

Jani Lehmonen

# Langattoman tiedonsiirron opetuskortti

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Kevät 2022



**KAMK • University  
of Applied Sciences**

## Tiivistelmä

**Tekijä(t):** Lehmonen Jani-Pekka

**Työn nimi:** Langattoman tiedonsiirron opetuskortti

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), tieto- ja viestintätekniikka

**Ohjaaja:** Asko Kinnunen

**Asiasanat:** LoRa, LoRaWAN, IoT, langaton tiedonsiirto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa KAMKille tutkimusta LoRa-teknologiasta sekä toteuttaa langaton järjestelmä käyttäen tätä teknologiaa. LoRa on pitkän kantaman radiotekniikka, joka on optimoitu vähän virtaa kuluttaville IoT-laitteille. Työssä tutkittiin, miten LoRa-radiomoduulia käytetään kahdella eri kontrollerilla: Raspberry Pillä sekä ESP32:lla. Molemmilla kontrollereilla käytettiin RAKWirelessin valmistamaa RAK811 LoRa -moduulia. KAMK tarjosi laitteiston tutkimusta varten.

Aineistona käytettiin laitteiden valmistajien tarjoamaa dokumentaatiota, mutta myös tarkempia tutkimuksia LoRa-teknologiasta. Suureksi tiedonlähteeksi paljastui The things network -sivusto ja sen sisältämät linkit oikeiden tutkijoiden syvällisiin tutkimuksiin.

Tutkimuksessa selvisi, kuinka helposti LoRa-moduulit saadaan käyttöön ja langaton tiedonsiirto saadaan toimintaan. Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että LoRa soveltuu hyvin IoT-laitteiden tiedonsiirtoratkaisuksi. LoRAWAN-verkkoa suunnitellessa tulee kuitenkin ottaa huomioon asianmukaiset viranomaismääräykset.

## **Abstract**

**Author(s):** Lehmonen Jani-Pekka

**Title of the Publication:** Main Title of the Publication and Possible Subtitle

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, ICT Engineering

**Supervisor:** Asko Kinnunen

**Keywords:** LoRa, LoRaWAN, IoT, wireless transmission

The purpose of the thesis was to provide KAMK with research on LoRa technology and to implement a wireless system using this technology. LoRa is a long-range radio technology optimized for low-power IoT devices. The study investigated how the LoRa radio module could be used with two different controllers: Raspberry Pi and ESP32. Both controllers used a RAK811 LoRa module manufactured by RAKWireless. KAMK provided the equipment for the research.

The material used was documentation provided by the equipment manufacturers, but also more detailed studies of LoRa technology were used. The Things Network website and its links to in-depth research by real researchers were revealed as a major source of information.

The study found out how easy it is to get LoRa modules up and running and to communicate wirelessly. In conclusion, LoRa is well suited as a data transfer solution for IoT devices. However, when planning the LoRAWAN network, the relevant official regulations must be considered.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	LoRa ja LoRaWAN .....	2
2.1	LoRa fyysinen kerros .....	2
2.1.1	Symboli .....	3
2.1.2	Modulaatio .....	3
2.1.3	Linkkibudjetti ja -marginaali .....	3
2.1.4	Chirp Spread Spectrum .....	4
2.1.5	Spreading Factor .....	5
2.1.6	Kaistanleveys .....	5
2.1.7	Virheenkorjauskerroin (code rate, CR) .....	6
2.1.8	LoRa-paketin kehys .....	7
2.2	LoRaWAN .....	8
2.2.1	LoRaWAN-laiteluokat .....	10
2.2.2	Tietoturva ja laiteaktiivointi .....	10
3	Toteutus .....	12
3.1	Digita (Gateway) .....	12
3.2	Päätelaitteet .....	13
3.2.1	RAK811 .....	13
3.2.2	RAK811 AT-komennot .....	13
3.2.3	Raspberry Pi 3B ja RAK811 LoRa Node piHat .....	16
3.2.4	Pythonkoodilla lähetys .....	19
3.2.5	ESP32 ja RAK811 Breakboard .....	21
4	Pohdinta .....	25
	Lähteet .....	26

## Liitteet

## Symboliluettelo

FSK	Frequency shift keying, taajuusavainnus, modulointimenetelmä
CSS	Chirp Spread Spectrum, modulointimenetelmä
PSK-modulaatio	Phase Shift Modulation, vaiheavainnus, modulointimenetelmä
AM-modulaatio	Amplitudimodulaatio, modulointimenetelmä
FM-modulaatio	Taajuusmodulaatio, modulointimenetelmä
CRC	Cyclic Redundancy check, syklinen redundanssitarkistus datapaketin eheyden tarkistukseen
MAC	Medium access control, siirtoyhteyskerros
LoRa	sanoista Long Range, modulointimenetelmä
WAN	sanoista Wide Area Network. Tiedonsiirtoverkko, joka peittää suuria maantieteellisiä alueita
IoT	sanoista Internet of Things, esineiden internetti
ISM-taajuusalue	sanoista Industrial, scientific, medical. Joukko radiotaajuusalueita, jotka ovat tarkoitettu käytettäväksi tieteellisen, teollisen, lääkinnällisen tai muun vastaavan sähkölaitteen kehittämistä varten.
fyysinen kerros	viittaa OSI-mallissa kuvattuun 1. kerrokseen
KAMK	Kajaanin Ammattikorkeakoulu
GPIO	sanoista General Purpose I/O. Yleiskäyttöinen, ohjelmoitava pinni mikrokontrollereissa ja -prosessoreissa.
UART	sanoista Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Laitteisto tai mikropiiri, joka muuttaa dataa rinnakkaismuotoisesta sarjamuotoiseksi ja päinvastoin.

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa uusi langattoman tiedonsiirron opetuskortti sekä kerätä tietoa opetusmateriaalia varten. Aihe valittiin 2021 talvella toimeksiantajien kanssa. Uuden opetuskortin on tarkoitus korvata Kajaanin ammattikorkeakoulun (KAMK) vanha opetusala.

Opetuskortin controlleriksi valittiin ESP32 sen monipuolisuuden takia. Kortin vaatimuksina olivat tuki LoRa-radiomodulille sekä liitännät ledille, kytkimille ja ns. 'vapaassa käytössä' oleville GPIO-pinneille.

Työ tehtiin yhteistyössä toimeksiantajien sekä toisen opiskelijan kanssa. Opetuskortin toteuttaminen jaettiin kahteen osaan, kahdelle opiskelijalle. Toisen opiskelijan osa keskittyi alustan suunnitteluun sekä kytkentöihin ja niihin liittyvään teoriaan. Tämä osa käsittelee LoRa-radiomodulin toimintaperiaatteita sekä siihen liittyviä käsitteitä. Työssä ei toteutettu omaa tukiasemaa LoRa-WAN-verkolle, vaan käytettiin kattavaa Digitan tarjoamaa palvelua, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 3.1.

Valitsin aiheen sen mielenkiintoisuuden takia. Ilman suurta aikaisempaa kokemusta radioteknologiasta työn tekeminen oli suurimmalta osin tutkimustyötä ja LoRa-tekniikkaan perehtymistä. Varmaa oli, että tätä tehdessäni pääsisi oppimaan paljon uutta.

Työssä valmistettu sovellus tulee Kajaanin ammattikorkeakoulun käyttöön. KAMKille haluttiin päivitetty versio vanhasta opetuskortista, jolla voisi halutessaan muodostaa LoRa-yhteyden. KAMK tarjosi tarvittavat ohjelmistot, laitteet sekä komponentit toteutusta ja tutkimusta varten.

Päällimmäisenä tavoitteena työllä oli luoda uutta opetusmateriaalia tuleville insinööreille, luoda uusi opetuskortti sekä oppia lisää LoRa-teknologiasta. Tämä sisälsi paljon perehtymistä radioteknologiaan, ja vielä tarkemmin LoRa-modulaatioon. Uutta opittua tietoa voisi sitten hyödyntää tulevaisuudessa työelämässä samantyyppisissä projekteissa.

## 2 LoRa ja LoRaWAN

LoRa Alliance -järjestön ylläpitämä LoRaWAN tiedonsiirtoprotokolla on käytössä useissa langattomissa tiedonsiirtojärjestelmissä, kuten IoT-sovelluksissa. LoRa-teknologia on optimoitu pienelle virran kulutukselle sekä pitkälle kantamalle, joten tästä johtuen se on erinomainen valinta keskipitkän kantaman radioverkkoihin, missä ei ole isoja tiedonsiirtovaatimuksia. Tässä osiossa käsitellään ensimmäisenä yleisiä käsitteitä liittyen LoRaan sekä langattomaan tiedonsiirtoon, minkä jälkeen keskitytään lähetykseen liittyviin ominaisuuksiin.

### 2.1 LoRa fyysinen kerros

LoRa on fyysisesti piirisirulle implementoitu modulaatiotekniikka, joka on optimoitu pitkän kantaman, alhaisen tehon sekä bittinopeuden langattomaan viestintään. LoRaWAN puolestaan tarkoittaa tiedonsiirtoprotokollaa, joka käyttää LoRa-modulaatiota fyysisessä kerroksessa. LoRaWAN on LPWAN (Low Power Wide Area Network) tarpeisiin luotu tiedonsiirtoprotokolla. Protokollan ja fyysisen tason laitteiden kehittämisestä vastaa LoRa Alliance -kattojärjestö. LoRa-teknologia sopii erinomaisesti sovelluksiin, joissa pitkä akun kesto ja pieni virrankulutus ovat keskeisempiä kuin nopea tiedonsiirto. [1.]

Monet vanhat langattomat tiedonsiirtojärjestelmät käyttävät modulointimenetelmänä FSK (Frequency Shift Key) taajuusavainmenetelmää fyysisessä kerroksessa, sillä se on erittäin tehokas modulaatoratkaisu energiankulutuksen kannalta. LoRa perustuu Chirp Spread Spectrum (CSS) hajapektritekniikkaan, jolla on samanlaisia vähävirtaisia ominaisuuksia kuin FSK-modulaatiolla, mutta mahdollistaen samalla huomattavasti laajemman kantaman. [1.]

LoRaWAN-taajuudet vaihtelevat eri alueellisten radio- tai sääntövaatimusten takia. Euroopassa LoRa toimii 863–870 MHz:n taajuusalueella. LoRaWAN-verkkojen rajoittava tekijä on suhteellisen pieni tiedonsiirtonopeus, joka tyypillisesti osuu välille 0,3–50 kb/s. [2.]

Fyysisellä tasolla datan nopeus riippuu modulaation kaistanleveydestä (bandwidth, BW), käytetävästä SF-arvosta (spreading factor, SF) sekä virheenkorjauskertoimesta (coding rate, CR). [3.]

### 2.1.1 Symboli

Radiomodulaatiossa lähetin voi käyttää vaiheen tai taajuuden muutoksia esittämään analogista tai digitaalista tietoa. Jokainen lähetetty bitti sisällytetään kanta-aallon tiettyyn tilaan riippuen modulaatiomenetelmästä. Tätä kanta-aallon tiettyä tilaa kutsutaan symboliksi. [4.]

Langattomassa tiedonsiirrossa käytetään usein termiä symbolitaajuus (symbol rate) ilmaisemaan tiedonsiirron nopeutta. Yksi symboli voi pitää sisällään yhden tai useamman bitin dataa. Symbolitaajuutta ei tule sekoittaa bittitaajuuteen, sillä symbolitaajuus on usein pienempi. Esimerkiksi jos haluttaisiin lähettää 4 bittiä per symboli, olisi bittitaajuus neljä kertaa suurempi kuin symbolitaajuus.

### 2.1.2 Modulaatio

Modulaatio tarkoittaa menetelmää, jolla haluttu data lisätään kanta-aaltoon muuntamalla jotakin sen ominaisuutta. Radiosignaalit moduloidaan lähetystä varten. Data lisätään korkeataajuiseen kanta-aaltoon, jonka avulla se voi edetä ilmakehässä. Vastaanottimessa signaali demoduloidaan takaisin alkuperäiseen muotoon. Nykyisin modulaatiomenetelmiä on analogisia analogisten viestien (esim. AM- ja FM-modulaatio) sekä digitaalisia digitaalisten viestien (esim. PSK- ja FSK-modulaatio) lähettämiseen. [5.]

### 2.1.3 Linkkibudjetti ja -marginaali

Langattomassa tiedonsiirrossa linkkibudjetti tarkoittaa laskelmaa kaikista tehonlisäyksistä ja -häviöistä, joita viestisignaali kokee kulkiessaan lähettimen ja vastaanottimen välillä [6]. Linkkibudjettiin vaikuttavat muun muassa lähetysteho, antennien vahvistus, välimatka sekä ympäristön luomat esteet, kuten seinät. Yksinkertaisimmillaan vastaanotettu teho voidaan laskea vastaavallisesti:

$$P_{vastaanotettu} = P_{lähetytys} - L_{häviöt} + G_{vahvistukset} \text{ (dBm)} \quad (1),$$

missä  $P_{vastaanotettu}$  on vastaanotettu teho,  $P_{lähetytys}$  on lähetykseen käytetty teho,  $L_{häviöt}$  on signaalin tehohäviöt ja  $G_{vahvistukset}$  on signaalin vahvistukset.

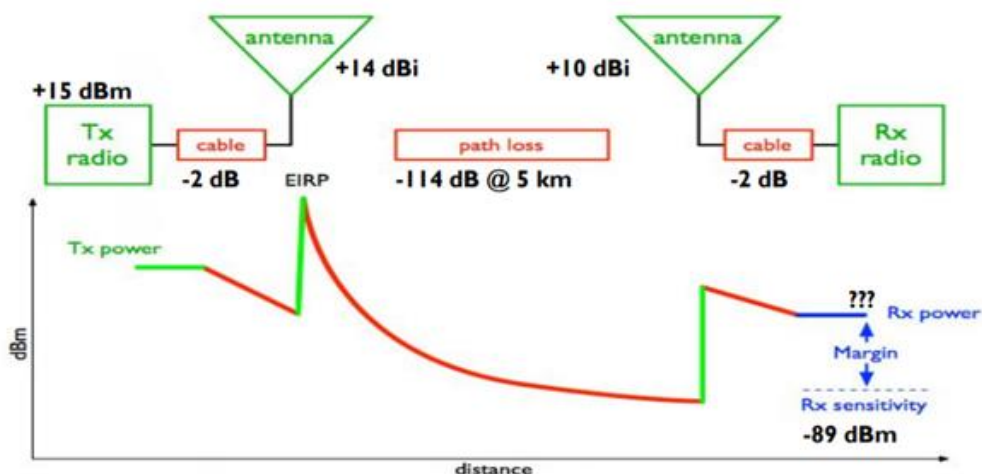


Linkkimarginaali on toinen tärkeä asia langattoman tiedonsiirron suunnittelussa. Linkkimarginaali määrittää langattoman linkin maksimihäviöt, jotka yhteys kestää menettämättä toiminnallisuuttaan. Linkkimarginaali on vastaanotetun tehon ja vastaanottimen sensitiivisyyden erotus. Linkkimarginaalin tulee olla vähintään yhtä suuri kuin vastaanottimen sensitiivisyys, jotta yhteys toimisi [6]. Asiaa voi kuvata vastaavanlaisella kaavalla:

$$\text{Linkkimarginaali} = R_{x_{teho}} - R_{x_{sens}} \text{ (dBm)} \quad (2),$$

missä  $R_{x_{teho}}$  on vastaanotettu teho ja  $R_{x_{sens}}$  on vastaanottimen sensitiivisyys.

Kuvassa 1 nähdään esimerkkikuvaus signaalin etenemisestä langattomassa järjestelmässä. Kuvassa esitetään, kuinka komponentit ja matka vahvistavat sekä heikentävät signaalin tehoa.



Kuva 1. Linkkibudjetti ja -marginaali esimerkkikuva [7.]

#### 2.1.4 Chirp Spread Spectrum

Chirp spread spectrum on hajaspektritekniikka, joka käyttää lineaarisia pulsseja, 'chirppejä' muuntamaan tietoa. Informaatio on enkoodattu lineaarisesti ajan mittaan muuntuvaan taajuuteen. 'Chirp' on sinimuotoinen taajuussignaali, joka kasvaa tai vähenee suhteessa aikaan. Lineaariset taajuuden muutokset jaetaan up- ja down-chirpeiksi. Kasvavan taajuuden vaihe on up-chirp ja vähenevän vaihe on down-chirp. CSS on erinomainen ratkaisu sovelluksille, joissa ei ole isoja virta- tai tiedonsiirtovaatimuksia. [8.]

CSS käyttää kokonaan sille annettua kaistanleveyttä signaalin lähettämiseen, mikä tekee siitä vastustuskykyisen kanavamelua kohtaan. Koska jokainen pulssi hyödyntää laajaa taajuusaluetta, monitie-etenemisen (multipath propagation; ilmiö, jossa radiosignaali kulkeutuu lähettimestä vastaanottimeen useita eri reittejä) aiheuttama häiriö ei ole ongelma [8]. Tyypillinen ongelma liikkuville radiosovelluksille on Doppler-ilmiö. CSS-modulaatoritarkaisu on hyvin vastustuskykyinen sen aiheuttamalle häiriölle [9].

### 2.1.5 Spreading Factor

LoRa-modulaation kantama ja suorituskyky on riippuvainen eri muuttujista, joista yksi on spreading factor. LoRan käyttämät SF-arvot ovat välillä 6–12 [10]. Kasvattamalla SF-arvoa saavutetaan suurempi kantama, mutta samalla pienennetään suurinta mahdollista lähetettävää datan määrää sekä kasvatetaan viestin lähetykseen kuluva aikaa [11]. SF kertoo suoraan, monta bittiä dataa on enkoodattu yhteen symboliin.

Arvo kertoo myös tiedonsiirrossa käytettävien lastujen (chip) määrän per datasymboli. Chippejä ei pidä sekoittaa aikaisemmin esiin tulleisiin lineaarisiin taajuuden muutoksiin eli chirpeihin. SF-arvo 6 on erikoistapaus siinä mielessä, että sen ollessa käytössä paketissa ei ole otsikkoa mukana ja yhteydelle pitää konfiguroida paketin pituus sekä CR-arvo. [3.]

Kun käytetään eri SF-arvoja, signaalit ovat ortogonaalisia. Tästä johtuen eri SF-arvolla moduloidut signaalit eivät aiheuta datapakettien törmäystä vastaanottimessa. Pakettien törmäys on mahdollista, jos ne saapuvat samaan aikaan, samalla SF-arvolla. [12.]

### 2.1.6 Kaistanleveys

Kaistanleveys (BW) on taajuusalue, jolla LoRa-chirpit toimivat ja nämä vaihtelevat valitun laitteen mukaan. Esimerkiksi työssä toteutetussa prototyypissä käytetty SX1276-radiopiiri pystyy 7,8–500 kHz:n kaistanleveyteen [13]. Semtechin mukaan yksi lastu (chip) lähetetään per kaistanleveyden hertsi eli lastujen lähetystaajuus  $R_c$  on sama kuin kaistanleveys  $BW$ . [14.]

$$R_c = BW \tag{3}$$

Symboliaika  $T_s$  voidaan laskea SF-arvon sekä kaistanleveyden avulla kaavalla (4). Symboliajan yksikkö on sekunti ja se kertoo ajan, mikä kuluu yhden symbolin lähettämiseen.

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

Symbolitaajuus  $R_s$  on symboliajan käänteisarvo ja sen yksikkö on symbolia per sekunti.

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

### 2.1.7 Virheenkorjauskerroin (code rate, CR)

LoRa-modulaatioon kuuluu myös muuttuja nimeltä virheenkorjauskerroin. Kertoimen kasvattaminen lisää kommunikaation luotettavuutta, mutta vaatii vastapainoksi enemmän aikaa paketin lähettämiseen. CR-kertoimen mahdolliset arvot ovat kokonaisluvut väliltä 1–4. CR-arvo voidaan ilmoittaa myös suoraan todellisena virheenkorjauskertoimena, jolloin se voi saada arvot: 4/5, 4/6, 4/7, 4/8. Todellinen virheenkorjauskerroin RC voidaan laskea kaavalla (6). [14.]

$$RC = \frac{4}{4+CR} \quad (6)$$

Semtech kertoo koko modulaation bittinopeuden  $R_b$  tulevan kaavasta (7).

$$R_b = SF * \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (7)$$

Koko modulaation bittinopeus virheenkorjauskertoimen avulla voidaan laskea kaavalla (8).

$$R_b = SF * \frac{\frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}}}}{BW} \quad (8)$$

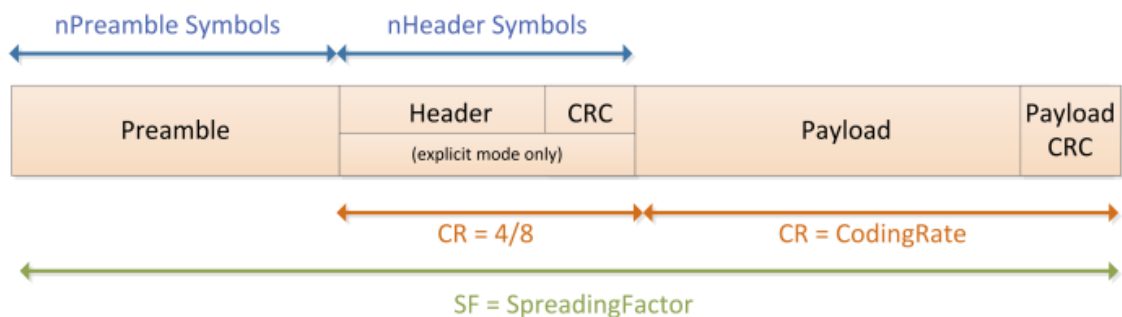
Käytetään esimerkkinä 500 kHz:n kaistanleveyttä, SF-arvoa 7 ja CR- arvoa 1. Tällöin saadaan tiedonsiirtonopeudeksi:

$$R_b = 7 * \frac{\frac{4}{\frac{4+1}{2^7}}}{500\,000} \approx 21875 \text{ (bps)}$$

### 2.1.8 LoRa-paketin kehys

LoRa-modulaatio ei vaadi mitään tietynlaista kehysformaattia, mutta Semtech Corporationin valmistamat radiopiirit käyttävät tiettyä formaattia. Jokainen paketti alkaa alustusosalla (preamble), joka pitää sisällään tietyn määrän up-chirppejä. Kahteen viimeiseen up-chirppiin enkoodataan verkon synkronointisana. Synkronointisana on yhden tavun mittainen ja sitä voidaan käyttää samoja taajuuksia käyttävien verkkojen erittelyyn. Laite ei kuuntele vastaanotettua viestiä loppuun, jos vastaanotettu synkronointisana ei ole sama kuin konfiguroitu synkronointisana. [3.]

Kuvassa 2 nähdään LoRa-paketin rakenne. Alustusosan jälkeen tulee kehysten otsikko (header), joka on valinnainen. Otsikon ollessa käytössä, sen tarkistukseen käytetään aina suurinta CR-arvoa 4 (todellinen virheenkorjauskerroin 4/8). Otsikko pitää sisällään CRC-tarkistuksen otsikon omalle datalle, mutta myös virheenkorjauskertoimen lopulle datalle, kuorman (payload) koko ja tieto kuorman valinnaisesta 16-bittisestä CRC-tarkistuksesta. Hyötykuorman (payload) pituus voi olla vain 1–255 tavua, koska se ilmoitetaan otsikossa yhdessä tavussa. [3.]



Kuva 2. LoRa-paketin rakenne [11.]

Semtechin mukaan alustusosan lähetykseen vaadittava aika voidaan laskea kaavasta 9.  $n_{\text{preamble}}$  ilmaisee laitteeseen konfiguroitujen alustussymbolien määrän ja  $T_s$  kertoo yhden symbolin lähetykseen tarvittavan ajan.

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4,25)T_s \quad (9)$$

Semtech on myös antanut kaavan hyötykuorman lähettämiseen tarvittavien symbolien määrän laskuun:

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max \left( \text{ceil} \left[ \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right] (CR + 4), 0 \right) \quad (10),$$

missä PL on hyötykuorman koko tavuissa (1...255), SF on hajautuskerroin (6...12), IH kertoo, onko otsikko käytössä (0 tai 1), DE kertoo low data rate -optimoinnin käytöstä (0 tai 1), CR on virheenkorjauskertoimen arvo ja CRC kertoo virhetarkistuksen tilan (0 tai 1).

Hyötykuorman lähetykseen kuluva aika saadaan kertomalla hyötykuorman lähetykseen tarvittavat symbolit  $n_{payload}$  symbolien lähetyksnopeudella. Tämä nähdään kaavasta (11).

$$T_{payload} = n_{payload} * T_s \quad (11)$$

Luonnollisesti koko paketin lähettämiseen tarvittava aika  $T_{packet}$  on kaavoista (9) ja (11) saatujen arvojen summa.

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (12)$$

Esimerkiksi lasketaan tarvittava symbolien määrä 16 tavun kokoiselle kuormalle kaavalla (10). SF-arvoksi asetetaan 8, CR-arvoksi 1, otsikko sekä CRC-tarkistus ovat käytössä eli saavat arvon 1.

$$n_{payload} = 8 + \max\left(\text{ceil}\left[\frac{8*16-4*8+28+16*1-20*1}{4*8}\right](1+4), 0\right) = 26,75$$

Kaavan (10) tulos pyöristetään oikeasti seuraavaan kokonaislukuun eli 27. Seuraavaksi voidaan laskea alustusosan lähettämiseen tarvittavien symbolien määrä. Asetetaan  $n_{preamble}$  arvoksi 6.

$$n_{symbols} = 6 + 4,25 = 10,25$$

Yhden symbolin lähetykseen tarvittava aika  $T_s$  saadaan kaavasta (4). Käytetään SF-arvona lukua 8 ja kaistanleveytenä 500 kHz.

$$T_s = \frac{2^8}{500\,000} = 0,000512(s)$$

Nyt voidaan laskea koko datapaketin lähetykseen kuluva aika soveltamalla kaavoja (11) ja (12).

$$T_{packet} = (10,25 + 26,75) * 0,000512 = 0,018944$$

## 2.2 LoRaWAN

LoRaWAN on MAC-protokolla, joka on kehitetty LoRan päälle. Suomessa LoRaWAN käyttää EU863-870 MHz ISM -taajuuskaistaa. Taajuuskaista on vapaassa käytössä, mutta siihen kuuluu päätelaitteille asetetut rajoitukset, kuten rajoitettu 1 % duty cycle ja +14 dBm lähetysteho. [15.]

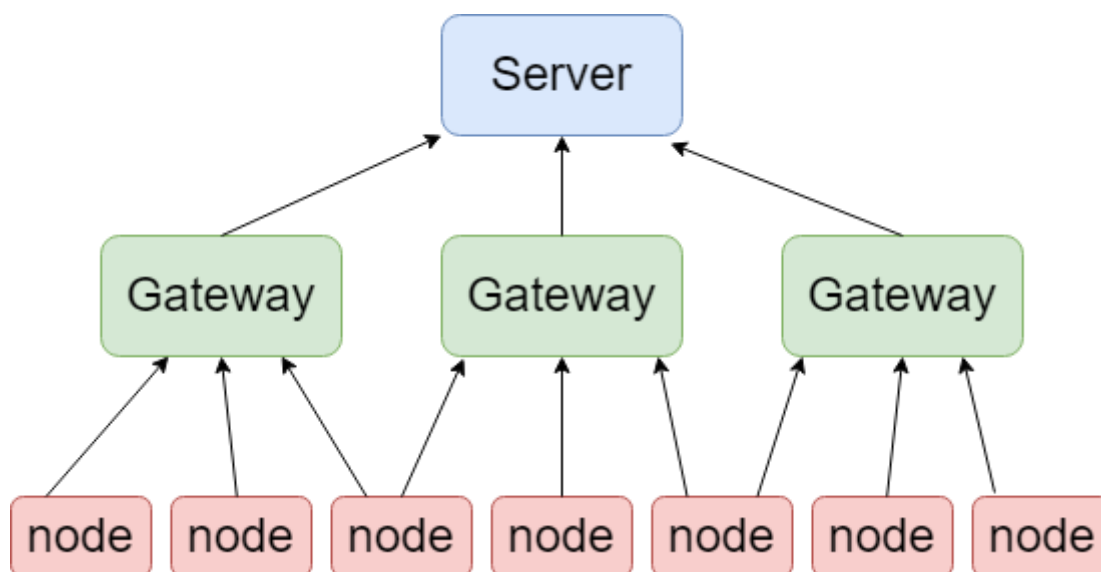
Jos laite lähettää jotain kanavalla kahden aikayksikön ajan kymmenen aikayksikön välein, laitteen duty cycle on 20 %. Jos laite käyttää useampaa kanavaa lähetykseen, vaikuttavat ne myös samaan malliin duty cycleen. Esimerkiksi, jos käytetään kolmea eri kanavaa kahden aikayksikön verran kymmenen aikayksikön välein, on duty cycle silloin 60 %. [16.]

Käytännön esimerkki 1 % duty cyclestä: jos yhden paketin ToA (time on air) on 530 ms, niin laitteen tulee odottaa kaavasta (13) saadun tuloksen verran, ennen seuraavan paketin lähetystä.

$$99 * 530ms = 52\,470\,ms = 52,47s \quad (13)$$

Topologian valitsemisella on iso rooli virran kulutuksen sekä verkon kapasiteetin kannalta. Jos käyttöön otetaan mesh-verkko, päätelaitteiden tarvitsee 'herätä' useammin ja välittää eteenpäin muiden päätelaitteiden dataa. Tähtitopologiassa päätelaitteet voivat toimia asynkronisesti, minkä takia lähetykseen kuluva aika on pienempi. [1.]

Tyypillinen LoRaWAN-verkko koostuu päätelaitteista (end device, node), tukiasemista (gateway) sekä verkkopalvelimesta (server). Päätelaitteet keräävät halutun datan ja lähettävät sen LoRa-tukiasemaan. Tukiasemat ovat yksinkertaisuudessaan vain kulkuteitä itse verkkopalvelimelle. Lähettimet eivät ole lukittuja käyttämään vain tiettyjä gateway-laitteita. Palvelimella data kerätään, analysoidaan ja esitetään käyttäjälle halutussa muodossa. Tällaista topologiaa kutsutaan nimellä 'star-of-stars'. Kuvassa 3 nähdään esimerkkikuva star-of-stars topologiasta. [17.]



Kuva 3. Star-of-stars -topologia LoRaWAN-verkolle

### 2.2.1 LoRaWAN-laiteluokat

LoRaWAN-päätelaitteet jaetaan kolmeen luokkaan: A, B ja C. Luokka A on kaikkien LoRaWAN-verkkoon kytkettävien laitteiden oletusluokka eli kaikkien päätelaitteiden on täytettävä vähintään luokan A vaatimukset. Luokassa A kommunikaatio laitteiden välillä on kaksisuuntaista, mutta vain tietyn aikaikkunan sisällä. Päätelaitteet voivat vastaanottaa viestejä pienen hetken, kun ne ovat lähettäneet oman datansa. Luokka A on LoRaWAN-spesifikaatiossa määritellyistä päätelaiteluokista pienitehoisin. [1.]

B-luokassa päätelaitteiden toimintaan on lisätty useampia vastaanottoikkunoita. Serveri lähettää synkronointisignaalin pitääkseen päätelaitteet aikataulussa [1]. Laitteiden herättäminen useammin kuluttaa luonnollisesti virtaa enemmän, mutta kulutuksen pitäisi olla tarpeeksi pientä akkukäyttöisille sovelluksille. [2.]

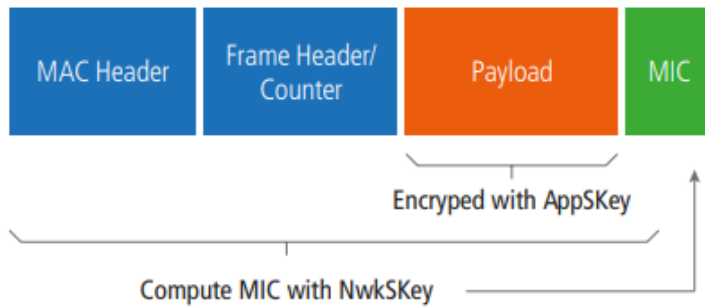
C-luokan laitteiden vastaanottoikkuna on auki melkein koko ajan ja kiinni vain lähettäessä dataa. Tämän luokan laitteiden tehon kulutus on suurin kaikista LoRaWAN-päätelaiteluokista, jopa 50mW. Luokan päätelaitteita suositellaan sovelluksille, joissa on pääsy verkkovirtaan. Luokan vaihtaminen A ja C välillä on mahdollista ja sitä suositellaankin akkukäyttöisille sovelluksille varsinkin 'over-the-air' -ohjelmistopäivitysten tekoon. [1.]

### 2.2.2 Tietoturva ja laiteaktivointi

LoRaWAN-verkoissa käytetään kahta tietoturvan tasoa: yksi sovelluksille ja yksi verkolle. 128-bit-tinen istuntoavain (Network Session Key, NwkSKey) pitää huolen päätelaitteen aitoudesta, kun taas 128-bittinen sovellusavain (AppKey) hoitaa sovellustietojen salauksen. AES-algoritmia (Advanced Encryption Standard) käytetään avainten vaihdossa [2]. Lisäksi laitteella sekä sovelluksella on 64-bittinen IEEE EUI64-tunniste (DevEUI ja AppEUI), joita hyödynnetään pakettien varmistuksessa palvelimen ja päätteiden välillä. Molempien tasojen implementointi mahdollistaa verkon luonnin, jossa operaattorilla ei ole pääsyä päätelaitteiden lähettämään dataan. [18.]

Jokainen päätelaite pitää rekisteröidä verkolle ennen viestien lähettämistä tai vastaanottamista. Tätä prosessia kutsutaan aktivoinniksi. Laitteet pystytään aktivoimaan kahdella tavalla. Over-the-Air Activation (OTAA) -liittymistapa edellyttää MIC-todistetta (Message Integrity Code) AppKeystä päätelaitteelta sekä serveriltä. Todiste luodaan AppKeystä AES-CMAC-algoritmilla (Cipher-based message authentication code), kun päätelaite lähettää liittymispyynnön serverille. Tämän jälkeen

luodaan kaksi uutta istuntoavainta; NwksKey ja AppSKey. NwksKey salaa koko lähetyksen datapaketin jättäen MIC-tunnisteen näkyväksi. AppSKey salaa datapaketin kuorman. AppKey ja AppSKey pystytään piilottamaan verkon operaattorilta siten, että pakettia ei voi purkaa ennen kuin se on saapunut sovelluksen palvelimelle. Kuvassa 4 nähdään kuvaus LoRaWAN-paketin salauksista ja salauksen sijainnista paketissa. [18.]



Kuva 4. LoRaWAN-paketti [18.]

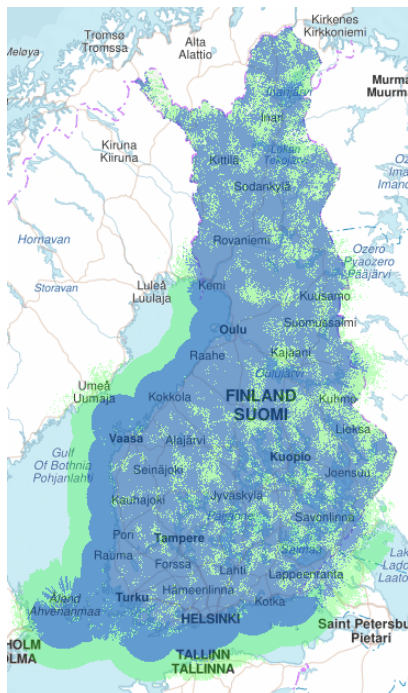


### 3 Toteutus

Projektissa ei toteutettu omaa LoRaWAN-tukiasemaa (gateway), vaan käytettiin Digitan tarjoamaa palvelua. Digitan tukiasemaan yhteydenottaminen toimii samoin periaattein kuin muihinkin tukiasemiin, eli konfiguroimalla yhteyteen vaadittavat parametrit oikein. Tässä osiossa käydään läpi radiomoduulin RAK811 käyttöönottoa kahdella eri implementaatiolla. Toinen tapa hyödyntää Raspberry Pi:lle tarkoitettua laajennuskorttia ja toinen tapa käyttää hyväkseen ESP32:n UART-väylää sekä RAK811 Breakboardia.

#### 3.1 Digita (Gateway)

Digita on suomalainen viestintäverkkoyhtiö, joka tarjoaa muun muassa LoRaWAN kuuluvuuden lähes koko Suomen alueelle. Kuva 5 perustuu tietokoneella luotuun malliin ja toimii Digitan arviona verkon peitosta. Verkon kuuluvuuteen vaikuttaa monet paikalliset tekijät, minkä takia Digita ei voi taata verkon kuuluvuutta kaikissa kartan osoittamissa sijainneissa. Kartassa vihreä väri havainnollistaa ulkokuuluvuutta ja sininen väri sisäkuuluvuutta. [19.]



Kuva 5. Arvio Digitan LoRaWAN-verkon peitosta [19.]

Projektissa käytettiin Digtan palvelua toimeksiantajan käskystä. Palvelu toimii siten, että käyttäjä järjestelmänvalvojan oikeuksilla konfiguroi tarvittavat laitetiedot ja parametrit Digtan ohjauspaneeliin. Konfiguroinnin jälkeen laiteyhteyttä pääseekin testaamaan päätelaitteella.

### 3.2 Päätelaitteet

Kuten aiemmin mainittiin, työssä toteutettiin kaksi LoRaWAN-päätelaitetta. Tässä osiossa käydään läpi kummankin laitteen käyttöönotto ja siihen vaadittavat kytkennät sekä koodit.

#### 3.2.1 RAK811

RAK811 on RAKWirelessin valmistama LoRa-moduuli. RAKwireless valmistaa LoRaWAN-teknoologiaan liittyviä laitteita, kuten LoRaWAN-päätelaitteita, tukiasemia sekä valmiiksi koottuja paketteja LoRa-kehittäjille. RAK811-moduulia käytetään monissa laajennuskorteissa. Moduulin kanssa kommunikoidaan UART-väylän kautta lähetetyillä AT-komennoilla, joita käydään läpi seuraavissa kappaleissa. [20.]

RAK811 perustuu Semtechin SX1276-radiopiiriin. Valmistajan ilmoittama teoreettinen maksimikantama on 15 km avoimilla alueilla ja 2 km urbaaneilla alueilla. Moduuli tukee LoRaWAN 1.0.2 -spesifikaatiota. [20.]

#### 3.2.2 RAK811 AT-komennot

Tässä kappaleessa listataan työssä käytetyn radiomoduurin tukemat AT-komennot. Toteutetun prototyypin kannalta ei ole tarpeellista käydä kaikkia komentoja tarkasti läpi, joten tutkimuksessa keskityttiin vain osaan komennoista. Alla olevan listan komennot on kopioitu Raspberry Pin terminaalista. Vastaavanlaisen listan voi löytää myös valmistajan tarjoamasta dokumentista nimeltä "RAK811 Module AT Command Manual", mutta myös esimerkiksi The things networkin sivuilta.

Lista AT-Komennoista:

Device AT commands:

```
at+version
at+help
at+set_config=device:restart
at+set_config=device:sleep:X
at+get_config=device:status
at+set_config=device:uart:X:Y
at+set_config=device:uart_mode:X:Y
at+send=uart:X:YYY
at+set_config=device:gpio:X:Y
at+get_config=device:gpio:X
at+get_config=device:adc:X
```

LoRaWAN AT commands:

```
at+set_config=lora:default_parameters
at+join
at+send=lora:X:YYY
at+set_config=lora:region:XXX
at+get_config=lora:channel
at+set_config=lora:dev_eui:XXXX
at+set_config=lora:app_eui:XXXX
at+set_config=lora:app_key:XXXX
at+set_config=lora:dev_addr:XXXX
at+set_config=lora:apps_key:XXXX
at+set_config=lora:nwks_key:XXXX
at+set_config=lora:multicastenable:X
at+set_config=lora:multicast_dev_addr:XXXX
at+set_config=lora:multicast_apps_key:XXXX
at+set_config=lora:multicast_nwks_key:XXXX
at+set_config=lora:join_mode:X
at+set_config=lora:work_mode:X
at+set_config=lora:ch_mask:X:Y
at+set_config=lora:class:X
at+set_config=lora:confirm:X
at+set_config=lora:dr:X
at+set_config=lora:tx_power:X
at+set_config=lora:adr:X
at+get_config=lora:status
at+set_config=lora:dutycycle_enable:X
at+set_config=lora:send_repeat_cnt:X
```

LoRa P2P AT commands:

```
at+set_config=lorap2p:XXX:Y:Z:A:B:C
at+set_config=lorap2p:transfer_mode:X
at+send=lorap2p:XXX
```

Työssä toteutetut LoRaWAN-päätelaitteet käyttivät OTAA-tapaa liittymistapaa. Tästä johtuen keskeisimmät komennot liittyvät laitteen sekä verkkoon liittymiseen vaadittavien parametrien konfigurointiin. Koska käytetään OTAA-tapaa, päätelaitteeseen tarvitsee konfiguroida avaimet APP\_EUI, APP\_KEY ja DEV\_EUI. Nämä avaimet tulee myös konfiguroida tukiasemaan, jotta yhteys toimisi. Esimerkkejä komentojen käytöstä nähdään kappaleissa 3.2.3–3.2.5. Seuraavaksi käydään läpi oleellisia komentoja, joilla voidaan tarkastella laitteen tilaa sekä lähetykseen liittyvien parametrien tilaa. Alla olevassa taulukossa 1 listataan AT-komentoja, joilla voidaan tarkastella laitteen tilaa. Taulukko 2 listaa laitekonfiguroinnin kannalta tärkeät komennot.

Taulukko 1. Laitteen tilan tarkistuksen kannalta keskeisiä komentoja ja niiden kuvauksia

Komento	Kuvaus
at+help	palauttaa moduulin käytössä olevat AT-komennot
at+version	palauttaa moduulin ohjelmistoversion
at+set_config=device:restart	käynnistää moduulin uudestaan
at+get_config=device:status	palauttaa moduulin komponenttien tiedot
at+get_config=lora:status	palauttaa konfiguroidut LoRa-parametrit, kuten laiteavaimet, work mode jne.

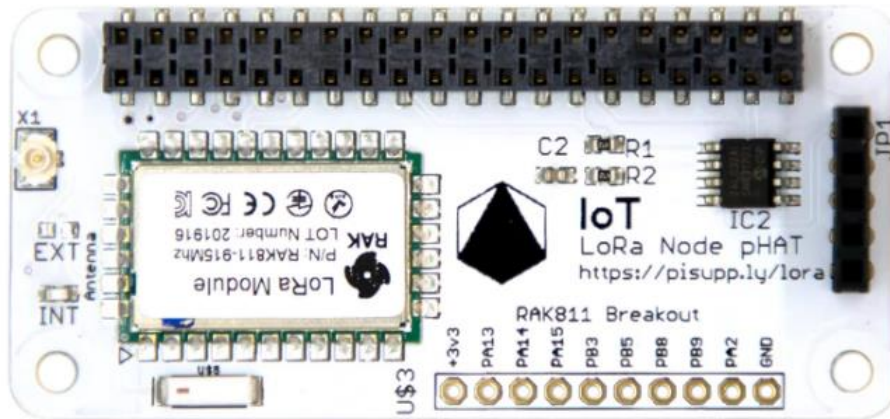
Taulukko 2. LoRan konfigurointi komennot ja niiden kuvaukset

Komento	Kuvaus
at+set_config=lora:region:XXX	Asettaa LoRa-laitteen alueen.  Parametrit: EU868 EU433, CN470, IN865, EU868, AU915, US915, KR920, AS923
at+set_config=lora:work_mode:X	Asettaa LoRa-laitteen work moden.  0: LoRaWAN, 1: LoRaP2P, 2: Test Mode

at+set_config=lora:join_mode:X	Asettaa LoRaWAN-liittymistavan  0: OTAA, 1: ABP
at+set_config=lora:class:X	Asettaa LoRa-laiteluokan  0: Luokka A, 1: Luokka B, 2: Luokka C
at+set_config=lora:dr:X	Asettaa LoRa-noodin DR-arvon  0–5, tarkempi kuvailu löytyy dokumentista LoRaWAN® Specification v1.0.2.
at+set_config=lora:dev_eui:XXXX	Asettaa DevEUI-avaimen OTAA-yhteydelle
at+set_config=lora:app_eui:XXXX	Asettaa AppEUI-avaimen OTAA-yhteydelle
at+set_config=lora:app_key:XXXX	Asettaa AppKey-avaimen OTAA-yhteydelle

### 3.2.3 Raspberry Pi 3B ja RAK811 LoRa Node piHat

Päätelaitteen kasaaminen alkoi asentamalla käyttöjärjestelmä lähteen [21] mukaan. Käyttöjärjestelmän asennuksen jälkeen ladattiin tarvittavat työkalut ja kirjastot. RAK811 LoRa-noden valmistajan sivuilla tarjottua kirjastoa [22] voi käyttää Raspberry pin terminaalissa ajamalla komentoja yksi kerrallaan käsin tai pythonkoodin avulla. LoRa Node on suunniteltu liitettäväksi suoraan Raspberry Pi:n GPIO-pinnien päälle. Kuvassa 6 nähdään LoRa Node pHAT päältä. [23.]



Kuva 6. RAK811 IoT LoRa Node pHAT [23.]

PyRak811-kirjasto käyttää python3 versiota. Python3 asennettiin Raspberry Pi:hin terminaalissa komennolla: `sudo apt-get install python3-pip`

Itse kirjasto asennettiin komennolla: `sudo pip3 install rak811`

Kirjaston asennuksen jälkeen voidaan testata sitä esimerkiksi komennolla: `rak811v3 --help`

```

pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi:~ $ rak811v3 --help
Usage: rak811v3 [OPTIONS] COMMAND [ARGS]...

  Command line interface for the RAK811 module.

Options:
  -v, --verbose  Verbose mode
  -d, --debug    Debug mode
  --version      Show the version and exit.
  --help        Show this message and exit.

Commands:
  get-config  Execute get_config RAK811 command.
  hard-reset  Hardware reset of the module.
  help       Print module help.
  join       Join the configured network.
  receive-p2p  Get LoraP2P message.
  run        Exit boot mode and enter normal mode.
  send       Send LoRaWan message and check for downlink.
  send-p2p   Send LoRa P2P message.
  send-uart  Send data to UART.
  set-config  Execute set_config RAK811 command.
  version    Get module version.
pi@raspberrypi:~ $

```

Kuva 7. Kuvakaappaus Raspberry Pin terminaalista

Kun kirjaston toimivuus on testattu, voidaan alkaa testaamaan LoRaWAN-verkon yhteyttä. Tätä ennen on kuitenkin konfiguroitava oikeat parametrit päätelaitteeseen sekä tukiasemaan. Seuraavaksi käydään läpi, kuinka LoRa piHat:in konfigurointi voidaan tehdä Raspberryn terminaalissa.

Käyttämällä `-v` lippua komentojen ajossa, saadaan tietoa myös terminaaliin komennon suoriutumisesta. Kuva 8 esittää, kuinka saadaan konfiguroitua LoRa piHat Raspberryn terminaalissa. Kuvassa asetetaan lähetyksen kannalta oleelliset parametrit ja lähetetään 'Hello\_World!' payload pakeettina.

```

pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v set-config lora:region:EU868
Configuration done
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v set-config lora:join_mode:0
Configuration done
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v set-config lora:dev_eui:60C5A8FFFE7985D2
Configuration done
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v set-config lora:app_eui:BEBBE7F0674EC04E
Configuration done
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v set-config lora:app_key:60C5A8FFFE7985D2BEBBE7F0674EC04E
Configuration done
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v set-config lora:dr:0
Configuration done
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v join
RAK811 response error 99: LoRa join failed
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v join
RAK811 response error 99: LoRa join failed
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v join
Joined!
pi@raspberrypi:~$ rak811v3 -v send Hello_World!
Message sent.
Send confirmed.
RSSI: -113
SNR: -3
pi@raspberrypi:~$

```

Kuva 8. LoRa piHat -konfigurointiesimerkki terminaalissa.

Kuten kuvasta 8 huomataan, verkkoon liittymistä joudutaan joskus kokeilemaan useampaan otteeseen ennen onnistumista. Tämä johtunee alhaisesta yhteyden tasosta päätelaitteen ja tukiaseman välillä.

LoRa-paketit näkyvät heksapaketteina gatewayn ohjauspaneelissa. Kuvassa 9 nähdään paljon tietoa gatewaylle saapuneesta datapaketista: kuorman data heksalukuna, paketin koko tavuina, lähetyksen 'lentoaika', lähetyksen taajuus, RSSI ja SNR sekä aikaleimat.

data 2022-04-24 11:11:04.766 2022-04-24 14:11:04.766 E00220D7 60C5A8FFFE7985D2 1 0 -113.0 -15.0 -128.13... SF12 G2 LCR

Mtype: UnconfirmedDataUp  
 Flags: ADR : 1, ADRAckReq : 0, ACK : 0  
 Mac (hex): -  
 Data (hex): 48656c63665f576f726c6421 [not encrypted]  
 Driver metadata: model: semtech:lr1110:1, application: semtech:lr1110:1  
 Data size (bytes): 12  
 AirTime (s): 1.482752

LRR	RSSI	SNR	ESP	CHAINS timestamp {GPS_RADIO}-	ISM Band	RF Region	GWID	GWToken	DLAllowed	ForeignOperatorNetID	ForeignOperatorNSID
FF01A331	-113.0	-15.0	-128.13521	CHAIN[0]:2022-04-24T11:11:04.7668749722 {GPS_RADIO}	EU 863-870MHz	CUSTOM_Digita_EU868_8chann.7084					
FF0194EA	-112.0	-18.0	-130.0683	CHAIN[0]:2022-04-24T11:11:04.766879483Z {GPS_RADIO}	EU 863-870MHz	CUSTOM_Digita_EU868_8chann.7084					

Device [Lat (sol): - Lat: 64.21699579999999 Long (sol): - Long: 27.7135032 Loc radius: - Loc time: - Alt: - Alt radius: - Acc: - North Velocity: - East Velocity: - ]  
 Reporting Status: On time  
 ISM Band: EU 863-870MHz  
 RF Region: CUSTOM\_Digita\_EU868\_8chann.7084  
 AS ID: TWA\_default-as-supplier.16.AS,TWA\_default-as-supplier.22.AS,TWA\_default-as-supplier.19.AS  
 Frequency (MHz): 867.9

Kuva 9. Kuvakaappaus gatewayn ohjauspaneelistista.

Paketin kuorman oikeellisuus voidaan tässä tapauksessa tarkistaa yksinkertaisella 'HEX to ASCII' -muuntimella, joita löytyy ilmaisena Googlestä. Kuvassa 10 nähdään muunnos ASCII-muotoon.

The image shows a web-based HEX to ASCII converter. At the top, there are two dropdown menus: 'From' (set to 'Hexadecimal') and 'To' (set to 'Text'). Below these are two buttons: 'Open File' and a search icon. A text area labeled 'Paste hex numbers or drop file' contains the hex string '48656c6c66f5f576f726c6421'. Below the text area is a 'Character encoding' dropdown set to 'ASCII'. At the bottom, there are three buttons: 'Convert' (green), 'Reset', and 'Swap'. The output area at the bottom shows the result 'Hello\_World!'.

Kuva 10. LoRa-viestin data muunnettuna ASCII-muotoon [24.]

### 3.2.4 Pythonkoodilla lähetys

Yksinkertaisimmillaan lähetys RAK811:lla lähetys voisi näyttää koodina taulukon 3 tapaiselta;

Taulukko 3. Esimerkki pythonkoodista LoRa-nodelle.

```
#!/usr/bin/env python3

from rak811.rak811_v3 import Rak811

lora = Rak811()

lora.hard_reset()

lora.set_config('lora:join_mode:0')
```



```

lora.set_config('lora:region:EU868')

lora.set_config('lora:dev_eui:60C5A8FFFE7985D2')

lora.set_config('lora:app_eui:BEBBE7F0674EC04E')

lora.set_config('lora:app_key:60C5A8FFFE7985D2BEBBE7F0674EC04E')

lora.join()

lora.set_config('lora:dr:0')

lora.send('Hello_World!')

lora.close()

```

Taulukossa 3 esitettyssä koodissa ensimmäisenä kutsutaan RAK811-kirjastoa ja luodaan lora-niminen olio. Tämän jälkeen asetetaan parametrit lähetystä varten ja liitytään LoRaWAN-verkkoon. Liittymisen jälkeen lähetetään teksti 'Hello\_World!' sekä suljetaan LoRa-yhteys. Lähetys muuttuu hiukan monimutkaisemmaksi lähettäessä muuta kuin tekstiä eli esimerkiksi numerodataa. Tämä johtuu siitä, että laitteiden väliset viestit luetaan MSB (sanoista Most Significant Bit) edellä ja verkkokerroksen viestit LSB (sanoista Least Significant Bit) edellä. Taulukossa 4 nähdään esimerkki, miten voidaan ratkaista tämä pakkaamalla pythonkoodissa.

Taulukko 4. Esimerkki bittimuunnoksesta LoRa-lähetystä varten.

```

#!/usr/bin/env python3

import datetime
import calendar
import struct
from random import randrange
from rak811.rak811_v3 import Rak811

def randomData():
    print("Collecting random values")
    Temp = randrange(25)
    print ("Random Value", Temp)
    date_time = datetime.datetime.utcnow()
    UTC = (calendar.timegm(date_time.utctimetuple()))
    # Mittaustyyppi
    measure_type = 51

```

```

# Datapaketin pituus tavuina
len = 4
# Tulostetaan lähetettävä datapaketti heksana
print(hex(UTC), hex(measure_type), hex(len), hex(Temp))
# bittimuutos MSB -> LSB
# https://docs.python.org/3/library/struct.html
# < on little-endian
# l on unsigned int, b on signed char
data = struct.pack("<lbbl", UTC, measure_type, len, Temp);
return data

#####
lora = Rak811()

lora.hard_reset()
lora.set_config('lora:join_mode:0')
lora.set_config('lora:region:EU868')

lora.set_config('lora:dev_eui:60C5A8FFFE7985D2')
lora.set_config('lora:app_eui:BEBBE7F0674EC04E')
lora.set_config('lora:app_key:60C5A8FFFE7985D2BEBBE7F0674EC04E')

lora.join()
lora.set_config('lora:dr:0')

data = randomData()

lora.send(data)

print('Data Sent!')

lora.close()

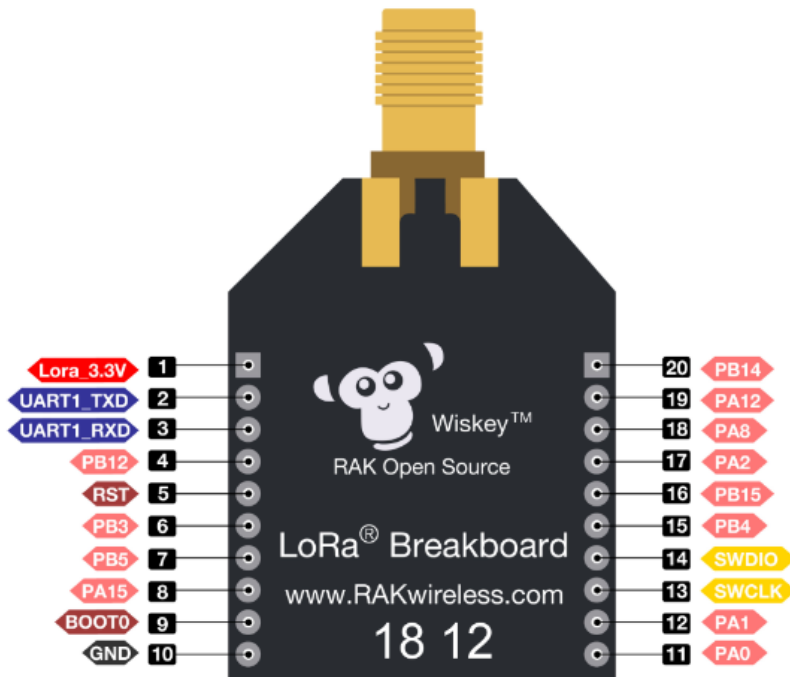
```

Taulukossa 4 esitetyssä koodissa luodaan data-niminen paketti lähetystä varten. Paketissa on aikaleima, mittaustyyppi, paketin pituus sekä jokin numero väliltä 0–24. Funktion randomData() toiseksi viimeisimmällä rivillä pakataan tiedot tavuksi. Bittimuutos saadaan aikaan lisäämällä pakkauskomennon formaatin määrittelyn alkuun merkki '<' [25]. Taulukon 4 koodi toimii samoin LoRa-lähetyksen osalta kuin taulukossa 3.

### 3.2.5 ESP32 ja RAK811 Breakboard

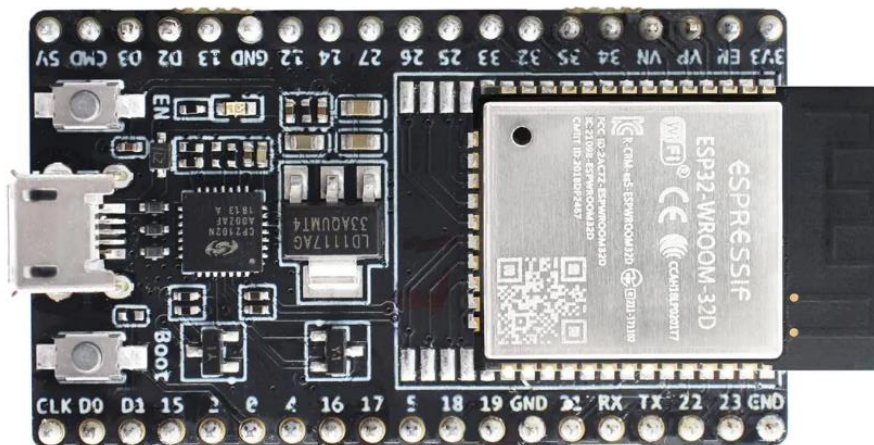
RAK811 Breakboard käyttää samaa RAK811-moduulia kuin aikaisemmin mainittu LoRa node, mutta pinnit ovat kammattuna auki laudan molemmille sivuille. Tämänlainen versio mahdollistaa

laudan helpomman käyttöönoton eri kontrollereille. Antenni tulee kiinnittää lautaan ennen virtojen kytkemistä. Kuvassa 11 nähdään RAK811 Breakboardin liittynät. [26.]



Kuva 11. RAK811 Breakboard [26.]

Mikrokontrollerin valinnassa oli oleellista valita kontrolleri, jossa oli vapaa UART-väylä radiomoduulia varten. Näin voidaan säilyttää kommunikointimahdollisuus kontrollerin ja tietokoneen välillä. Mikrokontrolleriksi valittiin 32-bittinen ESP32 sen helpon saatavuuden, hyvän laskentatehon ja ylimääräisten UART-väylien takia. Kuvassa 12 nähdään ESP32-mikrokontrolleri päältä kuvattuna.



Kuva 12. ESP32-mikrokontrolleri [27.]

UART-väylän kytkentäperiaate toimii mikrokontrolleri ympäristössä kytkemällä väylän Rx- ja Tx-pinnit ristiin laitteiden välillä. Tämä näkyy alla olevassa prototyypin kytkentää havainnollistavassa taulukossa.

Taulukko 5. RAK811 Breakboard ja ESP32 -liityntä

ESP32	RAK811 Breakboard
UART_Rx (GPIO16)	UART_Tx (2)
UART_Tx (GPIO17)	UART_Rx (3)
3.3V	3.3V (1)
GND	GND (10)

Sovelluksen haluttiin toimivan Arduino IDE:n terminaalista lähetettävillä AT-komennoilla. Komennot tulee kirjoittaa kokonaan malliin 'at+get\_config=lora:status'. Vaatimuksen täyttävä koodi löytyy taulukosta 6.

Taulukko 6. ESP32 koodi RAK811:n kanssa kommunikointia varten.

```
#define RXD2 16
#define TXD2 17
void setup(){
  Serial.begin(115200);
  Serial2.begin(115200, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2);
}

void loop(){
  if (Serial2.available()){
    Serial.write(Serial2.read());
  }
  if (Serial.available()){
    Serial2.write(Serial.read());
  }
}
```

Yllä oleva koodi alkaa perinteisesti pinnien määrittelyllä, jonka jälkeen avataan kaksi sarjaliikenneväylää. Ensimmäistä sarjaliikenneväylää käytetään tietokoneen ja toista radiomoduulin kanssa.

Silmukka, jossa koodi juoksee, tarkistaa ehtolauseella, onko kummankaan sarjaliikenneväylän puskurissa (eng. *buffer*) dataa. Jos dataa löydetään, se luetaan ja kirjoitetaan toiselle väylälle.

Kuvassa 13 nähdään, miten 'at+join' -komento käyttäytyy ArduinoIDE:n terminaalista lähetettynä komentona. LoRa-moduuli ei saa ensimmäisellä parilla yrityksellä yhteyttä LoRaWAN-verkkoon huonon yhteyden takia. Kolmannella yrityksellä saadaan moduulilta vastaus 'OK Join Success', joka ilmaisee verkkoon liittymisen onnistumista. Liittymisen jälkeen pystyttiin lähettämään heksanumeroita 'at+send=lora:x:xxx' -komennolla, joista saatiin 'OK' vastaus moduulilta lähetyksen onnistumisesta.



```
RX_WINDOW_DURATION: 3000ms
RECEIVE_DELAY_1: 1000ms
RECEIVE_DELAY_2: 2000ms
JOIN_ACCEPT_DELAY_1: 5000ms
JOIN_ACCEPT_DELAY_2: 6000ms
Current Datarate: 5
Primeval Datarate: 5
ChannelsTxPower: 0
UpLinkCounter: 0
DownLinkCounter: 0
ERROR: 99
ERROR: 99
OK Join Success
OK
OK
```

The screenshot shows a terminal window titled '/dev/ttyUSB0'. The output text is as follows: RX\_WINDOW\_DURATION: 3000ms, RECEIVE\_DELAY\_1: 1000ms, RECEIVE\_DELAY\_2: 2000ms, JOIN\_ACCEPT\_DELAY\_1: 5000ms, JOIN\_ACCEPT\_DELAY\_2: 6000ms, Current Datarate: 5, Primeval Datarate: 5, ChannelsTxPower: 0, UpLinkCounter: 0, DownLinkCounter: 0, ERROR: 99, ERROR: 99, OK Join Success, OK, OK. At the bottom of the terminal, there are controls for 'Autoscroll' (checked), 'Show timestamp' (unchecked), 'Newline' (dropdown), '115200 baud' (dropdown), and 'Clear output' (button).

Kuva 13. Kuvakaappaus ArduinoIDE:n terminaalista AT-komentojen ajosta

#### 4 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa uusi langattoman tiedonsiirron opetuskortti, jolla voitaisiin lähettää LoRa-viestejä. Tavoitteisiin päästiin lähes kaikilla osa-alueilla. Sovelluksen käyttöönotto on melko helppoa, toiminta suhteellisen luotettavaa ja lähetyksen toiminnallisuus pystyttiin todentamaan jopa kotioloissa.

Varsinaiset ongelmat olivat koulun laitteistossa, minkä takia päädyttiin tilaamaan piirikortit tehtaalta ja minkä vuoksi sovellusta ei keretty kasaamaan omalle piirikortilleen. LoRa-viestien lähetyksen osalta suurimmat ongelmat tulivat vastaan gateway-palveluntarjoajan, Digitan, palvelun katkoksissa. LoRa-laitteen käyttöönottoa vaikeutti myös se, että tarvittiin henkilö, joka pystyi ylläpito-oikeuksilla konfiguroimaan tukiasemaan vaadittavat parametrit. Lähetykseen liittyviä ongelmia olisi mahdollisesti pystytty kiertämään luomalla oma gateway-laite. Palvelunkatkokset saattoivat joskus kestää muutamia päiviä ja joskus vähän vähemmän. Loppujen lopuksi saatiin kuitenkin luotua uusi hyvä prototyyppi langattoman tiedonsiirron opetukseen.

Järjestelmän jatkokehityksen kannalta olennaista olisi tutkia eri topologia vaihtoehtoja uusien vaatimusten perusteella. Käytettäessä valmista LoRaWAN-verkkoa käytetään periaatteessa aina tähtitopologiaa, joka on yleisellä tasolla hyvä vaihtoehto monelle implementaatiolle. Pienille sovelluksille P2P-malli voisi olla kuitenkin optimaalisempi valinta. Viestien salausta voi tulla myös oleelliseksi kysymykseksi, kun halutaan lähettää arvokkaampaa tietoa.

## Lähteet

1. LoRa Alliance. LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ [internet]. LoRa Alliance; 2015 [viitattu 9.3.2022] Saatavilla: <[https://lora-alliance.org/resource\\_hub/what-is-lorawan/](https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/)>
2. LoRa Alliance. What is the LoRaWAN® Specification [internet]. LoRa Alliance. 2022 [viitattu 9.3.2022]. Saatavilla: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan/>>
3. Augustin, A. Clausen, T. Townsley, W & T. Yi, J. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things [internet]. 2016 [viitattu 9.3.2022]. Saatavilla: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>>
4. David Hall. Electronic Design. Modulation, Symbols, And Bits: Building Your Wireless Vocabulary [internet]. 2012 [viitattu 01.05.2022]. Saatavilla: <<https://www.electronic-design.com/technologies/communications/article/21795681/modulation-symbols-and-bits-building-your-wireless-vocabulary>>
5. ROHM. Modulation Methods [internet]. Päiväämätön [viitattu: 1.5.2022]. Saatavilla: <<https://www.rohm.com/electronics-basics/wireless/modulation-methods>>
6. Electronics Notes. Radio Link Budget: details & formula [internet]. Päiväämätön [viitattu: 1.5.2022]. Saatavilla: <<https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagation-overview/radio-link-budget-formula-calculator.php>>
7. Kinnunen A. 7\_Linkkibudjetti [luentokalvot]. 2022. Saatavilla Kajaanin ammattikorkeakoulun Moodle-oppimisympäristöstä.
8. M. J. Abbas, M. Awais and A. U. Haq. Comparative analysis of wideband communication techniques: Chirp spread spectrum and direct sequence spread spectrum. International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET) [internet]; 2018 [viitattu: 9.3.2022]. Saatavilla: DOI: 10.1109/ICOMET.2018.8346348.
9. A. A. Doroshkin, A. M. Zadorozhny, O. N. Kus, V. Y. Prokopyev and Y. M. Prokopyev. Experimental Study of LoRa Modulation Immunity to Doppler Effect in CubeSat Radio Communications [internet]. 2019 [viitattu: 9.3.2022]. Saatavilla: DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919274.

10. The Things Network. Spreading Factor [internet]. Päivämätön [viitattu: 9.3.2022]. Saatavilla: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>>
11. Orange Connected Objects & Partnerships. LoRa Device Developer Guide 2016 [internet]. 2016 [viitattu: 9.3.2022]. Saatavilla: <<https://developer.orange.com/od-uploads/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>>
12. Semtech. What are LoRa® and LoRaWAN®? [internet]. Päivämätön [viitattu: 10.3.2022]. Saatavilla: <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>
13. Semtech. SX1276/77/78/79 137 MHz to 1020 Low Power Long Range Transceiver [internet]. Rev.7-May 2020 [viitattu: 10.3.2022]. Saatavilla <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276>>
14. Semtech. AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics [internet]. Rev. 2, May 2015 [viitattu: 10.3.2022]. Saatavilla: <<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJk/yDEcfAkD9qEz6oG3PJryoH-Kas3UMsMDa3TFqz1UQOkM>>
15. The things network. LoRaWAN Regional Parameters [internet]. Päivämätön [viitattu: 1.4.2022]. Saatavilla: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>>
16. The things network. LoRaWAN Duty Cycle [internet]. Päivämätön [viitattu: 1.4.2022]. Saatavilla: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>>
17. Katy Koenen. Understanding the LoRaWAN® Architecture [internet]. 2019 [viitattu 1.4.2022]. Saatavilla: <<https://tech-journal.semtech.com/understanding-the-lorawan-architecture>>
18. LoRa Alliance. LoRaWAN™ SECURITY. A WHITE PAPER PREPARED FOR THE LoRa ALLIANCE™ [internet]. 2/2017 [viitattu 10.4.2022]. Saatavilla: <[https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-security-whitepaper/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-security-whitepaper/)>
19. Digita. Digitan IoT LoRaWAN-verkon peittokartta [internet]. Päivämätön [viitattu 15.3.2022]. Saatavilla: <<https://www.digita.fi/iotn-kartta/>>
20. RAKWireless. RAK811 tuotesivu [internet]. Päivämätön [viitattu 1.5.2022]. Saatavilla: <<https://store.rakwireless.com/products/rak811-lpwan-module>>



21. Raspberry Pi. Getting Started [internet]. Päivämätön [viitattu: 1.5.2022]. Saatavilla: <<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html>>
22. RAK811 Python kirjasto Raspberry Pi:lle [internet]. 2022 [viitattu 1.3.2022] Saatavilla: <<https://github.com/AmedeeBulle/pyrak811>>
23. Pi Supply. IoT LoRa Node pHAT for Raspberry Pi (Multi Frequency) tuotesivu [internet]. Päivämätön [viitattu: 1.5.2022]. Saatavilla: <<https://uk.pi-supply.com/products/iot-lora-node-phat-for-raspberry-pi>>
24. RapidTables. Hex to Ascii Converter [internet]. Päivämätön [viitattu 1.3.2022]. Saatavilla: <<https://www.rapidtables.com/convert/number/hex-to-ascii.html>>
25. Python Software Foundation. struct — Interpret bytes as packed binary data [internet]. 2022 [viitattu: 1.2.2022]. Saatavilla: <<https://docs.python.org/3/library/struct.html>>
26. RAKWireless. RAK811 Breakout Board Datasheet [internet]. 2022 [viitattu: 1.5.2022]. Saatavilla: <<https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisDuo/RAK811-Breakout-Board/Datasheet/#hardware>>
27. Mouser. ESP32 tuotesivu [internet]. Päivämätön [viitattu: 1.5.2022]. Saatavilla: <[https://www.mouser.fi/ProductDetail/Esspressif-Systems/ESP32-DevKitC-32D?q\\_s=%252BEew9%252B0nqrDsObWEpDx6YQ%3D%3D](https://www.mouser.fi/ProductDetail/Esspressif-Systems/ESP32-DevKitC-32D?q_s=%252BEew9%252B0nqrDsObWEpDx6YQ%3D%3D)>