.1109/INFOTEH48170.2020.9066337.
- [20] Ali Sodhro et al. "Energy efficiency comparison between data rate control and transmission power control algorithms for wireless body sensor networks". *International Journal of Distributed Sensor Networks* 14 (2018), s. 8–10. DOI: 10.1177/1550147717750030.
- [21] Thanh-Hai To ja Andrzej Duda. "Simulation of LoRa in NS-3: Improving LoRa Performance with CSMA". Teoksessa: *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2018, s. 1–7. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422800.
- [22] International Telecommunication Union. "World distribution and characteristics of atmospheric radio noise" (1964), s. 6–16.