



LoRa-kommunikaatiojärjestelmän kehitys

Santeri Vahos

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Älykkäät koneet

VAHOS, SANTERI:
LoRa-kommunikaatiojärjestelmän kehitys

Opinnäytetyö 55 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Toukokuu 2019

Opinnäytetyönä luotiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmälle kommunikaatiojärjestelmä LoRa-modulaatiotekniikkaa hyödyntäen. Järjestelmän pääasiallisia toimintaympäristöjä ovat eri tyyppiset rakennukset sekä niiden lähialueet. Kommunikaation piti olla salattua laitteiden välillä ja virhetilanteen sattua piti järjestelmän pystyä jatkamaan toimintaansa. Nämä määritykset otettiin huomioon järjestelmää suunnitellessa ja rakentaessa.

Opinnäytetyössä käytiin läpi LoRa-modulaatiotekniikan perustoimintaperiaatteita sekä muita järjestelmän luomista varten tarvittavia tekniikoita ja käsitteitä. Toimintaperiaatteiden käsittelyn perusteella pyrittiin luomaan raja-arvoja luotettavalle ja lain mukaiselle toiminnalle. Toiminnallisuuksien mahdollistamiseksi kehitettiin käyttötarkoitusta varten rakennetut pakettiformaatit, jotka toimivat koko kommunikaatiojärjestelmän perustana.

Testauksessa todennettiin luodun järjestelmän toiminta sellaisessa toimintaympäristössä, joka vastaa määriteltyä toimintaympäristöä. Testit jaettiin kahteen osaan. Ensimmäisessä testissä pyrittiin määrittämään raja-arvoja kommunikaation eri arvoille luotettavalle toiminnalle käyttöönottoa varten ja varmistamaan järjestelmän signaalien kuuluvuus rakennuksissa. Toisessa testissä pyrittiin testaamaan järjestelmän luotettavuutta testaamalla sitä käyttötarkoituksen mukaisessa ympäristössä.

Testitulosten perusteella järjestelmän toiminnan luotettavuudessa ja suorituskyvyssä havaittiin pieniä puutteita. Nämä puutteet eivät kuitenkaan estä järjestelmää toimimasta rakennuksissa ja niiden ympäristössä. Seuraavat askeleet järjestelmän kehityksessä ovat luotettavuuden ja suorituskyvyn parantaminen sekä akkutoimisuuden kehittäminen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Intelligent Machines

VAHOS SANTERI:
Development of a LoRa-communication system

Bachelor's thesis 55 pages, appendices 8 pages
Toukokuu 2019

The purpose of this thesis was to create a wireless communication system based on a modulation technology called LoRa for the building physics research group of Tampere University. Operating environments where the communication system was specified to operate consisted of different kinds of buildings and their immediate surroundings. Communication between devices within the system needed to be encrypted. In case of fault condition, the system needed to be able to continue operating. System was designed and built with these requirements in mind.

Working principles of LoRa-communication technology, necessary to build specified system were explored and applied in this thesis. Understanding of these principles was needed in configuring system settings. Custom packet formats were created and these were the basis of the whole wireless communication system.

System testing was divided into two parts. First part consisted of creating multiple different conditions to determine thresholds for reliable communication. This test was also used to validate signal reception in buildings. Second part included test in a real-world environment to test all the functions built into the system.

Tests showed that threshold there were some minor reliability and performance issues. The system built in this thesis was still able to operate in buildings and their surroundings despite the minor issues. Next steps in the development the system is to increase reliability and performance of the system and enabling battery powered operation.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	LANGATON KOMMUNIKAATIO.....	8
	2.1 Langattoman kommunikaation historiaa.....	8
	2.2 Low Power Wide Area Network.....	9
	2.3 Linkkibudjetti	11
	2.4 Symboli	12
	2.5 AES-salaus	12
3	LORA.....	14
	3.1 Yleistä	14
	3.2 LoRa:n fyysinen kerros	14
	3.2.1 Hajaspektrimodulaatio	14
	3.2.2 LoRa-modulaatio	15
	3.2.3 LoRa-kehys	17
	3.3 LoRaWAN	20
	3.3.1 Yleistä.....	20
	3.3.2 Päätelaitteet	22
4	TOTEUTUS	24
	4.1 Laitteisto.....	24
	4.1.1 Gateway-laite.....	24
	4.1.2 Päätelaitteet	26
	4.2 Toiminnot	27
	4.2.1 Toiminnalliset vaatimukset	27
	4.2.2 Päätelaitteen toiminta	28
	4.2.3 Gateway-laitteen toiminta	30
	4.2.4 Laitteiden konfigurointi.....	31
	4.2.5 Konfiguroinnin raja-arvot	33
5	TESTAUS	35
	5.1 Kuuluvuustestit.....	35
	5.1.1 Kuuluvuustestit TAMKin pääkampuksella.....	36
	5.1.2 Kuuluvuusrajat.....	37
	5.2 Järjestelmän testaus	38
	5.3 Tulosten analysointi	40
	5.3.1 Kuuluvuustestien analysointi	40

5.3.2 Järjestelmätestauksen analysointi	41
6 POHDINTA	43
LÄHTEET	45
LIITTEET	49
Liite 1. Päätelaitteen aloitussekvenssi	49
Liite 2. Päätelaitteen toimintasekvenssi	50
Liite 3. Gateway-laitteen aloitussekvenssi	51
Liite 4. Gateway-laitteen toimintasekvenssi	52
Liite 5. Gateway-laitteen virhesekvenssi	53
Liite 6. TAMK-pääkampuksen mittauspöytäkirja, SF-7	54
Liite 7. TAMK-pääkampuksen mittauspöytäkirja, SF-12	55
Liite 8. Osa järjestelmätestauksen lokitiedostosta	56

LYHENTEET JA TERMIT

CRC	Cyclic Redundancy Check, syklinen redundanssitarkistus datapaketin eheyden tarkistukseen
FSK	Frequency Shift Keying, taajuusavainnus
IoT	Internet of Things, esineiden internet
LAN	Local Area Network, lähiverkko
MAC-osoite	Media Access Control -osoite, laitekohtainen tunnistukseen käytetty yksilöintikoodi
MAN	Metropolitan Area Network, kaupunkiverkko
M2M	Machine to Machine, laitteesta toiseen laitteeseen tapahtuva kommunikointi
RSSI	Received Signal Strength Indicator, vastaanotetun signaalin voimakkuus
SNR	Signal to Noise Ratio, vastaanotetun signaalin suhde taustakohinaan
SoC	System on a Chip, järjestelmäpiiri, joka yhdistää monien eri piirien toiminnot
SPI	Serial Peripheral Interface, synkroninen sarjakommunikointirajapinta

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä LoRa-kommunikointitekniikkaan ja luoda sen perusteella kommunikaatiojärjestelmä erilaisissa rakennuksissa käytettävään järjestelmään. Opinnäytetyö toteutettiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmälle, jolla oli tarve järjestelmälle, joka pystyy langattomasti kommunikoimaan haastavissakin olosuhteissa rakennusten sisällä ja niiden lähiympäristössä. Työssä toteutettu järjestelmä on osa isompaa järjestelmää, mutta sitä tai sen toimintaa ei kuitenkaan olla käsitelty opinnäytetyössä salassapitovelvollisuuden takia.

Opinnäytetyö käsittelee LoRa-modulaatiotekniikkaa, sen toimintaperiaatteita sekä siihen liittyviä käsitteitä, joita vaadittiin työn toteuttamiseen. Näiden tietojen pohjalta rakennettiin yksinkertainen kommunikaatiojärjestelmä, jonka toimivuutta testattiin ja jonka toiminnalle pyrittiin määrittämään raja-arvoja, joiden sisällä toiminta on luotettavaa. Järjestelmän toimivuutta pyrittiin myös testaamaan vastavassa käyttöympäristössä, jossa sitä tullaan myös käyttämään. Mahdollinen jatkokehitys pyrittiin pitämään mielessä järjestelmää kehitettäessä. Näitä mahdollisuuksia on pohdittu ja niistä kerrotaan luvussa 6.

2 LANGATON KOMMUNIKAATIO

2.1 Langattoman kommunikaation historiaa

Langattoman kommunikaation historia alkoi vuonna, 1896 kun Italialainen Guglielmo Marconi patentoi ensimmäisen langattomasti toimivan lennättimen, jolla lähetettiin signaaleja lähes kolmen kilometrin päähän. Muita merkittäviä merkki-paaluja langattomassa kommunikoinnissa olivat muun muassa vuonna 1927 käyttöön otettu kaupallinen radiopuhelinlinkki USA:n ja Ison-Britannian välillä, vuonna 1962 käyttöön otettu ensimmäinen telekommunikaatiosatelliitti Telstar ja ensimmäinen mobiiliverkkojärjestelmä AMPS (Advanced Mobile Phone System) vuonna 1977. (Dubendorf 2003, 24–25)

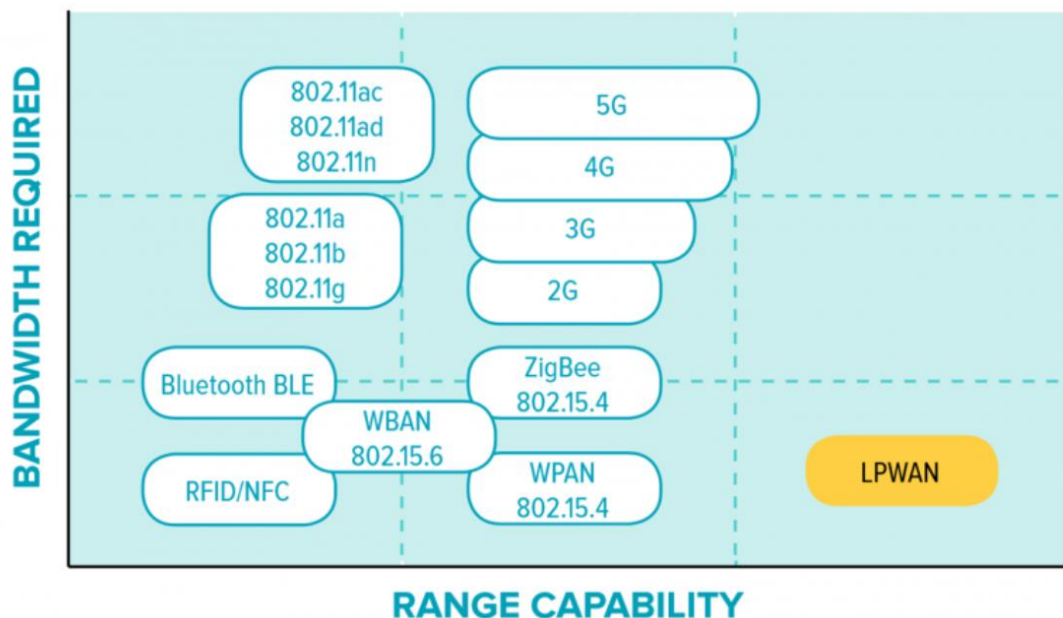
Vuonna 1968 kehitetty pakettikytkentämenetelmä mullisti kommunikointijärjestelmät. Robertsinkin mukaan datakommunikaatio ennen pakettikytkentämenetelmää ”haaskasi” yleensä yli 90 prosenttia kaikesta käytössä olevasta kaistasta, kun taas, pakettikytkentämenetelmä toi mukanaan dynaamisen kaistan määrittämisen, joka varasi kaistaa vain silloin kuin sille oli tarvetta. Käytännössä kaikki kommunikaatiojärjestelmät käyttivät pakettikytkentää jo vuonna 1978. (Roberts 1978) Suurin tätä menetelmää käyttävä verkko onkin internet (Internet Hall of Fame 2019).

Nykypäivänä langattomat tiedonsiirtotekniikat ovat suuri osa ihmisten jokapäiväistä elämää, sillä niihin liittyvät teknologiat ja palvelut tuottivat vuonna 2017 4,5 prosenttia koko maailman bruttokansantuotteesta ja tämän on odotettu kasvavan viiteen prosenttiin vuoteen 2022 mennessä. M2M-yhteyksiä oli maailmassa vuonna 2018 noin 1,5 miljardia ja tämän luvun on ennustettu kasvavan 3,3 miljardiin vuonna 2021. (5G Americas 2018)

2.2 Low Power Wide Area Network

Wide Area Network -termillä tarkoitetaan maantieteellisiä alueita kattavaa kommunikaatioita ja siitä käytetään yleensä lyhennettä WAN. Itse WAN-termi ei edellytä minkäänlaista tiettyä kommunikaatiota, vaan se voi toimia esimerkiksi puhe- ja valokuituja pitkin tai langattomasti radiotaajuuksia hyödyntäen. Erilaisien pienempien verkkojen, kuten LAN- ja MAN-verkkojen yhdistäminen toisiinsa on WAN-verkkojen pääasiallinen tehtävä. Esimerkkinä maailman suurimmasta WAN-verkosta onkin internet, koska se yhdistää useita eri verkkoja toisiinsa ympäri maailmaa. (Network Protocols Handbook 2005, 149)

LPWAN (joskus myös LPWA) eli pienitehoinen lähiverkko, on puolestaan suosioita kasvattava IoT-teknologia, joka tarjoaa langatonta kommunikointia laitteiden välillä laajalla alueella. LPWAN-teknologioilla kommunikoivien laitteiden osuus kaikesta M2M-kommunikaatiosta oli vuonna 2017 1,5 prosenttia, mutta tämän on ennustettu kasvavan 14 prosenttiin vuonna 2022. Kuviossa 1 voidaan nähdä LPWAN-teknologia kantaman ja tiedonsiirron nopeus verrattuna muihin langattomiin tiedonsiirtoteknologioihin. (Cisco 2019)



KUVIO 1. LPWAN verrattuna muihin teknologioihin (Medium 2017)

Mobiiliverkko- ja langattomista lähiverkkoteknologioista poiketen on LPWAN-teknologioiden tarkoitus tarjota pitkän kantaman langatonta kommunikointia, mutta

kuitenkin pienellä virran kulutuksella sekä matalilla valmistus- ja käyttöönottokustannuksilla (Dali, Rahman & Saifullah 2018). LPWAN-teknologiat toimivat yleensä paljon suuremmalla linkkibudjetilla (katso luku 2.3) kuin perinteiset langattomat teknologiat ja voivat näin ollen kattaa huomattavasti suuremmat alueet. Esimerkkinä -130 dBm herkkyys pystyvät LPWAN-teknologiat voivat havaita signaaleja, jotka ovat 10 000 kertaa heikompia kuin perinteisillä -90 dBm herkkyydellä toimivat teknologiat (LinkLabs 2019). Suuren tarpeen takia LPWAN:ille onkin ilmestynyt useita eri kilpailevia teknologioita ja nämä voidaan Ismailin, Rahmanin ja Saifullahin mukaan jakaa kahteen eri luokkaan: infrastruktuurilliset teknologiat ja infrastruktuurittomat teknologiat (Dali, Rahman & Saifullah 2018).

Infrastruktuurilliset LPWAN-teknologiat vaativat olemassa olevaa verkkoa päätelaitteen toiminta-alueella, koska ne muistuttavat toiminnaltaan mobiiliverkkoja ja osa myös pohjautuu suoraan niihin. Esimerkiksi EC-GSM-IoT perustuu jo olemassa oleviin GSM-teknologioihin, on niiden kanssa taaksepäin yhteensopiva ja lisää kuuluvuutta GPRS-verkkoon verrattuna jopa 20 dB (Ericsson 2018). Muita olemassa olevia tai tulevia infrastruktuurillisia LPWAN-teknologioita ovat NB-IoT, LTE Cat M1 ja 5G. Nämä teknologiat toimivat lisensoituilla taajuuskaistoilla. (Dali, Rahman & Saifullah 2018)

Infrastruktuurittomat teknologiat eivät välttämättä vaadi teleoperaattorien luomaa verkkoa laitteiden toiminta-alueella. Ismail, Rahman ja Saifullah ovat listanneet infrastruktuurittomiksi LPWAN-teknologioiksi seuraavat: LoRa, SigFox, IQRF, RPMA, Telensa, DASH7, Weightless-N, Weightless-P ja SNOW (Dali, Rahman & Saifullah 2018). Näistä RPMA toimii lisensoimattomalla 2.4 GHz taajuuskaistalla (Ingenu, 2019). SNOW toimii 572-578 MHz taajuusalueella ja kaikki muut toimivat alle yhden GHz:in lisensoimattomalla taajuusalueella (Dali, Rahman & Saifullah 2018).

Useimmat LPWAN-teknologiat käyttävät tähtitopologiaa, mutta esimerkiksi IQRF voidaan konfiguroida toimiaan myös mesh-verkkona (Dali, Rahman & Saifullah 2018). Tähtitopologia mahdollistaa pienemmän virrankulutuksen, sekä lisää verkon luotettavuutta verrattuna mesh-verkkotopologiaan. Pienempi virrankulutus tähtitopologiassa on mahdollista, koska jokaisen päätelaitteen pitää huolehtia vain oman datansa siirrosta. Suhteellisen nopea tiedonsiirto on edellytyksenä

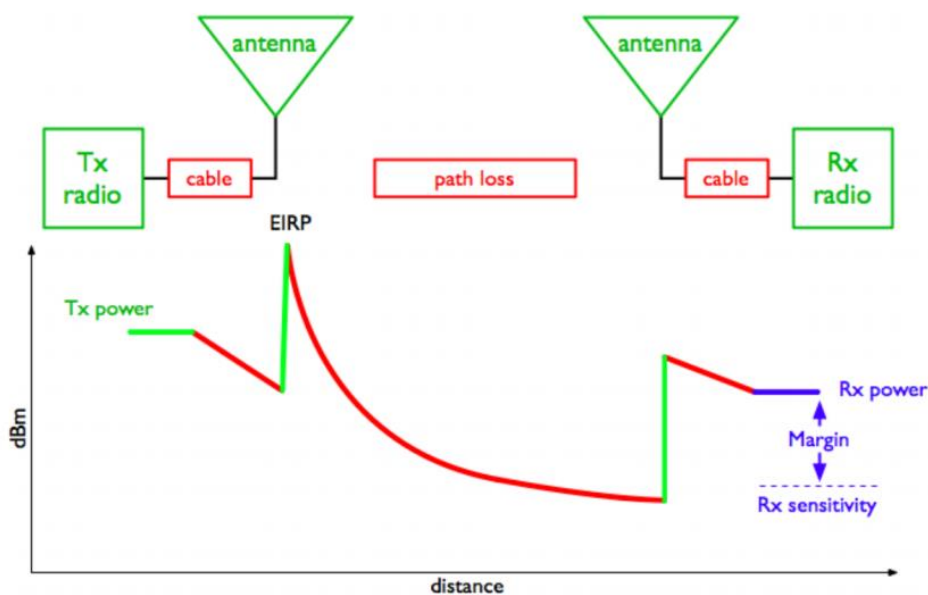
mesh-verkkoa käytettäessä, koska päätelaitteiden pitää välittää muiden päätelaitteiden dataa eteenpäin. Näin ollen signaalien kuuluvuus on usein heikompaa kuin tähtitopologiassa. Tähtitopologian etuna on myös se, että verkon kaikki monimutkaisuus voidaan keskittää yhteen gateway-laitteeseen (LinkLabs 2016).

2.3 Linkkibudjetti

Langattomassa tiedonsiirtotekniikassa linkkibudjetti tarkoittaa on lukua, joka ottaa huomioon kaikki tehohäviöt ja -vahvistukset lähettimen ja vastaanottimen välillä. Sen yksikkö on desibeliä verrattuna milliwattiin (dBm) (ISA 2019). Linkkibudjetin suuruuteen vaikuttavat asiat ovat lähettimen lähetysteho, lähettimen antennin vahvistus, vastaanottimen antennin vahvistus, välimatka sekä rakenteet vastaanottimen ja lähettimen välillä. Kaavalla 1 voidaan laskea yksinkertaistetusti vastaanotettu teho $P_{vastaanotettu}$ (Electronic Notes 2019).

$$P_{vastaanotettu} = P_{lähetys} + G_{vahvistukset} - L_{häviöt} \quad (1)$$

Kuviossa 2 on havainnollistettu signaalin tehon muutokset eri osissa langatonta kommunikaatiolinkkiä. Vihreällä merkatut osat ovat kuviossa 2 antennivahvistuksia ja punaisella merkatut taas kommunikaatiossa syntyviä erilaisia häviöitä. Sininen katkoviiva kuvaa heikointa signaalia, jonka vastaanottava radio pystyy havaitsemaan. Yhtenäinen sininen viiva kuvaa puolestaan vastaanotetun signaalin voimakkuutta.



KUVIO 2. Esimerkkikuva linkkibudjetista (Osmocom 2019)

2.4 Symboli

Langattomasta tiedonsiirrosta puhuttaessa käytetään usein termiä symbolitaajuus (engl. symbol rate) ilmaisemaan tiedonsiirron nopeutta. Symbolitaajuudesta käytetään myös nimitystä baudinopeus (engl. baud rate). Yksi symboli on radiotaajuusmodulaation tila, joka voi sisältää joko yhden tai useamman bitin dataa. Sitä ei pidä sekoittaa bittitaajuuteen, sillä symbolitaajuus on aina pienempi kuin bittitaajuus, kunhan yksi symboli sisältää enemmän kuin yhden bitin dataa. (Rennselaer Polytechnic Institute 2019)

2.5 AES-salaus

Kryptologia on jonkin selkokiehisen datan muuttamista joksikin muuksi sekaiseksi dataksi, josta alkuperäinen data ei selviä, mutta data voidaan kuitenkin muuttaa takaisin luettavaksi tunnetulla salausavaimella. Kumarin mukaan kryptologialla voidaan saavuttaa useita tavoitteita, jotka ovat luottamuksellisuus, käyttöoikeuksien tarkistaminen, datan eheys, tapahtuman kiistämättömyys ja pääsyn hallinta. Tapahtumaa, jossa data muutetaan salaiseksi, kutsutaan kryptaukseksi ja taas tapahtumaa, jossa data muutetaan takaisin selkokielelle kutsutaan dekryptaukseksi (Kumari 2017).

AES (Advanced Encryption Standard) on vuonna 2000 julkaistu symmetrinen lohkosalausmenetelmä, joka julkaistiin korvaamaan vanha Data Encryption Standardin (DES). Symmetrisyys salauksessa tarkoittaa sitä, että data voidaan kryptata ja dekryptata samalla salausavaimella, kun taas epäsymmetrisessä salauksessa on käytössä erilliset avaimet datan kryptaukseen ja dekryptaukseen. Symmetrinen salaus on myös nopeampaa ja tehokkaampaa kuin epäsymmetrinen salaus. AES:in toiminta perustuu siihen, että se kryptaa datan aina 16 tavun mittainen lohko kerrallaan. Salausavain voi olla kooltaan 128, 192 tai 256-bittiä ja sen koosta tulee usein AES-kryptauksen perässä oleva numeroliite, esimerkiksi AES-128. (Abdullah 2017)

ECB (Electronic Codebook) on yksinkertaisin AES-kryptauksen menetelmä, mutta sen ongelma on, että sama data tuottaa kryptauksessa aina saman tuloksen. CBC (Cipher Block Chaining) on puolestaan edistyneempi AES-kryptausmenetelmä, sillä jokaisen kryptatun lohkon data riippuu kaikkien edellisten lohkojen salauksen tuloksesta, mutta se tarvitsee salausavaimen lisäksi myös alustusvektorin, jonka avulla ensimmäinen lohko pystytään kryptaamaan tai dekryptaamaan. (Thijssen 2019)

3 LORA

3.1 Yleistä

LoRa (Long Range) on Semtech Corporationin kehittämä pienitehoinen modulaatiojärjestelmä LPWAN-laitteiden väliseen kommunikointiin. Se onkin tarkoitettu käytettäväksi sellaisissa käyttökohteissa, joissa pitkä akun kesto ja pieni virrankulutus ovat tärkeämpiä kuin reaaliaikainen tiedonsiirto. Kommunikaation fyysinen kerros on Semtech Corporationin omistama, eikä sen kaikista osista siitä näin ollen ole julkisesti saatavilla tarkkaa dokumentaatiota. (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 4).

LoRa:n fyysistä kerrosta ei pidä sekoittaa LoRaWAN:iin, joka on LoRa:n päälle rakennettu MAC-kerroksen protokolla, joka tarjoaa helpomman liittymän LoRa-päätelaitteisiin, vaikkakin LoRa-termiä käytettäessä voidaan tarkoittaa joko LoRa:n fyysistä kerrosta tai LoRaWAN-verkkoa. (LoRa-Alliance 2019)

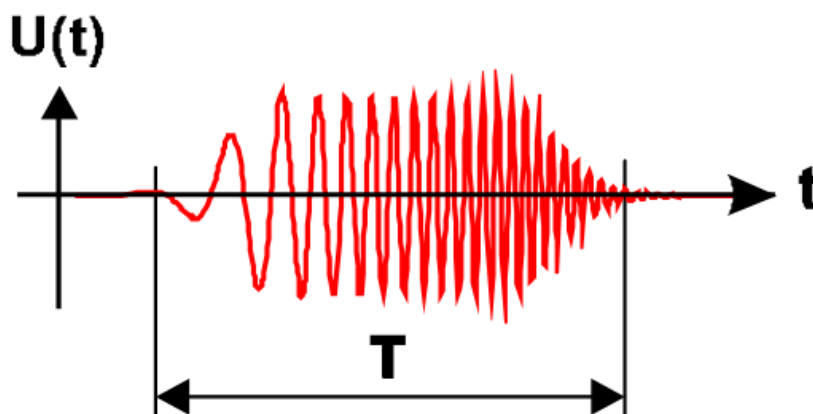
3.2 LoRa:n fyysinen kerros

3.2.1 Hajaspektrimodulaatio

Hajaspektrimodulaatio (CSS) kehitettiin erilaisiin tutkatarkoituksiin 1940-luvulla. Canon Inc. patentoi 1990-luvulla hajaspektrimodulaatiotekniikkaa hyödyntävän valokuitukommunikointijärjestelmän (Nanotron, 2019). Hajaspektrimodulaatio on ollut myös käytössä erilaisissa sotilaallisissa sovelluksissa sen häiriönsiedon takia. Se vastustaa hyvin seuraavia häiriöitä: Doppler-efektiä, monitie-etenemistä, vaimenemista ja kapea- sekä laajakaistaista häiriöitä (Semtech 2018).

Hajaspektrimodulaatiossa informaatio on enkoodattu lineaarisesti ajan mittaan muuttuvaan taajuuteen. Yhtä lineaarista taajuuden muutosta tietyllä aikavälillä kutsutaan chirpiksi. Nousevaa taajuutta kutsutaan up-chirpiksi ja taas laskevaa kutsutaan down-chirpiksi. Kuviossa 3 on kuvattu hajaspektrimodulaation up-

chirp. LoRa-modulaatio on eräänlainen hajaspektrimodulaatiotekniikka. (Pollin & Reynders 2016)



KUVIO 3. Up-chirp hajaspektrimodulaatiossa (IEEE 2003)

3.2.2 LoRa-modulaatio

LoRa on vikasietoinen taajuuden eroille lähettimen ja vastaanottimen välillä juurinkin chirppien lineaarisuuden takia, koska taajuuserot voidaan helposti poistaa vastaanottimen päässä. Taajuuserot voivat olla jopa 25% käytettävästä kaistanleveydestä ennen kuin ne alkavat haitata vastaanottimen dekodaausta. Suuri vikasietoisuus taajuuseroille laitteiden välillä tekee myös radiolaitteiden valmistamisesta halvempaa, koska kideoskillaattorien ei pidä toimia suurella tarkkuudella, vaan hieman epätarkempi toiminta riittää luotettavaan kommunikointiin. (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5)

LoRa-radiopiirit pystyvät myös dekodamaan dataa, vaikka vastaanotettu signaalin voimakkuus olisi pienempi kuin taustakohinan voimakkuus eli radiopiirit pystyvät toimimaan negatiivisella SNR-arvolla (Semtech 2015, 12).

Fyysisellä tasolla datanopeus LoRa-kommunikoinnissa riippuu käytettävästä SF-arvosta (spreading factor), modulaation kaistanleveydestä BW (bandwidth) ja virheenkorjauskertoimesta CR (coding rate). Kasvattamalla SF-arvoa voivat laitteet kommunikoida suuremmalla linkkibudjetilla, ja näin ollen saavuttaa paremman kantaman. Kääntöpuolena SF-arvon kasvattamisessa on kuitenkin se, että da-

tansiirtonopeus hidastuu. Lukuarvot, jotka SF-arvo voi saada, ovat kaikki kokonaisluvut välillä 6-12. SF-arvo kertoo myös suoraan, kuinka monta bittiä dataa on enkoodattu yhteen symboliin. SF-arvo kertoo myös kommunikaatiossa käytettävien lastujen (englanniksi chip) määrän per datasymboli, joita ei pidä sekoittaa lineaarisiin taajuuden muutoksiin eli chirppeihin. SF-arvo 6 poikkeaa muista arvoista sillä tavalla, että sitä käytettäessä paketissa ei ole otsikkoa ja kommunikaatiolinkin molempiin päihin pitää konfiguroida paketin pituus ja CR-arvo (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5).

Kaistanleveys on taajuusalue, jolla LoRa-chirpit toimivat ja nämä ovat laitteesta riippuvaisia. Esimerkiksi SX1272-radiopiirillä on kolme kaistanleveysasetusta: 500 kHz, 250 kHz ja 125 kHz (LinkLabs 2019). SX1276-radiopiiri taas pystyy puolestaan toimimaan 7,8 - 500 kHz kaistanleveydellä (SX1276/7/8/9-datalehti 2019, 9). Semtechin mukaan yksi lastu lähetetään per kaistanleveyden hertsi eli lastujen taajuus R_c on sama kuin taajuuskaistan leveys kuten voidaan nähdä kaavasta 2. (LoRa Modulation Basics 2015, 12)

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

Symboliaika T_s kertoo, kuinka pitkä aika yhden symbolin lähettämiseen kuluu. Se voidaan laskea SF-arvon ja kaistanleveyden avulla kaavalla 3. Symboliajan yksikkö on sekunti.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3)$$

Symbolitaajuus R_s on tällöin symboliajan käänteisarvo, kuten voidaan nähdä kaavasta 4, ja sen yksikkö on symbolia per sekunti.

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4)$$

Virheenkorjauskertoimen kasvattaminen lisää kommunikaation luotettavuutta, mutta myös vaatii enemmän aikaa saman paketin lähettämiseen kuin pienemmällä virheenkorjauskertoimella. Arvot, jotka virheenkorjauskerroin CR voi

saada, ovat kokonaisluvut 1, 2, 3 tai 4. Virheenkorjauskerroin voidaan myös ilmoittaa todellisena virheenkorjauskertoimella ja tällöin se voi saada arvot: 4/5, 4/6, 4/7 tai 4/8, jotka kertovat suoraan informaatiota sisältävän datan osuuden koko datapaketista. Todellinen virhekorjauskerroin RC voidaan laskea virheenkorjauskertoimesta kaavalla 5.

$$RC = \frac{4}{4 + CR} \quad (5)$$

Modulaation bittinopeus R_b voidaan laskea Semtechin mukaan kaavalla 6.

$$R_b = SF * \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (6)$$

Koko modulaation nimellinen bittinopeus virheenkorjauskerroin mukaan lukien voidaan laskea kaavalla 7.

$$R_b = SF * \frac{\frac{4}{4 + CR}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (7)$$

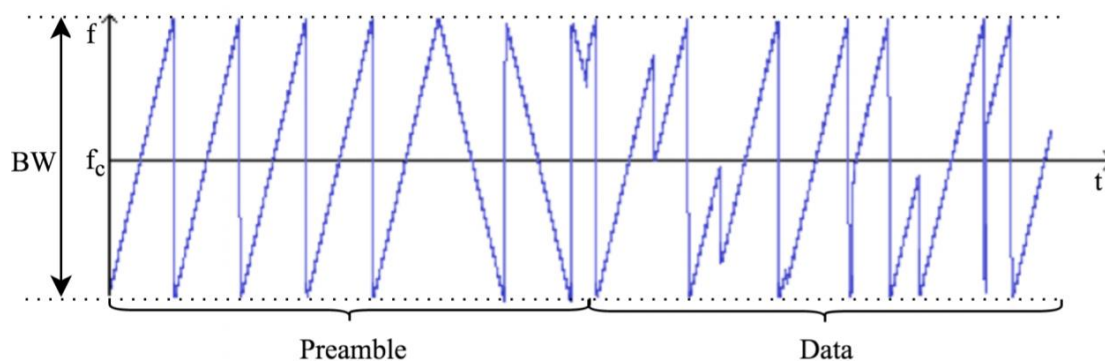
Käytetään esimerkkinä yleisesti käytettyä 125 kHz taajuuskaistaa, SF-arvoa 8 ja CR-arvoa 1 saadaan tällöin nimelliseksi tiedonsiirtonopeudeksi (The Things Network 2019)

$$R_b = 8 * \frac{\frac{4}{4 + 1}}{\frac{2^8}{125\,000}} \approx 3120 \text{ bps}$$

3.2.3 LoRa-kehys

Vaikka itse LoRa-modulaatio ei edellytä mitään tietynlaista kehysformaattia, käyttävät Semtech Corporationin valmistamat radiopiirit kuitenkin tiettyä formaattia,

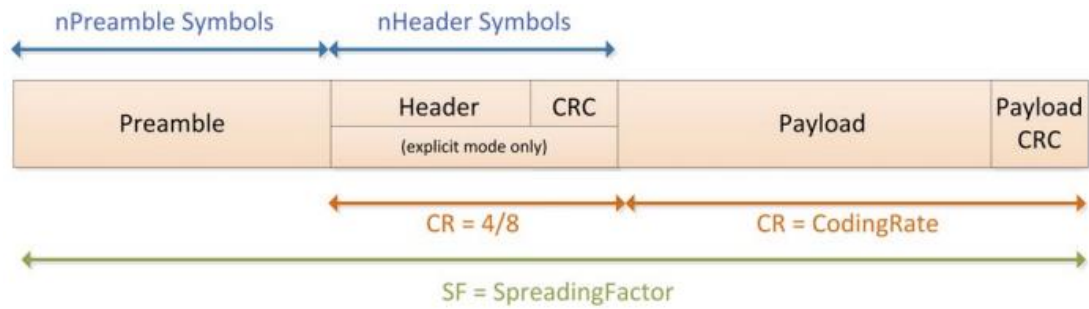
joka voidaan nähdä kuviosta 4. Jokainen kehys aloitetaan aina alustusosalla (englanniksi preamble), joka sisältää tietyn määrän up-chirppejä, joista kahteen viimeiseen on enkoodattu yhden tavun mittainen LoRa-verkon synkronointisana (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5). Aloitusosa voi vaihdella 6 ja 65535 symbolin välillä (Semtech, 2016). Synkronointisanan avulla voidaan erottaa verkot, jotka käyttävät samaa taajuutta, kaistanleveyttä sekä SF-arvoa toisistaan. Laite ei kuuntele vastaanotettua viestiä loppuun, jos viestin synkronointisana ei täsmää laitteeseen konfiguroitua synkronointisanaa. Kuviosta 4 voidaan nähdä, miten alustusosa poikkeaa dataa sisältävästä osasta (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5).



KUVIO 4. LoRa-paketin alustusosa (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5)

Kehyksen otsikko (engl. header) on valinnainen, mutta sen ollessa käytössä käytetään silloin aina todellisena virheenkorjauskertoimena arvoa 4/8 ja se sisältää myös oman CRC-tarkistuksen otsikon omalle datalle (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5). Otsikko sisältää seuraavat tiedot: virheenkorjauskerroin lopulle kehykselle, höytykuorman koko ja tieto siitä, onko höytykuormalle CRC-tarkistus viestin lopussa. (Techplayon 2019)

Höytykuorma (engl. payload) pituus voi olla minimissään 1 ja maksimissaan 255 tavua, koska höytykuorman koko ilmoitetaan otsikossa vain yhdessä tavussa (Augustin, Clausen, Townsley & Yi 2016, 5). Kehyksen lopussa sijaitsee valinnainen höytykuorman 16-bittinen CRC-tarkistus. (Semtech 2016)



KUVIO 5. LoRa-kehiksen formaatti (Semtech 2016)

Alustusosan lähettämiseen tarvittavien symbolien määrä voidaan laskea kaavalla 8. Laitteeseen konfiguroitujen alustussymbolien määrään kertoo luku n_{konf} . (SX1276/7/8/9-datalehti, 31)

$$n_{\text{alustus}} = (n_{\text{konf}} + 4,25) \quad (8)$$

Hyötykuorman lähettämiseen tarvittavien symbolien $n_{\text{hyötykuorma}}$ määrä voidaan Semtechin mukaan laskea kaavalla 9.

$$n_{\text{hyötykuorma}} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left[\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4SF} \right] (CR + 4), 0 \right) \quad (9)$$

Kaavassa 8 PL kertoo hyötykuorman koon tavuissa, SF kertoo käytettävästä SF-arvosta, IH kertoo käytössä olevan otsikkotilan ja se voi saada arvot 0 tai 1, CRC kertoo virhetarkistuksen käytöstä ja se voi myös saada vain arvot 0 tai 1 ja CR kertoo virhekorjauskertoimen arvon.

Hyötykuorman lähettämiseen kulunut aika voidaan laskea kaavalla 10.

$$T_{\text{hyötykuorma}} = n_{\text{hyötykuorma}} * T_s \quad (10)$$

Koko LoRa-paketin lähettämiseen kulunut aika voidaan laskea kaavalla 11.

$$T_{\text{paketti}} = T_{\text{alustus}} + T_{\text{hyötykuorma}} \quad (11)$$

Lasketaan tarvittava symbolien määrä 16 tavun mittaiselle hyötykuormalle kaavalla 9. SF-arvo saa arvon 8, CR saa arvon 1, CRC-tarkistus sekä otsikko ovat käytössä.

$$n_{hyötykuorma} = 8 + \max\left(\text{ceil}\left[\frac{8 * 16 - 4 * 8 + 28 + 16 * 1 - 20 * 1}{4 * 8}\right](1 + 4), 0\right)$$

$$= 26,75$$

Lasketaan alustusosan lähettämiseen käytettävien symbolien määrä kaavalla 8, kun n_{konf} saa lukuarvon 6.

$$n_{alustus} = (6 + 4,25) = 10,25$$

Lasketaan yhden symbolin lähettämiseen tarvittava aika T_s sekunteina kaavalla 3, käyttäen SF-arvona lukua 8 ja kaistanleveytenä arvoa 125 kHz.

$$T_s = \frac{2^8}{125\,000} = 0,002048 \text{ s}$$

Koko datapakettin lähettämiseen kulunut aika voidaan siis laskea kaavalla 11.

$$T_{paketti} = (10,25 + 26,75) * 0,00204 \approx 0,0553 \text{ s}$$

3.3 LoRaWAN

3.3.1 Yleistä

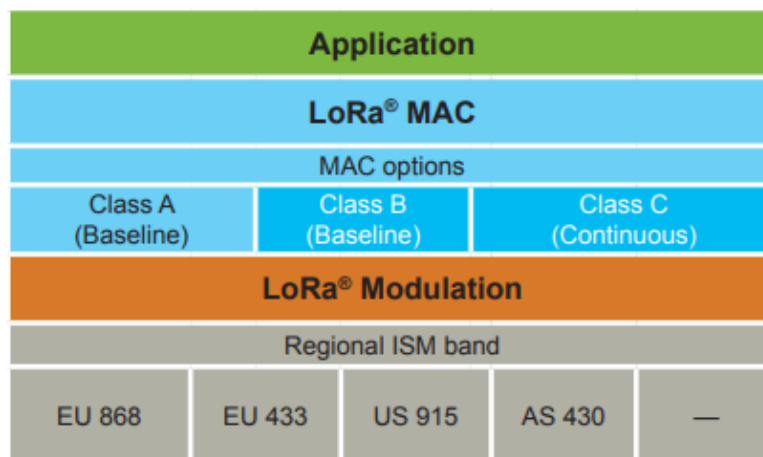
LoRaWAN on MAC-protokolla, joka on rakennettu LoRa:n päälle, mutta fyysisenä kerroksena voidaan käyttää LoRa-modulaation sijaan myös FSK-modulaatiota (The Things Network 2019). Suomessa LoRaWAN käyttää EU863-870 MHz ISM

-taajuuskaistaa, joka on vapaassa käytössä, mutta siinä on päätelaitteille asetettu vaatimuksia, jotka voidaan nähdä taulukosta 1.

Taulukko 1. Rajoitukset langattomalle radiokommunikoinnille Euroopassa (Texas Instruments 2005)

Frequency Band	ERP	Duty Cycle	Channel Bandwidth	Remarks
433.05 – 434.79 MHz	+10 dBm	<10%	No limits	No audio and voice
433.05 – 434.79 MHz	0 dBm	No limits	No limits	≤- 13 dBm/10 kHz, no audio and voice
433.05 – 434.79 MHz	+10 dBm	No limits	<25 kHz	No audio and voice
868 – 868.6 MHz	+14 dBm	< 1%	No limits	
868.7 – 869.2 MHz	+14 dBm	< 0.1%	No limits	
869.3 – 869.4 MHz	+10 dBm	No limits	< 25 kHz	Appropriate access protocol required
869.4 – 869.65 MHz	+27 dBm	< 10%	< 25 kHz	Channels may be combined to one high speed channel
869.7 -870 MHz	+7 dBm	No limits	No limits	
2400 – 2483.5 MHz	+7.85 dBm	No limits	No limits	Transmit power limit is 10-dBm EIRP

Päätelaitteiden akunkeston maksimoimiseksi on tähtitopologiaan kytketty verkko parempi kuin esimerkiksi mesh-verkko, koska mesh-verkossa päätelaitteet välittävät toisten päätelaitteiden dataa eteenpäin. Näin ollen mesh-verkon laitteiden tarvitsee ”herätä” tietyn väliajoin vastaanottamaan ja välittämään eteenpäin muiden päätelaitteiden dataa, vaikka sen oma toiminta ei sitä edellyttäisikään. Tähtitopologiassa päätelaitteet voivat toimia asynkronisesti ja näin ollen niiden kokonaislähetysaika voi olla huomattavasti pienempi. Topologian valinnalla onkin suuri merkitys verkon päätelaitteiden akunkeston ja verkon kapasiteetin kannalta. LoRaWAN-kerrokset on kuvattu kuviossa 5. (LoRa-Alliance 2015)



KUVIO 5. LoRaWAN-kerrokset (LoRa-Alliance 2015)

LoRa Alliance on voittoa tavoittelematon järjestö, jonka tavoitteena on standardoida LPWAN ja näin ollen taata LoRaWAN-laitteiden yhteensopivuus. Järjestö perustettiin maaliskuussa 2015 ja vuonna 2019 jäseniä oli jo yli 500. Siihen kuuluvia sponsorijäseniä ovat muun muassa Google, IBM ja Alibaba Group. (LoRa-Alliance 2019)

3.3.2 Päätelaitteet

LoRaWAN-päätelaitteet jaetaan kolmeen eri luokkaan, jotka ovat A, B ja C. Luokkaan A kuuluvien laitteiden välillä kommunikaatio on kaksisuuntaista, mutta laite voi vastaanottaa dataa vain pienen hetken sen jälkeen, kun se on lähettänyt oman datansa. Pienen vastaanottoaikaikkunan takia kaksisuuntaisessa kommunikaatiossa A-luokan laitteilla voi olla huomattavasti enemmän viivettä verrattuna muihin laiteluokkiin. Tämä on kaikista LoRaWAN-spesifikaation määrittelemistä luokista pienitehoisin. Kaikkien LoRaWAN-verkkoon kytkettävien laitteiden on täytettävä vähintään A-luokan vaatimukset. (LoRaWAN Specification 2017, 10)

B-luokan päätelaitteiden toimintaan on lisätty A-luokkaan verrattuna lisää vastaanottoaikaikkunoita myös tietyin väliajoin, eli kaksisuuntainen kommunikaatio ei ole riippuvainen datan lähetystaajuudesta. Serveri lähettää tietyin väliajoin synkronointisignaalin, jotta päätelaitteet pysyvät samassa aikataulussa. B-luokan laitteissa energian kulutus on suurempaa kuin A-luokan laitteissa. (LoRaWAN Specification 2017, 10)

C-luokan laitteilla datan vastaanottoikkuna on lähes koko ajan auki ja kiinni vain sen lähettäessä dataa. Energian kulutus on suurempaa kuin A- ja B-luokan laitteissa, mutta näin saavutetaan pienempi viive serverin ja päätelaitteen uplink-kommunikaatioon. (LoRaWAN Specification 2017, 10)

Vaikka EU:n alueella käytössä olevasta EU863-870 ISM -taajuuskaistasta voidaan käyttää mitä vain taajuutta LoRa-kommunikointiin, LoRaWAN kuitenkin edellyttää, että kaikissa päätelaitteissa on oltava käytössä vähintään seuraavat taajuudet: 868,10 MHz, 868,30 MHz ja 868,50 MHz. Nämä taajuudet ovat myös

ne, joita jokaisen gateway-laitteen pitää vähintään kuunnella. (LoRaWAN Regional Parameters 2018, 15)

4 TOTEUTUS

4.1 Laitteisto

Opinnäytetyön kohteena olevan hankkeen tutkimusryhmän projektitutkija Kantasen mukaan kommunikaatiojärjestelmän toteutuksessa oli ensiarvoisen tärkeää, että käytettävä laitteisto oli avointa ja sekä se, että pääte- ja gateway-laitetta pystyttäisiin ohjelmoimaan vapaasti. Mahdollisuus konfiguroida gateway-laitetta etänä oli myös edellytyksenä laitteiston valinnalle. Lisäksi erilaisten ulkoisten laitteiden liitettävyyden piti olla mahdollista. LoRa-radiopiirien tuli olla helposti käytettäviä ja niihin tuli löytyä valmiita kirjastoja kommunikaatiojärjestelmän rakentamisen helpottamiseksi. Myös päätelaitteiden virrankulutuksen piti olla mahdollisimman pieni akkukäyttöisen sovelluksen toteuttamiseksi. (Kantanen, 2019)

Edellä mainittujen määritysten perusteella valittiin LoRa-radiopiiriksi HopeRF:n valmistama RFM95-radiopiiri. RFM95-piirin datalehden mukaan herkkyydeksi luvataan jopa -148 dBm vastaanottoherkkyys sekä maksimissaan +14 dBm lähetysteho. LoRa-modulaation lisäksi piirillä pystyisi myös käyttämään tarpeen vaatiessa FSK-, GFSK-, MSK-, GMSK- ja OOK-modulaatioita. Käyttöjännitteenä piiri käyttää 1,8–3,7 voltin jännitettä sekä kommunikointi radiopiiriin kanssa tapahtuu SPI-väylää hyödyntäen. (HopeRF 2019, 1)

4.1.1 Gateway-laite

Gateway-laitteeksi päätettiin valita Raspberry Pi 3B+ -mallinen yhden piirilevyn tietokone sen suhteellisen pienen koon, edullisen hinnan, laajan liitettävyyden ja laajan kirjastovalikoiman takia. Sen keskusyksikkönä toimii Broadcomin valmistama BCM2837B0 Cortex-A53 64-bittinen SoC, jonka vakiokellotaajuus on 1,4 GHz. Lisäksi se sisältää yhden gigatavun LPDDR2 SDRAM -muistia. Ulkoisiin laitteisiin voidaan Raspberry Pi:stä liittyä sen 40-pinnisestä GPIO-rimasta, joka sisältää liitännät muun muassa I²C- ja SPI-väyliin, digitaalisiin lähtöihin ja sisään-

tuloihin sekä +3,3 voltin, +5 voltin ja maapinneihin. Laitteella voidaan myös langattomasti liittyä 2,4 GHz tai 5 GHz WLAN-laitteisiin tai Bluetooth-laitteisiin. (Raspberry Pi Foundation, 2019)

Raspberry Pi:ssä voidaan käyttää Raspberry Pi -säätiön virallista Linux- käyttöjärjestelmää Raspbiania (Raspberry Pi Foundation 2019). Ohjelmointikielenä voidaan Raspberry Pi:llä käyttää lähes mitä ohjelmointikieltä tahansa, joten toteutus päätettiin tehdä Python 3.6-ohjelmointikielellä sen helppokäyttöisyyden ja valmiiden kirjastojen takia. Esimerkiksi kommunikointiin RFM95-radiopiirin kanssa käytettiin pySX127X-kirjastoa. Raspberry Pi:hin liitettiin päälle Dragino LoRa/GPS -lisäosa, joka helpottaa RFM95-piirin kiinnittämistä ja liittymistä Raspberry Pi:n SPI-pinneihin. Raspberry Pi ja Dragino LoRa -lisäosa voidaan nähdä kuvasta 1.

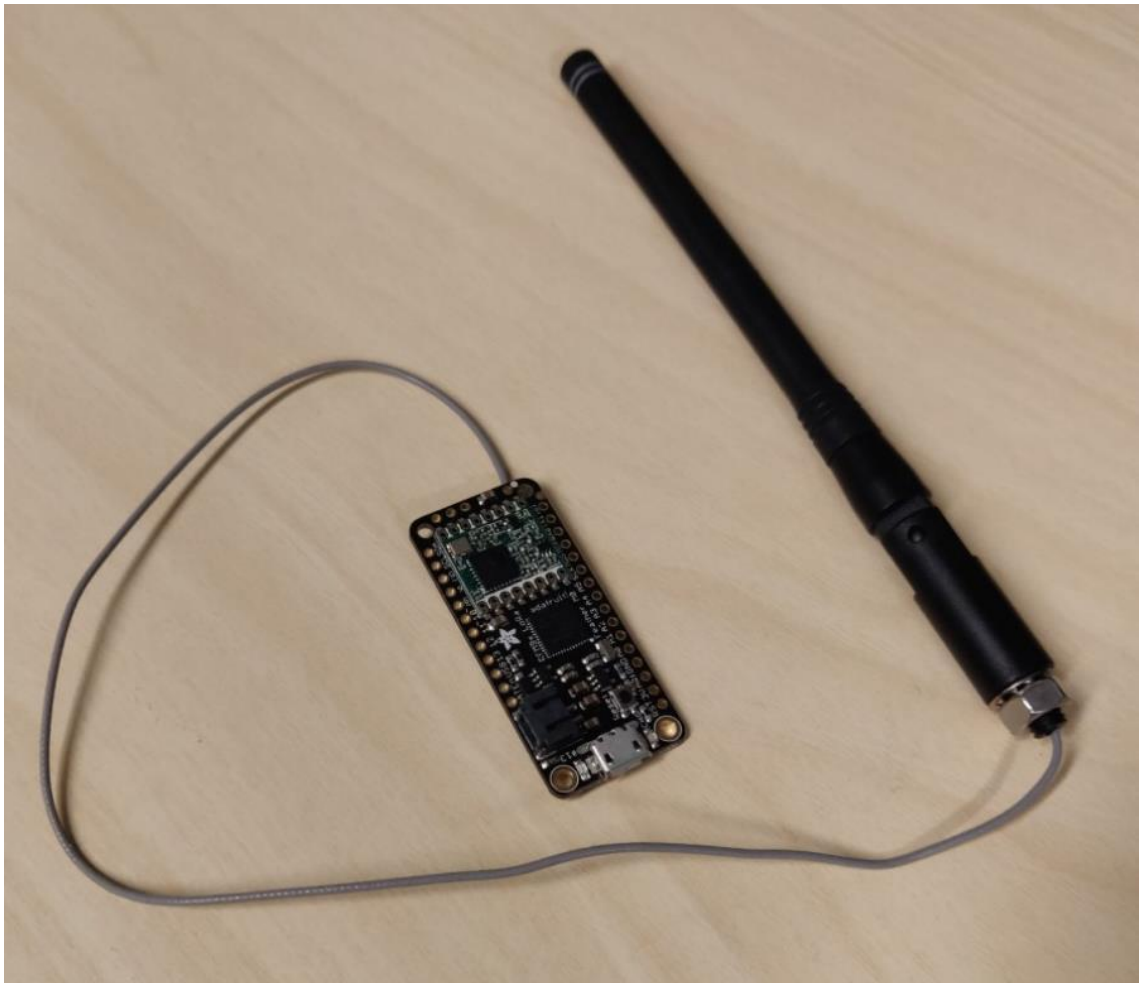


KUVA 1. Raspberry Pi 3B+, jossa Dragino LoRa -lisäosa

4.1.2 Päätelaitte

Päätelaitteen ”älynä” ei ollut tarvetta yhden piirinlevyn tietokoneelle, vaan mikrokontrolleri pystyi hoitamaan kaiken tarpeellisen liittymät niin RFM95-radiopiiriin sekä muihin ulkoisiin laitteisiin. Mikrokontrolleriksi valikoitui Microchipin valmistama ARM Cortex M0+ SAMD21 -mikrokontrolleri, koska sen SPI- ja I²C-väylien logiikkajännitetasot täsmäsivät RFM95-radiopiiriin edellyttämään 3,3 voltin jännitteeseen. SAMD21 sisältää 256 kilotavua ohjelmamuistia, 32 kilotavua SRAM-käyttömuistia, maksimissaan 48 MHz:n kellotaajuudella toimivan prosessorin ja 12-bittisen ADC- muuntimen. Valmistaja lupaa mikrokontrollerille 7,5 µA lepovirtakulutuksen, kun vain RTC-kello ja siihen liitetty keskeytyspalvelu ovat käytössä. SAMD21- mikrokontrollerin ohjelmointi tapahtuu C-koodin avulla, joka puolestaan käännetään ARM-arkkitehtuurille soveltuvaksi konekoodiksi ja ladataan mikrokontrolleriin. (SAMD 21 -datalehti 2018, 1, 993)

Toteutusta varten valittiin kehitysalustaksi Adafruit Industries:in valmistama Feather M0 -kehitysalusta, jossa SAMD21-mikrokontrollerin lisäksi RFM95-piiri valmiiksi liitettynä. Feather M0 -kehitysalusta voidaan nähdä kuvasta 2. Kehitysalustassa on lisäksi sisäänrakennettu USB-bootloader sovellusohjelmien lataamista varten, litiumioniakun lataus- ja suojapiiri, jänniteregulaattori 3,3 voltin jännitteelle ja jännitteenjako akun kytkentänastasta yhteen analogiatuloon akun varaustason mittaamista varten. Lisäksi kehitysalustaan on tuotu paikka uFL-antenniliittimelle. Myös SPI- ja I²C-väylien pinnit on tuotu esiin helpottamaan liitettävyyttä lisälaitteisiin. (Adafruit 2019)



KUVA 2. Adafruit Feather M0 -kehitysalusta, jossa myös RFM95-radiopiiri

4.2 Toiminnot

4.2.1 Toiminnalliset vaatimukset

Järjestelmän toiminnan vaatimuksia varten haastateltiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän projektitutkijaa Juho Kantasta. Hänen mukaansa järjestelmän pääasiallinen toimintatarkoitus on luoda luotettava pitkän matkan kaksisuuntainen kommunikointi LoRa-tekniologiaa hyödyntäen päätelaitteiden ja näitä ohjaavan gateway-laitteen välille. Toteutuksessa piti myös ottaa huomioon erityisesti laitteiston käyttöympäristöt, joita ovat erilaiset rakennukset. Päätelaitteiden määrän skaalautuvuus järjestelmässä oli myös eräänä vaatimuksena, mutta pääasiallisessa käyttötarkoituksessa tarvetta ei ole kuitenkaan kuin muu-

tamalle päätelaitteelle yhtä gateway-laitetta kohti. Myös päätelaitteiden mahdollisimman pieni virrankulutus oli eräänä määrittämisnä, jotta päätelaitteiden akkutoimisuus olisi mahdollista. o

Opinnäytetyössä rakennetussa järjestelmässä ei rakennettu akkutoimisuutta vaikkakin sen asettamat rajoitukset otettiin huomioon. Gateway-laitteen on tarkoitus olla kytkeytyneenä koko ajan internetiin, mutta järjestelmän pitää myös toimia itsenäisesti ilman internet-yhteyttä. Kantanen ilmaisi myös tarpeen kommunikaation turvallisuudelle seuraavasti: ”LoRa-kommunikaatiossa pitää ottaa huomioon kyberturvallisuuden asettamat vaatimukset. Siirrettävä data ei saa olla kaapattavissa tai häiritävissä helposti. Lisäksi rinnakkain/lomittain olevien LoRa-solujen data pitää pysyä erillään toisistaan”. (Kantanen, 2019)

Kantasen mukaan luotettava kommunikaatio vaatii myös erilaisista vikatilanteista selviytymistä ja niiden ilmoittamisesta käyttäjälle. Mahdollisten koodivirheiden välttämiseksi, määritettiin päätelaitteiden koodista tehtäväksi mahdollisimman yksinkertaista ja toimintavarmaa. Lisäksi kaikki kommunikaation ”äly” piti pyrkiä pitämään gateway-laitteen päässä, koska gateway-laitteen toimintaa pystytään muuttamaan etänä, mutta päätelaitteen ei. Järjestelmän käyttöönoton oli oltava helppoa ja järjestelmän oli oltava myös helposti skaalautuva, eli päätelaitteiden määrän piti olla määriteltävissä vain konfiguraatitiedostossa. Järjestelmän signaalien luotettavan kuuluvuuden takia piti myös määrittää signaalien kuuluvuusrajat, joiden sisällä kommunikointiyhteyden laatu vastaa asetettuja vaatimuksia. (Kantanen 2019)

4.2.2 Päätelaitteen toiminta

Päätelaitteen kommunikaation toiminta voidaan jakaa kahteen sekvenssiin: aloitus- ja toimintasekvenssiin. Päätelaitteen aloitussekvenssin tehtävänä on aloittaa kommunikointi synkronoimalla kello gateway-laitteen lähettämän synkronointikomenton kanssa. Aloitussekvenssin toiminta on kuvattu tarkemmin liitteessä 1. Synkronointikomento sisältää seuraavat tiedot: päätelaitteen MAC-osoitteen, jolle komento on tarkoitettu, UNIX-ajan, lähetystaajuuden, datan vastaanottoikkunan pituuden sekä ajoitusdatan, jonka avulla saadaan useampi laite synkronoitua lähettämään datansa tietyin väliajoin. Ajoitusdata on poikkeama UNIX-ajasta, jonka

kuluttua päätelaite herää lepotilasta suorittamaan toimintansa. Synkronointikomennon pakettiformaatti voidaan nähdä kuviosta 6 ja sen koko on 18 tavua.

MAC-osoite 48-bittiiä	UNIX-aika 32-bittiiä	Lähetystaajuus 32-bittiiä	Vastaanottoikkuna 16-bittiiä	Ajoitusdata 16-bittiiä
--------------------------	-------------------------	------------------------------	---------------------------------	---------------------------

KUVIO 6. Synkronointikomennon pakettiformaatti

Päätelaitteen tulisi normaalissa toimintatilanteessa olla aina toimintasekvenssissä aloitussekvenssin jälkeen. Toimintasekvenssissä laitteen tulisi olla suurimman osan ajasta lepotilassa, eikä sen pitäisi kuunnella paketteja muulloin kuin siihen tarkoitetun aikaikkunan aikana. Lepotilan tarkoitus on vähentää virrankulutusta ja näin ollen mahdollistaa laitteen akkutoimisuus.

Päätelaitteen olleessa esimerkiksi anturi, aloittaa se toimintasekvenssinsä tekemällä mittauksen, jonka jälkeen se nostaa pakettilaskurin arvoa yhdellä. Pakettilaskuri kertoo, kuinka mones datapaketti on kyseessä laitteen viimeisen uudelleen käynnistymisen jälkeen. Tämän avulla voidaan gateway-laitteen päässä pitää kirjaa saapuvista paketeista ja näin ollen havaita puuttuvat paketit. Pakettilaskurilla on myös toinen tarkoitus, joka on lisätä aina muuttuva osa kryptausta varten. Tämä vaaditaan, koska AES-128 EBC-kryptausta käytettäessä on jokaisen kryptattavan datapaketin oltava uniikki, sillä kaksi täysin samaa pakettia antaa kryptatessa täysin saman ulostulon. Tämä puolestaan helpottaa salauksen purkamista. (Roslyn Security Guard 2019)

Pakattuaan, kryptattuaan ja lähetettyään paketin jää laite odottamaan konfiguroidun ajan verran uutta synkronointipakettia, jonka formaatti voidaan nähdä kuviosta 6. Päätelaitteen lähettämän datapaketin formaatti voidaan puolestaan nähdä kuviosta 7 ja sen koko on 16 tavua. Vastaanotettuaan ja varmistuttuaan, että paketti kuuluu sille, laite dekryptaa paketin, synkronoi kellon ja asettaa muut konfigurointitiedot. Tämän jälkeen laite vaihtuu taas lepotilaan odottamaan heräämistä ja sekvenssin uudelleen alkamista. Toimintasekvenssin tarkempi toimintakuvaus on kuvattu liitteessä 2.

MAC-osoite 48-bittiiä	Synkronoinnin tila 8-bittiiä	Pakettinumero 32-bittiiä	Hyötykuorma 40-bittiiä
--------------------------	---------------------------------	-----------------------------	---------------------------

KUVIO 7. Päätelaitteen lähettämän paketin formaatti

4.2.3 Gateway-laitteen toiminta

Gateway-laitteen toiminta on jaettu kolmeen eri sekvenssiin, jotka ovat aloitus-, toiminta- ja virhesekvenssi. Aloitussekvenssin tarkoitus on määrittää verkon laitteille toimintajärjestys, jotta välttyttäisiin päällekkäisyyksiltä datan lähetyksessä sekä mahdollistaa toiminallisuus, jossa datapakettien oikea-aikaisuus on välttämätöntä. Jokaiselle päätelaitteelle, jonka MAC-osoite löytyy gateway-laitteen konfiguraatiodostosta, määrätään oma järjestysnumero, jonka perusteella voidaan määrittää uniikki ajoistusdata jokaiselle päätelaitteelle. Tämän jälkeen data pakataan kuvion 6 mukaiseen synkronointipakettiformaattiin, kryptataan ja lähetetään päätelaitteelle. Aloitussekvenssin toiminta on kuvattu liitteessä 3. Kun kaikki MAC-osoitteet on käyty läpi, siirtyy gateway-laite toimintasekvenssiin.

Toimintasekvenssin tarkoitus on pitää kirjaa vastaanotetusta datasta, järjestellä sitä, ja muuntaa se tarvittaviin dataformaatteihin jatkokäsittelyä varten. Vastaanotettuihin paketteihin lisätään RSSI- ja SNR-arvot, joista voidaan päätellä signaalien laatua. Liian heikon signaalin sattuessa järjestelmä kirjaa varoituksen lokitiedostoon, mutta ei tee muita toimenpiteitä, jos paketin MAC-osoite täsmää konfiguroituihin MAC-osoitteisiin. Jokainen päätelaitteen lähettämä datapaketti sisältää pakettinumeron, jonka perusteella voidaan gateway-laitteen päässä nähdä, ovatko vastaanotetut paketit saapuneet järjestyksessä. Paketin puuttuessa välistä, kirjataan varoitus lokitiedostoon. Pakettinumeron nollaantuessa on päätelaite todennäköisesti nollaantunut ja tällöin myös kirjataan varoituslokiin ilmoitus tapahtuneesta. Synkronointikomento lähetetään päätelaitteelle vain silloin, kun päätelaitteen lähettämässä paketissa on ilmoitettu, että laitteella on tarve synkronoida kellot. Tarkempi kuvaus gateway-laitteen toimintasekvenssistä voidaan nähdä liitteestä 4.

Virhesekvenssin tehtävänä on pyrkiä selviytymään mahdollisista kommunikation aikana tapahtuvista virheistä ja pyrkiä saamaan toiminta jatkumaan normaalisti. Virhesekvenssin aloitus tapahtuu silloin, kun LoRa-pakettia ei ole vastaanotettu tietyn ajan kuluessa tai mikäli vastaanotetut paketit eivät ole olleet valideja. Jos virhesekvenssi aloittaa toimintansa pakettien puutteen takia, yrittää se käynnistää uudelleen radiopiirin, mutta jos tämä ei kuitenkaan auta, käynnistetään koko gateway-laite uudelleen uuden aikakatkaisun päätteeksi. Mikäli laite vastaanottaa paketteja, mutta niistä ei ole mikään validi aikakatkaisun päätteeksi, vertailee virhesekvenssi paketin sisältöä ja yrittää selvittää onko kryptausavaimessa mahdollisesti konfigurointivirhe, kuuluuko paketin lähettäjä järjestelmään vai onko MAC-osoitteiden konfiguroinnissa mahdollisesti tapahtunut virhe. MAC-osoitteen konfigurointivirheestä ilmoittava toiminnallisuus vaatii hyötykuormassa olevan joidenkin bittien aina samoja toimiakseen. Virhesekvenssin toimintaa on kuvattu liitteessä 5.

4.2.4 Laitteiden konfigurointi

Konfiguraatioiden määritykset pitää tehdä ennen järjestelmän käyttöönottoa. Muutosten tekeminen vaatii gateway-laitteen uudelleenkäynnistämistä. Gateway-laitteeseen määriteltävät konfiguroinnit ovat seuraavat:

- AES-128-salausavain
- LoRa-kommunikoinnin taajuus
- SF-arvo, kaistanleveys
- CRC-tarkistus
- virheenkorjauskerroin
- lähetysteho
- aikakatkaisu virhesekvenssiä varten
- päätelaitteen lähetys- ja vastaanottointervallit
- validit MAC-osoitteet

Lisäksi voidaan tiedostossa määritellä lisäotsikko LoRa-paketille, joka lisätään lähetettävään pakettiin AES-128-kryptauksen jälkeen. Esimerkkinä tämän käytöstä on päätelaitteiden käyttämä RH-RF95-kirjasto, joka vaatii jokaisen viestin

alkavan neljän tavun mittaisella otsikolla, jonka sisältö on 0xFFFF0000. Esimerkki konfiguraatiodostosta voidaan nähdä kuvasta 3.

```
AES128_KEY = "{gsg./#gc71,4ETG"
RFM_95_HEADER = [255, 255, 0, 0]
MINIMUM_RSSI = -92

LORA_CRC = True
LORA_FREQ = 868.0           # Taajuus
LORA_SPREADING_FACTOR = 7  # 6 - 12
LORA_BW = 7                 # 7 = 125 kHz, 8 = 250k kHz, 9 = 500 kHz
LORA_TIMEOUT = 600         # Virhesekvenssin aikakatkaistu sekunteina

VALID_SENSOR_IDS = {       # Päätelaitteiden MAC-osoitteet
    "SENSOR_1": "6f:6f:6f:6f:6f:6f",
    "SENSOR_2": "6f:6f:6f:6f:6f:ff",
}

SENSOR_TX_INTERVAL = 120   #Päätelaitteen lähetysintervalli sekunneissa
SENSOR_RX_WINDOW = 5000    #Datan vastaanottoikkuna millisekunneissa
```

KUVA 3. Esimerkki gateway-laitteen konfiguraatiodostosta

Jotta kommunikaatio gateway-laitteen ja päätelaitteen välillä toimii, pitää seuraavien konfigurointien olla identtiset molemmissa laitteissa:

- AES-128-salausavain
- LoRa-kommunikoinnin taajuus
- SF-arvo
- kaistainleveys
- CRC-tarkistuksen tila
- virheenkorjauskerroin

Myös päätelaitteen oma MAC-osoite pitää löytyä gateway-laitteen konfigurointitiedostosta. Päätelaitteessa voidaan myös konfiguroida arvot lähetysteholle, aikakatkaistuksen aloitussekvenssille sekä oletuslepoajalle ja oletus vastaanottointervallille. Lepoaika ja vastaanottointervalli voidaan lukea myös synkronointipaketista. Esimerkki oletuskonfiguroinnista voidaan nähdä kuvasta 4.


```

#define SF_VALUE 7
#define BANDWIDTH 125000
#define CRC 1
#define CODE_RATE 3
#define SYNC_PERIOD 5
#define AUTO_NORMAL_CONFIG_TIME 600000
#define TX_POWER 14
#define REC_WINDOW_LENGTH 5000
#define SLEEP 120000
uint8_t encryptkey[16] = { 123, 103, 115,
                          37, 46, 58, 35,
                          103, 99, 55, 65,
                          44, 52, 69, 84, 71 };

```

KUVA 4. Esimerkki päätelaitteen konfiguroinnista

4.2.5 Konfiguroinnin raja-arvot

Pysyäkseen lain sallimissa rajoissa lähetyksajan puitteissa, on laskettava rajat, kuinka usein kukin laite voi lähettää oman datansa. Huomioon on otettava AES-128-kryptauksen toiminta, joka kryptaa datan aina 16 tavun (128-bitin) kokoisissa osissa ja täyttää tyhjäksi jäävän osan niin, että kokonaisuudeksi saadaan aina tavumäärä, joka on jaollinen luvulla 16. Kuvion 7 mukaisen päätelaitteen lähettämän datapaketin koko on 16 tavua ja näin ollen se ei vaadi täyttöä kryptausta varten. Lisäksi tähän lasketaan lisäksi RH-RFM95-kirjaston vaatima 4 tavun mittainen lisäotsikko. Näin ollen hyötykuorman kooksi, joka sovitetaan LoRa-kehyyseen, tulee 20 tavua. Kaavojen 9, 10 ja 11 avulla luotiin taulukko 2, josta voidaan nähdä minimilähetyksintervalli SF-arvon sekä kaistanleveyden suhteen, kun halutaan pitää datan lähetyksaika alle yhden prosentin ja näin ollen käyttää taulukon 1 mukaan 868,0–868,6 MHz taajuuskaistaa. Tällä taajuuskaistalle ei ole kaistanleveysrajoitusta, joten voidaan käyttää kaikkia RFM95-radiopiirin tukemia kaistanleveyksiä.

TAULUKKO 2. Minimilähetysintervalli 1 % lähetysajalla ja 20 tavun hyötykuormalla

		Kaistanleveys Hz		
		125000	250000	500000
SF-arvo	7	5,555 s	2,778 s	1,389 s
	8	9,882 s	4,941 s	2,47 s
	9	19,763 s	9,882 s	4,941 s
	10	34,611 s	17,306 s	8,653 s
	11	69,222 s	34,611 s	17,306 s
	12	118,784 s	59,392 s	29,696 s

Gateway-laitteen lähettämä synkronointidatapaketin koko on taas 18 tavua, joten AES-128-kryptausta käytettäessä on lähetettävän hyötykuorman koko pakkauksesta johtuen 32 tavua. Tähän lisätään vielä lisäksi RH-RFM95-kirjaston vaatima 4 tavun mittainen lisäotsikko ja näin ollen lähetettävä kokonaishyötykuorma on 36 tavua. Taulukosta 3 nähdään minimilähetysintervallit yhden prosentin lähetysajalle SF-arvon ja kaistanleveyden mukaan.

TAULUKKO 3. Minimilähetysintervalli 1 % lähetysajalla ja 36 tavun hyötykuormalla

		Kaistanleveys Hz		
		125000	250000	500000
SF-arvo	7	8,627 s	4,314 s	2,157 s
	8	14,797 s	7,398 s	3,699 s
	9	27,136 s	13,568 s	6,784 s
	10	49,357 s	24,678 s	12,339 s
	11	98,714 s	49,357 s	24,678 s
	12	177,766 s	88,883 s	44,442 s

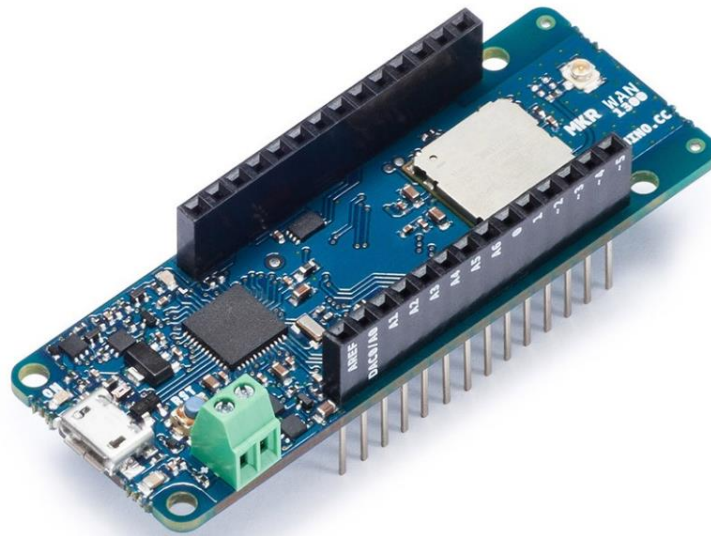
Lähetystehon maksimiarvoksi on määritelty 868,0-869,2 MHz taajuuksilla taulukon 1 mukaan +14 dBm. RFM95-radion maksimilähetysvoimakkuus on puolestaan +20 dBm, joten lähetystä ei voi suorittaa laitteen maksimiteholla, vaikkakin liittimissä ja johtimissa tapahtuu häviöitä, jolloin laitteeseen konfiguroitu lähetysteho voisi käytännössä olla hieman suurempi kuin lain sallima +14 dBm. Koska näitä häviöitä ei tiedetä, määritetään maksimiarvoksi, joka voidaan konfiguroida laitteeseen, +14 dBm. (HopeRF, RFM95/96/97/98-datalehti)

5 TESTAUS

5.1 Kuuluvuustestit

Järjestelmälle suoritettiin kuuluvuustestejä, jotta pystyttiin määrittämään raja-arvot signaalin voimakkuudelle, joissa toiminta on luotettavaa ja lisäksi todentamaan järjestelmän toiminta myös haastavammissa olosuhteissa. Vastapainoisesti oli myös tärkeää määrittää ylärajat signaalinvoimakkuuksille, ettei dataa lähetetä turhaan liian voimakkaalla signaalilla ja näin ollen vapaassa käytössä olevaan ISM 868 -taajuuskaistaa ”saastuteta” turhaan. Lisäksi turhan suurella teholla lähettäminen lisäisi virrankulutusta ja näin ollen lyhentäisi akkutoimisen laitteentoiminta-aikaa tarpeettomasti. Kuuluvuustesteissä keskityttiin mittaamaan ja varmentamaan toiminta rakennuksissa ja niiden ympäristössä, koska LoRa-tekniologian kuuluvuutta ja toimivuutta ulkoilmassa on testattu monien eri tahojen puolesta (Linatti, J. Janhunen, J. Mikhaylov, K. Pettissalo M & Petäjäjärvi, J 2017 ja Curry, J & Harrin 2018).

Kuuluvuustestin laitteistona käytettiin täysin samaa laitekonfiguraatiota kuin toteutuksesta kertovassa luvussa 4 on kuvattu, mutta lisäksi vastaanottavaan päähän lisättiin myös CMWX1ZZABZ-piirillä varustettu Arduino MKR1300 -kehitysalusta (Kuva 5). CMWX1ZZABZ-piiri sisältää Semtechin SX1276-LoRa-piirin (Murata 2019). Signaalia vastaanottavat Raspberry Pi ja Arduino MKR1300 pidettiin kuuluvuustestin aikana paikallaan ja signaalia lähettävää, päätelaitteena toimivaa Feather M0 LoRa -kehitysalustaa liikutettiin ympäri testikohdetta. Vastaanottavissa laitteissa käytettiin antennia, jonka pituus on yksi neljäsosa radio-signaalin aallonpituudesta. Lähettävässä laitteessa käytetyn antennin pituus on puolikas radioaallon aallonpituudesta.

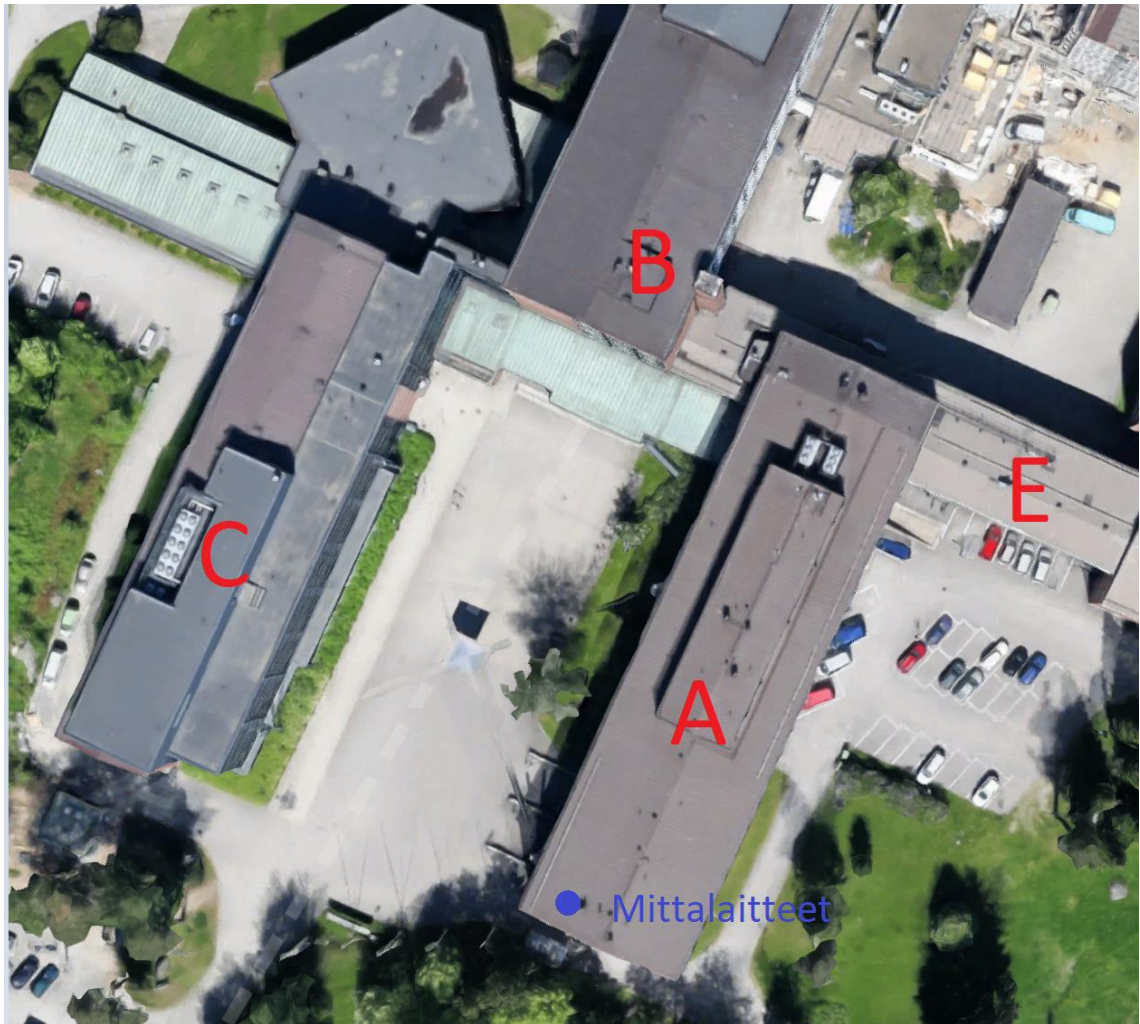


KUVA 5. Arduino MKR1300 -kehitysalusta (Arduino store, 2019)

Signaalin voimakkuutta kuvaava RSSI-luku mitattiin gateway-laitteena toimivan Raspberry Pi:hin kytketyn Dragino-lisäkilven RFM95-radiopiiristä sekä Arduino MKR1300 -kehitysalustasta. Myös signaalien SNR-arvoa mitattiin. Mittaukset toistettiin jokaisesta mittapaikasta viisi kertaa, ja näistä laskettiin keskiarvo, joka kirjattiin taulukkoon. Mittauksista ei huomioitu selvästi vääriä mittatuloksia, joita Raspberry Pi:hin kytketty RFM95-radiopiiri välillä tuotti. (HopeRF 2019)

5.1.1 Kuuluvuustestit TAMKin pääkampuksella

Kuuluvuustestiä tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun pääkampuksen eri osissa. Vastaanottavat laitteet sijoitettiin A-siiven kolmannen kerroksen etelä-osaan (kuva 6) ja signaalia lähettävää laitetta siirrettiin ympäri rakennusta. Kaikissa mitatuissa kerroksissa toteutettiin mittaukset kolmessa eri kohdassa. A-siivessä mittaukset toteutettiin neljässä eri kerroksessa, B- ja C-siivessä kolmessa eri kerroksessa ja E-siivessä kahdessa eri kerroksessa.



KUVA 6. Tampereen ammattikorkeakoulun A-, B- C- ja E-siivet (Google Maps, muokattu, 2019)

Kaikkia kuuluvuusmittauksia varten asetettiin lähettävän laitteen lähetystehoksi +14 dBm, ja kaistanleveydeksi 125 kHz. CRC-tarkistus konfiguroitiin myös olemaan päällä, jotta kuuluvuusmittauksia ei tehty viallisista paketeista. Kuuluvuusmittaukset SF-arvolla 7, voidaan nähdä liitteestä 6 ja kuuluvuusmittaukset SF-arvolla 12 voidaan nähdä liitteestä 7.

5.1.2 Kuuluvuusrajat

Laitteille määritettiin kuuluvuusrajat, jotta voitiin olla varmoja, että tietyllä konfiguraatiolla laiteiden signaalit saapuvat perille luotettavasti. Nämä testit tehtiin testikohteessa tehtyjen mittausten lisäksi, sillä näin oli helpompi määrittää missä lai-

tekonfiguraation toimivuusrajat menevät. Testissä käytettiin muuten samaa menetelmää kuin aikaisemmassa testissä, mutta lähetystehoksi asetettiin +5 dBm, jotta saatiin pienemmällä välimatkalla testattua herkkyyttä. Mittatuloksista kirjattiin ne arvot, joilla signaali saapui luotettavasti perille joka kerta ja jokaisesta mittauksesta kirjattiin ylös kymmenen mittauksen keskiarvo. Luotettavuuden rajana pidettiin sitä, että kaikki kymmenen mittausta tulivat perille luotettavasti.

TAULUKKO 4. Kuuluvuusrajat eri SF-arvoilla ja 125 kHz kaistanleveydellä

SF	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
7	-96	10	-114	-5,5
8	-96	7,5	-113	-8
9	-97	6,25	-115	-9,5
10	-98	6	-114	-11,5
11	-103	4,25	-116	-11,5
12	-105	2	-118	-13,5

Molemmista radiopiireistä (RFM95 ja SX1276) luetut SNR- ja RSSI-arvot poikkesivat melko suuresti toisistaan, mutta laitteiden mittaukset olivat kuitenkin hyvin toistettavissa. Arduino MKR1300 -kehitysalustassa olevasta SX1276-radiopiiristä saatiin huomattavasti pienempiä RSSI-arvoja ja myös fyysisesti liikutettavaa laitetta pystyttiin viemään huomattavasti kauemmaksi, jotta löydettiin kuuluvuusraja verrattuna RFM95-radiopiiriin. RFM95-radiopiiristä luetut SNR-arvot olivat välillä selvästi vääriä ja näitä tuloksia ei huomioitu kymmenen mittatuloksen keskiarvoon, vaan mittaus toistettiin uudelleen.

5.2 Järjestelmän testaus

Järjestelmän toiminta varmistettiin tekemällä järjestelmätestaus, jossa laitteet otettiin käyttöön sellaisissa olosuhteissa, joissa niitä tullaan myös käyttämään. Päätelaitteet konfiguroitiin mitta-antureiksi, joilla lähetettiin mittadataa gateway-laitteelle. Järjestelmään konfigurointiin SF-arvoksi 7, kaistanleveydeksi 125 kHz ja virheenkorjauskertoimeksi 2.

Testissä keskityttiin synkronoinnin toimintaan, signaalin onnistuneeseen vastaanottamiseen ja mahdollisista virheistä selviytymiseen. Järjestelmä asetettiin toimimaan tasan viiden päivän ajan ja päätelaiteiden lähetysintervalliksi konfiguroitiin minuutti. Gateway-laitteen vastaanottavat viestit kirjattiin kaikki ylös ja niiden määrää verrattiin lukuun 7200, joka on viiden vuorokauden pituus minuutteina. Näin saatiin selville puuttuvien pakettien määrä tällä aikavälillä. Vertailu voidaan nähdä taulukosta 5.

Taulukko 5. Neljän eri päätelaitteen toimintavarmuus viiden päivän ajalta

	Päätelaite 1	Päätelaite 2	Päätelaite 3	Päätelaite 4
Vastaanotetut paketit	7050	6941	7150	7124
Lähetetyt paketit	7200	7200	7200	7200
Toimintavarmuus	97,92 %	96,40 %	99,31 %	98,94 %

Gateway-laitteen virhesekvenssin toimintaa testattiin muutamalla eri tavalla. Ensimmäinen testi oli järjestelmän käyttöönotto ilman yhtään päätelaitetta. Tässä testissä järjestelmä yritti aikakatkaisun jälkeen luoda uudelleen yhteyden käynnistämällä radiopiirin uudelleen. Uudelleenkäynnistyksen aikana kytkettiin päälle yksi päätelaite, joka synkronoitui konfiguroidulla tavalla ja järjestelmä jatkoi toimintaansa ilman virheilmoituksia. Vastaava testi tehtiin myös ilman että päätelaitetta kytkettiin järjestelmään ollenkaan. Näin ollen järjestelmä käynnistyi uudelleen ja yritti aloittaa toimintaansa uudelleenkäynnistyksen aikana. Järjestelmään kytkettiin päätelaite uudelleenkäynnistyksen aikana, jonka jälkeen päätelaite synkronoitui konfiguroidulla tavalla ja järjestelmä jatkoi toimintaansa.

Toisessa virhesekvenssitestissä yritettiin selvittää mahdollisesti väärin konfiguroidut MAC-osoitteet paketin muun sisällön perusteella. Gateway-laitteen konfigurointitiedostossa asetettiin sellaiset MAC-osoitteet, joista mikään ei ollut järjestelmässä kytkettynä. Järjestelmään kytkettiin yksi päätelaite, jossa oli kuitenkin sama salausavain, joten salatut viestit pystyttiin dekryptaamaan. Päätelaite ei synkronoitunut normaalisti, koska se ei saanut gateway-laitteelta synkronointikäskyä, joten se alkoi lähettää omaa dataansa vasta määritellyn aikakatkaisun jälkeen. Gateway-laite kirjasi lokitiedostoon mahdollisen väärän konfiguraation hyötykuorman sisällön perusteella.

5.3 Tulosten analysointi

5.3.1 Kuuluvuustestien analysointi

Kaikista kuuluvuustestimittauksista oli selvästi huomattavissa, kuinka RFM95-piiristä saadut tulokset poikkesivat suuresti SX1276-piiristä saaduista tuloksista. RFM95-piirillä ei kertaakaan päästy lähellekään HopeRF:n lupaamaa negatiivista SNR-arvoa (HopeRF 2019, 27). SX1276-piirillä varustetulla Arduino MKR1300-kehitysalustalla puolestaan päästiin parhaillaan kuuluvuusrajatestissä luotettavaan -13,5 dB herkkyuteen. Parhaillaan SF-arvolla 12 saatiin luettua -17,5 dB, luokka olevia tuloksia, vaikkakin näin matalilla arvoilla signaali ei enää luotettavasti tullut perille. Myös muilla SF-arvoilla tehdyt mittaukset osoittautuivat mukailemaan SNR-arvon puolesta kohtalaisen hyvin SX1276-radiopiirin datalehden mukaisia minimi SNR-arvoja, kuten voidaan huomata taulukoista 4 ja 6 (Semtech 2019, 27).

TAULUKKO 6. SX1276-radiopiirin pienimmät SNR-arvot eri SF-arvoilla (Semtech 2019, 27)

<i>SpreadingFactor</i> (RegModulationCfg)	Spreading Factor (Chips / symbol)	LoRa Demodulator SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

RFM95-piirin RSSI-arvoista ei mittaustulosten perusteella voi päätellä paljoakaan onko signaalin vastaanotto luotettavaa, sillä jos verrataan kuuluvuusrajatestiä ja testikohdekuuluvuustestiä keskenään, ovat pienimmät vastaanotetut RSSI-arvot kuuluvuusrajatestissä huomattavasti suuremmat. Toisaalta myös alhaisimmat mitatut SNR-arvot kuuluvuusmittauksessa vaihtelivat niin paljon, ettei niistäkään voi tehdä suurempia johtopäätöksiä. Gateway-laitteeseen konfiguroitaviksi raja-

arvoiksi päätettiin kuitenkin silti määrittää raja-arvomittausten perusteella taulukon 7 arvot, jotka saatiin lisäämällä taulukon 6 RSSI-arvoihin 2 dBm vara.

TAULUKKO 7. Gateway-laitteeseen konfiguroitavat alhaisimmat RSSI-arvot

SF	RSSI (dBm)
7	-94
8	-94
9	-95
10	-96
11	-101
12	-103

RFM95-radiopiirin huonoille mittatuloksille ei pystytty määrittämään varmaa aiheuttajaa, mutta mitattu RSSI-arvo on todennäköisesti hieman pienempi kuin mitä se todellisuudessa on. Tämä ilmiö voidaan nähdä liitteistä 6 ja 7, joissa RSSI-arvon pienentyessä lähelle kuuluvuusrajaa, ovat SX1276-radiopiiristä saadut mittaustulokset noin 5-10 dBm pienempiä kuin samasta paikasta lähetettyjen signaalien RSSI-arvot RFM95-radiopiiristä mitattuna. Osaltaan huonoja ja vaihtelevia mittatuloksia voi selittää se, että Tampereen ammattikorkeakoulun pääkampuksella tehdyt mittaukset tehtiin päiväsaikaan, jolloin kaikki opiskelijoiden ja henkilökunnan laitteet saattoivat aiheuttaa häiriötä ja näin ollen lisätä taustakohinan voimakkuutta. Taustakohinan voimakkuus saattaa myös vaihdella kampuksella ajan mittaan, joka toisi osaltaan vielä lisää vaihtelua mittatuloksiin.

5.3.2 Järjestelmätestauksen analysointi

Taulukkoa 5 tarkastellessa voitiin huomata, kuinka päätelaitteiden välillä oli melko suurta vaihtelua niiden toimintavarmuudessa. Suurimmillaan toimintavarmuus oli 99,3 % ja huonoimmillaan 96,4 %. Erot voivat osittain selittyä laitteiden sijoittelulla, sillä päätelaite 3 sijaitsi vain noin muutaman metrin päässä gateway-laitteesta ja muut päätelaitteet sijaitsivat rakennuksen ulkopuolella ja sisällä läheisissä rakennuksissa. Vastaanotettujen signaalien RSSI-arvot vaihtelivat päätelaitteella kolme noin -55 dBm ja -60 dBm välillä sekä muilla päätelaitteilla -80

dBm ja -87 dBm välillä, joten nämä olivat aikaisemmin määriteltyjen raja-arvojen yläpuolella.

Testin tuloksista voitiin huomata, että päätelaitteiden käyttämä lähetysintervalli ei vastannut tarkasti gateway-laitteeseen konfiguroitua 60 sekunnin arvoa. Neljän päätelaitteen lähettämien pakettien intervalli oli keskimäärin 60,167 sekuntia. Tästä aiheutuvan virheen suuruus on noin 0,25 % ja se vaikuttaa toimintavarmuuteen positiivisesti, sillä lähetettyjen pakettien määrä on todellisuudessa odotettua pienempi, eli päätelaitteen 3 toimintavarmuus olisi virhe huomioon ottaen jopa noin 99,6 %. Virheen pääteltiin johtuvan siitä, että päätelaite ei kompensoinut omaa suoritusajansa pois lähetysintervallista. Osa järjestelmätestauksessa syntyneestä lokitiedostosta voidaan nähdä liitteestä 8, jossa oikeimman puoleinen sarake kuvaa ajan hetkeä, jolloin paketti on vastaanotettu.

Virhesekvenssin toiminta oli odotettua radiopiirin ja koko gateway-laitteen uudelleenkäynnistämisen osalta ja kaikki toimi niin kuin oli ennalta oletettu. Virheellisestä konfiguroinnista johtuvat ilmoitukset kirjautuivat myös oletetusti varoituslokiin, mutta ongelmana tässä virheentunnistuksessa on kuitenkin se, että se toimii vain juuri tietynlaisilla hyötykuormilla (kuviot 6 ja 7). Erilaisille hyötykuormille on tämä toiminnallisuus rakennettava lähes kokonaan uudelleen ja ei näin ollen ole välttämättä järkevää, paitsi sellaiselle järjestelmäkonfiguraatiolle, joissa päätelaitteita on melko suuri määrä. Kaiken tyyppisille hyötykuormille tämän toiminnallisuuden rakentamisen ei ole edes mahdollista.

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteeksi asetettiin helppokäyttöisen ja luotettavan LoRa-kommunikaatiojärjestelmän kehittäminen. Tavoitteeseen päästiin lähes kaikilla osalualueilla. Järjestelmän käyttöönotto on melko helppoa, toiminta suhteellisen varmaa ja toiminnallisuus pystyttiin osoittamaan oikeassa käyttöympäristössä. Koko kommunikaation toimintavarmuus ei kuitenkaan aivan ole sillä tasolla, kuin järjestelmälle määriteltiin, sillä melko lyhyilläkin matkoilla toimintavarmuus oli vain noin 98 %. Käyttötarpeeseen, johon järjestelmä rakennettiin, on toimintavarmuus kuitenkin riittävä.

Sytä odotettua heikommalle luotettavuudelle kommunikaatiossa ei löydetty pelkällä gateway-laitteen lokitiedoston tarkastelulla. Toimintavarmuuden kehittämiseen vaadittaisiin todennäköisesti testimenetelmä, jossa voitaisiin tarkastella myös useiden päätelaitteiden toimintaa samanaikaisesti gateway-laitteen lisäksi. Testitulosten perusteella LoRa-teknologia kuitenkin mahdollistaisi paremman suorituskyvyn kuin mitä opinnäytetyössä rakennettu järjestelmä pystyy saavuttamaan.

Todellisessa testiympäristössä tehdyt testit toivat arvokasta tietoa siitä miten kuinka tapauskohtaisia kuuluvuudet voivat olla. Esimerkkinä kuuluvuusrajaa etsiessä, saattoi lähellä olevan oven aukaiseminen tai sulkeminen vaikuttaa signaaliin kuuluvuuteen ratkaisevasti. Tämän tyyppisistä olosuhteista johtuen järjestelmän suorituskyvyn arvioiminen ilman tapauskohtaista testausta voi olla lähes mahdotonta. Kuuluvuustestit osoittivat myös osan alussa suunnitelluista toiminnoista hieman turhiksi, sillä esimerkiksi RSSI- ja SNR-arvojen ajateltiin olevan hyvä merkki siitä, kuinka hyvin signaalit kuuluvat. Todellisuudessa kuitenkin näiden arvojen kriittiset rajat vaihtelevat ja mitään tiettyä sekä yleispätevää kuuluvuusrajaa on vaikea määrittellä.

Eräänä määrittämisnä järjestelmälle oli tehdä kommunikaatiosta turvallista niin, että ulkopuolinen taho ei pystynyt lukemaan signaaleja tai häiritsemään järjestelmää. Tämän toiminnallisuuden luomisessa onnistuttiin ja lisäksi AES-128 salauksen käyttö toi vielä lisävarmuutta viestin oikeellisuuden määrittelyyn. Toisaalta

salauksen käyttö rajoittaa hieman järjestelmän datapakettien kokojen joustavuutta, sillä AES-salaus pakottaa kryptattavan ja dekryptattavan paketin koon olevan 16 tavulla jaollinen. Pakettikoon joustavuuden rajoittaminen on vähäinen haitta verrattuna salauksen tuomiin etuihin.

LoRaWAN-verkon käyttö käyttötarkoitusta varten rakennetun verkon sijaan olisi luultavasti auttanut varmatoimisemman järjestelmän luomisessa. Luodun järjestelmän suurin etu LoRaWAN:iin nähden on mahdollisuus jonkin verran pidempään akkutoimisuuteen, sillä LoRaWAN tuo ainakin 13 tavua lisää lähetettävää dataa jokaiseen pakettiin (Techplayon 2019). Lisäksi LoRaWAN-arkkitehtuurin luominen kohteeseen, jossa käytössä on vain muutama päätelaite, ei välttämättä ole järkevää. Julkisiin LoRaWAN-verkkoihin liittyminen ei myöskään tullut kyseenkäyttöä käyttötarkoituksesta johtuen.

Järjestelmän jatkokehitystä helpottaa toiminnallisuudessa huomioon otettu mahdollinen akkutoimisuus, joskaan käytetty laitekonfiguraatio ei kuitenkaan mahdollista tätä toiminnallisuutta parhaalla mahdollisella tavalla. Seuraavat askeleet järjestelmän kehittämisessä olisivat lisätä järjestelmän toimintavarmuutta ja rakentaa laitekonfiguraatio, joka mahdollistaisi päätelaitteiden nopeamman valmistuksen. Lisäksi nähtiin tarpeellisena rakentaa järjestelmään toiminnallisuus, joka mahdollistaisi päätelaitteiden lisäämisen ilman järjestelmän uudelleenkäynnistystä.

LÄHTEET

5G Americas. 2018. 3GPP Tiedotteet 14 – 16. Wireless Technology Evolution. Transition From 4G to 5G.

Abdullah, A. 2017. Artikkel. Advanced Encryption Standard Algorithm to Encrypt and Decrypt Data.

Adafruit. Adafruit Feather M0 RFM95 LoRa Radio Overview. Luettu 25.3.2019. <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-radio-with-lora-radio-module/overview>

Arduino Store. Arduino MKR WAN 1300 (LoRa Connectivity). Luettu 8.5.2019. <https://store.arduino.cc/mkr-wan-1300>

Augustin, A. Clausen, T. Townsley, W & T. Yi, J. 2016. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Luettu 25.3.2019 <https://www.thomasclausen.net/wp-content/uploads/2016/09/2016-A-Study-of-LoRa-Long-Range-Low-Power-Networks-for-the-Internet-of-Things.pdf>,

Cisco. 2017. Visual Networking Index. Global Mobile Data Traffic Forecast Update. Luettu 28.3.2019. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>

Curry, J & Harrin, N, R . 2018. World Academy of Science, Engineering and Technology. Development and Range Testing of a LoRaWAN System in an Urban Environment. Luettu 5.8.2019. <https://waset.org/publications/10008429/development-and-range-testing-of-a-lorawan-system-in-an-urban-environment>

Dali, I. Rahman, M. & Saifullah, A. 2018. Low-Power Wide-Area Networks: Opportunities, Challenges, and Directions. Luettu 8.5.2019. <http://www.cs.wayne.edu/saifullah/scc18.pdf>

Dubendorf, V. 2003. Wireless Data Technologies. John Wiley & Sons Ltd.

Electronic Notes. Antennas and Propagation. Radio Link Budget: details & formula. Luettu 21.3.2019. <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/radio-link-budget-formula-calculator.php>

Ericsson. 2016. Cellular Networks for Massive IoT. Luettu 8.5.2019. https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp_iot.pdf

HopeRF. RFM95/96/97/98-Datalehti. Versio 1.0. Luettu 8.5.2019. https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf

Linatti, J. Janhunen, J. Mikhaylov, K. Pettissalo M & Petäjärvi, J. 2017. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. Luettu 8.5.2019. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147717699412>

- Ingenu. Free Worldwide Spectrum. Luettu 11.2.2019. <https://www.ingenu.com/technology/rpma/spectrum/>
- Kumari, S. International Journal Of Engineering And Computer Science. A research Paper on Cryptography Encryption and Compression Techniques. 2017.
- IEEE. 2003. P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). Presentation on CSS for IEEE 802. Esitysmateriaali. Luettu 23.2.2019.
- Internet Hall of Fame, Donald Davies, Luettu 29.3.2019. <https://www.internethalloffame.org//inductees/donald-davies>
- ISA. dB vs dBm. ISA Publications. Luettu 23.3.2019. <https://www.isa.org/standards-publications/isa-publications/intech-magazine/2002/november/db-vs-dbm/>
- LinkLabs. 14 LoRa FAQs Answered. Luettu 25.2.2019. <https://www.link-labs.com/blog/lora-faqs>
- LinkLabs. 2016. A Comprehensive Look at Low Power, Wide Area Networks. Luettu 8.5.2019 <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/427771/LPWAN-Brochure-Interactive.pdf>
- LinkLabs. 2016. New Industrial Internet of Things Products. Luettu 8.5.2019. <https://www.link-labs.com/blog/iiot-topology>
- LoRa-Alliance. About LoRa-Alliance. Luettu 21.2.2019. <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>
- LoRa-Alliance. 2018. LoRaWAN Regional Parameters. Versio 1.1. Luettu 8.5.2019. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf
- LoRa-Alliance. 2017. LoRaWAN Specification. Versio 1.1. Luettu 8.5.2019. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-_v1.1.pdf
- LoRa-Alliance. 2015. What is LoRaWAN. A technical overview of LoRa and LoRaWAN. Luettu 8.5.2019 <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- Javvin Technologies. 2005. Network Protocols Handbook. Saratoga USA: Javvin Technologies Inc.
- Kantanen, J. Projektitutkija. Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmä. Haastateltu 4.1.2019.
- Medium. 2017. Should I Use LPWAN. Artikkel. Luettu 1.4.2019. <https://medium.com/iiotforall/should-i-use-lpwan-94986e81ea29>
- Nanotron. Chirp Spread Spectrum. Luettu 22.2.2019. https://nanotron.com/EN/co_techn-css-php/

Osmocom. Path Loss Link Budget. Luettu 21.3.2019. https://osmocom.org/attachments/download/2615/path_loss_link_budget.pdf

Microchip. 2018. SAM D21-Family. Datalehti. Low-Power, 32-bit Cortex-M0+ MCU with Advanced Analog and PWM. Luettu 8.5.2019. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAMD21-Family-DataSheet-DS40001882D.pdf>

muRata. Sub-G Module Data Sheet. Luettu 30.3.2019. https://wireless.murata.com/pub/RFM/data/type_abz.pdf

Pollin, S. Reynders, B. 2016. Chirp Spread Spectrum as a Modulation Technique for Long Range Communication. Luettu 8.5.2019. https://www.researchgate.net/publication/311980840_Chirp_spread_spectrum_as_a_modulation_technique_for_long_range_communication

Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 3B+ Product Brief. Luettu 27.3.2019. <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>

Raspberry Pi Foundation. Raspbian. Luettu 8.5.2019. <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>

Rennselaer Polytechnic Institute. Bit- & Baudrate. Luettu 29.3.2019. https://www.rpi.edu/dept/ecse/mps/Bit_&_Baud_Rate.pdf

Roberts, L. 1978. Proceedings of the IEEE Vol. 66. Evolution of Packet Switching. IEEE

Roslyn Security Guard. ECB mode is weak. Luettu 29.3.2019. <https://dotnet-security-guard.github.io/SG0012.htm>

Semtech. 2018 Application Note. Lora Modulation. Crystal Oscillator Guidance. Revisio 2.1. Luettu 8.5.2019. <https://www.semtech.com/uploads/documents/an120014-xo-guidance-lora-modulation.pdf>

Semtech. 2015 LoRa Modulation Basics. Revisio 2. Luettu 8.5.2019. <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf1>

Semtech. 2019. SX1276/7/8/9-datalehti. Revisio 6. Luettu 8.5.2019. https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V6.pdf

Techplayon. LoRa- (Long Range) Network and Protocol Architecture with Its Frame Structure. Luettu 25.3.2019. <http://www.techplayon.com/lora-long-range-network-architecture-protocol-architecture-and-frame-formats/>

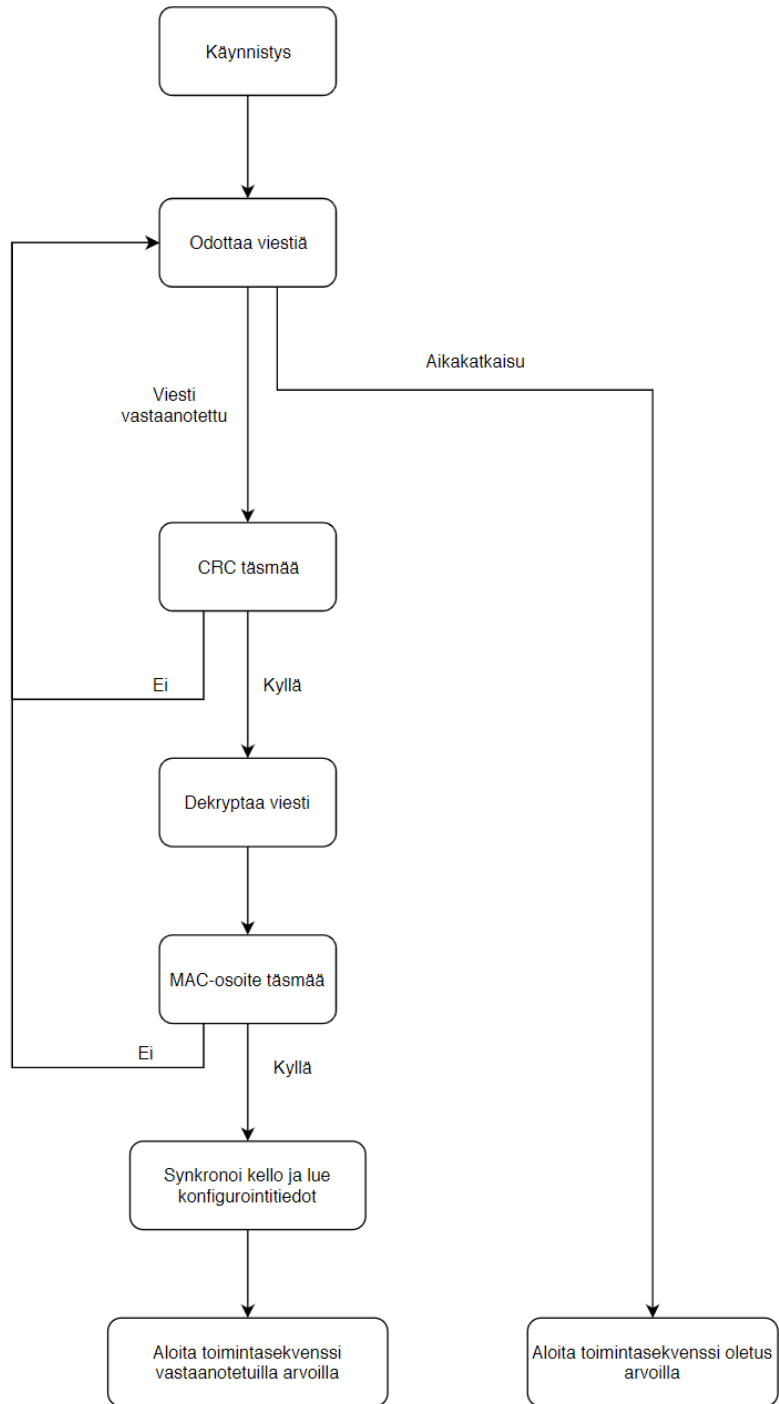
Texas Instruments. ISM-Band and Short Range Device Regulatory Compliance Overview. Application Report. 2005. Luettu 8.5.2019. <http://www.ti.com/lit/an/swra048/swra048.pdf>

The Things Network. LoRaWAN Frequencies Overview. Luettu 23.3.2019.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans.html#eu863-870>

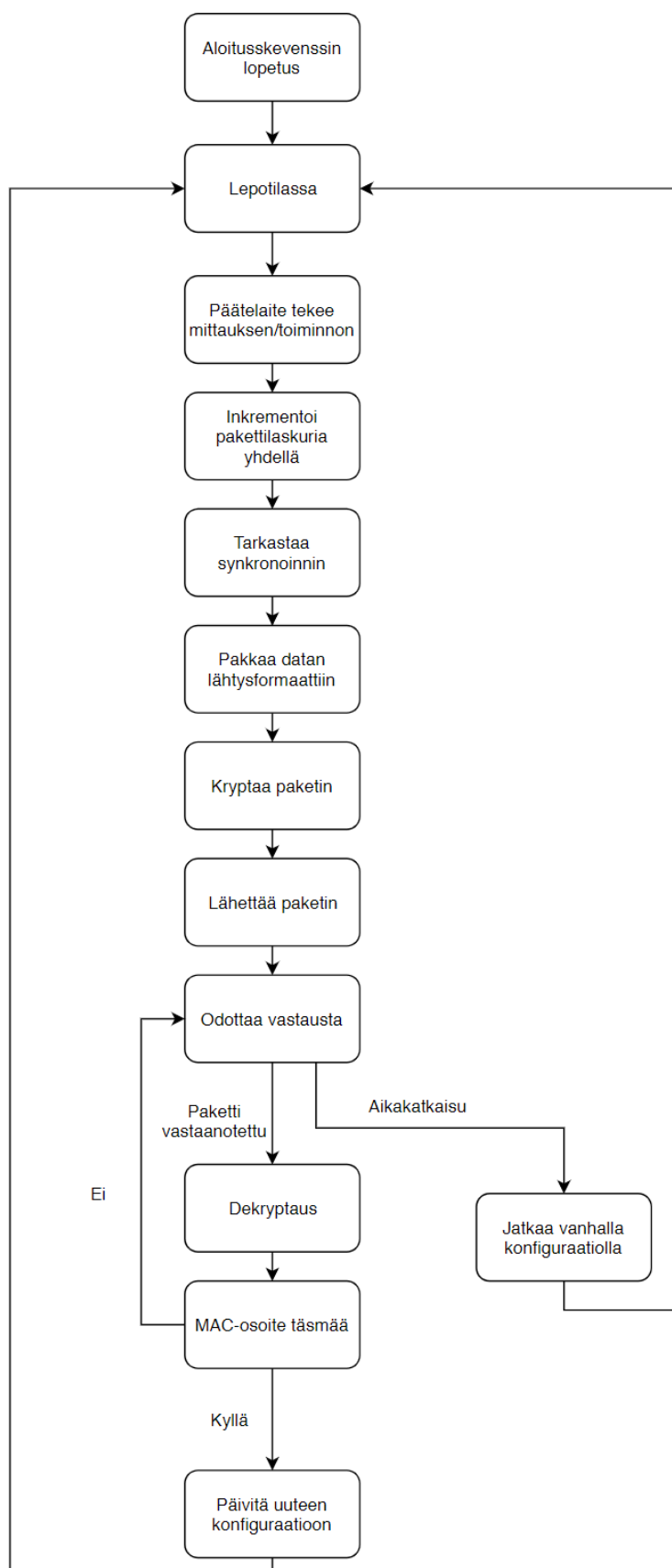
Thijssen, J. A Day in the Life Of. Encryption operating modes: ECB vs CBC. Luettu 1.4.2019. <https://adayinthelifeof.nl/2010/12/08/encryption-operating-modes-ecb-vs-cbc/>

LIITTEET

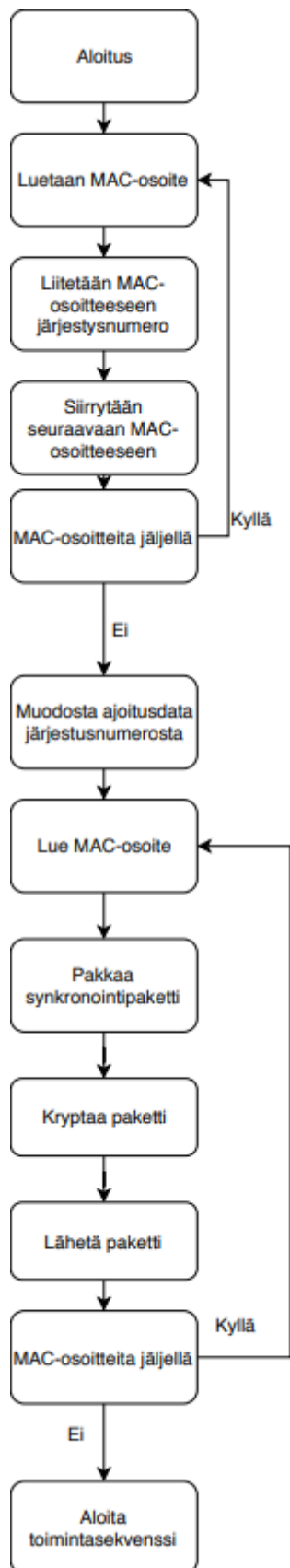
Liite 1. Päätelaitteen aloitussekvenssi



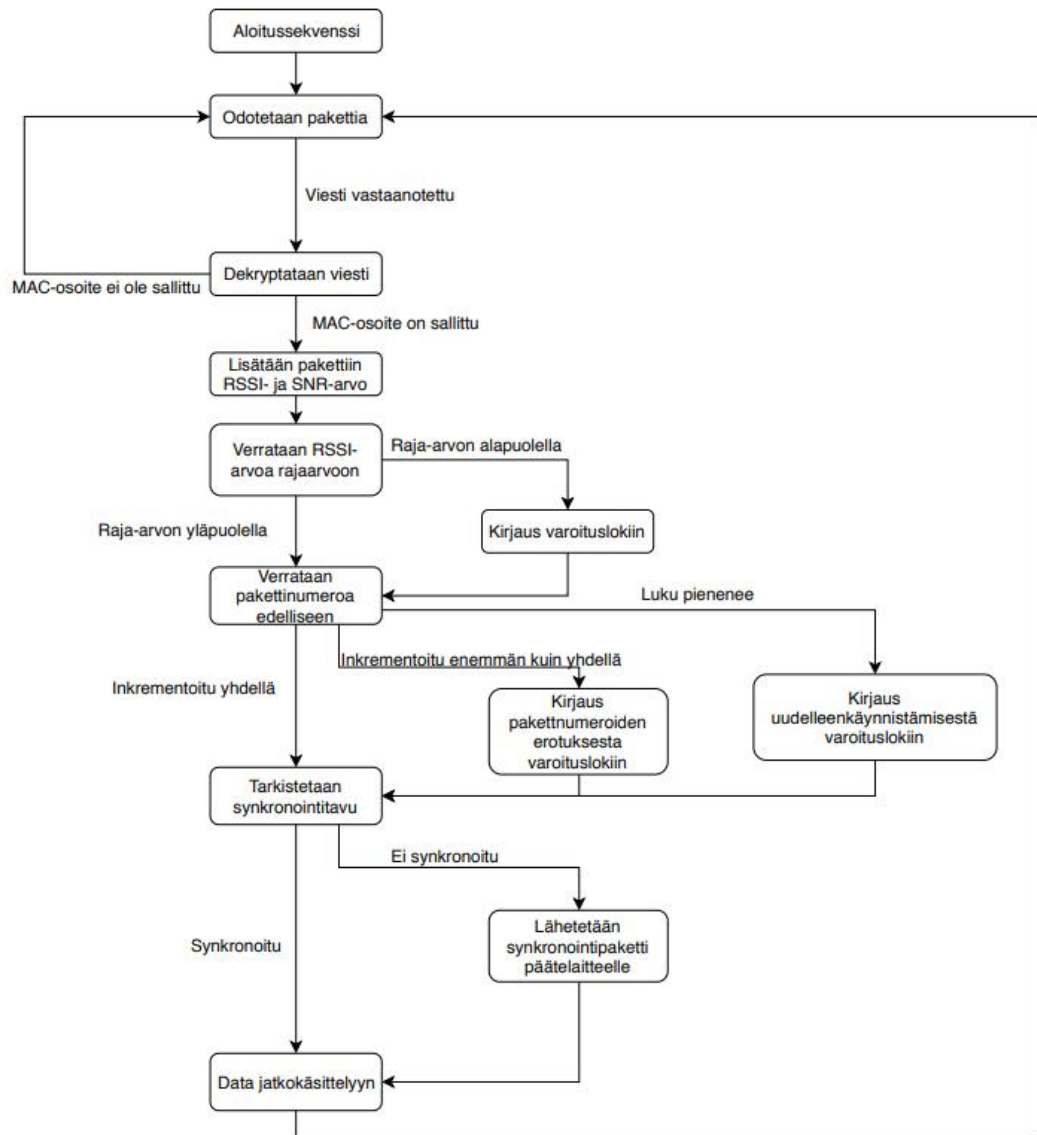
Liite 2. Päätelaitteen toimintasekvenssi



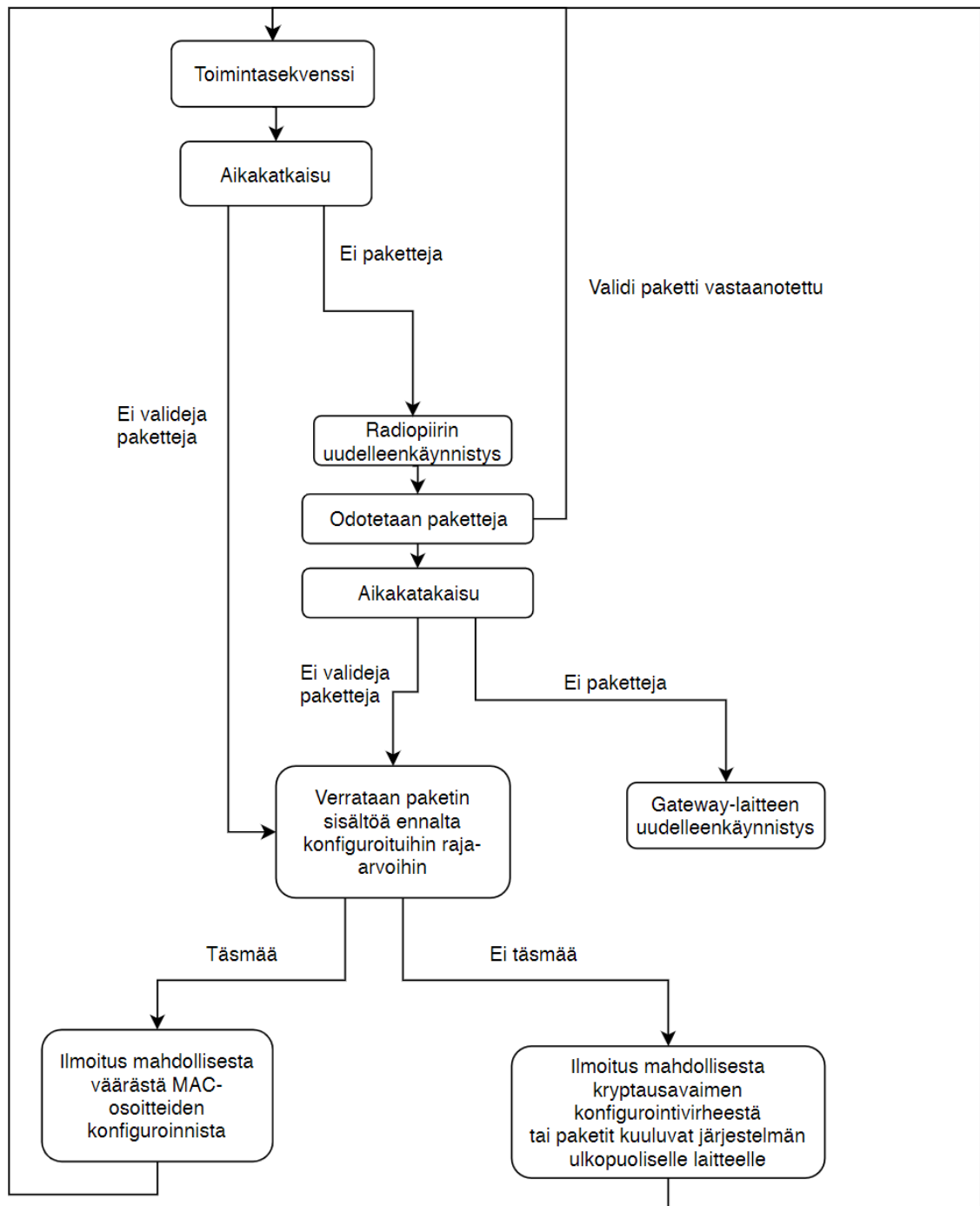
Liite 3. Gateway-laitteen aloitussekvenssi



Liite 4. Gateway-laitteen toimintasekvenssi



Liite 5. Gateway-laitteen virhesekvenssi



Liite 6. TAMK-pääkampuksen mittauspöytäkirja, SF-7

SF-arvo:	7	Kaistanleveys:	125000 Hz	Lähetysteho:	14 dBm
----------	---	----------------	-----------	--------------	--------

A-siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
3. kerros				
Eteläosa	-64	54	-73	10
Keskiosa	-90	56	-85	9,25
Pohjoisosa	-95	5,75	-101	0

2. kerros				
Eteläosa	-74	54	-77	9,25
Keskiosa	-89	60	-90	9,5
Pohjoisosa	-96	8,75	-96	3,75

1. kerros				
Eteläosa	-91	63	-94	7,75
Keskiosa	-94	3	-100	3,25
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-105	-3

0. kerros				
Eteläosa	Ei mitattu	Ei mitattu	Ei mitattu	Ei mitattu
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-104	-2,5
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-105	-3,75

B-Siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
6. Kerros				
Eteläosa	-93	4	-100	9
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta

3. kerros				
Eteläosa	-94	5,25	-99	8,5
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta

1. kerros				
Eteläosa	-93	6	-98	8,5
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta

C-Siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
3. kerros				
Eteläosa				
Keskiosa	-94	3	-106	6
Pohjoisosa	ei järkevä	11,5	-109	-0,5

2. kerros				
Eteläosa	-92	63	-92	9
Keskiosa	-94	3,75	-100	7
Pohjoisosa	-96	8	-103	0,25

1. kerros				
Eteläosa	-94	9	-98	5,25
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-103	0,5
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-105	-4,5

E-Siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)

2. kerros				
Itäosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-110	2
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-108	0,5
Länsiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-109	-4

1. kerros				
Itäosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-110	-5
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-112	-6
Länsiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-111	-6

Liite 7. TAMK-pääkampuksen mittauspöytäkirja, SF-12

SF-arvo:	12	Kaistanleveys:	125000 Hz	Lähetysteho:	14 dBm
----------	----	----------------	-----------	--------------	--------

A-siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
3. kerros				
Eteläosa	-65	55,75	-64	10,25
Keskiosa	-85	55,75	-84	9
Pohjoisosa	-96	2,25	-96	9,5

2. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	-64	55	-71	9,75
Keskiosa	-92	61,25	-90	9,25
Pohjoisosa	-102	60,25	-100	9

1. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	-100	63	-93	9,5
Keskiosa	-100	62	-103	8,5
Pohjoisosa	-103	5,75	-107	7

0. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	Ei mitattu	Ei mitattu	Ei mitattu	Ei mitattu
Keskiosa	-103	7,5	-108	7,25
Pohjoisosa	-103	9	-108	7,25

B-Siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
6. Kerros				
Eteläosa	-103	17,5	-113	1,25
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-114	-12,75
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta

3. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	-102	17,5	-112	4,25
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-116	-14
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta

1. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	-101	16	-107	7
Keskiosa	-101	18,25	-116	-1,5
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-117	-12,75

C-Siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
3. kerros				
Eteläosa	Ei mitattu	Ei mitattu	Ei mitattu	Ei mitattu
Keskiosa	-94	3	-106	6
Pohjoisosa	-100	8	-109	-0,5

2. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	-92	63	-92	9
Keskiosa	-94	3,75	-100	7
Pohjoisosa	-96	8	-103	0,25

1. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Eteläosa	-94	9	-98	5,25
Keskiosa	-98	8,75	-103	0,5
Pohjoisosa	-101	6,25	-105	-4,5

E-Siipi	Raspi/Dragino/RFM95		Arduino MKR1300/SX1276	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
2. kerros				
Itäosa	-102	10,5	-109	8,25
Keskiosa	-103	8	-111	4,25
Länsiosa	-104	20	-111	5,25

1. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Itäosa	-103	11,5	-111	6,75
Keskiosa	-103	8	-112	2,75
Länsiosa	-104	20	-113	5,25

F-Siipi	Raspberry Pi/Dragino		Arduino MKR1300	
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
2. kerros				
Pohjoisosa	-103	18,5	-116	-9,5
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-117	-14,5
Eteläosa	-102	23	-116	-8

1. kerros				
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Pohjoisosa	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta	Ei tulosta
Keskiosa	Ei tulosta	Ei tulosta	-117	12,75
Eteläosa	-104	20	-116	-11

Liite 8. Osa järjestelmätestauksen lokitiedostosta

	Tunnistetieto	Data	Laite ID	Paketin vastaanottoaika
3129	OE4EMS5F3375E7ZQCHKNOV8QN9	40.11	1041769	2019-04-07 10:32:41
3130	OE4EMSQTE9568T8HFFH3ZVD21T8	40.1	1041769	2019-04-07 10:33:41
3131	OE4EMTA4EX01W7ZA3SFPXD6CKB	40.12	1041769	2019-04-07 10:34:41
3132	OE4EMTWHREYDAMREEMWBYK7X6D	40.1	1041769	2019-04-07 10:35:41
3133	OE4EMVEWHQ4J9CZ1EP523X17WW	40.1	1041769	2019-04-07 10:36:41
3134	OE4EMW19EQXYW4VV98194H4F8	40.09	1041769	2019-04-07 10:37:41
3135	OE4EMWKMQCZK3ESBZVHFP40BDA	40.06	1041769	2019-04-07 10:38:42
3136	OE4EMX5Z57YGCT558CQ2SRR559	40.06	1041769	2019-04-07 10:39:42
3137	OE4EMXRAXM18KD0YR46PEM7AFM	40.08	1041769	2019-04-07 10:40:42
3138	OE4EMYANSA7EMZ7FPVMX09AHSF	40.0	1041769	2019-04-07 10:41:42
3139	OE4EMYX2HKYQ9FHHG4XQ7BT1QN	39.98	1041769	2019-04-07 10:42:42
3140	OE4EMZFDRP1XR6HYD9NJE9E4	39.89	1041769	2019-04-07 10:43:42
3141	OE4EN01R5MVTKP3T9D4X6433PT	39.91	1041769	2019-04-07 10:44:42
3142	OE4EN0M3T398WAXXTG2VHNXVJW	39.86	1041769	2019-04-07 10:45:43
3143	OE4EN16FKWPJ9WBCGXKD19M87N	39.7	1041769	2019-04-07 10:46:43
3144	OE4EN1RVR6GB8RY41R413NSB86	39.65	1041769	2019-04-07 10:47:43
3145	OE4EN2B7XGAG68MEYSEV7AA33F	39.56	1041769	2019-04-07 10:48:43
3146	OE4EN2XHVCXDSPF8DEF089QFQP	39.4	1041769	2019-04-07 10:49:43
3147	OE4EN3FXCJ4K0JMZN7ZRTWT872	39.5	1041769	2019-04-07 10:50:43
3148	OE4EN429W3FSPPG7K7B8TRNVRA	39.47	1041769	2019-04-07 10:51:44
3149	OE4EN4MNGQYWHE6AZHCX0Q1VFZ	39.5	1041769	2019-04-07 10:52:44
3150	OE4EN5714X3HM4YVJHFXXTAJH0	39.47	1041769	2019-04-07 10:53:44
3151	OE4EN5SBT2D209NM72FJMG8W6Y	39.54	1041769	2019-04-07 10:54:44
3152	OE4EN6BPW1QZRNQXC4GRPSYSF6	39.53	1041769	2019-04-07 10:55:44
3153	OE4EN6Y2DP12DFNG9MA5Y640GT	39.51	1041769	2019-04-07 10:56:44
3154	OE4EN7GEVZ3X3Q58B2C3F0RAWJ	39.6	1041769	2019-04-07 10:57:45
3155	OE4EN82V0F74MWKSATQQ91P1ED	39.6	1041769	2019-04-07 10:58:45
3156	OE4EN8N5KVTTCCYYNRRTFPH7Y1X	39.48	1041769	2019-04-07 10:59:45
3157	OE4EN97JKHEVG74VMVXYFX4PEV	39.46	1041769	2019-04-07 11:00:45
3158	OE4EN9SWVG6A677R1YN1S2J9X7	39.28	1041769	2019-04-07 11:01:45
3159	OE4ENAC8EX1AW22GGAQKHXCTXY	39.24	1041769	2019-04-07 11:02:45
3160	OE4ENAYMA0DDGMY6EBKJSJZWTS	39.24	1041769	2019-04-07 11:03:46
3161	OE4ENBGYKW2COCK59PE42NW6ZZ	39.19	1041769	2019-04-07 11:04:46
3162	OE4ENC3A6APZ1826BWWN1ZA0T7	39.26	1041769	2019-04-07 11:05:46
3163	OE4ENCNP38A6GRE5KNP1TCJ7EF	39.29	1041769	2019-04-07 11:06:46
3164	OE4END82YP51FWVECFMVYV5FBP	39.34	1041769	2019-04-07 11:07:46