



Ville Laukkoski

Verkkoteknologiat ja niiden hyödyntäminen sulautetuissa järjestelmissä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Insinöörityö

18.2.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Ville Laukkoski
Otsikko:	Verkkoteknologiat ja niiden hyödyntäminen sulautetuissa järjestelmissä
Sivumäärä:	31 sivua + 1 liitettä
Aika:	18.2.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine:	Smart systems
Ohjaajat:	Lehtori Sami Sainio

Sulautetuista järjestelmistä on paljon erinäisiä ohjeita, dokumentteja sekä artikkeleita mutta vain vähän teoksia, jotka tarjoavat yhteenvedon sulautettujen järjestelmien soveltuvuudesta erityisesti asiakkaan näkökulmasta.

Tässä työssä esitellään eri verkkoteknologioita, kuten mobiiliverkkoja, LPWANia sekä Internetiä. Kirjallisuusosassa esitetyjä havaintoja käyttäen muodostetaan asiakkaalle sulautettuja järjestelmiä sekä verkkoteknologioita hyödyntävä demo. Demossa on toteutettu yksityinen Lora-wan-verkko. Tähän verkkoon on kytketty asiakkaalle tehty sulautettu laite, jonka tehtävänä on kerätä sensoridataa ja lähettää se eteenpäin.

Kirjallisuuskappaleessa esitettyjen verkkoratkaisujen vertailun perusteella tämä työ toteutettiin käyttäen LPWANin alla toimivia Lora-wan- ja Sigfox-versioita. Nämä soveltuvat hyvin IoT-laitteiden väliseen tiedonsiirtoon, koska Lora tarjoaa avoimeen verkkoon perustuvan teknologian, johon jokainen luo oman verkon. Sigfox hyödyntää puolestaan kaikkia teknologiaansa käyttäviä muodostaen yhden suuren yhteisön, josta jokainen käyttäjä joutuu maksamaan Sigfoxille operaattorimaksun.

Työn lopputuloksena saatiin laadukas kokonaisvaltainen verkkoteknologiatietopaketti, jota on saatu demottua laitekokonaisuuden avulla, jota pystytään helposti jatkokehittämään tarpeen vaatiessa.

Tämä tulos avaa ovia myös uusille alan harrastajille, jotka haluavat löytää helpommin ja yhtenäisemmin eri teknologioista kertovan teoksen. Työ myös auttaa verkkoteknologioiden integroinnissa asiakkaan näkökulmasta.

Avainsanat: LPWAN, verkkoteknologiat, TTN, Chirpstack, radloTaa-juusmääräys

Abstract

Author: Ville Laukkoski
Title: Web technologies and utilizing them in embedded systems
Number of Pages: 31 pages + 1 appendices
Date: 18 February 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information and Communication Technology
Professional Major: Smart Systems
Supervisors: Sami Sainio, Lecturer

There are many articles and instructions, and a lot of documentation about different kinds of web technologies but not that many works are written from customer's perspective.

This thesis presents different kinds of web technologies such as mobile networks, LPWAN and the Internet. Based on the made in the literature review, an embedded system demo was designed for a company client. The demo is essentially a private Lora-wan network. A self-made embedded device was made for the network that collects sensor data and passes the data forward.

Based on the comparison of the web technologies presented in the literature review, this work was implemented using two LPWAN versions, Lora-wan and Sigfox. These are great for communication between two IoT devices because Lora utilizes open network technology where everyone creates their own network. Sigfox utilizes everyone who is using their technology, which creates one big community where every user must pay for the operating cost.

The result is a comprehensive web technology information packet that has been demod with a device that can be easily developed further if needed.

This work opens doors for new field hobbyists who want to find more easily and uniformly information about different kinds of web technologies. From the customer's perspective, the work also helps in the integration web technologies.

Keywords: LPWAN, web technologies, TTN, Chirpstack, radio frequency regulation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Verkkoteknologiat	3
2.1	Verkko	3
2.2	LPWAN	7
2.3	Mobiiliverkko	9
2.4	Hyödyntäminen sulautetuissa järjestelmissä	10
3	Demon lähtötilanne	12
3.1	Valintaperuste	12
3.2	Laitteisto	15
3.3	Ohjelmisto	16
4	Demon toteutus	17
4.1	Päätelaitteen konfigurointi	17
4.2	Gatewayn pystytys	17
4.3	Application-palvelin	18
4.4	Datan lähettäminen front-endiin	20
4.5	Todellinen kuuluvuus	25
5	Johtopäätökset ja yhteenveto	28
	Lähteet	29

Liitteet

Liite 1: RAK-2245 packet forwarded configuration -lähdekoodi

Lyhenteet

- LPWAN: *low-power wide-area network*. Kommunikointityyli IOT-laitteille.
- IOT: Internet of things. Sulautettuja järjestelmiä, jotka hyödyntävät Internet-verkkoa.
- TTN: the things network. Avoin Lora-wan-verkko kaikille.
- SF: spreading factor. Lora-wan-verkoissa käytettävä termi, joka kuvastaa, kuinka nopeasti dataa voidaan lähettää sekunnissa.
- TX: lähetysteho. Kertoo desibelimilliwatteina (dBm) lähetystehon voimakkuuden.
- RX: vastaanottimen herkkyys (receiver sensitivity). Kertoo, kuinka matalalla signaalin voimalla vastaanotin havaitsee.
- VPN: virtual private network. Yhdistää julkisen ja yksityisen verkon toisiinsa.
- RSSI: Received signal strength indication. Kertoo signaalin vahvuuden (RSSI-arvona).
- NMT: Nordisk Mobiltelefon. Pohjoismaiden yhteinen analoginen radiopuhelinverkko, joka oli käytössä vuosina 1981-2010.
- GSM: Global System for Mobile Communications. Nykyinen maailmanlaajuinen mobiiliverkko.

1 Johdanto

Sulautettuja järjestelmiä on kaikkialla, mitä näemme ja koemme. Ne ovat käytännössä tietokoneita, jotka on suunniteltu tiettyä käyttötarkoitusta ajatellen ja tuovat fyysisen maailman laitteet ja ohjelmistot yhteen. Hyvänä esimerkkinä voidaan tässä pitää kaikkien autojen ajotietokoneita. Otetaan esimerkiksi ajovalojen jännite, analysoidaan tämä data ja mahdollisesti näytetään tämä käyttäjälle kojelaudalla vikatietona. Myös kaikki kotielektroniikka on jollain tapaa sulautettu niiden sisäisillä mikrosiruilla. Näitä löytyy esimerkiksi mikroaaltouuneista ja jääkaapeista. [1, s. 29.] Näiden järjestelmien verkkoteknologioihin on useita erinäisiä artikkeleita, dokumentteja ja muita, jotka käyvät läpi kunkin teknologian hyviä sekä huonoja puolia lävitse. Verkkoteknologioista on tosin hyvin vaikea löytää kaiken kattavaa pakettia, joka kasaisi yhteen erilaisia teknologioita ja niiden tuomia hyötyjä myös asiakkaan näkökulmasta.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ja vertaillaan erinäisiä verkkoteknologioita. Kirjoituksessa käydään läpi myös, miten niitä pystytään hyödyntämään parhaimmalla mahdollisella tavalla sulautettujen järjestelmien maailmassa. Tätä varten opinnäytetyössä on tehty asiakkaalle demoprojekti, jossa muodostetaan yksityinen sulautetun järjestelmän verkko asiakkaan tarpeiden mukaisesti ja johon on tehty dataa keräävä päätelaite.

Opinnäytetyössä on koottu eri lähteitä erinäisistä verkkoteknologioista. Näistä tekstissä kerrotaan niiden historiasta, niiden nykyisestä olemassaolosta sekä siitä, miten nämä mahdollisesti näkyvät meidän tulevaisuudessamme.

Työssä on selvitetty paljon eri verkkoteknologioiden olemassaoloista ja sitä, on sulautettujen järjestelmien näkökulmasta olennaista. On selvitetty erinäisiä rajoituksia, jotka vaikeuttavat harrastajien näkökulmasta laitteiden käyttöä ja tuovat haasteita käyttäjilleen. Rajoituksia käydään läpi eritoten Suomen näkökulmasta, ja niiden valvontaa johtaa Traficom. [2, s. 29.]

Ensimmäisessä luvussa johdatetaan tehtyyn insinööriyöhön. Toisessa luvussa keskitytään eri verkkoteknologioihin ja niiden tuomiin hyviin ja huonoihin puoliin. Kolmannessa luvussa alustetaan asiakkaalle tehtyä demoa ja käydään läpi valittuja laitteita sekä niihin tulevia ohjelmistoja. Neljännessä luvussa on tehty itse demon toteutus ja kerrotaan mitä on tehty. Viimeinen luku tuo kaikki luvut yhteen.

2 Verkkoteknologiat

Verkkoteknologia käsitteenä on hyvin laaja. Verkkoteknologiat muuttuvat koko ajan ja uusia teknologioita tulee vuosittain lisää. Näitä teknologioita käytetään viestien kommunikoinnissa kahden tai useamman pisteen välillä.

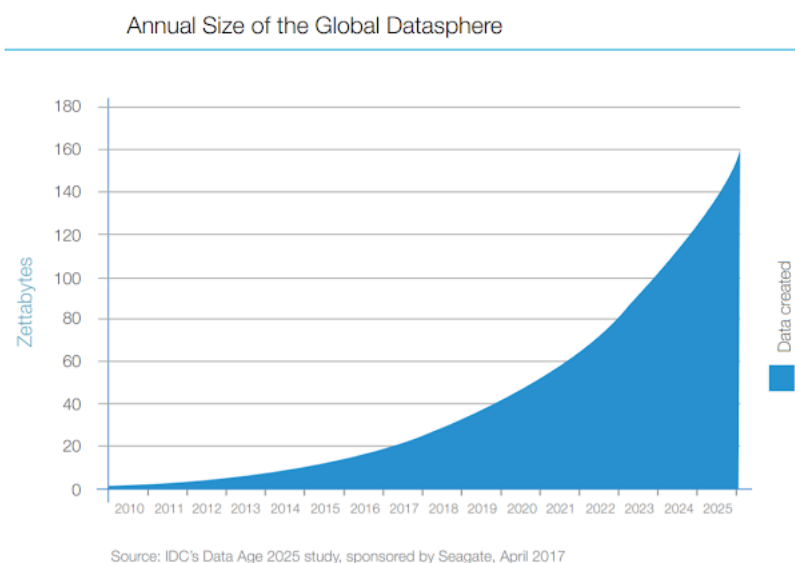
2.1 Verkko

Internet on asia, joka usein tulee mieleen ensimmäisenä, kun kuulee sanan verkko puhuttaessa tietotekniikasta. Sillä on pitkä historia lähtien jo 60-luvulta ja monia edeltäjiä. Meidän tuntemamme Internet muodostui vasta 90-luvun taitteessa, kun kansainvälinen Internet, Web 1.0 muodostui [3, s.29]. Suomi oli tässä yksi edelläkävijöistä. Jo 1993 se levisi laajasti eri kotitalouksiin EUnet Finlandin tarjoamien palveluiden muodossa [4, s. 29]. Kaikki eivät tosin jakaneet samoja mietteitä Internetin alkua ajoilta, kuten kuva 1 vuodelta 2000 demonstrooi hyvin. ”Internet ’may be just a passing fad as millions give up on it’ ”, joka karkeasti käännettynä tarkoittaa ”Internet on vain ohi kulkeva villitys, josta miljoonat luopuvat”.



Kuva 1. Lehtiartikkelin kuva 2000-luvun alusta [5, s. 29].

Nykypäivänä Internetistä puhuttaessa käytetään myös nimitystä Web 2.0. Käsite muodostui vuonna 2004. [4, s. 29.] Internetistä tuli pelkän tiedon hankkimisen sijaan sosiaalisen median alusta. Alla oleva kuva 2 vuodelta 2017 demonstroi hyvin, miten paljon dataa on, miten paljon sen lisääntyminen on kiihtynyt lähivuosina ja miltä Internetin mahdollinen tulevaisuus näyttää. Pelkästään Netflixissä käyttäjät katsovat kokonaisuudessaan joka minuutti 404 000 tuntia videoita [6, s. 29].



Kuva 2. Datan luontimäärä vuosittain [7, s. 29].

Internetin tulevaisuutta on vaikea ennustaa. Tällä hetkellä kasvua on muodostunut valtavasti ja joka vuosi vain kiihtynyt kovempaan tahtiin tietoliikenteen määrää. Tämä tosin voi selittyä teknologian yleistyessä eri puolilla maapalloa. Mutta myös pitää muistaa, että teknologioiden tuomat jokavuotiset nopeuden lisäykset ovat avanneet ovia kaikenlaisille uusille tiedonkeruukeinoille eikä lopua vieläkään näy.

Suomessa kuin myös muualla maailmassa radiotaajuudet ovat yksi olennaisia osia, kun verkosta puhutaan. Radiotaajuuksien välityksellä liikkuvat kaikki liikenne niin puheluista kuin verkon käytöstämme. Tämän vuoksi on todella rajoitettua ja säännösteltyä, miten ja kuka mitäkin taajuutta voi käyttää. Kuvassa on

avattu Lora-verkon taajuuksia Suomessa, jotka on poimittu Traficomin radio-taajuusmääräys-pdf:stä. Siitä näkee myös hyvin säännöstelyn määrän pdf:n ollessa yli 230 sivua pitkä.

Osa-alue (sen leveys) ja käyttö	Liikennemuoto Asemaluokka ja käyttösuunta, Säteilyteho / Lähtetimen teho (pääsääntöisesti enintään) Kanavanleveys / Lähetteen leveys Dupleksiväli ja parikaista Läheteluokka Tyyppivakio	Radiorajapinnan käyttöä koskevia ehtoja ja huomautuksia. Standardiviittaukset ovat vain informatiivisia.
865 - 868 MHz (3 MHz) (SRD) Yleiset lyhyen kantaman radiolähteet		Dataverkot. Lähteet on sallittu ainoastaan taajuuksilla: 865.600 - 865.800 MHz 866.200 - 866.400 MHz 866.800 - 867.000 MHz 867.400 - 867.600 MHz Luvasta vapautettuja laitteita. Katso Liikenne- ja viestintäviraston määräys 15. Säteilyteho enintään 500 mW ERP. Kanavan leveys enintään 200 kHz. Toimintasuhde keskusasemille enintään 10 % ja muille verkon laitteille enintään 2,5 %. Automaattinen tehonsäätö (APC) tai vastaava häiriönlievennystekniikka. SRD-suositus ERC/REC/70-03. Euroopan komission päätös 2006/771/EY, jonka voimassa oleva tekninen liite on päätös (EU) 2019/1345.
865 - 868 MHz (3 MHz) (SRD) Yleiset lyhyen kantaman radiolähteet		Luvasta vapautettuja laitteita. Katso Liikenne- ja viestintäviraston määräys 15. Säteilyteho enintään 25 mW ERP. Toimintasuhde enintään 1 % tai soveltuva liikennöintiprotokolla. Standardi EN 300 220 soveltuvin osin. SRD-suositus ERC/REC/70-03. Euroopan komission päätös 2006/771/EY, jonka voimassa oleva tekninen liite on päätös (EU) 2019/1345.
865 - 868 MHz (3 MHz) (SRD) Etätunnistuslaitteet (RFID)	200 kHz /	Luvasta vapautettuja laitteita. Katso Liikenne- ja viestintäviraston määräys 15. Lukijalaitteella (interrogator) ainoastaan seuraavat osakaistat: 865.600 - 865.800 MHz säteilyteho enintään 2 W ERP. 866.200 - 866.400 MHz säteilyteho enintään 2 W ERP. 866.800 - 867.000 MHz säteilyteho enintään 2 W ERP. 867.400 - 867.600 MHz säteilyteho enintään 2 W ERP. Standardi EN 302 208. SRD-suositus ERC/REC/70-03. Euroopan komission päätös 2006/804/EY. Euroopan komission päätös 2006/771/EY, jonka voimassa oleva tekninen liite on päätös (EU) 2019/1345.

915.000 - 919.400 MHz (4.400 MHz) (SRD) Jäljitys-, seuranta- ja tiedonkeruujärjestelmät		ECC:n päätös ECC/DEC/(01)01. Uusien laitteiden käyttöönotto ei ole sallittu 31.12.2003 jälkeen. Dataverkot. Luvasta vapautettuja laitteita. Katso Liikenne- ja viestintäviraston määräys 15. Säteilyteho enintään 25 mW ERP. Kanavan leveys enintään 600 kHz. Toimintasuhde enintään 1 %. SRD-suositus ERC/REC/70-03.
915 - 921 MHz (6 MHz) Siirtyvä liikenne	Dupleksi Tukiasema (FB) TX -45 MHz 870 - 876 MHz	
916.100 - 918.900 MHz		Luvasta vapautettuja laitteita.

Kuva 3. Radiotaajuusmääräys.pdf Traficom [2, s. 29]

Mielenkiintoisen erityisesti Suomen Lora-verkon taajuuksista tekee sen, että Euroopassa on käytössä 865-868 MHz:n taajuus ja Suomessakin tämä on pääsääntöisesti myös näin, mutta Digita on päättänyt poiketa tästä. [8, s. 29.] He käyttävät tässä alle yhden gigahertsin ISM-taajuusaluetta, jota verkko-operaattorit sekä laitevalmistajat voivat vapaasti hyödyntää. Tämä tarkoittaa sitä, että

he käyttävät 902-928MHz:n taajuutta, joka on Pohjois-Amerikan piiriin kuuluva Lora-taajuus.

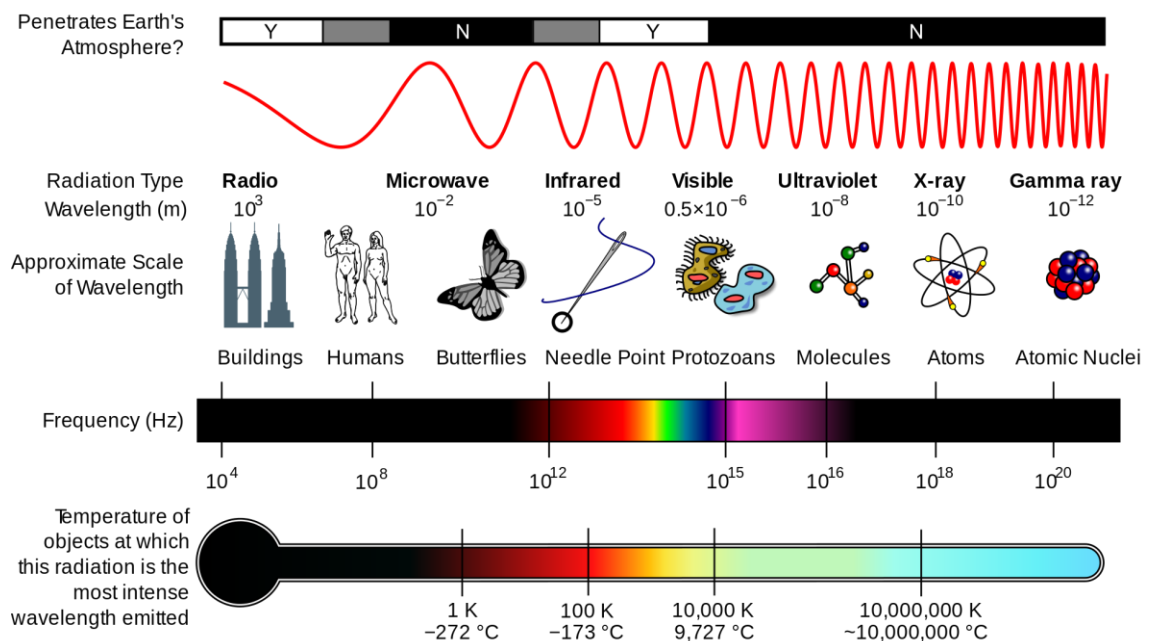
	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 + 8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Kuva 4. Lora-wan-taajuudet maailmalla [9, s. 29].

Radiotaajuuksien rajoittamisilla on aina hyviä perusteita esimerkiksi linjojen päällekkäisyyksien muodostuminen, joka voisi esimerkiksi johtaa lentokoneiden häiritsemiseen ja vaarantaa ihmishenkiä. Esimerkiksi rajoitusten ollessa voimassa se rajoittaa uusien radioharrastajien mukaan tulemistakin, jotka eivät jaksakaan nähdä vaivaa opetellakseen jokaista lakipykälää eri taajuuksista. Tämä siis tarkoittaa käytännössä teknologian kehittymisen kannalta hidasteita.

Kun puhutaan radiotaajuuksista myös terveysriskit tulevat esille. Taajuuksia käytetään kaikessa. Hyvänä esimerkkinä ovat esimerkiksi röntgengeneraattorit, jotka lähettävät 30 petahertsistä 30 attohertsiin asti taajuuksia [10, s. 29]. Tämä puolestaan ei ole kovin terveellinen taajuus, ja siksi myös sitä käytetään vain todellisen tarpeen vaatiessa. Kyseinen taajuus voi aiheuttaa syöpää, joka mahdollisesti huomataan vasta paljon myöhemmin saannin jälkeen [11, s. 29]. Vaikka on taajuuksia, jotka ovat meille vaarallisia, on myös hyvä huomioida, että meille jokapäiväisten taajuuksien esimerkiksi radiotaajuuksien saaminen on

täysin turvallista. Uusien verkkoteknologioiden kehittyessä ei pitäisi pelätä, ovatko ne vaarallisia, koska ne eivät tule käyttämään samankaltaisia taajuuksia esimerkiksi röntgensäteilyn kanssa. Tässä toki pitää myös huomioida, että vaikka oltaisiin kaukana vaarallista taajuuksista, on taajuuksien lähetyksellä myös vaikutusta. Nykyisillä määrillä tosin tästä ei muodostu vielä riskiä [12, s 30]. Kuvassa 5 on eri taajuuksia, joista käy hyvin myös ilmi, miten kaukana ovat radiotaajuudet röntgensäteilyntaajuuksista.



Kuva 5. Radiotaajuuksia kuvaava kaavio [13, s. 30].

2.2 LPWAN

LPWAN-tyyli on tarkoitettu sulautettuihin järjestelmiin, jossa halutaan saada kommunikointia pitkiä matkoja vähäisellä virralla. [14, s. 30.] Se ei rajoitu vain yhdenlaiseen kommunikointiin vaan siitä on luotu omia aliversioitaan, jotka kaikki kuuluvat LPWANin alle. Tunnetuimpina voidaan pitää LoRaa, Sigfoxia, LTE-M:ää ja NB_IoT:tä.

LPWANin vahvuudet koostuvat kolmesta eri osa-alueesta: pitkän matkan kuuluvuudesta, sen energiatehokkuudesta sekä sen yksikköhinnasta [14, s. 30]. Pitkän matkan kuuluvuudeksi on kerrottu avoimella maastolla jopa kymmenen kilometrin kantama. Näitä tosin pystytään tehostamaan erinäisten asioiden avulla, joista suurimpana tekijänä on signaalin voima, jota pystytään tehostamaan antennien avulla.

Energiatehokkuudessa laitteet on yleisesti suunniteltu olemaan niin kutsutusti horrostilassa, kun tavaraa ei liiku. Tämä takaa täten jopa vuosien toiminnan yhdellä normaalilla AA-patterilla. Tämä toki riippuu hyvin paljon laitteista ja näiden ohjelmoinnista.

Viimeisenä kolminaisuuden huipentumana yksikön hinta on huomattavasti alhaisempi verrattuna esimerkiksi matkapuhelinverkon laitteistoihin. Hintaerona voidaan puhua jopa kymmenistä euroista, joten isoissa erissä tämä on huomattava ero ja on siksi kaikista järkevin ratkaisu, kun pieniä datapaketteja halutaan liikuttaa.

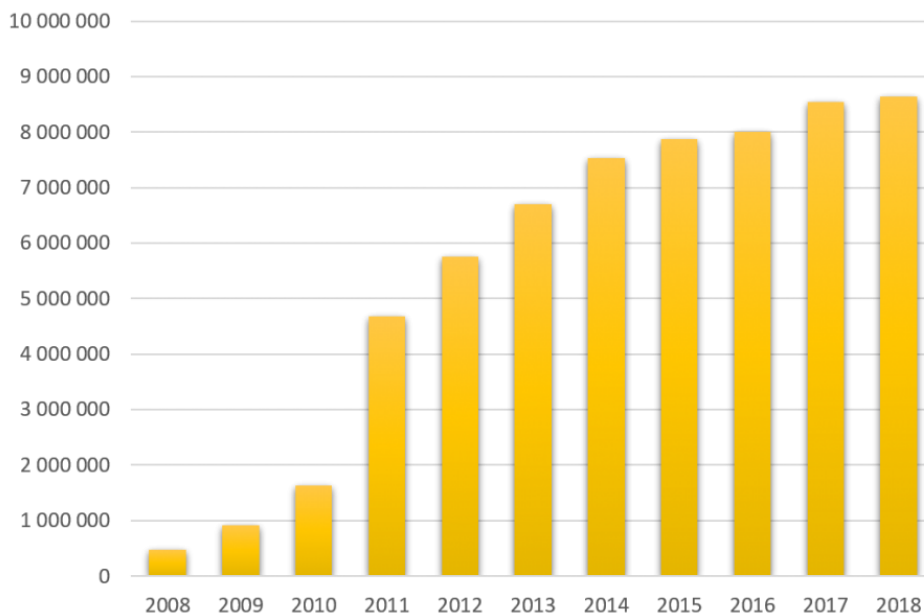
Näihin kolmeen voisi lisätä neljänneksi myös toteutuksen helppouden, kun halutaan kommunikoida turvallisesti yksityisillä linjoilla. LPWANin hienous piilee siinä, että yksityisen verkon luominen on yksi sen kulmakivistä, vaikka sitä ei mainosteta heti kättelyssä. Toisin kuin matkapuhelinverkko, jota operoi tietyt operaattorit, kuten Elisa ja DNA, on tietyt LPWAN-aliversiot täysin vapaana kaikille, jotka haluavat perustaa oman verkon. Tämä on tuonut paljon eri vaihtoehtoja yrittäjille tuoda tuotteitaan markkinoille.

Heikkouksiakin löytyy, kun puhutaan energiatehokkuudesta. Pienen virrankulutuksen takia LPWAN ei ole tarkoitettu lähettämään isoja datapaketteja kerralla, kuten esimerkiksi kuvia tai videoita eteenpäin. LPWAN-siirtonopeudetkin yleisesti liikkuvat 0,3 – 50 kbit/s, joten esimerkiksi kymmenen minuutin pitkä FULL HD -video veisi tällä yhteydellä arviolta 8 – 124 tuntia. Isojen tiedostojen lähettäminen on tosin estetty erinäisten radiotaajuuslakien avulla [2, s. 29].

2.3 Mobiiliverkko

Mobiiliverkko on käsitteenä hyvin laaja ja siitä puhuttaessa yleisesti tulee mieleen LTE, 4G ja 3G. Erilaisia versioita mobiiliverkoista on kuitenkin helposti kymmeniä. Mobiiliverkot voidaan tosin jakaa kahteen eri isoon ryhmään, analogisiin ja digitaalisiin. Analogiset liittymät tulivat ensin NMT-muodossa [15, s. 30] ja myöhemmin digitaalisessa GSM-muodossa [16, s. 30]. Näitäkin ennen sekä myöhemmin oli omia teknologioita, mutta NMT aloitti ensimmäisen analogisen täysautomaattisen matkapuhelinverkon ja GSM digitaalisen verkon.

Suomi oli yksi edelläkävijöistä mobiiliverkkojen maailmassa. Pohjoismaissa avattiin yhtä aikaa maailman yhdet ensimmäisistä 1G-linjoista vuonna 1981 [17, s. 30]. Tästä kymmenen vuotta myöhemmin Radiolinja toi 2G-verkot Suomeen ensimmäisinä maailmassa 1991. [18, s. 30.] Radiolinja on nykyään osa Elisaa. Myös Nokialla on ollut iso osuus niin mobiiliverkkojen kuin itse puhelinten markkinoilla jo vuosikymmeniä. 2000-luvulla tämä alkoi muuttua älypuhelinien tullessa markkinoille. Mobiililaajakaistaliittymien määrä räjähti ja maailmalla alkoi kova kilpailu eri teknologioiden kehittämisessä.



Lähde: Liikenne- ja viestintävirasto

Kuva 6. Mobiililaajakaistaliittymien määriä kuvaava kaavio [19, s. 30].

Vielä viime vuosina Suomi on jäänyt jälkeen uusien teknologioiden tuonnissa, mutta tähän on nyt panostettu urakalla, jotta saataisiin Suomi takaisin maailman kärkimaiksi mobiiliverkkojen saralla. Suomen liikenne- ja viestintäministeriön alla toimiva 5G momentum -ekosysteemihanke, on suunniteltu tuomaan Suomi takaisin maailmankartalle [20, s. 30]. Suomessa suurimpana tekijänä on edelleen Nokia, joka on yksi isoimmista 5G-tekniikan tuojista maailmassa.

Sulautetuissa järjestelmissä mobiiliverkot tarjoavat todella laajaa infrastruktuuria, joka puolestaan auttaa paljon pieniäkin yrityksiä pääsemään mukaan IoT-piireihin. Kyseinen teknologia on myös kaikista tunnetuin ja käytetyin. Tämä puolestaan auttaa kehittäjiä löytämään tietoa ja parantamaan heidän tuotteitaan.

2.4 Hyödyntäminen sulautetuissa järjestelmissä

Hyödyntäminen lähtee käyttötarkoituksesta. Suurimmassa osassa sulautetuista järjestelmistä pienikin bittinopeus on riittävä, kun puhutaan tekstien lähettämisestä paikasta A paikkaan B. Tämä tarkoittaa siis sitä, että laitetta suunniteltaessa ei suosita tehokkaita komponentteja, vaan lasketaan riittävä teho kyseiseen toimintoon ja tyydytään siihen. Tällä on useita hyötyjä. Hinnat ja virrankulutus saadaan alas rajaamalla toimintoja ja nopeuksia.

Hintojen ollessa avainkeskiössä on mietittävä tarkkaan, mihin verkkoteknologiaan päätyy. Hyväksi esimerkiksi tässä voidaan pitää jo pelkästään LPWANin alla toimivia eri ratkaisuja, jotka käytännössä pyrkivät samantyyliisiin ratkaisuihin, mutta tuovat jokainen oman vivahteen mukaan. Esimerkiksi jos vertaillaan Lora ja LTE-M:ää. LTE-M:n hyöty tulee siitä, että se käyttää jo olemassa olevia LTE-torneja kommunikoinnissa eikä täten uutta infrastruktuuria tarvitse luoda. Tässä tulee kuitenkin haittapuoleksi radiomodulin yksikön hinta. Arduinossa esimerkiksi NB-IOT/LTE-M -piirilevyn hinnat alkavat yli 60 euron puolelta [22, s. 30], kun taas Lora pystyy tuottamaan saman noin puolella hinnalla [23, s. 30].

Myös turvallisuus voi olla uhattuna riippuen, mihin teknologioihin laitteissa päädytään. Turvallisuutta ei kannata ikinä jättää pois laitetta miettiessä, vaan se kannattaa ottaa heti keskiöön, jotta estetään tietojen väärinkäyttöä.

Sulautetuissa järjestelmissä virrankulutus on todella tärkeänä osana, koska jotkut laitteista pitää pärjätä vuosia omalla virrallaan eikä tähän siksi sovellu kaikki verkkoteknologiat.

3 Demon lähtötilanne

3.1 Valintaperuste

Projektissa haluttiin panostaa kustannustehokkuuteen sekä omavaraisuuteen eli projektissa on mahdollisimman vähän ulkoisia tekijöitä, kuten teleoperaattoreita välikäsinä yrityksen ja asiakkaan välillä.

Tämän jälkeen oli aika valita sopiva verkkoteknologia näitä kriteereitä hyödyntäen. Aluksi oli kaavailua, jos laite toteutettaisiin mobiiliverkon välityksellä. Tämä tosin vesittyi edellä mainitsemaan syyhyn omavaraisuudesta sekä kustannustehokkuudesta laitteiden hintojen ollessa moninkertaisia verrattuna kilpailijoihinsa. Tämän takia tuli päätettyä kaksi eri LPWANin alla toimivaa versiota: Sigfox ja Lora.

Lora tulee lyhenteistä long range ja on nimensä mukaisesti suunniteltu pitkien matkojen lähettämiseen. Maailmanennätys paketin lähettämiseksi saavutettiin 2020, jolloin pakettikantamaksi mitattiin 832 kilometriä.



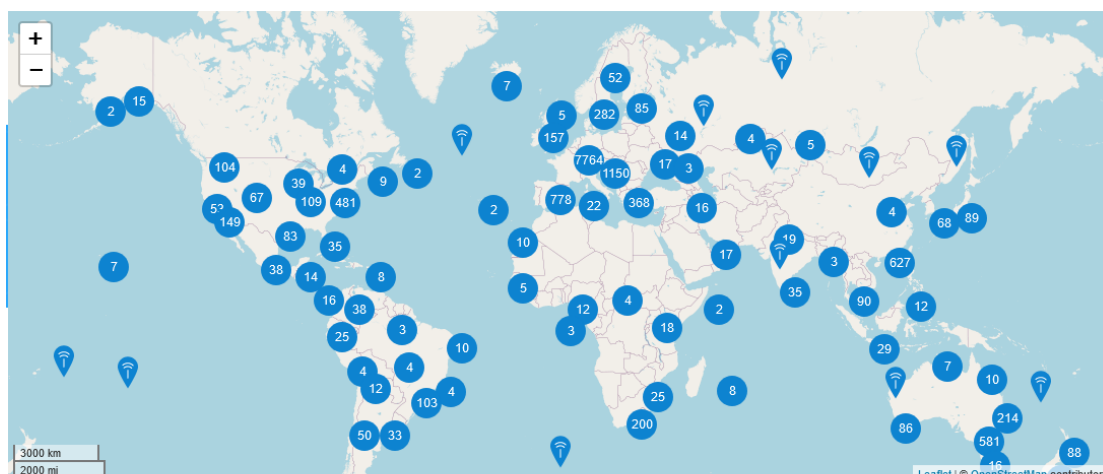
Kuva 7. Maailmanennätyksen matka [24, s. 31].

Lora kehitettiin ranskalaisessa yhtiössä Cycleossa ja myytiin yhdysvaltalaiselle Semtechille. [25, s. 31.] Ensimmäinen versio julkaistiin 2015, ja se on vuosi vuodelta noussut yhdeksi isoimmista IoT-kommunikointityyleistä. Yksi tähän syynä on sen sitomattomuus tiettyyn operaattoriin.

Lopulta päädyimme Lora-teknoologiaan sen avoimuuden takia. Toinen syy tälle oli Digitan jo olemassa oleva verkko, joka hyödyntää kyseistä Lora-teknoologiaa. Tämä takaa kattavan kuuluvuuden vuosienkin päähän ja eliminoi syyn kehittää omaa infrastruktuuria kilpailijaksi. Demoa varten emme tosin tarvinneet Suomen kattavaa verkkoa, joten päädyimme tekemään oman yksityisen Lora-verkon.

Harkinnassa oli myös TTN. TTN on avoimeen lähdekoodiin perustava avoin Lora-wan-verkko, jonka ideana on auttaa kaikkia tuomaan omat päätelaitteensa verkkoon ja yhdistämällä kaikki yhteiseksi yhteisöksi. TTN:ää ylläpitää The Things Industries, joka tarjoaa myös omia laitteitaan ja palveluitaan yhteisölle. TTN on lähivuosina räjähtänyt Lora-wan-tukijoiden joukossa ja sitä käyttää tällä hetkellä yli 143 000 kehittäjää. TTN oli 2018 loppupuolella 5528 gateway:tä ja tämä on yli kolminkertaistunut vain reilussa kahdessa ja puolessa vuodessa. [26, s. 31.]

At this moment, there are 18530 gateways up and running



143854

MEMBERS

18530

GATEWAYS

151

COUNTRIES

Kuva 8. TTN gateway määrä [26, s. 31].

TTN-verkossa toimimisessa tuli haasteita demon toteuttamisen näkökulmasta. TTN käyttää julkisella community-palvelimellaan "Fair access policya", joka rajoittaa uplink-aikaa 30 sekuntiin päivässä laitteelta sekä downlink-viestien määrää 10 viestiin päivässä. Tämä olisi rajoittanut massiivisesti testimielessä datan lähettämistä. Myös muutokset, joihin meillä ei ollut sanavaltaa, nousivat isoksi ongelmaksi. Isoimpana tästä nousi gatewayn päällä pysyminen. Kaikki gatewayt ovat jonkun projekteja, joko yksityisen tai yrityksen. Eli näin ollen, jos projekti keskeytettäisiin, myös gateway, joka olisi siihen liitetty, otettaisiin mitä luultavimmin pois verkosta ja täten voisi aiheuttaa asiakkaan päätyyn isoja ongelmia yhteyden menettämisen muodossa.

Tämän jälkeen oli myös hyvä käydä läpi kuuluvuuden riittävyyttä sekä laitteen akun kestoa. Kuuluvuudessa päädyttiin siihen, että Digitan verkon ollessa Suomen kattava ja vaikka laitteet sijoitettaisiin metsiin, ovat heikoimmatkin antennit riittävät kyseiseen tarkoitukseen. Akun kestossa oli myös paljon pohtimisen varaa. Vaikka tosin demoa varten tällä ei ollut paljoakaan väliä, niin oli hyvä tietää,

miten paljon virtaa tarvittaisiin pyörittämään laitetta viidestä seitsemään vuoteen ilman häiriöitä. Päädyimme tässä helppoon ja yksinkertaiseen akkumenetelmään demoa varten.

3.2 Laitteisto

Laitteisto koki monia muutoksia insinööriyön aikana. Alussa oli harkinnassa jättää yksityisen Lora-wan-verkon luonti kokonaan pois, mikä olisi tarkoittanut gatewayn ja suurimman osan ohjelmiston jättämistä pois. Lopulta tähän ei kuitenkaan päädytty.

Lora-wan gatewayssä on paljon eroja. Gatewaytä löytyy kahdesta eri muodosta single-channel ja multi-channel. Single-channelin heikkous piilee siinä, että se voi vain vastaanottaa yhden kanavan ja SF vastaanottaa samaan aikaan, kun taas multi-channel pystyy vastaanottamaan kahdeksan (joissain tapauksissa jopa kymmenen) kanavaa sekä SF samaan aikaan. Single-channelin hyvä puoli on siinä, että se on paljon halvempi liittää mukaan projekteihin. Halvimmat pyörivät noin 30 euron luokassa, kun taas multi-channel versiot lähtevät 120 euron luokasta. Demossa haluttiin useammasta laitteesta ottaa dataa kerralla, joten single-channel ei ollut vaihtoehto. Gatewayssä on myös hyvä huomioida niiden TX- ja RX-taso. Nämä kertovat ostajalle hyvin, miten laadukkaasta laitteesta puhutaan. Lopulta gatewayssä päädyttiin Raspberry pi -hattuun RAK-2245, joka on yksi halvimista mutta silti yksi käytännöllisimmistä multi-channel-versioista hintaansa nähden.



Kuva 9. RAK-2245-tuotekuva [27, s. 31].

Gatewayn päätyttyä RAK-2245 oli tähän myös lisättävä Raspberry Pi. Tämän seurauksena päädyimme Raspberry Pi 3 B+:aan, joka tukee kyseistä hattua.

Antenneissa emme halunneet lähteä hakemaan mitään pitkän matkan laitteita. Demomielessä jo mukana tulleet antennit antoivat riittävän kantaman talon sisäisille testailuille.

3.3 Ohjelmisto

Raspberry pi tarvitsi käyttöjärjestelmäksi järjestelmän, joka pystyy kommunikoi-
maan RAK-2245:n kanssa. Tätä varten kehittäjät RAKwirelessilla tarjosivat il-
maisen käyttöjärjestelmän, joka pohjautuu Debian Linux -käyttöjärjestelmään.

Rasperry pi:lle oli valmiiksi jo asennettu Chirpstack, joten käytimme sitä lähet-
tääksemme dataa eteenpäin. Alkuperäiseen suunnitelmaan kuului koulun palve-
limeen asennettuun dockerin Chirpstackiin hyödyntäminen yhdistämällä laitteet
keskenään, mutta tässä tulivat koulun verkko-ongelmat vastaan.

4 Demon toteutus

4.1 Päätelaitteen konfigurointi

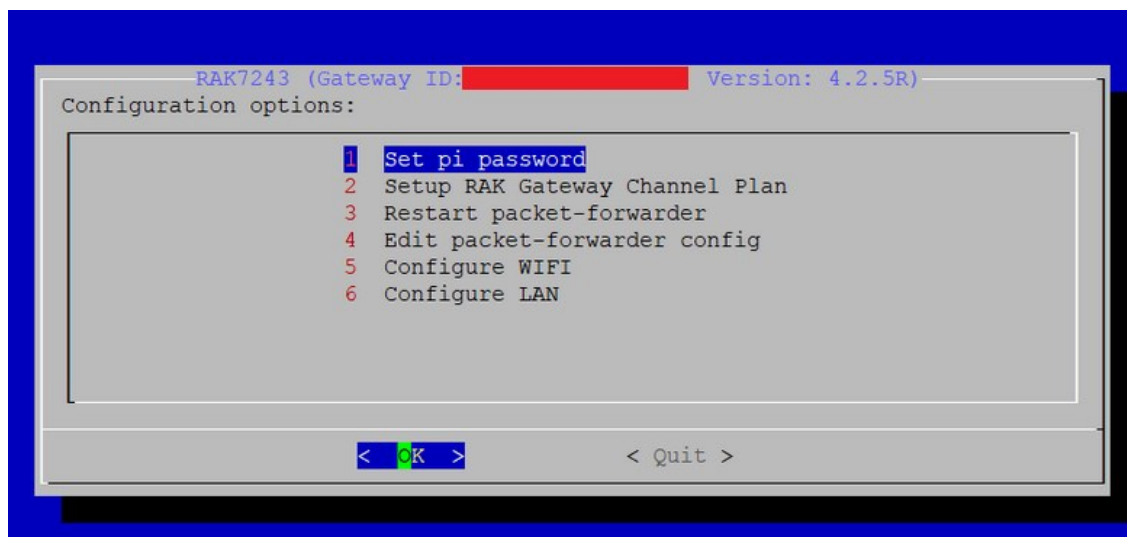


Kuva 10. Projektin päätelaitteet

Päätelaitteet konfiguroitiin ottamaan sensorilta dataa, seuraamaan datan muutoksia ja lähettämään data eteenpäin gatewaylle.

4.2 Gatewayn pystytys

Gatewayn pystytys oli hyvin suoraviivainen prosessi. RAK-2245:n ollessa Raspberry Pi -hattu se yksinkertaisuudessaan piti vain kohdistaa pinnien kanssa ja painaa sisään. Tämän jälkeen itse gateway pystyttiin konfiguroimaan.



Kuva 11. RAK-2245-konfigurointinäkymä

Gatewaylle määriteltiin uusi salasana. Määriteltiin antennin taajuus, joka pohjautui Suomessa sallittuun radioaaltotaajuuteen 867-869 MHz. Tämän jälkeen oli vielä määriteltävä laitteelle staattinen IP-osoite sekä default gateway, minkä avulla laitteelle päästiin tarvittaessa myös ulkoverkosta käsiksi.

4.3 Application-palvelin

Application-palvelimella tässä tapauksessa tarkoitetaan käytännössä paikkaa, joka sitoo kaikki yhteen. Palvelimella on monta tehtävää. Siihen määritellään jokainen päätelaite ja niille annetaan application key. Tämä avain on henkilökohtainen koodi, joka annetaan päätelaitteelle ja jonka avulla gateway pystyy tunnistamaan kommunikoinnissa päätelaitteen.

Seuraavana tehtävänä palvelimella on gatewayn määrittelemine, jonka kautta päätelaitteiden viestit tulevat. Tätä varten chirpstackkiin määritellään gatewayn oma henkilökohtainen Gateway ID ja annetaan tunnistimenimi. Tunnistimenimi on vain auttamassa ylläpitäjiä tunnistamaan eri laitteet toisistaan.

Kolmantena tehtävänä on itse viestien purku. Chirpstackiin tuli tehtyä hyvin yksinkertainen viestin purkamisohjelma. Koodi käytännössä vain muuttaa jokaisen

päätelaitteelta saamansa viestin muodon bittijonosta objektiksi ja lähettää sen eteenpäin. Objekti käytännössä koostuu kolmesta eri päätelaitteella mitatusta arvosta. Tämän jälkeen chirpstack vie tämän puretun objektin ja liittää sen osaksi yhtä isoa JSON-objektia.

```

2 // Decode decodes an array of bytes into an object.
3 // - fPort contains the LoRaWAN fPort number
4 // - bytes is an array of bytes, e.g. [225, 230, 255, 0]
5 function Decode(fPort, bytes)
6 {
7     var myObj = {"status_code":"","parallel_direction":"","contrary_direction":""};
8     var str = "";
9     var count = 0;
10    for(var i=0; i<bytes.length; i++)
11    {
12        str = str + String.fromCharCode(bytes[i]);
13    }
14    var ar = str.split(",");
15    var toP_dir=bin2p_dir(bytes);
16    var toC_dir=bin2c_dir(bytes);
17    myObj.status_code = parseInt(ar[0]);
18    myObj.parallel_direction = parseFloat(ar[1]);
19    myObj.contrary_direction = parseFloat(ar[2]);
20    return myObj;
21 }

```

Kuva 12. Paketin muuttaminen biteistä objektiksi

Application-palvelimesta on myös hyvä tietää, että se ei tallenna mitään dataa omaan palvelimeen vaan sen tehtävänä on vain toimia linkkinä asioiden välillä. Tästä syystä sen viimeisimpänä tehtävänä on halutun tyylin mukainen kommunikointi, joka on asetettu palvelimelle. Tästä löytyy enemmän tietoa luvussa 4.4.

Application-palvelin koki monia muutoksia insinööriyön aikana. Ensimmäinen idea oli lähteä TTN application -palvelimen alle toteuttamaan projektia, mutta tämä oli jo hylätty ja siksi tähän piti keksiä jokin muu ratkaisu.

Toisena palvelimena ajattelimme gotthardpin avoimeen lähdekoodiin perustuva Lora-wan-versiota. Tämä vaikutti järkevältä ratkaisulta, koska avoin lähdekoodi ei rajoittaisi jatkokehitystä. Tämä taas auttaisi mahdollisesti saamaan paremmin räätälöidyn paketin omaan käyttötarkoitukseemme. RAK-2245 tosin ei tukenut suoraan gotthadpin teosta ja huomasimme, että konfiguroinnissa oli vain kaksi vaihtoehtoa: TTN tai chirpstack.

Tästä pääsemme valittuun application-palvelimeen eli chirpstackiin. Chipstackin runko tuli suoraan samassa gatewayn käyttöjärjestelmän kanssa, joten se vaikutti loogisimmalta vaihtoehdolta. Chirpstackiin luotiin jokaiselle päätelaitteelle omat arvot.

4.4 Datan lähettäminen front-endiin

Datan lähettämisessä oli paljon mutkia matkassa. Ensiksi piti miettiä, kuinka päästä koulun palvelimeen käsiksi erillisellä fyysisellä laitteella, tässä tapauksessa Raspberry-pi:llä. Ongelmaksi muodostuivat erinäiset kommunikointirajoitteet. Koulussa on muodostunut vuosien varrella hyvin tehokkaat rajoitukset, jotka on suunniteltu estämään ulkopuolisten pääsy sisäverkkoon. Näiden lisäksi pitää myös huomioida erinäiset käytännön säädökset.

Ensimmäinen idea, mitä lähdimme rakentamaan tässä, oli ottaa yhteys koulun verkkoon VPN:n avulla. Koulun verkko käyttää Cisco AnyConnect -palvelimia, joten piti löytää tähän sopiva konsolipohjainen sovellus. Tätä varten asennettiin openconnect raspberry Pi:lle. Openconnectilla pystytään yhdistämään moniin eri VPN-verkkoihin, ja se toimii myös Linux-pohjaisilla laitteilla konsolin avulla, joten tämä oli täydellinen käyttötarkoitusta ajatellen. Openconnectiin yhdistäminen oli hyvin suoraviivaista. Komennolla openconnect http://koulun_palvelimen_nimi.com sai suoraan yhteyden palvelimeen. Tämän jälkeen annettiin vain koulun kirjautumistunnukset, ja yhteys oli valmis. Tämä ei tosin syystä tai toisesta lähettänyt esimerkiksi pingejä VPN:n kautta ja näin ollen yhteyttä koulun palvelimeen ei saatu.

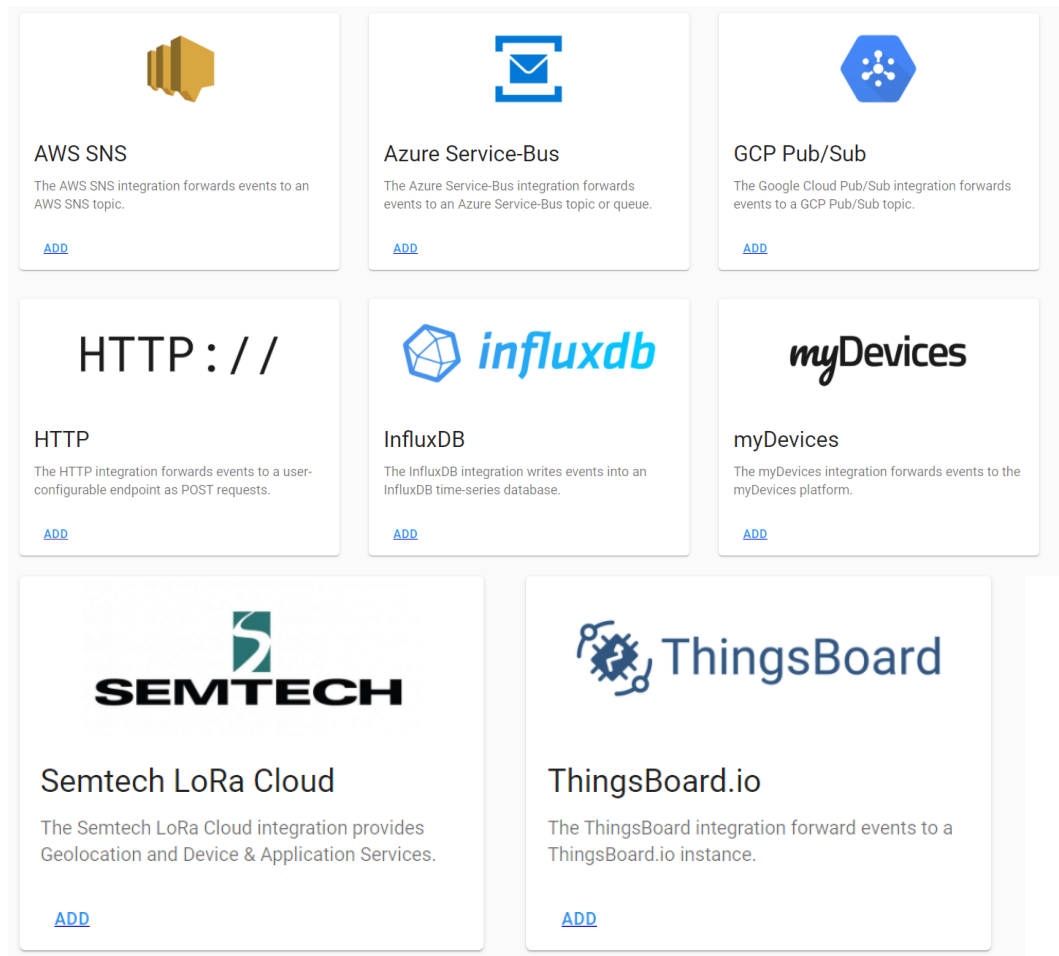
Lopulta saimme yhteyden SSH-tunneloinnin avulla. SSH-tunnelointi eroaa VPN:stä siinä, että SSH yhdistää tiettyyn tietokoneeseen, kun taas VPN yhdistää koko verkkoon. Tässä tapauksessa esimerkiksi tarkoitus oli saada yhteys vain yhteen palvelimeen, joten SSH-tunnelointi oli järkevä ratkaisu. Tätä varten asensimme rasperry-pi:lle openssh-sovelluksen. Tunneloinnin asetimme niin, että kaikki localhostin 8888 portista lähtevät tiedot siirtyvät koulun määrättyyn palvelimeen, jonka portti on 80. Komento toimi siis näin: ssh -L

127.0.0.1:8888:10.114.32.214:80 -N -f käyttäjä@koulun_ssh_palvelin. Selitykset merkeille on kuvattu alla olevassa taulukossa.

- L	Kertoo mistä lokaalista portista lähetetään paketti mihin osoitteeseen ja niiden portit.
- N	Kertoo että koodi ei aja etäyhteyttä. Tämä siksi, että kyseessä ei ole tarkoitus hallita palvelinta vain lähettää paketteja näiden välillä.
- f	Lähettää SSHn toimimaan taustaohjelmana.

Kuva 13. merkkiselitys taulukko

Rasperry-pin määrittelemisen jälkeen oli määriteltävä myös, miten itse data päätelaitteelta liikutetaan palvelimeen asti. Chirpstackissa on lukuisia eri mahdollisuuksia liikuttaa dataa. Näitä on kuvattu alla olevassa kuvassa 14.



Kuva 14. Chirpstackin vaihtoehdot viestin lähettämiselle

Parhaaksi ja helpoimmaksi ratkaisuksi päädyimme http post -pyyntöihin. Http postista hyvänä esimerkkinä voidaan pitää sitä, että aina, kun selaimeen kirjoitetaan joku verkkosivu ja se avataan, lähetetään eräänlainen http get -pyyntö palvelimelle. Tämä puolestaan näyttää kyseisen sivun. Http post puolestaan lähettää datan palvelimelle, jota palvelin voi sen jälkeen käsitellä.

The screenshot shows the ChirpStack web interface. The top navigation bar is blue with the ChirpStack logo on the left, a search bar in the center, and a user profile icon labeled 'admin' on the right. A left sidebar contains a menu with items: Dashboard, Network-servers, Gateway-profiles, Organizations, All users, API keys, and a dropdown for 'chirpstack'. Below this are links for Org. dashboard, Org. users, Org. API keys, Service-profiles, Device-profiles, Gateways, and Applications. The main content area is titled 'Applications / app' and has a 'DELETE' button. It features four tabs: DEVICES, APPLICATION CONFIGURATION, INTEGRATIONS (selected), and FUOTA. The 'Update HTTP integration' form includes a 'Payload marshaler' dropdown set to 'JSON', a 'Headers' table with one entry 'Content-Type' with value 'application/json', and an 'Endpoints' field with the URL 'http://127.0.0.1:8888/datakerain/measurement'. A 'UPDATE INTEGRATION' button is at the bottom right.

Kuva 15. HTTP POST -integrointi

Chirpstackin lisäksi yhteyttä varten oli myös palvelimeen tehtävä lisäyksiä. Tämän hoiti innovaatioprojektia tekevä ryhmä, joka avasi palvelimeen portit lukua varten. He myös tekivät oman datakeräimen, jonka tarkoituksena oli kerätä nämä tiedot ja käyttää niitä front-endissä. Datakeräimeen tehtiin tunnistus, jossa se tunnistaa eri laitteet niiden uniikista 16-merkkisestä stringistä, device EUI:stä. Lopullinen viesti koostui yhdestä isosta JSON-objektista. Seuraavassa on esimerkki viestistä.

```
4:05:14 PM      up

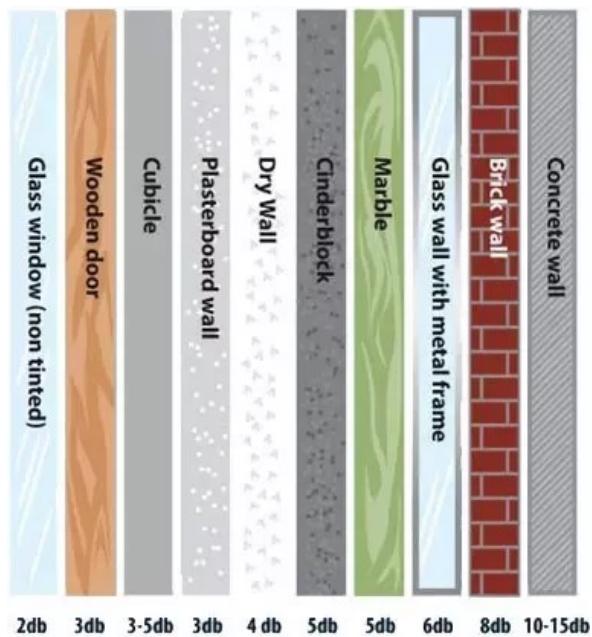
applicationID: "2"
applicationName: "app"
deviceName: "mkr1"
devEUI: ██████████
▼ rxInfo: [] 1 item
  ▼ 0: {} 14 keys
    gatewayID: ██████████
    time: null
    timeSinceGPSEPOCH: null
    rssi: -21
    loRaSNR: 10
    channel: 0
    rfChain: 1
    board: 0
    antenna: 0
    ▼ location: {} 5 keys
      latitude: 0
      longitude: 0
      altitude: 0
      source: "UNKNOWN"
      accuracy: 0
      fineTimestampType: "NONE"
      context: "6sVgXA=="
      uplinkID: "38056e8f-1035-40bd-9039-e0091140c0e2"
      crcStatus: "CRC_OK"
    ▼ txInfo: {} 3 keys
      frequency: 868100000
      modulation: "LORA"
    ▼ loRaModulationInfo: {} 4 keys
      bandwidth: 125
      spreadingFactor: 12

      codeRate: "4/5"
      polarizationInversion: false
    adr: true
    dr: 0
    fCnt: 0
    fPort: 2
    data: "MDs5MC4wMDstNzkuNTE="
  ▼ objectJSON: {} 3 keys
    contrary_direction: -79.51
    parallel_direction: 90
    status_code: 0
  tags: {} 0 keys
  confirmedUplink: true
  devAddr: "0172cbea"
```

Kuva 16. Lähtevän viestin paketti

4.5 Todellinen kuuluvuus

Työstä tehtiin myös todellisen kuuluvuuden mittaus, jossa mitattiin maksimikantama päätelaitteen ja gatewayn välillä. Lopputulokseksi tässä saatiin noin 100 metrin etäisyys, josta pitää ottaa huomioon, että laitteiden välillä oli esteitä. Paksumat lasit ja betoniseinät estävät tehokkaasti signaalin kulkua ja heikensivät täten myös testietäisyyden kantamaa. Ohessa on kuva, josta näkee hyvin, miten eri materiaalit heikentävät kuuluvuutta.



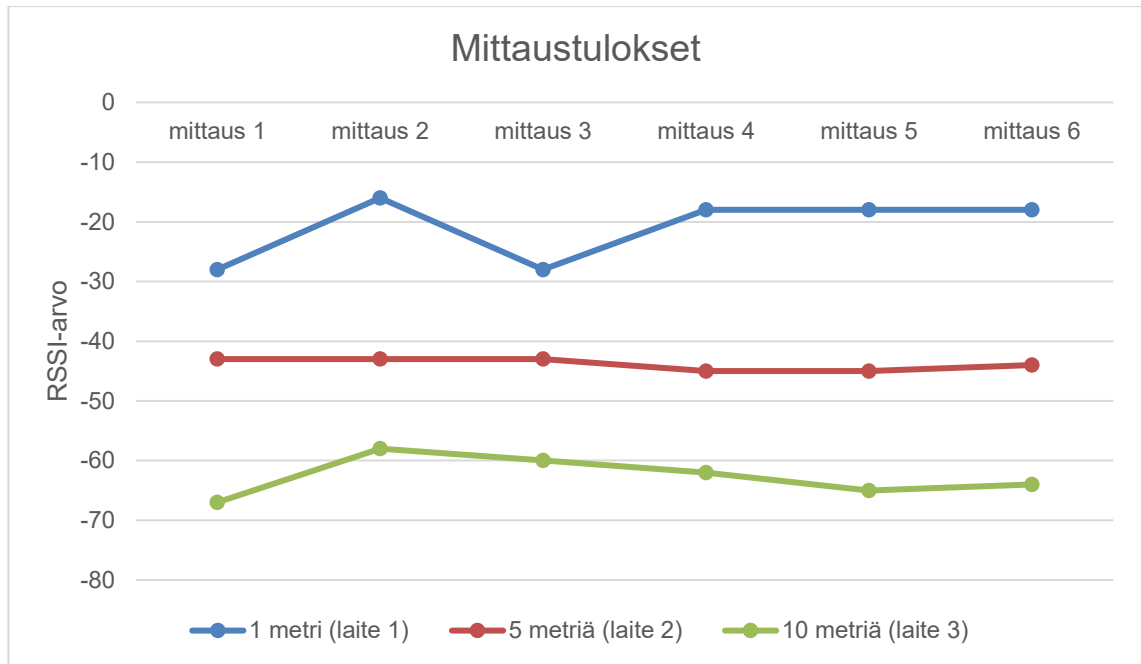
Kuva 17. Kuuluvuutta heikentävät esteet [28, s. 31].

Kuuluvuutta testattiin myös RSSI-asteikolla. RSSI on yleinen lyhenne, jota käytetään radiosignaalien vahvuuksista puhuttaessa. Yleisesti mitä lähempänä nolaa RSSI-arvo on, sitä vahvempi ja luotettavampi itse signaali on. Oheinen kuva kuvaa hyvin, miten eri signaalien tulokset voidaan mieltää.

RSSI	Signaalin voimakkuus
< -50	Loistava
-51 - -60	Hyvä
-61 - -70	Tyydyttävä
-71 - -85	Heikko
> -86	Epäluotettava

Kuva 18. RSSI-signaalin voimakkuustaulukko

Laitteille tehtiin pieni RSSI-testaus, jossa käytettiin jokaista kolmea eri päätelaitetta, jotka oli asetettu sovitun matkan päähän raspberry Pi:stä. Testailun ajan jokaisessa pyöri ohjelma, joka lähetti dataa 70 sekunnin välein kohti front-endiä. Testien tulosten perusteella voi hyvin huomata, että pienetkin etäisyydet vaikuttavat laajasti signaalin vahvuuteen. Normaalisissa tilanteissa näin pienillä muutamien metrien eroilla ei pitäisi olla näin suuria vaikutuksia. Tähän löytyy useita syitä. Syinä ovat esteet, antennien vahvuudet sekä kaistan käyttö Lora-verkon ollessa hyvin rajoitettu viestien lähettelyssä. Ohessa on kuva 19 testaustuloksista.



Kuva 19. Mittaustilauksien tulokset

5 Johtopäätökset ja yhteenveto

Loppujen lopuksi sulautettujen järjestelmien verkon valinta on hyvin pitkä prosessi, jota kannattaa miettiä hyvin tarkkaan. Hyvin suunniteltu on puoliksi tehty, ja se tuli hyvin selväksi tässä työssä.

Verkkoteknologioista parhaimpana yleisesti IoT-laitteille nousivat selvästi LPWAN-teknologiat. Tämän voi huomata sen pääpiirteistä, jotka ovat pieni virrankulutus, alhainen hinta sekä pitkä kantama. LPWANin sisäisistä teknologioista päällimmäisiksi nousi kaksi eri versiota: Sigfox ja Lora-wan. Kummatkin Arduino-kehitysalustat maksavat saman verran, mutta ovat silti hyvin erilaisia. Sigfox esimerkiksi on lukittu heidän oman verkkonsa alle, ja se pakottaa ihmiset käyttämään heidän palveluitaan. Lora-wan puolestaan on ottanut täysin erilaisen tyylin tähän ja tarjoaa puolestaan kaikille mahdollisuuden avata omia verkkojaan. Tämä tarkoittaa, että kuuluvuus ei toimi kahden eri Lora-verkon yllä ja tuo täten pienemmän infrastruktuuriin yhden verkon alle.

Työ oli osa isompaa projektia. Demo-mielessä tavoitteisiin päästiin kaikin puolin. Asiakkaan näkökulmasta haluttiin saada kokonaisvaltainen kustannustehokaspaketti, jolla voidaan lähettää dataa päätelaitteen ja front-endin välillä ja jota he voivat myöhemmin jatkokehittää. Ainoana asiana, mikä jäi työprojektista uupumaan, oli kahdenkeskinen kommunikointi.

Lähteet

- 1 How Embedded is Your World?. 2016. Verkkoaineisto. < <https://www.totalphase.com/blog/2016/10/embedded-world>>. Luettu 20.7.2021.
- 2 Radiotaajuusmääräys 4 AB/2021M. 2021. Verkkoaineisto. < <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/Radiotaajuusm%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys%204AC2021M.pdf> >. Luettu 20.7.2021.
- 3 Choudhury, Nupur. 2014. Word Wide Web and its Journey from Web 1.0 to Web 4.0. Verkkoaineisto. <<https://ijcsit.com/docs/Volume%205/vol5issue06/ijcsit20140506265.pdf>>. Luettu 20.7.2021.
- 4 Internet, 2021. Verkkoaineisto. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Internet>>. Luettu 20.7.2021.
- 5 Chapman, James. 2000. Verkkoaineisto. Daily Mail. <<https://www.tekedia.com/forum/topic/Internet-the-passing-fad-daily-mail-dec-2000>>. 5.12.2000 Luettu 20.7.2021.
- 6 Data Never Sleeps 8.0, 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.domo.com/learn/infographic/data-never-sleeps-8>>. Luettu 20.7.2021.
- 7 The Reality Behind The Enigma That's the Internet. 2018. Verkkoaineisto. <<https://www.digitalinformationworld.com/2018/06/how-Internet-works.html>>. Luettu 20.7.2021.
- 8 10 faktaa Lora-wan- ja NB-IoT-tekniikasta. Verkkoaineisto. <<https://www.digita.fi/etusivu/palvelut-yrityksille/IoT/Lora-wan-teknologia/10-faktaa-Lora-wan-ja-nb-IoT-tekniikasta>>. Luettu 20.7.2021.
- 9 Lora-wan Frequency Bands. Verkkoaineisto. <<https://www.3glteinfo.com/lora/Lora-wan-frequency-bands>>. Luettu 20.7.2021.
- 10 X-ray, 2021. Verkkoaineisto. <<https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray>>. Luettu 20.7.2021.

- 11 Newman, Tim. 2018. Are X-rays really safe?. Verkkoaineisto. <<https://www.medicalnewstoday.com/articles/219970>>. 9.1.2018 Luettu 20.7.2021.
- 12 Radiofrequency (RF) Radiation. 2020. Verkkoaineisto. < <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/radiation-exposure/radiofrequency-radiation.html>>. Luettu 7.11.2021.
- 13 Electromagnetic spectrum. 2021. Verkkoaineisto. < https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum>. Luettu 20.7.2021.
- 14 LPWAN. 2021. Verkkoaineisto. <<https://en.wikipedia.org/wiki/LPWAN>> Luettu 20.7.2021.
- 15 Nordic Mobile Telephone. 2021. Verkkoaineisto. <https://en.wikipedia.org/wiki/Nordic_Mobile_Telephone>. Luettu 20.7.2021.
- 16 GSM. 2021. Verkkoaineisto. <<https://en.wikipedia.org/wiki/GSM>>. Luettu 20.7.2021.
- 17 1G. 2021. Verkkoaineisto. <<https://en.wikipedia.org/wiki/1G>>. Luettu 20.7.2021.
- 18 2G. 2021. Verkkoaineisto. <<https://en.wikipedia.org/wiki/2G>>. Luettu 20.7.2021.
- 19 Kärpänniemi, Silja. 2019. Toimivaa kilpailua ja markkinaehtoisia ratkaisuja. Verkkoaineisto. <<https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/toimivaa-kilpailua-ja-markkinaehtoisia-ratkaisuja>>. Luettu 20.7.2021.
- 20 2021. 5G Momentum -ekosysteemi vie Suomea 5G-edelläkävijäksi. Verkkoaineisto. <<https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/5g-momentum-ekosysteemi-vie-suomea-5g-edellakavijaksi>>. Luettu 20.7.2021.
- 21 Kärpänniemi, Silja. 2019. Toimivaa kilpailua ja markkinaehtoisia ratkaisuja. Verkkoaineisto. <<https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/toimivaa-kilpailua-ja-markkinaehtoisia-ratkaisuja>>. Luettu 20.7.2021.
- 22 2021. Verkkoaineisto. <<https://store.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-mkr-nb-1500>>. Luettu 20.7.2021.
- 23 2021. Verkkoaineisto. <<https://store.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-mkr-wan-1310>>. Luettu 20.7.2021.

- 24 LoRa World Record Broken: 832km/517mi using 25mW. 2020. <<https://www.thethingsnetwork.org/article/Lora-wan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>>. Luettu 20.7.2021.
- 25 LoRa. 2021. Verkkoaineisto. <<https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa>>. Luettu 20.7.2021.
- 26 TTN. 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.thethingsnetwork.org>>. Luettu 20.7.2021.
- 27 Verkkoaineisto. 2021. <<https://store.rakwireless.com/products/rak2245-pihat>>. Luettu 20.7.2021.
- 28 Koop, Josh. 2021. Do Walls Affect WiFi? Does It Impact Your Coverage At Home. Verkkoaineisto. <<https://wifihomesafety.com/do-walls-affect-wifi>>. Luettu 20.7.2021.

RAK-2245 packet forward configuration lähdekoodi

```
{
  "SX1301_conf": {
    "Lora-wan_public": true,
    "clksrc": 1,
    "antenna_gain": 0,
    "radio_0": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 867500000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": true,
      "tx_freq_min": 863000000,
      "tx_freq_max": 870000000
    },
    "radio_1": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 868500000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": false
    },
    "chan_multiSF_0": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_1": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_2": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": 0
    },
    "chan_multiSF_3": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_4": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_5": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 0
    },
    "chan_multiSF_6": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 200000
    },
    "chan_multiSF_7": {
```

```
        "enable": true,
        "radio": 0,
        "if": 400000
    },
    "chan_Lora_std": {
        "enable": true,
        "radio": 1,
        "if": -200000,
        "bandwidth": 250000,
        "spread_factor": 7
    },
    "chan_FSK": {
        "enable": true,
        "radio": 1,
        "if": 300000,
        "bandwidth": 125000,
        "datarate": 50000
    },
    "tx_lut_0": {
        "pa_gain": 0,
        "mix_gain": 9,
        "rf_power": -6,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_1": {
        "pa_gain": 0,
        "mix_gain": 12,
        "rf_power": -3,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_2": {
        "pa_gain": 0,
        "mix_gain": 15,
        "rf_power": 0,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_3": {
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 8,
        "rf_power": 3,
        "dig_gain": 1
    },
    "tx_lut_4": {
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 9,
        "rf_power": 6,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_5": {
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 11,
        "rf_power": 10,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_6": {
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 12,
        "rf_power": 11,
        "dig_gain": 1
    },
    "tx_lut_7": {
```

```
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 12,
        "rf_power": 12,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_8": {
        "pa_gain": 2,
        "mix_gain": 11,
        "rf_power": 13,
        "dig_gain": 1
    },
    "tx_lut_9": {
        "pa_gain": 2,
        "mix_gain": 11,
        "rf_power": 14,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_10": {
        "pa_gain": 3,
        "mix_gain": 8,
        "rf_power": 16,
        "dig_gain": 1
    },
    "tx_lut_11": {
        "pa_gain": 3,
        "mix_gain": 8,
        "rf_power": 20,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_12": {
        "desc": "TX gain table, index 12",
        "pa_gain": 3,
        "mix_gain": 12,
        "rf_power": 23,
        "dig_gain": 1
    },
    "tx_lut_13": {
        "desc": "TX gain table, index 13",
        "pa_gain": 3,
        "mix_gain": 13,
        "rf_power": 25,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_14": {
        "desc": "TX gain table, index 14",
        "pa_gain": 3,
        "mix_gain": 13,
        "rf_power": 26,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_15": {
        "desc": "TX gain table, index 15",
        "pa_gain": 3,
        "mix_gain": 13,
        "rf_power": 27,
        "dig_gain": 0
    }
},
"gateway_conf": {
    "gateway_ID": "0000000000000000",
```

```
/* change with default server address/ports, or over-
write in local_conf.json */
"server_address": "127.0.0.1",
"serv_port_up": 1700,
"serv_port_down": 1700,
/* adjust the following parameters for your network */
"keepalive_interval": 10,
"stat_interval": 30,
"push_timeout_ms": 100,
/* forward only valid packets */
"forward_crc_valid": true,
"forward_crc_error": false,
"forward_crc_disabled": false,
/* gps enable */
"gps_tty_path": "/dev/ttyAMA0",
"fake_gps": false,
"ref_latitude": 10,
"ref_longitude": 20,
"ref_altitude": -1,
"autoquit_threshold": 20
}
}
```