

Mika Ahonen

**LoRaWAN-verkkojen downlink-viestintä B-luokan
päätelaitteissa**

Tietotekniikan Pro gradu-tutkielma

31. toukokuuta 2023

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Mika Ahonen

Yhteystiedot: mika.k.ahonen@gmail.com

Ohjaaja: Timo Hämäläinen

Työn nimi: LoRaWAN-verkkojen downlink-viestintä B-luokan päätelaitteissa

Title in English: Downlink communication of B-class end devices in LoRaWAN networks

Työ: Pro gradu-tutkielma

Opintosuunta: Ohjelmisto- ja tietoliikennetekniikka

Sivumäärä: 63+4

Tiivistelmä: Tässä tutkielmassa tutkittiin LoRaWAN-verkkojen downlink-viestinvälitystä B-luokan päätelaitteilla. Aihetta on tutkittu simuloinneissa, mutta vielä vähän käytännön esimerkein. Työssä käytiin läpi miten teknologia toimii ja toteutettiin geneerinen Proof of Concept (PoC) -ratkaisu LoRaWAN-verkkoalustalla. LoRaWAN downlink-viestinnän Duty cycle-käyttöjako sekä palveluntarjoajien rajoitukset asettavat haasteita hyödyntää B-laiteluokan potentiaalia. Laitteita on vielä vähän ja tällä hetkellä teknologian hyödyntäminen LoRaWAN-verkoissa on vähäistä. Kuitenkin teknologialla on potentiaalia toteutusvaihtoehdoksi ratkaisussa, joissa pienet viiveet, energiatehokkuus sekä laitteiden ylläpito ja ohjaaminen downlink-viesteillä verkosta ovat tarpeen. Tutkielma esittelee myös LoRaWAN Multicast-viestintää, joilla downlink-viestintää voidaan vähentää merkittävästi.

Avainsanat: LoRaWAN, Class B, downlink, multicast

Abstract: In this thesis, the downlink communication of B-class end devices in LoRaWAN networks was studied. While the topic has been researched through simulations, practical examples are scarce. The thesis investigates how the technology works and presents a generic PoC implementation on a LoRaWAN network platform. Limitations such as duty-cycle and other constraints set by LoRaWAN downlink communication service providers present challenges in utilizing the potential of B-class devices. Despite the small number of devices and limited use of B-class technology in LoRaWAN networks at present, it proved to be a

suitable implementation option for solutions that require low latency, energy efficiency, and network control through downlink communication. Additionally, multicast transmissions can significantly reduce the downlink communication of a LoRaWAN network.

Keywords: LoRaWAN, Class B, downlink, multicast

Termiluettelo

ABP	Activation by Personalization
ADR	Adaptive Data Rate
AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Programming Interface
AppEUI	Application Extended Unique Identifier
AppKey	Application Key
Chirp	Compressed High Intensity Radar Pulse
CR	Coding Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
DevAddr	Device Address
DevEUI	Device Extended Unique Identifier
FSK	Frequency Shift Keying
FUOTA	Firmware Update Over The Air
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
JoinEUI	Join Extended Unique Identifier
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
Multicast	One-to-Many group communication
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OTAA	Over the Air Activation
PHY	Radio Physical Layer
PoE	Power over Ethernet
REST	Representational State Transfer
RSSI	Received Signal Strength Indication

SF	Spreading Factor
SNR	Signal to Noise Ratio
ToA	Time on Air/Arrival
UDP	User Datagram Protocol

Kuviot

Kuvio 1. LoRaWAN arkkitehtuurikuvaus	9
Kuvio 2. Uplink- ja downlink-viestintää Digitan verkossa	11
Kuvio 3. LoRaWAN MAC-kerros	11
Kuvio 4. A-luokan vastaanottoikkunat	13
Kuvio 5. C-luokan vastaanottoikkunat	14
Kuvio 6. LoRaWAN B-luokka	16
Kuvio 7. Beacon-jakso (Beacon period)	17
Kuvio 8. Yhdyskäytävä lähettää Beacon-viestejä (DR3)	24
Kuvio 9. Wisgate Edge Pro v2 -yhdyskäytävä	24
Kuvio 10. PoC-toteutuksen arkkitehtuuri (unicast)	29
Kuvio 11. Lora-E5 mini (“Wio-E5 Mini” 2023)	30
Kuvio 12. Laiteasetukset B-luokalle Digitan verkossa	34
Kuvio 13. Chirpstack-docker käynnissä	34
Kuvio 14. ST-LINK/V2 kytkentä	37
Kuvio 15. ChirpStack laiteprofiili	39
Kuvio 16. ChirpStack B-luokan konfiguraatio	39
Kuvio 17. ChirpStack käyttöliittymä. Downlink-viestien lähettäminen.	39
Kuvio 18. Node-Red sovelluspalvelin. Downlink-viestintää päätelaitteelle.	41
Kuvio 19. Uplink-viesti. Päätelaite toimii B-luokan tilassa. FCtrl: class_b: true	43
Kuvio 20. LoRa-E5 mini. Ledi palaa, ohjaus Node-Red sovelluspalvelimelta.	43
Kuvio 21. ChirpStack - Multicast ryhmän konfigurointi	45
Kuvio 22. Node-Red - multicast-lähetys päätelaitteille.	46
Kuvio 23. Laitteet vastaanottavat multicast-viestejä. Multicast-osoite: 36b7629b	47
Kuvio 24. Päätelaitteiden ja verkkopalvelimen kehyslaskurin arvot	47
Kuvio 25. ChirpStack - LoraWAN-paketteja multicast-osoitteeseen: 36b7629b	48

Taulukot

Taulukko 1. LoRa tiedonsiirtonopeudet (DR0-DR5) EU868	6
Taulukko 2. LoRa-fyysinen kerros (“LoRaWAN® Specification v1.0.3” 2018)	7
Taulukko 3. B-luokan MAC-komennot (“LoRaWAN® Specification v1.0.3” 2018)	15
Taulukko 4. Beacon datakehys	19

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	LORAWAN	3
2.1	Lyhyesti LPWAN-verkoista.....	3
2.2	LoRa	4
2.3	LoRaWAN-verkon arkkitehtuuri	7
2.4	Viestien lähettäminen ja vastaanottaminen.....	10
2.5	LoRaWAN laiteluokat	12
2.6	Luokka B (Class B)	14
2.7	LoRAWAN multicast	19
2.8	LoRaWAN yhdyskäytävät	22
3	AIEMPI TUTKIMUS	25
4	LORAWAN B-LUOKAN POC-TOTEUTUS	28
4.1	Toteutuksen suunnittelu	28
4.2	Laitteisto ja verkkopalvelimet	29
4.2.1	Päätelaitteet	29
4.2.2	LoRaWAN yhdyskäytävät.....	31
4.2.3	LoRaWAN verkkopalvelimet	32
4.2.4	LoRaWAN sovelluspalvelin.....	35
4.3	B-luokan downlink-viestintä - PoC.....	36
4.4	B-luokan multicast - PoC	44
5	YHTEENVETO.....	49
	LÄHTEET	51
	LIITTEET.....	57
A	LoRa-E5, AT-testaaminen.....	57
B	Multicast konfigurointi	59

1 Johdanto

Älykkäiden IoT (Internet of Things) teknologioiden hyödyntäminen on kasvava trendi globaalisti. IoT-teknologioiden käyttö on yhä yleisempää ja laajenee jatkuvasti uusille alueille, kuten terveydenhuoltoon, liikenteeseen ja maatalouteen. Tässä tutkielmassa perehdytään LoRaWAN-teknologiaan, joka on yksi merkittävien lisenssivapaa vähävirtainen pitkän kantaman IoT- radioverkkoteknologia (LPWAN).

LoRaWAN on jo melko paljon tutkittu aihe kirjallisuudessa, mutta tutkimus on keskittynyt ensisijaisesti A-laiteluokan uplink-viestintään, joka on protokollan oletustyyppi ja tuettuna kaikissa LoRaWAN päätelaitteissa. A-laiteluokassa on kuitenkin tiettyjä rajoituksia, erityisesti downlink-viestinnän viiveisiin liittyen. Melko vähän kirjoitettu aihe on LoRaWAN downlink-viestintä verkkopalvelimelta päätelaitteelle B-luokan laitteissa (Class B).

Tämä tutkielma keskittyy LoRaWAN MAC-kerrokseen ja tutkii downlink-viestintää verkkopalvelimelta päätelaitteeseen. Tutkielma keskittyy B-laiteluokan (Class B) päätelaitteisiin, jotka tarjoavat kontrolloidun ja ajastetun downlink-viestinnän sekä monilähetys (multicast) mahdollisuuden verkon päätelaitteille. Keskiössä on B-laiteluokan spesifikaatio, koska aiheesta on kirjoitettu vähemmän. Se on myös ainoa luokka, jonka virrankulutus on optimoitu downlink-viestintään. Laiteluokka tukee myös multicast-ryhmäviestintää. Erityisiä käytännön toteutuksia löytyy niukasti, joka johtune siitä, että laitetyppejä tukevia päätelaitteita ei vielä juurikaan ole markkinoilla.

Yleisesti LoRaWAN ratkaisuisissa dataliikenne on päätelaitteesta eli sensorista verkkoon päin. Kuitenkin yhtä tärkeää toimilaitteiden (aktuaattorit) ohjauksen, päätelaitteiden ohjelmistoylläpidon ja tietoturvan sekä reunalaskennan sovellusten osalta on tiedonsiirto myös päätelaitteisiin kustannustehokkaasti huomioiden verkon rajallinen datansiirto sekä päätelaitteiden virrankulutus. Aihe on myös nostettu esille Jyväskylän yliopiston coADDVA-hankeessa.

Tutkimuskysymyksenä on selvittää ja esitellä käytännössä LoRaWAN downlink-viestintää (unicast/multicast) B-laiteluokan päätelaitteissa. Tutkielman tavoitteena on esitellä esillä olevaan tutkimuskysymykseen liittyvää kirjallisuutta ja työn kehittämistehtävänä toteuttaa käytännön Proof of Concept (PoC) -toteutus LoRaWAN-verkossa. Kirjallisuudessa aiheeseen

on perehdytty enemmänkin simulointien avulla. Tämä tutkimus lähestyy aihetta käytännössä ja pyrkii toteuttamaan esimerkinomaisen PoC-toteutuksen LoRaWAN downlink-viestinnästä B-laiteluokan päätelaitteissa. Samalla pyritään kokoamaan aihealueen kirjallisuutta, hyödyntämään jo olemassa olevaa sekä keräämään hyviä käytänteitä edelleen hyödynnettäväksi.

IoT-ympäristöt ovat kaikkineen moninaisia ja haastavia kehittämisympäristöjä. Aihetta lähestytään konstruktiivisin menetelmin ja prosessi on vahvasti iteratiivinen. Työssä toteutetaan artefakti, prototyypisovellus, jolla todennetaan käytännössä tutkitun teknologian toimivuus. Konstruktiivinen menetelmä ja PoC-toteutus ovat kaksi käsitettä, joita voidaan yhdistää monissa sovellusalueissa, erityisesti ohjelmisto- ja tuotekehityksessä. Menetelmä on yleisesti käytössä vastaavanlaisissa tutkielmissa. Konstruktiivisessa menetelmässä lähdetään liikkeelle yksinkertaisesta ratkaisusta ja lisätään siihen asteittain uusia piirteitä ja ominaisuuksia, kunnes lopullinen ratkaisu on saavutettu. Proof of Concept (PoC) -toteutus (prototyypointi) puolestaan on kokeellinen todiste siitä, että tietty idea tai konsepti on toimiva ja toimii käytännössä. Menetelmä lähtee liikkeelle havainnoista ja aikaisemmista tutkimuksista. Kokeellisten prototyyppien, simulaatioiden tai mallien avulla pyritään kehittämään uusia teorioita, käsitteitä tai ratkaisuja (“Kari Lukka: Konstruktiivinen Tutkimusote” 2014).

Tutkielman luvussa 2 käymme läpi LoRa-teknologiaa ja LoRaWAN verkkoarkkitehtuuria ja samalla käymme keskustelua aiheeseen liittyvän kirjallisuuden kanssa. Luvussa 3 esittelemme aikaisempaa tutkimusta. Luvussa 4 esitellään kehittämistehtävän suunnittelu ja toteutus, jossa läpikäymme empiirisen vaiheen menetelmiä, laitteita, ympäristöjä, teknologioita ja kerromme käytännön kokeiluista. Lopuksi päätämme tutkielman yhteenvedoon ja tulevaisuuden ehdotuksiin luvussa 5.

2 LoRaWAN

Tässä kappaleessa kerrotaan ensin lyhyesti LPWAN-verkoista, jonka jälkeen esitellään LoRa-tekniologiaa yleisesti sekä läpikäydään LoRaWAN-protokolla. LoRaWAN-verkot soveltuvat erityisesti IoT-ratkaisuihin, joissa päätelaitteiden ja verkon datasanomat ovat kooltaan pieniä ja niitä lähetetään verkossa harvaksen. Tekniologiaa käytetään pääasiassa sovelluksissa, joissa ei ole tarvetta matalalle viiveelle ja liikenne on päätelaitteelta verkkoon (Ertürk ym. 2019). LoRaWAN tarjoaa useita etuja, kuten avoimen verkkoarkkitehtuurin ja protokollan, pitkän kantaman, sisäänrakennetun turvallisuuden ja mahdollisuuden niin yksityisiin kuin julkisiin verkkototeutuksiin. Lisäksi vahvuuksia ovat edulliset päätelaitteet ja päätelaitteiden vähäinen energiankulutus (Haxhibeqiri ym. 2018).

2.1 Lyhyesti LPWAN-verkoista

Tutkielma keskittyy LoRaWAN tekniologiaan, joka on yksi kiinnostavimmista LPWAN (Low Power Wide Area Network) -radioverkkotekniologioista (Chaudhari ja Zennaro 2020). LPWAN-verkot ovat kasvava trendi IoT-ratkaisuissa (Internet of Things) sekä M2M-viestinnässä, ja niitä käytetään yhä enemmän erilaisissa sovelluksissa. LPWAN-verkkojen erityisominaisuuksia ovat niiden pitkä kantama ja energiatehokkuus, mitkä tekevät niistä erinomaisen ratkaisun haastaviin IoT-laitteiden paristokäyttöisiin sovelluksiin, joissa välimatkat kiinteisiin verkkoihin ovat haasteellisia muodostaa ja etäisyydet pitkiä. Teknologiat mahdollistavat langattoman tiedonsiirron jopa usean kilometrin etäisyydeltä ja voivat läpäistä esteitä, kuten rakennuksia. Virrankulutus ja akunkesto ovat tärkeä aihealue liittyen IoT-päätelaitteisiin ja vaikuttavat päätelaitteiden elinikään. LPWAN-verkkojen päätelaitteet ovat toteutukseltaan yksinkertaisia ja edullisia. Niillä voidaan kustannustehokkaasti toteuttaa maantieteellisesti laajan alueen kattava IoT-laitteiden verkosto. LPWAN-verkkotekniologioita on useampia, kuten LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT tai Weightless (Almuhaya ym. 2022). Osa tekniologioista, kuten LoRaWAN käyttää lisensoimattomia eli vapaasti käytössä olevia ISM-taajuusalueita (Industrial, Scientific and Medical).

LPWAN-verkot ovat yleisesti käytössä monissa älykkäissä sovelluksissa, kuten ympäristö-

seurannassa, älykkäissä kaupunkiympäristöissä, liikenteessä, teollisuusautomaatiossa, terveysteknologioissa, älykkäissä energiaratkaisuissa, älymaataloudessa ja logistiikassa (Ertürk ym. 2019). LPWAN-teknologiat mahdollistavat tiedonsiirron myös vaikeasti tavoitettavissa olevissa paikoissa, kuten maan alla tai rakennusten sisällä.

LPWAN-teknologioissa on myös omat haasteensa. LPWAN-verkot käyttävät langattomia taajuuksia ja näiden käyttö on usein rajoitettua. Tämä voi johtaa kapasiteettiongelmiin tai viestien törmäämiseen ja katoamiseen. Viestien lähettämisessä ja vastaanottamisessa on viiveitä. Huomioitavaa onkin, että LPWAN-verkot ja päätelaitteet ovat suunniteltu ratkaisuihin, joissa on vähäinen tiedonsiirtotarve, eivätkä ne sovellu reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon. Ja kuten kaikki tietotekniikka, myös LPWAN-verkot ovat alttiita erilaisille tietoturvahyökkäyksille. Päätelaitteiden elinkaari on monesti useita vuosia ja näin ollen erityinen haaste on laiteohjelmistojen tietoturva ja ylläpidettävyys (Catalano 2021).

2.2 LoRa

LoRa (Long Range) on langaton pitkän kantaman RF-teknologia, joka hyödyntää CSS-hajaspektrimodulaatiota (Chirp Spread Spectrum) radiosignaalin moduloinnissa. Teknologian on julkaissut ja patentoinut Semtech (“LoRa Modulation Basics” 2023). Teknologia sietää hyvin häiriöitä sekä heijastumia ja signaalit voidaan tunnistaa kohinatason alapuolelta. Signaalin kuuluvuuteen vaikuttavat mm. lähetysteho, taajuuskaista, modulaatio sekä ympäristön olosuhteet. Parhaimmillaan linkkibudjetti on 155-170 dB ja signaalin kuuluvuus ympäristön olosuhteista riippuen useista kilometreistä kymmeneen kilometriin.

LoRaWAN-verkoissa teknologiaa käytetään LoRa-päätelaitteen ja verkon yhdyskäytävän (gateway) väliseen kommunikointiin ja viestintään. LoRa määrittelee verkon fyysisen kerroksen (PHY), kun taas LoRaWAN on MAC-kerroksen protokolla. LoRa käyttää lisensoimattomia eli vapaasti käytössä olevia ISM-taajuusalueita. Euroopassa käytössä ovat taajuusalueet 868 MHz (863-870MHz, EU868) sekä 433 MHz (“RP2-1.0.3 LoRaWAN Regional Parameters” 2018). Lisenssivapaiden taajuuksien käytöstä vastaa Euroopassa European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Taajuusalue on jaettu useisiin kanaviin, joita voidaan käyttää tiedon lähettämiseen. Kanavakohtaisesti käytössä ovat 125kHz, 250kHz ja

500kHz kaistanleveydet. Kanavat on jaettuja ja laitteiden lähettämistä rajoitetaan. Päätelaitte valitsee satunnaisesti lähetyiskanavan ja koska päätelaitteiden lähettämistä ei synkronoida, niin törmäyksiä syntyy.

LoRa-radioteknologia toimii lisenssittömällä taajuuskaistoilla ja sen on täytettävä alueelliset määräykset kaistankäytön ja lähetystehon suhteen (Pasetti ym. 2019; Pasetti ym. 2020). Päätelaitteiden ja yhdyskäytävien lähetysteho on määritelty. Euroopassa päätelaitteen lähetysteho (uplink) on enintään 16 dBm (25mW) ja yhdyskäytävän lähetysteho (downlink) korkeintaan 0,5W. Euroopassa sertifioitujen laitteiden on tuettava vähintään kolmea 125 kHz kanavaa (868.10 MHz, 868.30 MHz ja 868.50 MHz) (Haxhibeqiri ym. 2018). Euroopan taajuusalueella voidaan hyödyntää maksimissaan 16 kanavaa.

Teknologia mahdollistaa usean päätelaitteen samanaikaisen lähettämisen samalla kanavalla hyödyntäen siihen erityistä signaalirakennetta. CSS-modulaation signaalirakenne sisältää Chirp-symboleja, jotka mahdollistavat, että vastaanottaja kykenee erottamaan kanavalta laitekohtaisen signaalin. Chirp-nimi tulee sen käytöstä tutkatekniikassa (Compressed High Intensity Radar Pulse). Chirp-viserrys on signaali, jossa taajuus muuttuu lineaarisesti ajan funktiona. Viserrysten taajuutta kutsutaan Spreading Factor-hajautuskertoimeksi (SF). Signaalin leveyttä ja kestoja voidaan säätää SF arvoilla, mitä suurempi SF-arvo niin sen matalampi viserryksen taajuus ja sitä pidempi etäisyys, jota linkki tukee.

LoRa-kanavat ovat ortogonaalisia ja tarjoavat häiriöttömän tiedonsiirron käyttämällä samaa kanavaa eri Spreading Factor-arvoilla. Minimivaatimus on, että päätelaitteet tukevat Spreading Factor arvoja välillä SF7 - SF12, joka mahdollistaa kuusi samanaikaista lähetystä yhdellä kanavalla. SF12 mahdollistaa pisimmän kantaman, mutta pienimmällä tiedonsiirtonopeudella (DR, Data Rate) ja suurimmalla energiakulutuksella. Hyötykuorman (payload) koko riippuu myös mitä SF:ä on käytetty. Mitä pienempi SF, sen suurempi tiedonsiirtonopeus ja lyhyempi lähetyksen kesto. Spreading Factoria käytetään LoRa-verkoissa usein yhdessä muiden parametrien, kuten kaistanleveyden ja Coding Rate-arvon kanssa signaalin ominaisuuksien optimoimiseksi erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Tiedonsiirtonopeuteen (DR) vaikuttaa myös kaistanleveys (bandwith, BW) ja tämä voidaan laskea kaavalla $DR = \frac{SF}{2^{SF/2}} \times BW$. LoRa-radion tiedonsiirtonopeus vaihtelee CSS-tekniikalla

Tiedonsiirtonopeus	SF/taajuuskaista	bit/s	Maks. payload (tavua)
DR0	SF12 / 125 kHz	250	51
DR1	SF11 / 125 kHz	440	51
DR2	SF10 / 125 kHz	980	51
DR3	SF9 / 125 kHz	1760	115
DR4	SF8 / 125 kHz	3125	222
DR5	SF7 / 125 kHz	5470	222

Taulukko 1. LoRa tiedonsiirtonopeudet (DR0-DR5) EU868

välillä 0,3 - 5,5 kb/s ja FSK-tekniikalla se voi olla jopa 50 kb/s. (Almuhaya ym. 2022). Taulukossa 1 esitetty tiedonsiirtonopeus, SF-arvot ja taajuuskaista ja näiden vaikutus hyötykuormaan (payload).

Myös määritellyllä virheenkorjauskertoimen (Coding Rate, CR) arvolla on vaikutusta siihen, paljonko lähetyksen hyötykuorma voi sisältää bittejä. Coding Rate (CR) on virheenkorjauksen suhdeluku, jossa lisätään lähetettyjen bittien määrää vastaanotossa virheiden havainnointiin ja korjaamiseen. Jos $CR = 4/8$, niin neljän bitin lähetyksessä lähetetään kahdeksan bittiä. Yleinen CR-luku on $4/5$ ja tällöin suhdeluku on 1,25. Suhdeluku kertoo redundanssibittien suhteesta lähetettävien bittien kokonaismäärään. Mitä isompi suhdeluku niin sen parempi häiriönsieto ja helpompi vastaanottajan ymmärtää viesti. CR arvolla on vaikutusta siihen, paljonko todellisia bittejä pystytään lähettämään kerralla.

Ruuhkan välttämiseksi ja tasapuolisuuden nimissä LoRaWAN-verkoissa on määritelty lähetyksen käyttöjakso (Duty Cycle), jolla rajoitetaan päätelaitteen kaistanvaraamista ja kanavalepääsyä. Duty Cycle -käyttöjakso määritellään osuutena ajasta, jonka aikana verkkoa käytetään. Euroopan sääntelyn mukaan 868 MHz:n taajuusalueella käyttöjakso on 1%. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kanavakohtaisesti jokaista lähetettyä sekuntia kohden tulee olla 99 sekuntia lähettämättä (Ertürk ym. 2019). Edellä mainituista poiketen 869.525MHz taajuuskanavalla downlink-viestien käyttöjakso on 10%. Tämän lisäksi LoRaWAN verkkoalustaoperaattorit voivat rajoittaa viestiliikennettä sääntelyä enemmän. Esimerkiksi The Things Networkin yhteisöalusta rajaa päivittäisen päätekohtaisen uplink-lähettämisen 30 sekuntiin ja downlink-viestien lähettämisen 10 viestiin päivässä ("TTN Duty Cycle" 2023).

Käyttöön otettavissa on ADR-mekanismi (Adaptive data rate), jolla tiedonsiirtonopeutta (DR) voidaan säätää dynaamisesti. Se ohjaa Spreading Factor, kaistanleveys ja lähetysteho -arvoja. Menetelmässä verkkopalvelin laskee optimaalisen tiedonsiirtonopeuden päätelaitekohtaisesti hyödyntäen 20 viimeisintä uplink-mittausta ja mittausprosessi on jatkuva. Mittauksessa se hyödyntää RSSI ja SNR keskiarvoja. ADR on tärkeä ominaisuus LoRaWAN-verkoissa peiton, häiriöiden ja energiankulutuksen hallitsemiseksi. Tavoitteena on lyhentää datakehysten lähetysaikaa, koska tukiasemaa lähempänä olevat päätelaitteet voivat käyttää pienempiä SF-arvoja ja näin suurempia lähetysnopeuksia, mikä vähentää kanavan käyttöä ja energiankulutusta. (Ertürk ym. 2019)

LoRa-signaali voidaan vastaanottaa, jos signaalin voimakkuus (RSSI) on suurempi kuin vastaanottimen herkkyytaso. Vastaavasti signaali-kohinasuhteen (SNR) tulee pysyä tietyn kynnyksen alapuolella. Teknologian kohinansietoa kuvaa hyvin, että SF12 signaalin SNR voi olla -20dB:n luokkaa, jonka kohina on 100 kertaa voimakkaampi kuin signaali.

Fyysisen kerroksen pakettirakenne (PHY) on hyvin kevyt ja sisältää vain alustusosan (preamble), valinnaisen otsikon (header) ja hyötykuorman (PHYpayload) (kts. taulukko 2). PHYpayload sisältää kaiken LoRa MAC -kerroksen tiedon. CRC-tarkistusta käytetään virheiden havaitsemiseen. CRC on käytössä vain uplink-viestinnässä, muutoin uplink- ja downlink-paketit ovat vastaavat. Alustusosaa käytetään vastaanottimen synkronointiin, ja sen kokonaispituus voi olla 10 - 65 536 symbolia. Lähettimen ja vastaanottimen on tunnettava SF-arvo etukäteen alustusosan havaitsemiseksi, koska sen koko skaalautuu SF-arvon mukaisesti (Haxhibeqiri ym. 2018).

Alustusosa	PHY otsikko ja otsikon CRC	PHY hyötykuorma	CRC
Preamble	PHDR + PHDR_CRC (20 bittiä)	PHYpayload (P tavua)	CRC (2 tavua)

Taulukko 2. LoRa-fyysinen kerros (“LoRaWAN® Specification v1.0.3” 2018)

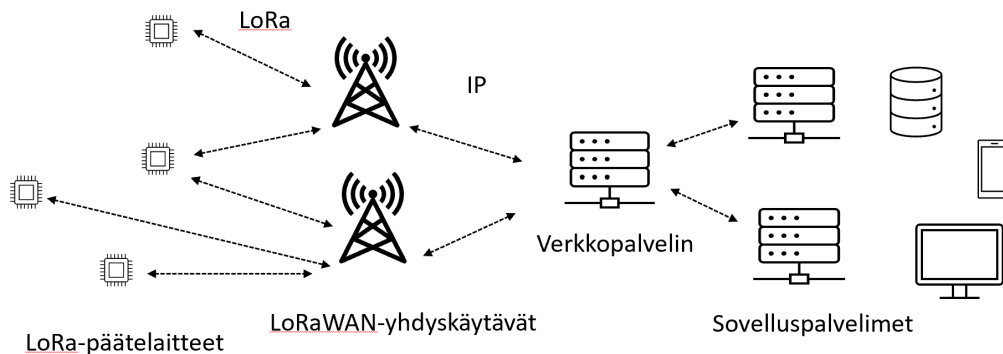
2.3 LoRaWAN-verkon arkkitehtuuri

LoRaWAN-protokolla määrittelee MAC-kerroksen fyysisen kerroksen LoRa-laitteille. Se on avoin tiedonsiirtoprotokolla, jonka kehitystä koordinoi LoRa Alliance yhteisliittymä (“Lora Alliance” 2023). LoRaWAN versio 1.0 julkaistiin vuonna 2015. Merkittävin päivitys spe-

sifikaatioon on ollut LoRaWAN v1.1 (“LoRaWAN® Specification v1.1” 2017), joka mahdollistaa eri laiteluokat, multicast-lähetämisen, laitteiden verkkovierailut sekä turvallisuuden parantamisen. Päätelaitteet eivät vielä tue versiota LoRaWAN v. 1.1 ja tällä hetkellä LoRaWAN-verkot ovat pääosin v1.0.x protokollan mukaisia. Merkittävin päivitys tähän versioon on ollut LoRaWAN v1.0.3 (“LoRaWAN® Specification v1.0.3” 2018), joka lisäsi tuen B-luokan laitteille. Viimeisin ja viimeinen version 1.0 päivitys on v1.0.4. LoRaWAN kuvaa koko verkkoarkkitehtuurin, hoitaa todennuksen, tietojen salauksen, kuittauksen ja verkon hallinnan.

LoRAWAN-verkkojen arkkitehtuuri muodostuu päätelaitteista, yhdyskäytävistä sekä verkko- ja sovelluspalvelimista. Päätelaitteet ovat vähävirtaisia, yksinkertaisia ja edullisia laitteita, joissa on mikropiiri, LoRa-radio ja laiteohjelmisto sekä yleensä jokin sensori tai aktuaattori. Päätelaitteet kommunikoivat verkon yhdyskäytävälle LoRaWAN MAC-protokollalla. Siirtokerros huolehtii energiatehokkuudesta, kanavanhallinnasta, tiedonsiirrosta ja tietoturvasta. LoRaWAN verkko on topologiaaltaan Star of stars -tähtiverkko, jossa päätelaitteet viestivät verkkoon yhdyskäytävän (gateway) välityksellä. Yhdyskäytävät muuttavat LoRa-radiosignaalin IP-paketeiksi ja välittävät ne verkkopalvelimelle (Network Server). Vastavasti yhdyskäytävät välittävät verkkopalvelimen lähettämät downlink-viestit päätelaitteelle. Yhdyskäytäviä voi verkossa olla yksi tai useampi ja laitteiden ensisijainen tarkoitus on yhdistää LoRa-päätelaitteet ja verkkopalvelin. Päätelaitteiden lähettämän uplink-viestin vastaanottavat kaikki lähetysalueella olevat yhdyskäytävät. Päätelaitteet kommunikoivat lähimmän yhdyskäytävän kanssa, jonka se kuulee parhaiten. Verkkopalvelin poistaa mahdolliset duplikaattiviestit ja vain yksi paketti käsitellään. Yhdyskäytävä on yhdistetty verkkopalvelimeen IP-protokollalla vaihtoehtoisin verkkoyhteyksin (Ethernet, Wi-Fi, 4G). Jokaisella päätelaitteella ja yhdyskäytävällä on yksilöllinen EUI (Extended Unique Identifier) (“LoRaWAN® Specification v1.1” 2017).

Verkkopalvelin (Network Server) on LoRaWAN-protokollan keskiössä ja hallitsee kaikkea MAC-kerroksen toimintoja. Se vastaa verkon resursseista ja toiminnasta, laitehallinnasta (päätelaitteet, yhdyskäytävät), niiden autentikoinnista ja auktorisoinnista (pääsynhallinta), viestinvälityksestä, viestien reitittämisestä, kuittaamisesta ja puskuroinnista sekä integraatioista ja ADR-tiedonsiirtonopeuden ohjauksesta. Verkkopalvelin todentaa viestinnän istun-



Kuvio 1. LoRaWAN arkkitehtuurikuvaus

tokohtaisella 128-bittisellä AES-avaimella (NwksKey, Network Session Key). Verkkopalvelimen rinnalla Join Server-hoittaa verkkoarkkitehtuurin liittymispalvelua. (Ertürk ym. 2019; “LoRaWAN® Specification v1.1” 2017).

Verkkopalvelimet välittävät dataa sovelluspalvelimille (Application Server). Sovelluspalvelimen tehtävä on mm. prosessoida ja visualisoida päätelaitteiden välittämää dataa ja tarjota palveluita käyttäjäsovelluksen toteuttamiseen. Sovelluspalvelimet lähettävät myös tarvittaessa datapaketteja verkkopalvelimen välityksellä päätelaitteelle. Viestit salataan päätelaitteen ja sovelluspalvelimen välillä 128-bittisellä AES-avaimella (AppSKey, Application Session Key). Spesifikaatio ei määrittele sovelluspalvelimen ja verkkopalvelimen välistä rajapintaa, vaan se on toimittajakohtainen. Yleisesti verkko- ja sovelluspalvelimen integraatiot toteutetaan HTTP- tai MQTT-protokollaa hyödyntäen.

LoRaWAN-arkkitehtuurin toteuttamiseen on erilaisia ratkaisuja. On olemassa useita kansallisia ja globaaleja LoRaWAN-alustaratkaisujen tarjoajia, joilla voidaan toteuttaa niin julkisia kuin yksityisiä LoRaWAN-verkkototeutuksia. Käytettävissä on myös avoimen lähdekoodin ratkaisuja, joilla toteutuksen voi rakentaa itse. Kolehmainen (2022) on omassa tutkielmassaan tehnyt varsin kattavan esittelyn yleisimmistä LoRaWAN-verkkoalustoista. Tietoturvallinen ratkaisu on, että verkko- ja sovelluspalvelin on eriytetty, jolloin voidaan taata end-to-end-tietoturva (Montagny 2022). Kuviossa 1 esitellään LoRaWAN verkkoarkkitehtuuri.

LoRaWAN-protokollassa on sisäänrakennettu tietoturva. Jokainen laite vaatii aktivoinnin

voidakseen liittyvä LoRaWAN-verkkoon. LoRaWAN standardi määrittelee kaksi erilaista päätelaitteen aktivointi- ja pääsynhallinnan menetelmää OTAA (Over-the-Air Activation) sekä ABP (Activation by Personalization). OTAA menetelmä on näistä tietoturvallisempi ratkaisu, jossa päätelaitteiden tulee liittyä verkkoon ennen sovelluskohtaista tiedonsiirtoa. Menetelmä on myös joustavampi ja helpompi ylläpitää, koska liittymisavaimet luodaan dynaamisesti. Päätelaite aloittaa aktivointiprosessin salaamattomalla Join Request-liittymispyynnöllä, joka sisältää laitteen DevEUI ja AppEUI/JoinEUI tiedot, sekä satunnaisen DevNonce tiedon. Salaamiseen käytetään laitteen AppKey-arvoa. Verkkopalvelimeen tulee olla määritelty nämä vastaavat tiedot. Verkkopalvelin vastaa liittymispyyntöön hyväksymällä pyynnön (Join Accept). Päätelaite generoi viestistä (JoinNonce-arvosta) sessiokohtaiset (DevAddr), NwkSKey ja AppSKey avaimet. ABP menetelmässä päätelaitteelle ja verkkopalvelimeen määritellään kiinteät DevAddr, NwkSKey ja AppSKey arvot ja erillistä Join Request/Join Response aktivointiprosessia ei tarvita. Laitteet kommunikoivat verkkopalvelimella etukäteen määritellyillä avaimilla. Koska avaimet tallennetaan päätelaitteelle, niin niihin kohdistuvat hyökkäykset voivat vaarantaa avaimet. ABP-menetelmä soveltuukin enemmän testikäyttöön. Viimeisin päivitetty spesifikaatio erottelee liittymispalvelimen (Join Server) erillistoteutukseksi verkkopalvelimesta. Näin verkkopalvelin ei tiedä käyttäjätietoja ja tämä parantaa tietoturvalisuutta.

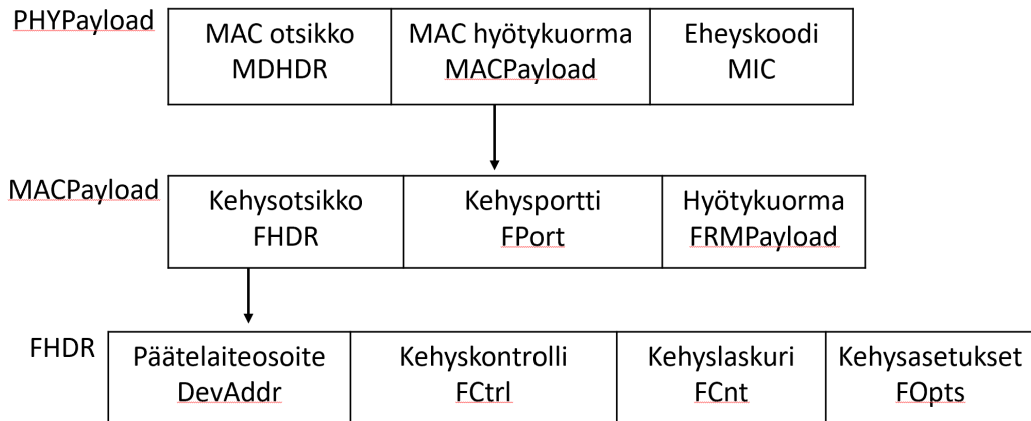
2.4 Viestien lähettäminen ja vastaanottaminen

LoRaWAN-protokollan viestit jaotellaan päätelaitteelta lähteviin uplink-viesteihin ja verkkopalvelimelta päätelaitteelle lähteviin downlink-viesteihin. Uplink-viestit lähetetään kaikille kantoalueella oleville yhdyskäytävillä ja ne noudattavat yksinkertaista ALOHA-menetelmää, jossa laitteet lähettävät dataa aina kun sitä on lähetettäväksi, käyttörajoitukset huomioiden. Downlink-viestit ovat kohdistettuja, mutta ne voivat olla myös multicast-viestejä eli monilähetyksiä. Yleisimmin päätelaitteet lähettävät viestejä. Viestit voivat olla tyypiltään sovellusdataa, MAC-komentoja tai viestien vahvistuksia. Viestien tietosisältö riippuu eri viestinnän tilanteista, viestikenttien pituudet eivät ole vakioita, mutta niillä on maksimipituus.

LoRaWAN-verkon viestit voivat olla vahvistamattomia tai vahvistettuja. Pääsääntöisesti viestit ovat vahvistamattomia, joka on tehokkain tapa. Vahvistetuissa viesteissä jokainen viesti

X	mac data	2023-05-30 17:27:29.325	2023-05-30 20:27:29.325	3230CCA8		2	4	-118.0	-16.0	-134.10...	SF12
↓	mac data	2023-05-30 17:26:31.791	2023-05-30 20:26:31.791	3230CCA8		3	2				SF9
X	data	2023-05-30 17:26:29.791	2023-05-30 20:26:29.791	3230CCA8		2	3	-103.0	-23.0	-126.02...	SF12
↓	mac	2023-05-30 17:25:31.190	2023-05-30 20:25:31.190	3230CCA8		0	1				SF9
X	data	2023-05-30 17:25:29.190	2023-05-30 20:25:29.190	3230CCA8		2	2	-108.0	-9.5	-117.96...	SF12
↓	data	2023-05-30 17:24:48.079	2023-05-30 20:24:48.079	3230CCA8		2	2				SF9
↓	mac	2023-05-30 17:24:31.204	2023-05-30 20:24:31.204	3230CCA8		0	0				SF9
X	data	2023-05-30 17:24:29.204	2023-05-30 20:24:29.204	3230CCA8		2	1	-113.0	-13.0	-126.21...	SF12

Kuvio 2. Uplink- ja downlink-viestintää Digitan verkossa



Kuvio 3. LoRaWAN MAC-kerros

vahvistetaan ACK-kuittauksella. Vahvistetut viestit käyttävät rajoitettua downlink-kapasiteettia ja siksi toteutuksissa onkin tärkeä perustella, miksi viesti tulisi vahvistaa.

Viestin fyysinen kerros esiteltiin aiemmin taulukossa 2. PHYpayload sisältää kaiken LoRa MAC -kerroksen tiedon, joka esiteltä kuviossa 3 . MAC-kerros käsittää MAC-otsikon, hyötykuorman (MAC Payload) ja eheyskoodin (MIC). MACPayload viestikerros sisältää kentät: kehysotsikko (FHDR), kehysportti (FPort) sekä kehyksen hyötykuorman (FRMPayload). FHDR jakaantuu kenttiin: laitteen osoite (DevAddr), kehyskontrolli (FCtrl), kehyslaskuri (FCnt) ja kehysasetukset (FOpts).

MAC-otsikon kenttä määrittelee viestin tyyppin, onko se liittymispyyntö (Join-Request), liittymisen hyväksyntä (Join-Accept), uplink tai downlink-viesti ja onko kyseessä vahvistettu tai vahvistamaton lähetys. FRMPayload sisältää mitä tahansa sovellusdataa huomioiden maksimikoko, kun kehysportin arvo on välillä 1-223. Kentässä voidaan lähettää myös MAC-komentoja, kehysportin arvolla 0. MAC-komentoja voidaan viedä myös sovellusdatan mukana FOpts-kentässä. (“LoRaWAN® Specification v1.1” 2017; “Sending and Receiving Mes-

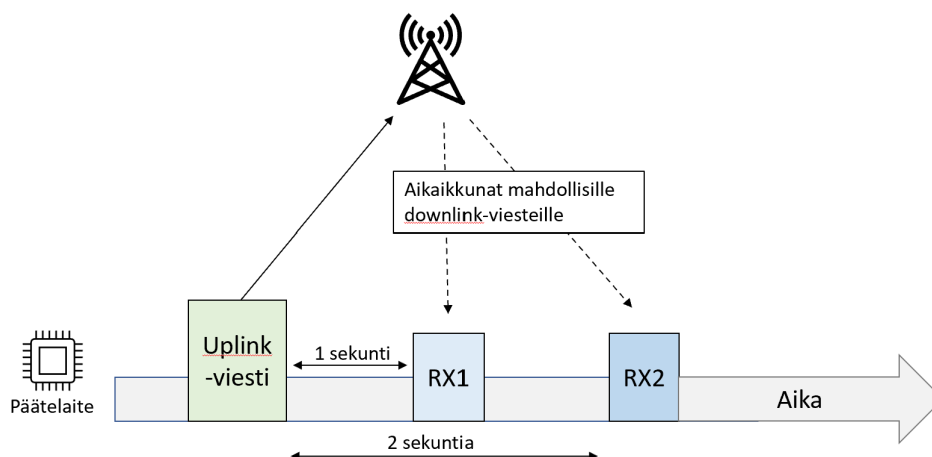
sages with LoRaWAN” 2023; Montagny 2022)

2.5 LoRaWAN laiteluokat

LoRaWAN-standardi tukee kolmea eri laiteluokkaa (Class A, B ja C) (“LoRaWAN® Specification v1.1” 2017; Yegin ym. 2020; Ron ym. 2020). Nämä luokat määrittelevät laitteiden lähetyskäytännöt ja näistä jokaisella on omat erityispiirteensä.

A-luokka (Class A, All) on päätelaitteiden oletustyyppi ja jokaisen LoRaWAN-päätelaitteen tulee tukea tämän luokan toiminnallisuuksia. Kaikki LoRaWAN päätelaitteet käynnistyvät ja liittyvät LoRaWAN-verkkoon A-luokan laitteina. Ne toimivat Aloha-menetelmän mukaisesti. Viestintä on aina päätelaitteen käynnistämää, eikä yhdyskäytävän saatavuutta tarkisteta. Kun päätelaite on määritelty lähettämään uplink-viestin, niin se valitsee satunnaisesti taajuuskanavan ja aloittaa lähettämisen. Downlink-viestintä on luokan laitteilla rajoitettua. Kun päätelaite lähettää uplink-viestin, niin heti lähettämisen jälkeen (-/+ 20 microseconds) se avaa lyhyen vastaanottoikkunan (RX1) vastaanottaakseen downlink-viestin tai ACK-kuittauksen verkkopalvelimelta. Mikäli päätelaite ei vastaanota pakettia ensimmäisen aikakehyksen aikana, niin avaa se vielä toisen vastaanottoikkunan (RX2). Laite kuuntelee vastaanottoikkunan ajan mahdollista downlink-viestiä verkkopalvelimelta. RX1:n aikana kanavataajuus ja tiedonsiirtonopeus ovat vastaavat kuin uplink-lähetyksessä. RX2:ssa käytetään ennalta määriteltyä arvoja. Euroopassa tyypillisesti käytössä ovat 869.525 Mhz ja DR0 (SF12, 125Khz) (H. E. Elbsir ym. 2020). Kanavan Duty Cycle-käyttöjakso on 10%. LoRa-radio pysyy aktiivisena lähetyksen loppuun asti. Aikaikkunan aikana voidaan lähettää vain yksi downlink-paketti. Mikäli verkkopalvelimelle jää jonoon downlink-viestejä, niin päätelaite saa niistä tiedon FPending-lipulla. Kuviossa 4 on esitelty A-luokan downlink-viestintää.

A-luokan laitteet käyttävät vähän virtaa, koska ne kommunikoivat vain silloin kun uplink-viestejä lähetetään. LoRaWAN viestintä on enimmäkseen uplink-viestintää päätelaitteelta verkkopalvelimelle ja laitteet toimivat pääosin A-luokan laitteina. Ne toimivat hyvin soveluksissa, joissa tarvittava downlink-viestintä voi odottaa saapuvaa uplink-viestiä. Näiden laitteiden haasteena on downlink-viestinnän viiveet, koska päätelaitteet voivat vastaanottaa paketteja vain edellä mainittujen aikaikkunoiden aikana.

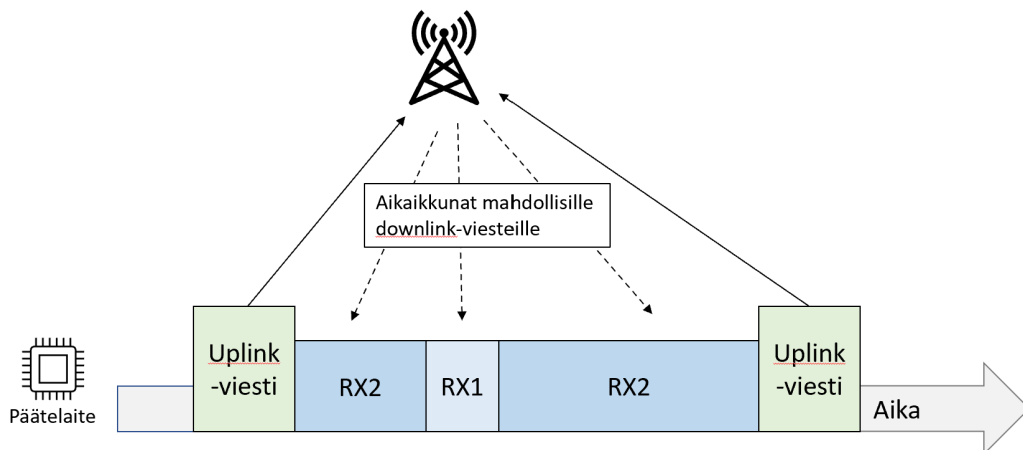


Kuvio 4. A-luokan vastaanottoikkunat

LoRaWAN-päätelaitteet voivat toimia myös B- tai C-luokan laitteina, mutta niiden tulee toteuttaa myös A-luokan mekanismit ja toiminnallisuudet. Päätelaite voi muuttaa tilaansa tarvittaessa. B- ja C-luokan laitteissa voidaan hyödyntää myös multicast-teknologiaa.

Laiteluokka B (Class B, Beacon) on esitelty ratkaisemaan A-luokan viiveisiin liittyviä puutteita ("LoRaWAN® Specification v1.0.3" 2018). B-luokan päätelaitteelle voidaan lähettää downlink-viestejä ilman päätelaitteen uplink-viestejä. Spesifikaatio mahdollistaa säännöllisen downlink-viestinnän verkkopalvelimelta päätelaitteelle. Päätelaite avaa säännöllisin aikaväleihin vastaanottoikkunan (ping slot) downlink-viestien vastaanottamiseen. Tämä vaatii, että päätelaitteen kello on synkronoitu. Menetelmällä on korkeampi virrankulutus verraten A-luokan laitteisiin. Teknologia soveltuu erityisesti akkukäyttöisiin ratkaisuihin, joissa tarvitaan viiveettömämpää downlink-viestintää. Luokan uplink-lähetystyksiä hallitaan samalla tavalla kuin luokassa A. B-laiteluokan spesifikaatioon perehdymme tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Laiteluokka C (Class C, Continuous) mahdollistaa jatkuvan downlink-viestinnän. Päätelaite kuuntelee jatkuvasti downlink-viestintää yhdyskäytävältä uplink-viestien välillä. Vastaanottoikkuna (RX2) pidetään avoinna koko ajan, ainoastaan uplink-viestin aikana ikkuna on suljettu (kuvio 5). Laiteluokka mahdollistaa pienet lähetysviiveet, mutta kuluttaa päätelaitteelta paljon virtaa. Ratkaisu soveltuukin parhaiten laitteisiin, jotka ovat verkkovirrassa. Uplink-



Kuvio 5. C-luokan vastaanottoikkunat

lähetyksiä hallitaan samalla tavalla kuin A-luokassa.

2.6 Luokka B (Class B)

Tässä tutkielmassa perehdymme B-laiteluokan (Beacon) laitteisiin, jotka ovat optimoitu energiatehokkaaseen ja vähäviiveiseen downlink-viestintään (Delobel, El Rachkidy ja Guitton 2017). Myös Ron ym. (2020) toteaa, että B –luokka on suunniteltu vähentämään downlink-viestinnän lähetysviiveitä energiatehokkaasti. Tämä luokka sopii akkukäyttöisille päätelaitteille ja sovelluksiin, joissa päätelaitteelle lähetetään aikataulutettuja downlink-viestejä.

LoRaWAN määrittelee, että päätelaitteet kommunikoivat oletuksena A-luokan tilassa. B- ja C-luokan laitteet kykenevät vaihtamaan tilaansa tarvittaessa ohjelmallisesti. Kaikki päätelaitteet eivät kuitenkaan tue B-luokkaa. B-luokan laitteiden tulee toteuttaa kaikki A-luokalle määritellyt MAC-komennot, sekä B-luokan komennot. Toimiakseen laitteiden ja verkon tulee tukea vähintään LoRaWAN 1.0.3 spesifikaatiota. Kyseessä on vaihtoehtoinen tila, joka mahdollistaa downlink-viestien lähettämisen uplink-lähetyksistä riippumatta. Kuten edellä jo mainittiin B-luokka tarjoaa aikataulutetut Ping-ikkunat (ping-slot) downlink-viestien vastaanottamiseen. Tämä perustuu synkronointimekanismiin päätelaitteen, verkkopalvelimen ja yhdyskäytävän välillä. Synkronointi toteutetaan yhdyskäytävän lähettämän aikasynkronoidun Beacon-viestin avulla, joka päätelaitteen tulee vastaanottaa säännöllisesti (“LoRaWAN®

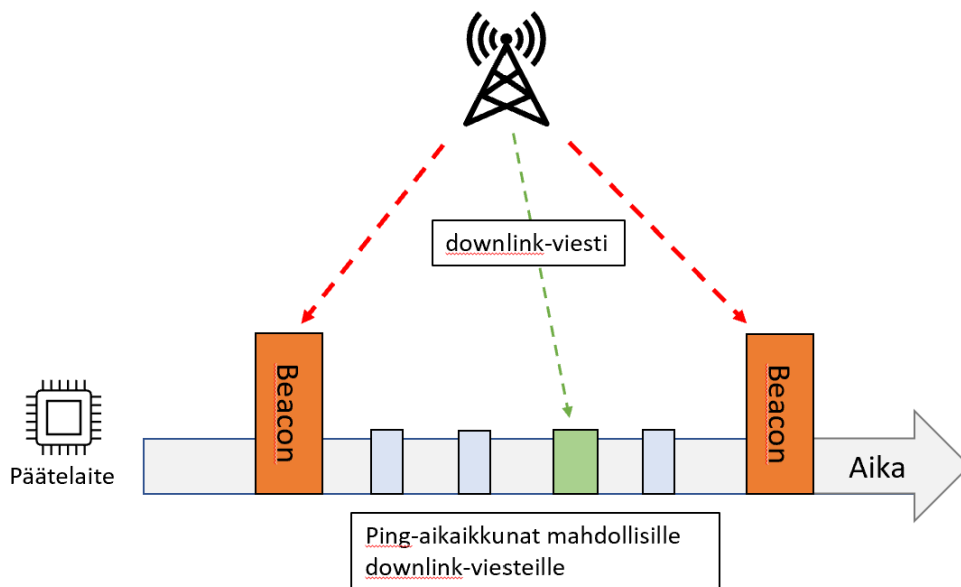
Specification v1.0.3” 2018).

CID	Komento	Lähettäjä	Kuvaus
0x10	PingSlotInfoReq	node	Asetetaan Ping-ikkunan aikaväli (unicast)
0x10	PingSlotInfoAns	GW	PingInfoSlotReq-komennon vahvistaminen
0x11	PingSlotChannelReq	GW	Asetetaan päätelaitteen ping-kanavan taajuus ja tiedonsiirtonopeus (unicast)
0x11	PingSlotChannelAns	node	PingSlotChannelReq-komennon vahvistaminen
0x12	BeaconTimingReq	node	Poistunut käytöstä
0x12	BeaconTimingAns	GW	Poistunut käytöstä
0x13	BeaconFreqReq	GW	Muutetaan Beacon-viestien lähetystaajuutta
0x13	BeaconFreqAns	node	BeaconFreqReq-komennon vahvistaminen

Taulukko 3. B-luokan MAC-komennot (“LoRaWAN® Specification v1.0.3” 2018)

Kun päätelaite tekee pyynnön toimia B-luokan tilassa, tulee sen ensin kuulla yhdyskäytävän lähettämä Beacon-viesti. Havainnoidakseen Beacon-viestin päätelaite pitää vastaanottaa päällä vähintään yhden Beacon jakson. Vastauksena päätelaite saa joko BEACON LOCKET tai BEACON NOT FOUND-vastauksen. Kun päätelaite vastaanottaa Beacon-viestin, niin päätelaite synkronoi kellonsa ja avaa vastaanottoikkunan Ping Slot-määritysten mukaisesti. Päätelaitteet voivat vaihtaa tilansa B-luokan laitteeksi vasta sitten, kun ne kuulevat Beacon-viestin ja ovat lukittautuneet (Beacon locked) majakkaan (Shiferaw, Arora ja Kuipers 2020). Tämän rinnalla päätelaite voi lähettää palvelimelle DeviceTimeReq-komennon, jolla synkronoi kellonsa ja nopeuttaa prosessia. Kaikki päätelaitteen kuulemat yhdyskäytävät lähettävät Beacon-viestejä synkronisesti samalla kanavalla ja samoilla radioparametreillä, näin ne näyttävät samalta signaalilta päätelaitteesta katsoen. Laitteen toimiessa B-luokan tilassa avaa se ennalta määritellyin aikaväleihin (ping period) Ping-vastaanottoikkunan (ping slot), jonka aikana verkkopalvelin voi käynnistää downlink-viestin lähettämisen päätelaitteelle.

Downlink-viestin välitys sovelluspalvelimelta B-laiteluokan päätelaitteelle etenee seuraavasti. Sovelluspalvelin lähettää downlink-viestin verkkopalvelimen jonoon. Verkkopalvelin laskee seuraavan ping-ikkunan aikataulun sekä valitsee parhaimman yhdyskäytävän perustuen päätelaitteen viimeisimpään uplink-viestiin signaaliarvoon. Verkkopalvelin asettaa downlink-viestin yhdyskäytävän jonoon. Kun Ping-ikkuna alkaa, päätelaite siirtyy vastaanottotilaan ja samanaikaisesti yhdyskäytävä lähettää downlink-viestin. Päätelaite kytkeytyy aina vastaanottotilaan Ping-ikkunan alussa, mutta mikäli viestin alustusosaa (preamble) ei

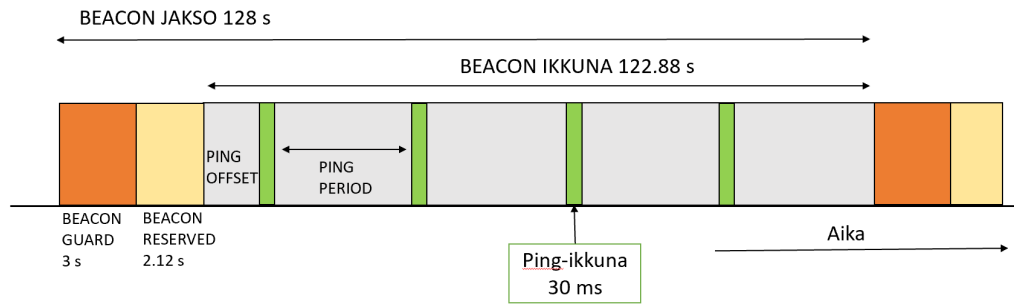


Kuvio 6. LoRaWAN B-luokka

havaita, niin laite siirtyy takaisin lepotilaan. Suurimmalta osin verkko ei lähetä mitään, kuviossa 6 on kuvattu B-luokan viestintää (“An In-depth Look at LoRaWAN Class B Devices” 2023).

Synkronointisignaalien vastaanotto ja ping-ikkunat lisäävät virrankulutusta verraten A-luokan laitteisiin. Tapauskohtaisesti laitetilaja voidaankin vaihtaa sovelluserroksen ohjaamana. Mikäli tilojen vaihtoa hallitaan verkosta vaaditaan ensin A-luokan tilassa uplink-viesti, että tilamuutosta ohjaava downlink-viesti saadaan lähetettyä päätelaitteelle. LoRa-radio on vastaanottotilassa vain, kun se vastaanottaa downlink-viestejä, vastaanottaa yhdyskäytävän beacon-viestejä ja tarkistaa tyhjiä ping- aikavälejä. Muulloin laitteen radio on lepotilassa. Tyhjät ping-ikkunat voivat myös osin johtua siitä, että yhdyskäytävä ei kykene lähettämään rajoitetun duty cycle-käyttöjakson vuoksi (“An In-depth Look at LoRaWAN Class B Devices” 2023; “LoRaWAN 1.0.4 Class B and C for End Devices” 2023).

Yhdyskäytävät lähettävät Beacon-viestejä oletuksena 128 sekunnin välein kaikille kantoalueella oleville päätelaitteille. Kahden peräkkäisen Beacon-viestin välinen aika on nimeltään Beacon-jakso (Beacon period). 128 sekunnin jaksoväli on kompromissi, jolla pyritään



Kuvio 7. Beacon-jakso (Beacon period)

säästämään yhdyskäytävän lähetyssaikabudjettia (duty-cycle) sekä minimoimaan päätelaitteen virrankulutusta Beacon-vastaanotossa.

Beacon-aikajakso koostuu kuvion 7 mukaisista osista. Jakson ajasta 2.120 sekuntia on varattu Beacon-viestin lähettämiseen (Beacon reserved), jakson alussa on 3 sekunnin suoja-aika (Beacon guard), johon Ping-ikkunaa ei voida sijoittaa, tällä vältetään downlink-viestien ja Beacon-viestien vastaanoton konfliktit päätelaitteessa. Jäljelle jäävä 122,88 sekunnin Beacon-ikkuna on käytettävissä Ping-vastaanottoikkunoille. Tällä aikavälillä päätelaite avaa määritellyin välein ping-vastaanottoikkunan downlink-viestintään. Beacon-ikkuna jaetaan 4096 yksikköön, joiden pituus on 30 ms. Ping-ikkunan aikaväli voi olla 1-128 sekuntia ja tämä määritellään arvoilla 0-7 (Periodicity, P). Kun $P = 0$, niin päätelaite avaa Ping-ikkunan noin joka sekunti Beacon-jakson aikana, kun taas $P = 7$ avaa Ping-ikkunan kerran 128 sekunnin välein. Aikaväli voidaan laskea kaavalla $2^P = 128s$. Mitä pidempi peräkkäisten ping-välien välinen aika on, niin sitä pidempi on keskimääräinen odotusaika. Ping-jakso on kahden ping-ikkunan välinen viive. (Abdelfadeel ym. 2020) Järjestelmällisten törmäysten ja viestien kuulemiseen liittyvien ongelmien välttämiseksi, kunkin laitteen poikkeama Beacon-viestin ja ensimmäisen Ping-ikkunan välillä satunnaistetaan (Ping Offset) ja sitä muutetaan jokaisen Beacon-jakson välein (Pasetti ym. 2020).

Beacon-viestit lähetetään yhdellä kanavalla. Euroopassa Beacon-viestien ja downlink-kanavan tiedonsiirtonopeutena on käytössä DR3 (SF9, 125 KHz, coding rate 4/5) taajuuskaistalla 869.525 MHz. Näitä arvoja voidaan muuttaa MAC -komennoilla.

B-luokan uplink-viestintä toteutetaan vastaavasti mitä A-luokassa. Uplink-viesti voidaan lä-

hettää milloin tahansa käyttöjakson rajoitukset huomioiden, mutta downlink-viesteissä ei käytetä RX-ikkunoita. Mikäli A- ja B-luokan vastaanotossa tulee konflikteja niin A-luokka on etusijalla. B-luokan uplink-kehysrakenne on kaikilta muilta osin vastaava kuin A-luokan rakenne, lukuunottamatta kehyksen otsikossa olevaa Frame Control (FCtrl)-kentän bittiä, joka B-luokan tiedonsiirrossa saa arvon 1. Tämä kertoo verkkopalvelimelle, että päätelaite toimii B-luokassa. B-luokan downlink-viestit ovat hyvin vastaavia, mitä A-luokassa. Poikkeuksena FPending bitin eri merkitys, jota käytetään B-luokassa ping-aikavälien ristiriitaisissa ilmaisemaan, mitä aikaväliä päätelaitteen tulee kuunnella. B-luokan downlinkit eivät voi sisältää MAC-komentoja ja ne jätetään huomioimatta. Jos päätelaite vastaanottaa vahvistetun downlink-viestin (ACK), päätelaita vastaa tähän A-luokan uplink-viestillä, ACK-bitin arvolla 1 (“Sending and Receiving Messages with LoRaWAN” 2023).

B-luokan tilassa laitteen on pysyttävä synkronoituina verkon beaconeihin. Päätelaite viestii säännöllisesti uplink-viestillä sijaintinsa ja downlink-reitin verkkopalvelimelle, jotta verkkopalvelin voi päivittää downlink-reitityspolkutietokannan. Laite voi menettää tilapäisesti yhdyskäytävän Beacon-viestinnän, tähän voivat olla syynä erilaiset häiriöt tai päätelaitteen liikkuminen verkkoalueen ulkopuolelle. LoRaWAN-spesifikaatio edellyttää, että B-luokan laitteiden on toimittava B-luokan tilassa vastaanottamatta Beacon-viestejä (beaconless) kahden tunnin ajan. Tällöin päätelaite luottaa omaan sisäiseen kelloonsa. Mikäli Beacon-viestiä ei vastaanoteta tässä ajassa, niin laitteet palaavat A-luokkaan.

B-luokan virrankulutukseen vaikuttavat Beacon-viestin hakuun ja vastaanottoon käytetty aika, Ping-ikkunan aikaväli, tiedonsiirtonopeus ja lähetettyjen downlink-viestien määrä. Semtechin materiaalissa (“An In-depth Look at LoRaWAN Class B Devices” 2023; “LoRaWAN 1.0.4 Class B and C for End Devices” 2023) todetaan, että Ping-ikkunan aikavälin ollessa 32 sekuntia ($P=5$), kulutus jakautuu suunnilleen tasan Beacon-synkronoinnin ja Ping-ikkunoiden avaamisen välillä. Paras skenaario on, että Ping-ikkunan jaksotus on lähellä yhdyskäytävän Duty Cycle-käyttöjaksoa. Abdelfadeel ym. (2020) toteaa, että yhdyskäytävän Duty Cycle-käyttöaste riippuu käytetystä datanopeudesta ja näin paras säännöllisyys vaihtelee datanopeuden mukaan.

B-luokan vaatimus on, että yhdyskäytävä lähettää beacon-signaalin päätelaitteelle. Kaikki yhdyskäytävät eivät tue B-luokkaa. Tämä vaatii, että yhdyskäytävältä on saatavissa GPS-

Tavukoko	2	4	2	7	2
BCNPayload	RFU	Time	CRC	GwSpecific	CRC

Taulukko 4. Beacon datakehys

aika, jolla ajan synkronointi hoidetaan. Yleisesti sisätukiasemissa tällaista ominaisuutta ei ole. Beacon-viesti sisältää ainoastaan preamble ja määritellyn pituisen payloadin (BCN-Payload). Päätelaitteiden Beacon-haun virrankulutuksen minimoimiseksi preamble on pidempi kuin oletuksena. BCNPayload koostuu verkon yhteisestä osasta, yhdyskäytäväkohtaisesta osasta ja aikaleimasta. Beacon-viestin aikaleima on GPS-aika ilmoitettuna sekunteina lähtien GPS-ajanlaskun alusta (06.01.1980 klo 00:00:00 UTC). Beaconin verkon yhteisen osan eheys suojataan CRC:llä. Valinnaisen yhdyskäytäväkohtaisen osan (GwSpecific) Infokentässä välitetään yhdyskäytävän GPS-koordinaatit. Taulukossa 4 esitetty Beacon datakehys.

LoraWAN downlink-viestit voivat olla unicast tai multicast-lähetysiksi. Seuraavassa kappaleessa tarkastelemme LoRaWAN-multicast viestintää.

2.7 LoRAWAN multicast

LoRaWAN-multicast on monilähetysteknologia, joka mahdollistaa saman downlink-viestin lähettämisen yhdellä kertaa usealle päätelaitteelle LoRaWAN-verkossa. Identtisten tietojen lähettäminen erikseen (unicast-lähetys) jokaiselle yksittäiselle IoT-laitteelle on tehotonta energiankulutuksen ja verkon kuormituksen suhteen, ja se voidaan tehdä tehokkaammin monilähetysten kautta yhdellä lähetyksellä (Shiferaw, Arora ja Kuipers 2020). Multicast-viestejä voidaan käyttää esimerkiksi erilaisten hallinta- ja päivitysviestien lähettämiseen laitteille. Kun ryhmä päätelaitteita on yhteisen tukiaseman vaikutusalueella, niin kokonaisen ryhmän päivittäminen on käytännössä sama kuin yhden päätelaitteen päivittäminen. Tämä vähentää verkkoliikennettä ja on energiatehokasta. LoRa Alliance on määritellyt prosessin dokumentissa LoRaWAN Remote Multicast Setup Specification (“LoRaWAN Remote Multicast Setup Specification” 2018).

Multicast-viestejä voivat vastaanottaa vain B- ja C-luokan päätelaitteet. Päätelaitteet tuke-

vat enintään neljää samanaikaista monilähetysryhmää. Multicasting edellyttää, että pääte-laitteet tulee määrittellä multicast-ryhmään (McGroupID). LoRaWAN-verkossa multicast-ryhmä määrittellään verkkoa ylläpitävälle verkkopalvelimelle (Network Server), ryhmä voi-daan luoda dynaamisesti. Remote Multicast Setup -paketti sisältää komentoja multicast-ryhmien listaamiseen, luomiseen, muokkaamiseen ja poistamiseen, sekä tietojen kyselyyn multicast-ryhmistä. Spesifikaatio edellyttää, että kaikki multicast-ryhmän laitteet jakavat sa-man multicast -lähetysosoitteen (McAddr) ja siihen liittyvät salausavaimet. Multicast-osoite on nelitavuinen verkko-osoite. Viestit salataan käyttämällä ryhmäkohtaista McAppSKey:tä. McNwkSKey on verkkosessioavain, jota käytetään pakettien tarkistamiseen. Lisäksi määri-tellään kehyslaskuri, joka laskee Multicast-ryhmän lähettämien kehysten määrän. Kaikkien laitteiden on kuunneltava verkkoa samanaikaisesti, samalla kanavalla ja samalla tiedonsiir-tonopeudella ja niiden Spreading Factor-arvo ja ping-ikkunoiden aikavälit tulee olla samat (“LoRaWAN Remote Multicast Setup Specification” 2018).

Että viesti voidaan lähettää koko monilähetysryhmälle, järjestelmän on ensin varmistetta-va, että kaikki monilähetysryhmän laitteet ovat aktiivisina vastaanottamassa viestiä samaan aikaan. Tämä varmistetaan laitteiden kellojen synkronoinnilla. LoRaWAN-verkot käyttävät GPS-aikaa aikaviitteenä. Synkronointi voidaan tehdä käyttämällä MAC-kerroksen DeviceTimeReq-komentoa, joka on saatavilla LoRaWAN-määrittelyn versiosta 1.0.3 alkaen. B-luokassa laite kuuntelee säännöllistä Beacon-viestiä, joka sisältää GPS-ajan. Laite voi käyttää tähän myös erillistä Application Layer Clock Synchronization-pakettia.

Kun laitteiden kellot on synkronoitu, laitteenhallintapalvelu (Device Management Service) asettaa ryhmän laitteet avaamaan vastaanottimensa samanaikaisesti sekä käyttämään samaa taajuuskanavaa ja tiedonsiirtonopeutta. C-luokan monilähetysistunnossa määritellään aloi-tusajankohta, kesto sekä taajuuskanava ja tiedonsiirtonopeus. Kun laitteen kello saavuttaa aloitusajan, niin vastaanottimet käynnistyvät. Verkko voi sen jälkeen lähettää paketteja sa-moilla parametreilla koko C-luokan istunnon ajan. Menetelmä on yksinkertainen eikä vaadi tarkkaa ajoituksen synkronointia. C-luokan laitteiden vastaanotin on päällä koko istunnon ajan, menetelmä ei ole energiatehokas, johtuen LoRaWAN verkon alhaisesta Duty Cycle-lähetysjaksosta (10%).

B-luokan monilähetysistunnossa kaikki ryhmän laitteet synkronoivat kellonsa Beacon-viestillä

(128 sekunnin välein) ennen istunnon aloittamista. Istunnon aikana ryhmän laitteet avaavat vastaanottoikkunansa samanaikaisesti ja pysyvät auki istunnon keston ajan. Tämä mahdollistaa laitteiden vastaanottimien päälle kytkemisen jaksoittain, samalla kun ne viettävät suurimman osan ajasta levossa.

Päätelaitteiden ohjauskomennot lähetetään jokaiselle päätelaitteelle erikseen unicast downlink-viestinä. Viesti voi sisältää kerralla useita komentoja, payload on määrämuotoinen. Käskyt suoritetaan ensimmäisestä viimeiseen ja jokaisen täytyy saada yksilöllinen vahvistus päätelaitteelta.

Monilähetystoiminto rakennetaan kahden komennon avulla. McGroupSetupReq-komennolla perustetaan multicast-ryhmä ja lähetetään ryhmäkohtainen salausavain päätelaitteille. Avainta käytetään multicast-viestien salaukseen. Jokainen päätelaite vahvistaa multicast-asetukset McGroupSetupAns-komennolla. Tämän jälkeen C-luokan multicast-ryhmän laitteille lähetetään McClassCSessionReq-viesti, joka määrittelee istunnon keston, istunnon aikakatkon, datanopeuden ja kanavan. Vastaavasti kun kyseessä on B-luokan multicast-ryhmä, niin laitteille lähetetään McClassBSessionReq-komento, joka sisältää lisäksi B-luokan ping-ikkunoiden aikavälin multicast-lähetystyksiä varten (Abdelfadeel ym. 2020). Multicast-viestien ping-ikkunoiden aikavälit määritellään sovelluserroksen toimesta, eivätkä siis muutu käyttäen LoRaWAN-protokollan PingSlotInfoReq-komentoa.

B-luokan istunto kestää pidempään, kuin vastaava C-luokan, mutta kuluttaa vähemmän virtaa päätelaitteelta johtuen luokan aikataulutetusta kommunikoinnista. Kellon synkronisointi on tärkeää, että laiteryhmä voi aloittaa monilähetystoimintonsa samaan aikaan ja synkronoituna. (Catalano 2021).

LoRaWAN on yksi harvoista radioprotokollista, jotka mahdollistavat todellisen monilähetysominaisuuden ilmassa ("Firmware Updates Over-the-Air" 2023). Spesifikaatio ei määrittele mitään oletuksia datakehysten luonteesta. Multicast-teknologian haasteena on kadonneet datapaketit. Multicast-viestit ovat aina vahvistamattomia ja niiden ACK-bitti on asetettu 0:aan. Tästä syystä monilähetystoiminnon aikana on tarpeen olla käytettävissä tehokas menetelmä tiedostojen fragmentoinnille ja varmistaa toimitus jokaiselle laitteelle ryhmässä. Tämän vuoksi on kehitetty menetelmä Fragmented Data Block Transport ("LoRaWAN Frag-

mented Data Block Transport Specification v1.0.0” 2023) virheiden korjaamiseen, niin että kaikki laitteet saavat virheettömän tiedoston, vastaanottamatta jokaista fragmenttia useita kertoja.

LoRa Alliance on perustanut ryhmän tavoitteenaan standardoida FUOTA (Firmware Update Over The Air) prosessi. Tällä hetkellä kyse on suosituksesta FUOTA Process Summary Technical Recommendation (Abdelfadeel ym. 2020). Remote Multicast Setup ja Fragmented Data Block Transport spesifikaatiot ovat ensijaiset dokumentaatiot, jotka määrittelevät FUOTA-prosessin. Tässä tutkielmassa ei syvennytä FUOTA-prosessiin sen tarkemmin. Université Savoie Mont Blanc -yliopiston tutkijat ovat LoRaWAN for advanced users-kirjassaan (Montagny 2022) esitelleet C-luokan multicast-toteutusta ja FUOTA-prosessia.

2.8 LoRaWAN yhdyskäytävät

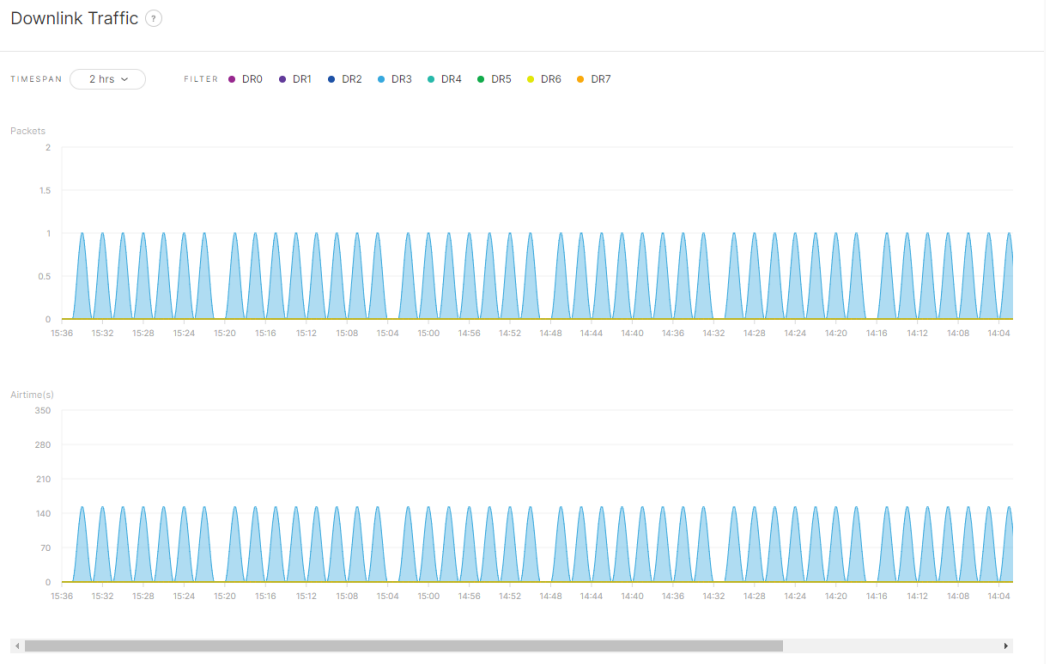
LoRaWAN-yhdyskäytävä toimii fyysisessä kerroksessa (PHY) päätelaitteen ja verkkopalvelimen välissä. Se kuuntelee yhdyskäytävään määriteltyjä radiotaajuuksia. Yhdyskäytävä purkaa päätelaitteen lähettämät LoRaWAN-paketit LoRa-modulaation avulla ja välittää ne verkkopalvelimelle. Vastaavasti se lähettää LoRaWAN-paketteja verkkopalvelimelta päätelaitteelle LoRa-moduloidussa muodossa. Samalla se välittää tietoa kohteelle lähetysparametreista mm. taajuuskaista, SF, RSSI, SNR, DR, ToA. Oletuksena LoRaWAN-yhdyskäytävät toimivat half-duplex tilassa ja näin eivät voi vastaanottaa saapuvia viestejä lähtevien lähetysten aikana. Yleisin kytkentä verkkoon on Ethernet tai Wi-Fi-liitäntä, mutta myös mobiiliyhteys voi olla vaihtoehtona. Hyvin yleinen LoRa-tukiasemayksikön prosessori on SX1301, joka pystyy vastaanottamaan kahdeksan kanavaa kaikilla SF-arvoilla samanaikaisesti. Laitteet toimivat yleisesti verkkovirralla. Yhdyskäytävissä on laitekohtaisia eroja ja yhdyskäytävän voi rakentaa myös komponenteista itse. Yhdyskäytävät luokitellaan usein sisä- ja ulkotilojen laitteiksi. Ulkotilojen yhdyskäytävissä on huomioitu säänkestävyys ja ne tarjoavat laajaa kattavuutta käyttämällä suuritehoisia antenneja. Sisätilojen yhdyskäytävät ovat kustannuksiltaan edullisempia ja niiden tarkoituksena on laajentaa verkon kattavuutta sisätiloissa (“Expert Series” 2023).

Yhdyskäytävän ja verkkopalvelimen välinen rajapinta ei ole standardoitu, ja siitä on useita

eri verkkopalvelintoimittajien määrittelemiä toteutuksia. Yhdyskäytävän Packet Forwarder-ohjelmisto määrittää protokollan, jota käytetään tukiaseman ja verkkopalvelimen välisessä kommunikoinnissa. Semtech tarjoaa kaksi avoimen lähdekoodin yhdyskäytäväohjelmistoa Semtech UDP Packet Forwarder (“Lora Network Packet Forwarder Project” 2023) ja LoRa Basics Station (“LoRa Basics Station” 2023). UDP Packet Forwarder -projekti on ollut käytössä pitkään. Se tarjoaa yksinkertaisen UDP-pohjaisen rajapinnan. Toiminnoiltaan ja suojaukseltaan se on kuitenkin jo vanhentunut ja kykenee ainoastaan välittämään uplink- ja downlink-dataa. LoRa Basics Station on vuonna 2019 julkaistu Packet Forwarder. Se mahdollistaa TLS-suojauksen, yhdyskäytävän etähallinnan ja ohjelmistopäivitykset (CUPS) sekä aikasynkronoinnin. Yhteys verkkopalvelimeen muodostetaan suojatulla WebSocket-yhteydellä. (“LoRa Basics Station” 2023)

Myös mm. Actility:llä on oma ThingPark Long Range Relay (LRR) Packet Forwarder, joka on tietoturvallinen ja sisältää useita vastaavia toimintoja. On verkkopalvelinkohtaisia eroja, mitä Packet Forwarder-ohjelmistoa niissä voidaan käyttää. Avoimien ohjelmistojen mm. ChirpStack-ohjelmiston yhteydessä Basics Station on jatkossa ensisijainen vaihtoehto.

LoRa-pakettien välittämisen lisäksi yhdyskäytävä voi lähettää Beacon-viestejä B-luokan laitteille. Aihetta on esitelty luvussa 2.6. Yleisesti todetaan, että tällöin yhdyskäytävässä tulee olla GPS-vastaanotin ja toiminto tulee ottaa käyttöön. GPS-vastaanotin löytyy yleensä vain ulkokäyttöön tarkoitetuista yhdyskäytävistä. LoRa Basics Station dokumentaatiossa (“LoRa Basics Station” 2023) kuitenkin todetaan, että yhdyskäytävä saa aikasynkronoinnin verkkopalvelimelta ja B-luokassa yhdyskäytävä vaatii vain PPS-signaalin, joka on ohjattu yhdyskäytävän konsentraattoriin. Tarkoittaen, että LoRa Basics Station ei vaatisi pääsyä GPS-laitteeseen ylläpitääkseen globaalia GPS-aikaa. PPS-signaali, joka on synkronoitu GPS-aikaan, riittäisi. Dokumentaatio kertoo, että yhdyskäytävässä on API, jonka avulla verkkopalvelin voi hallita yhdyskäytävän kellon synkronointia ulkoisen GPS/PPS-aikasignaalin kanssa ja tätä aikasynkronointia voidaan käyttää sisätiloissa tapahtuviin Beacon lähetyksiin. Tämä mahdollistaa tarkan aikasynkronoinnin sisätiloissa, jolloin Class B -toimintoa voidaan käyttää myös sisätiloissa. Kuviossa 8 yhdyskäytävä lähettää Beacon-viestejä tiedonsiirtonopeudella DR3.



Kuvio 8. Yhdyskäytävä lähettää Beacon-viestejä (DR3)



Kuvio 9. Wisgate Edge Pro v2 -yhdyskäytävä

3 Aiempi tutkimus

Tutkielman lähteinä käytettiin tutkimusartikkeleita sekä olemassa olevia spesifikaatioita. Kirjallisuushakuja tehtiin mm. Google Scholar-, IEEE Xplore-, ScienceDirect-, ACM Digital Library-, MDPI- tietokantoihin ja hakukoneisiin. Hakusanoina käytettiin: LoRaWAN ja class B, LoraWAN ja multicast, LoRaWAN ja FUOTA. Uusimmat julkaisut saivat ehkä eniten huomioita, mutta vuosiluvun ja viittausten määrien suhteen ei tehty rajoituksia.

H. E. Elbsir ym. (2020) ovat tutkimuksessaan todenneet, että luokka B vähentää downlink-liikenteen toimitusviiveitä luokkaan A verrattuna. Luokka B mahdollistaa aikataulutetun downlink-viestinnän käynnistämisen verkkopalvelimelta ja ratkaisu soveltuu toimilaitteille ja antureille, jotka vaativat verkkovälitteisiä komentotoimenpiteitä. Tulokset osoittivat, että luokka B parantaa merkittävästi suorituskykyä luokkaan A verrattuna tiedonsiirron tehokkuuden ja viiveiden suhteen. Luokan B toimintaa rajoittaa kuitenkin yhdyskäytävän käyttöjakso (duty cycle), kun verkon kuormitusta lisätään. Kirjoittajat ehdottavat RX2-parametrin poistamista B-luokan tilassa pakettien toimitussuhteen parantamiseksi.

Toisessa tutkimuksessaan H. Elbsir ym. (2022) ovat arvioineet luokan B suorituskykyä ja sen optimointia toimilaitteissa. Tutkimus osoitti, että järjestelmän tehokkuutta voidaan parantaa lyhentämällä toimilaitteiden aktiivisen tilan aikaa. Tämä vähentää energiankulutusta ja parantaa laitteiden suorituskykyä. Lisäksi tutkimuksessa ehdotettiin keinoja häiriöiden vähentämiseksi, jotka aiheutuvat LoRaWAN-luokan B käytöstä. Tutkimus osoitti, että B-luokan suorituskykyä voidaan parantaa ja että se soveltuu hyvin toimilaitteisiin.

Delobel, El Rachkidy ja Guitton (2017) ovat keskittyneet B-luokan tiedonsiirron tehokkuuden arviointiin ruuhkaisissa olosuhteissa. Erityisenä huomiona todetaan, että Duty cycle-käyttöjakso voi rajoittaa myös Beacon-viestien lähettämistä. Käyttöjakso rajoittaa lähetystä ja suurinta osaa Ping-ikkunoista ei voida käyttää. Tutkimuksen simulaatiotulokset osoittavat, että datanopeudella ja taajuuskaistojen määrällä on merkittävä vaikutus viiveeseen. Ping-aikavälin valinta on kompromissi loppulaitteiden energiankulutuksen ja downlink-viestien viiveiden välillä. Aikaväliksi suositellaan, että $P < 4$, näin downlink-paketti voidaan lähettää alle 32 sekunnissa.

Vastaavasti Finnegan, Brown ja Farrell (2018) ovat todenneet, että verkon skaalautuvuutta rajoittaa yhdyskäytävän duty cycle. Liikenteen lisääntyminen johtaa nopeasti yhdyskäytävän tukkeutumiseen käyttöjakson rajoitusten vuoksi. He ovat tutkineet myös B-luokan parametrien vaikutuksia vahvistettujen (ACK) downlink-viestien viiveeseen.

Myös Ron ym. (2020) ovat todenneet, että downlink-viestien lähettämisessä voi olla merkittäviä viiveitä ja B-luokalla on vaikutuksia laitteiden energiankulutukseen. Tutkimuksessaan he esittävät useita optimointistrategioita, joilla parantaa suorituskykyä. Tutkimuksessa todetaan, että optimaalinen ping-aikaikkunoiden määrä kasvaa liikennetiheyden kasvaessa. Suorituskyky B-luokan verkoissa liittyy pitkälti siihen, miten ping-ikkunoiden aikaväli (ping-slot) on konfiguroitu.

Pasetti ym. (2020) toteavat, että B-luokan käyttö älyverkkojärjestelmissä antoi lupaavia tuloksia. Järjestelmä saavutti korkean luotettavuuden ja alhaisen viiveen laitteiden välisessä kommunikoinnissa. Luokan B käyttö mahdollisti akkukäyttöisten laitteiden aikataulutetun kommunikoinnin, vaikuttamatta merkittävästi niiden akun käyttöikään. He havainnoivat myös pakettihäviöistä sekä uplink-viestintään liittyvistä RX2-ristiriidoista, kun nämä ajoittuvat saman aikajakson Ping-ikkunaan.

Shiferaw, Arora ja Kuipers (2020) tarkastelivat tutkimuksessaan B-luokan LoRaWAN-laitteiden skaalautuvuutta multicast-viestinnässä. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että B-luokan verkko skaalautuu hyvin oikeanlaisella protokollalla ja verkon oikeanlaisella konfiguroinnilla. Verkon topologia ja kuormituksen hallinta vaikuttavat myös suorituskykyyn.

Abdelfadeel ym. (2020) kirjoittavat, että B-luokan multicast-sessio on kestoaltaan 17% pidempi, mutta 550 kertaa energiatehokkaampi verrattuna C-luokan multicast viestintään. Lisäksi simuloinnit osoittivat datanopeuden merkittävän vaikutuksen kokonaistuloksiin. Esimerkiksi DR5 saavuttaa 30%:n vähennyksen päivitysajassa ja laitteen energiankulutuksessa verrattuna DR0:aan. Ping-ikkunan aikaväli vaikuttaa myös tuloksiin. Kaikissa datanopeuksissa nopein firmware-päivitys voidaan tehdä kun $P = 0$, mutta energiankulutuksen osalta optimaalinen aikaväli vaihtelee datanopeuden mukaan. Tutkimuksessa todetaan, että $P = 5$ on paras DR0:lle, $P = 4$ DR1:lle, $P = 3$ DR2:lle, DR3:lle ja DR4:lle ja $P = 2$ DR5:lle.

On kuitenkin todettava, että suurin osa tutkimuksista rajoittuvat A-luokan laitteisiin, kun

taas vain harvat laajentavat analyysin luokkaan B (Delobel, El Rachkidy ja Guitton 2017; Finnegan, Brown ja Farrell 2018).

Useammat tutkimukset osoittavat, että lähetyksen rajoittaminen on merkittävä haaste LoRaWAN-verkkojen viestinnälle. Erityisesti rajoitukset tulevat vastaan verkon yhdyskäytävissä ja downlink-viestinnässä päätelaitteiden ohjelmistojen päivittämisessä (FUOTA) (Catalano 2021; Abdelfadeel ym. 2020). Viestinnän rajoitukset, kuten alhainen tiedonsiirtonopeus ja syklinen toimintavelvollisuus, muodostavat nopeasti esteitä päätelaitteiden ohjelmistopäivityksille. (Delobel, El Rachkidy ja Guitton 2017)

LoRa Alliance on perustanut Firmware Update Over The Air (FUOTA) Working Groupin, jonka tavoitteena on kehittää yleisiä protokollia ohjelmistopäivityksiin liittyen. FUOTA Working Groupin tavoitteena on kehittää LoRaWAN-päätelaitteiden ohjelmistopäivitysten varmuutta, verkkojen ja päätelaitteiden hallintaa sekä LoRaWAN-verkon monilähetystä, fragmentointia ja aikasykronointia, jotka ovat olennaisia tehokkaan FUOTA:n kannalta.

On havaittu, että FUOTA-istunnon käyttäminen korkeimmalla datanopeudella on edelleen energiankulutuksen ja päivitysajan kannalta hyödyllisintä (Abdelfadeel ym. 2020).

Todoli-Ferrandis ym. (2020) ovat tutkineet ADR-mekanismien ominaisuuksia myös downlink-viestintään B-luokan tehdasympäristösimuloinneissa. Mekanismit todettiin toimivaksi ja tulokset olivat lupaavia energian optimoinnin näkökulmasta. Gumaa (2022) on tutkielmassaan käynyt keskustelua DevOps-menetelmien hyödyntämisestä LoRaWAN-verkkojen FUOTA-prosessissa.

Universite Savoie Mont Blanc (Montagny 2022) ovat koonneet kaksi LoRa-aiheista vapaasti tarjolla olevaa kirjaa, joissa on esitelty mm. C-luokan FUOTA-toteutus.

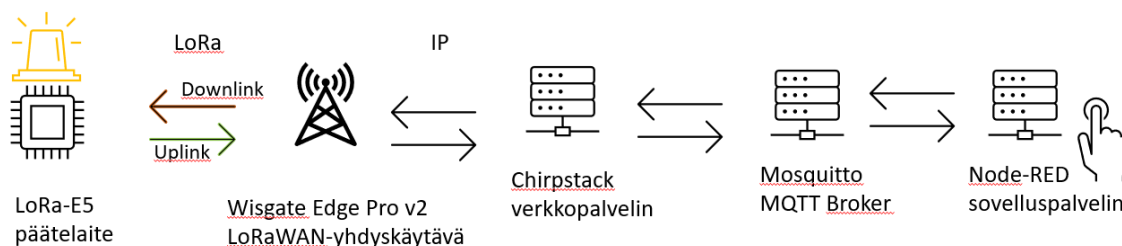
4 LoRaWAN B-luokan PoC-toteutus

4.1 Toteutuksen suunnittelu

Tämän tutkielman tärkein tavoite on käytännön PoC-toteutuksen avulla perehtyä ja esitellä B-laiteluokan downlink-viestintää sekä multicast-lähetystä. Kirjallisuudesta löytyy lukuisia LoRaWAN toteutuksia, mutta nämä perehtyvät verkon uplink-viestintään ja A-laiteluokan laitteisiin. Seikkaperäisesti esiteltyä B-luokan toteutusta ei kirjallisuudesta tutkielmaa tehtäessä löydetty. Käytännön ratkaisua lähdettiin toteuttamaan ensin Digitan kansallisessa LoRaWAN verkossa, tämän rinnalla päädyttiin kuitenkin esittelemään toteutus ns. omassa kehittämissympäristössä. Koska aihepiiri oli uusi, liittyi toteutukseen monia teknisiä asioita, joihin käytettiin aikaa ennalta arvioitua enemmän. Digitan LoRaWAN ympäristö saatiin käyttöön Jyväskylän yliopiston coADDVA-hankeesta ja hankkeen kanssa tehtiin muutenkin yhteistyötä. Alkuperäinen ajatus aihepiirin tutkimisesta tuli myös hankkeen suunnalta. Kyseessä olivat ensimmäiset B-luokan päätelaitteet, jotka kommunikoivat Digitan-verkossa.

Tutkimuksen alkuvaiheessa ajatuksena oli toteuttaa päätelaitteelle oppiva sovellus, jonka tietomallia voisi päivittää LoRaWAN-päätelaitteelle multicast-viestein. Tutkimuksen aikana kuitenkin vahvistui, että tällainen kokonaisuus oli liian laaja ja tutkimus hajautetuista koneoppimisen menetelmistä (Federated Learning/TinyML) LoRaWAN-verkoissa soveltuu hyvin omaksi työksi. Nyt pyrittiinkin esittelemään B-luokan downlink-viestintää yksinkertaisella esimerkillä, jolla ylläpidetään toimilaitteen tilaa. Toteutuksena rakennettiin yksinkertainen PoC-toteutus, jossa B-luokan tilassa toimivat päätelaitteet saavat ohjausviestejä unicast ja multicast-lähetystenä sovelluspalvelimelta. Tässä pelkistetystä tapauksesta toimilaitetta (aktuaattoria) esittää kehitysalustan ledi.

IoT-ratkaisut ovat kaikkineen melko kompleksisia kokonaisuuksia ja kehittämistehtävä toteutettiin iteratiivisesti. Toteutus koostui LoRaWAN päätelaitteista ja yhdyskäytävästä sekä verkko- ja sovelluspalvelimista. Kuviossa 10 on esitelty verkon arkkitehtuuri. Jokainen osaluokka vaatii oman perehtymisensä ja eri osaluokkia työstettiin rinnakkain. Tässä työssä esitellään erityisesti vain tähän työhön liittyviä laitteistoja ja ympäristöjä, vaihtoehtoisia ratkaisuja voidaan mainita. Seuraavassa esitellään työn laitteita ja vaiheita tarkemmin.



Kuvio 10. PoC-toteutuksen arkkitehtuuri (unicast)

4.2 Laitteisto ja verkkopalvelimet

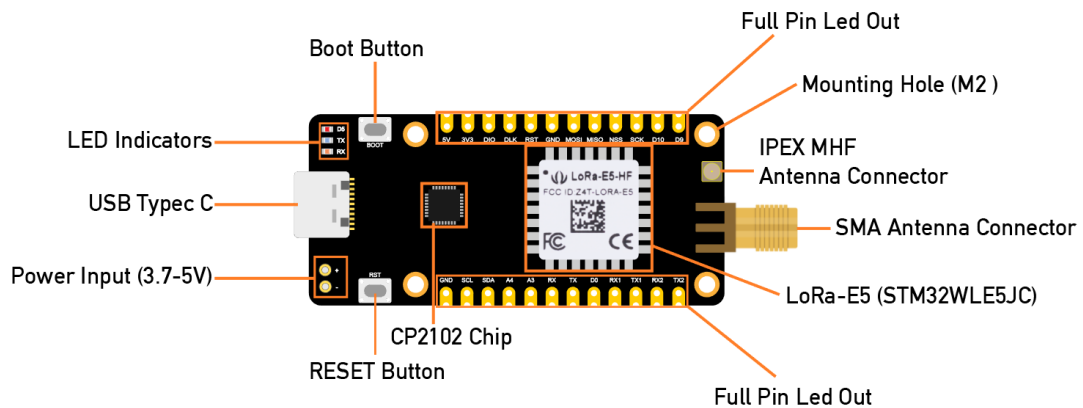
4.2.1 Päätelaitteet

LoRaWAN-päätelaitteena käytössä oli Seeed Technologyn Wio-E5 Mini kehitysalusta (“Wio-E5 Mini” 2023). Laitteessa on LoRa-E5 STM32WLE5JC -moduuli. STM32WLE5JC on ST-Microelectronicsin valmistama mikrokontrolleri (MCU), jossa samalle piirille on integroitu ARM Cortex-M4-suoritin sekä Semtech SX126X LoRa-radiomoduuili. Kyseinen mikrokontrolleri on yksiytiminen, mutta siitä on saatavilla myös kaksiytiminen versio (STM32WL5x). Laite tukee LoRaWAN 1.0.3 protokollaa ja näin B-luokan ominaisuudet olivat käytettävissä (“LoRa-E5 Module datasheet_V1.0” 2023).

Yksi päätelaite ja tarvittava ST-LINK-ohjelmointilaite saatiin käyttöön yliopiston hankkeelta. Hanketoimijoilla oli jo aiempaa kokemusta kyseisestä päätelaitteesta. Tämän lisäksi projektiin hankittiin vielä pari vastaavaa laitetta. Olikin hyvä, että laitteita oli useampi. Näin osa päätelaitteista voitiin pitää työn ajan tehdasasetuksissa, joilla verkon testaaminen ensivaiheessa helpottui. Yksi laite myös vikaantui projektissa.

Laitteelle tehdasasennettu firmware mahdollisti laitteen ohjaamisen AT-komennoilla (“LoRa-E5 AT Command Specification_V1.0” 2023) UART-USB-liitynnän kautta. Esiasennettua laiteohjelmistoa hyödynnettiin projektissa, koska se mahdollisti helpohkon LoRaWAN-verkkoympäristön testaamisen ja prototypoinnin. Hankalaksi asian teki se, että kyseinen firmware ei ollut saatavilla kuin esiannettuna. Kun laitteelle asensi jonkin toisen laiteohjelmiston, niin laitetta ei enää voinut palauttaa tehdasasetuksiin. Tehdasohjelmiston lisäksi projektissa hyödynnettiin STMicroelectronicsin sovelluskehitysympäristöä (SDK). Työkaluina käytössä oli STM32CubeIDE,

LoRa-E5 mini Hardware Specification



Kuvio 11. Lora-E5 mini (“Wio-E5 Mini” 2023)

joka on Eclipse IDE-pohjainen ympäristö STM32-mikrokontrollereille sekä laiteohjelmointiin STM32CubeProgrammer-ohjelmisto.

Työn aikana tutustuttiin myös Mbed-kehitysalustaan, johon yliopiston hankkeessa oltiin aiemmin perehdytty. Selvisi kuitenkin, että Mbed-ympäristön LoRaWAN-kirjastosta puuttui tuki B-luokalle ja näin tarkempi perehtyminen jäi. Mikäli työssä olisi keskitytty A- ja C-luokan ominaisuuksiin, olisi Mbed-ympäristö ollut niissä kiinnostava vaihtoehto. Kaikkineen ympäristöjen tutkimiseen, opiskeluun ja valintaan meni oma aikansa.

Wio-E5 -laitteessa on monipuolisesti liitäntöjä erilaisten sovellusten käyttöön mm. UART, I2C, SPI, ADC ja GPIO. Laitteen linkkibudjetti on 158 dB, mikä tekee siitä sopivan pitkien etäisyyksien langattomaan tiedonsiirtoon. Laitteen herkkyydeksi kerrotaan -136.5 dBm, kun käytetään SF12 ja 125 kHz:n kaistanleveyttä. Virrankulutukseltaan laite on hyvin energiatehokas ja kuluttaa ainoastaan 2.1µA unutilassa (WOR). Vaihtoehtoisena ratkaisuna olisi voinut käyttää esimerkiksi RAK Wirelessin RAK3172-kehitysalustaa. Yleisesti päätelaitteita, jotka tukevat vähintään LoRaWAN 1.0.3 B-luokkaa on tällä hetkellä vielä vähän.

4.2.2 LoRaWAN yhdyskäytävät

Koska alussa oli tarkoitus hyödyntää ainoastaan Digitan kansallista LoRaWAN-verkkoa, niin käytössä olivat heidän ylläpitämät yhdyskäytävät. Digitan LoRaWAN-verkko on toteutettu Actilityn Thingpark-alustalla, joten yhdyskäytävissä on tätä alustaa tukeva Packet Forwarder-ohjelmisto. Digitan yhdyskäytävien teknisiä ominaisuuksia ei selvitetty paremmin. Yhdyskäytävien Beacon-viestit eivät olleet Digitan verkossa käytössä, koska aiempia B-luokan toteutuksia verkkoympäristössä ei ollut toteutettu. Beacon-viestit konfiguroitiin Digitan toimesta käyttöön kahteen lähimpään Digitan yhdyskäytävään päätelaitteiden sijainnista katsoen. Digitan verkkoa olisi ollut myös mahdollista laajentaa omilla yhdyskäytävillä.

Työssä haluttiin saada kattava läpileikkaus verkon toiminnasta. Koska Digitan yhdyskäytävään ei ollut pääsyä, päädyttiin hankkimaan projektiin oma LoRaWAN yhdyskäytävä, joka tuki B-luokkaa. Tämä johtui myös siitä, että B-luokan testaaminen koettiin työlääksi Digitan ympäristössä, eikä ongelmatilanteissa aina selvinnyt miksi downlink-viestit eivät tavoittaneet päätelaitteita. Digita on rajannut laitekohtaisen päivittäisen downlink-viestien määrän (24 kpl) ja kehittämistyössä tämä rajoitus asetti omat haasteensa. Digita tarjosi tähän myös lisäpalvelua tammikuusta 2023 alkaen (72 kpl). Kaikkineen näistä syistä kehittämistehtävää päädyttiin toteuttamaan Digitan ympäristön rinnalla omissa kehittämissympäristöissä.

Huomioitavaa on, että kaikki LoRaWAN-yhdyskäytävät eivät tue B-luokkaa. Yleisesti tämän tiedon toivoisi löytyvän paremmin, tästä syystä tähän tutkielmaan lisättiin erillinen kappale yhdyskäytävistä. Toteutus vaatii, että tukiasemalla tulee olla GPS-laite integroituna, sisäkäyttöön suunnitelluissa tukiasemissa tällaista ei yleensä ole. Markkinoilla on myös tarjolla laitteita, joiden kerrotaan tukevan LoRaWAN versiota 1.0.3, mutta sisäkäyttöön tarkoitettuina näissä ei ole tarvittavaa GPS-laitetta. LoRa Basics Station dokumentaatiossa (“LoRa Basics Station” 2023) kuitenkin todetaan, että sen osalta yhdyskäytävä vaatisi ainoastaan PPS-signaalin, joka on ohjattu yhdyskäytävän konsentraattoriin. PPS-signaali, joka on synkronoitu GPS-aikaan, riittäisi aikasykronointiin, jolloin B-luokkaa voidaan käyttää myös sisätilojen laitteissa. Tätä ei kuitenkaan ehditty paremmin selvittämään, onko tällainen mahdollisuus yhdyskäytävien ohjelmistoissa tällä hetkellä.

Projektiin hankittiin ulkokäyttöön soveltuva LoRaWAN-yhdyskäytävä. Laitteeksi valikoitui

RAKwirelessin uusin Wisgate Edge Pro v2 (“WisGate Edge Pro Datasheet” 2023). Laitteessa on SX1303 LoRa Core, 8-kanavaa, GPS, PoE-virransyöttö, Ethernet ja Wi-Fi yhteydet sekä 8dBi ulkoantenni. Laite tukee LoRaWAN 1.0.3 versiota. Laiteohjelmistona on WisgateOS 2 (“WisGate OS 2 User Manual” 2023), joka perustuu OpenWRT-projektiin. Laitteessa on ohjelmistotuki Basics Station ja Packet Forwarder-ohjelmistokomponenteille ja näin tukee useimmille verkkopalvelin-ohjelmistoille ja alustoille. Lisäksi laitteessa on oma sisäinen LoRaWAN-verkkopalvelin, joka tukee versiota LoRaWAN 1.0.3. RAK Wireless on myös kehittänyt WisDM-palvelualustan yhdyskäytävien hallintaan ja ylläpitoon, johon kyseisen laitteen oli mahdollista myös liittää.

4.2.3 LoRaWAN verkkopalvelimet

Kuten jo edellä on mainittu, käytössä oli Digitan LoRaWAN-verkkoympäristö, joka saatiin käyttöön Jyväskylän yliopistolta. Digita on ainut toimija, joka tarjoaa Suomessa maan kattavan LoRaWAN-verkon. Jyväskylän yliopiston eri hankkeet ovat hyödyntäneet Digitan LoRaWAN-verkkoympäristöä aiemmin ja siksi verkko oli luonnollinen kohde aihealueen tutkimusympäristönä. Digitalla on käytössä Actilityn ThingPark Wireless-verkkoalusta. Tässä tutkielmassa ei syvennytä Actilityn perusominaisuuksiin, kyseiseen alustaan on perehdytty useissa tutkimuksissa. Alustassa on tuki B-luokan laitteille sekä multicast-viesteille. Koska aiempia B-luokan toteutuksia Digitan LoRaWAN-verkossa ei ollut toteutettu, vaati aihe perehtymistä. Toimiakseen B-luokan laitteiden kanssa, verkkopalvelimeen tuli ottaa käyttöön erillinen Connectivity plan, joka tuki B-luokkaa. Laiteprofiiliksi valittiin geneerinen toimittaja (Generic) ja protokollan versioksi LoRaWAN 1.0.3 revA - class B (kuvio 12). Päätelaitteiden konfigurointi verkkopalvelimelle voitiin tehdä itse. Mikäli verkkopalvelimella olisi demottu multicast-viestintää, vaatisi tämä myös oman erillisen connectivity plan-määrittelyn.

LoRaWAN-verkkopalvelimia on käyttöönotettavissa vaihtoehtoisin tavoin. Verkko voidaan rakentaa yksityisenä tai julkisena avoimen lähdekoodin ohjelmistoilla tai palveluntarjoajan pilvipalveluna. Edellä jo mainittiin, että kehittämistehtävän aikana Digitan LoRaWAN-ympäristön rinnalle haluttiin joustavammin määriteltävissä oleva kehittämisympäristö. Samalla tuli kartoitettua muutamien alustojen B-luokkaan liittyviä toiminnallisuuksia ja ky-

vykkyyksiä.


Wisgate Edge Pro V2-yhdyskäytävässä on oma sisäinen verkkopalvelin, joka on LoRaWAN 1.0.3 yhteensopiva. Ratkaisu soveltuisi hyvinkin rajatun alueen tai yksittäisen organisaation sisäisiin yhden yhdyskäytävän LoRaWAN-verkkoihin. Verkkopalvelin todettiin toimivaksi myös B-luokan osalta. Kyseinen verkkopalvelinohjelmisto ei kuitenkaan tukenut tällä hetkellä multicast-viestintää, joten se ei soveltunut niiltä osin kehittämissympäristöksi.

ChirpStack on kehittynein avoimen lähdekoodin LoRaWAN-verkkoalusta (Kolehmainen 2022). Semtech tarjoaa LoRaWAN-kehittäjien käyttöön vapaasti LoRaWAN-verkkopalvelinta (“Semtech Network Server” 2023), joka perustuu avoimen lähdekoodin ChirpStack v4-ohjelmistoon. Ympäristö mahdollistaa kolmen yhdyskäytävän ja 10 päätelaitteen LoRaWAN-verkkototeutuksen rakentamisen, joka olisi riittänyt mainiosti työn tarkoituksiin ja sopinut kehittämistehtävän luonteeseen. Projektille hankittu yhdyskäytävä ei kuitenkaan tässä vaiheessa tukenut täysin ChirpStack v4-ohjelmistoa ja yhdyskäytävän Basics Station TLS-autentikoinnissa ilmeni ongelma. Tästä oltiin laitetoimittajaan yhteyksissä, mutta asia ei kevään 2023 aikana edennyt niin, että verkkopalvelimenä olisi voinut käyttää Semtechin ympäristöä. Koska ChirpStack-ohjelmiston voi avoimen lähdekoodin ohjelmistona asentaa myös omaan ympäristöön, niin siitä asennettiin Docker-asennus (“Docker - ChirpStack” 2023) ja TLS-autentikointia ei testiympäristössä otettu käyttöön. Docker (“Docker” 2022) on konttitekniikka, joka mahdollistaa sovellusten paketoiminnan ja suorittamisen eristetyssä ympäristössä.

Lisäksi tutustuttiin muutamaa vaihtoehtoiseen ratkaisuun. AWS IoT Core for LoRaWAN on LoRaWAN-verkkopalvelin, joka mahdollistaa langattomien laitteiden liittämisen AWS-pilveen. AWS IoT Coren avulla voidaan toteuttaa julkinen tai yksityinen LoRaWAN-verkko, liittämällä LoRaWAN-laitteet ja yhdyskäytävä AWS-pilveen ilman tarvetta ylläpitää erillistä LoRaWAN-verkkopalvelinta (“AWS IoT Core for LoRaWAN” 2023). Alusta tukee LoRaWAN spesifikaation uusimpia versioita. Yhdyskäytävien kommunikointi verkkopalvelimeen on toteutettu Basics Station-ohjelmistolla.

ThingPark Community (“ThingPark Community” 2023) on osa Actilityn ThingPark-ekosysteemiä ja tarjoaa rajatun avoimen LoRaWAN-alustan IoT-sovelluskehittäjille. Alustaan tutustuttiin Digitan Thingpark-ratkaisun rinnalla. Huomioitavaa on, että käytetyn Wisgate-yhdyskäytävän

Device



Manufacturer: *	Generic
Model: *	LoRaWAN 1.0.3 revA - class B eu868, eu433, cn
Name: *	LoRa E5 mini MikaA-AT
Motion indicator:	Near static
Activation mode:	Over The Air Activation (OTAA)
Join server:	Local Join server with software encryption
Payload encryption:	-
DevEUI:	7860007860000000
JoinEUI:	8000000000000007
DevAddr:	3230D1C8
Current class:	Class B
Ping-slot period:	-

Kuvio 12. Laitteasetukset B-luokalle Digitan verkossa

chirpstack-docker
RUNNING

- chirpstack-docker_chirpstack-rest-api_1 chirpstack/chirpstack-rest-api:4
RUNNING PORT: 8090
- chirpstack-docker_chirpstack-gateway-bridge-eu868_1 chirpstack/chirpstack-gateway-bridge:4
RUNNING PORT: 1700
- chirpstack-docker_chirpstack_1 chirpstack/chirpstack:4
RUNNING PORT: 8080
- chirpstack-docker_mosquitto_1 eclipse-mosquitto:2
RUNNING PORT: 1883
- chirpstack-docker_postgres_1 postgres:14-alpine
RUNNING
- chirpstack-docker_redis_1 redis:7-alpine
RUNNING

Kuvio 13. Chirpstack-docker käynnissä

osalta ei Beacon-viestien lähettämistä saatu päälle. Yhdyskäytävä ja verkkopalvelin kommunikoivat Basics Station-yhteyksin, koska Thingparkin oma LLR ei ollut yhdyskäytävässä vaihtoehtona. Asian selvittäminen jäi kesken, koska alustaa ei käytetty PoC-tehtävään.

The Things Network tarjoaa julkisen yhteisöllisen LoRaWAN-verkon (Network 2023). Alustaa olisi voinut myös testata PoC-toteutukseen. palvelun käyttö on kuitenkin lähetyssaikojen suhteen rajoitettua kaupalliseen palveluun verrattuna ja rajoitukset olivat vielä tiukemmat kuin Digitan ympäristössä.

LoRaWAN-verkkopalvelimen toiminnallisuus ja käyttö ovat melko samankaltaisia eri palveluntarjoajien kesken, yhdyskäytävien, päätelaitteiden ja sovelluspalvelin integraatioiden lisääminen sekä hallinta toimivat pitkälti vastaavalla tavalla. Edellä mainituista ainoastaan AWS IoT Core for LoRaWAN eroaa selvästi muista. Näiden vertailuja löytyy kirjallisuudesta, mm. Kolehmainen (2022) on vertaillut näitä omassa tutkielmassaan.

4.2.4 LoRaWAN sovelluspalvelin

Sovelluspalvelimen rooli tässä kehittämistehtävässä oli lähettää ohjaustietoa verkkopalvelimen välityksellä päätelaitteille. Verkko- ja sovelluspalvelimien integraatiot toteutetaan yleisesti HTTP- tai MQTT-protokollaa hyödyntäen. Sovelluspalvelimena käytettiin Node-RED (“Node-RED” 2023) kehitysympäristöä, myös Azuren sekä AWS-pilvialustoja tarkasteltiin. Node-RED valittiin ratkaisuksi, koska se on yleisesti IoT-ratkaisuissa käytössä ja sitä oli käytetty mm. Universite Savoie Mont Blanc-yliopiston (Montagny 2022) toteuttamassa koulutusmateriaalissa, johon tutustuttiin.

Node-RED on visuaalinen low code -ohjelmointityökalu, joka tarjoaa helpon ja intuitiivisen tavan luoda IoT-sovelluksia ja virtauspohjaisia (flow) ohjelmistoja ja prototyyppejä. Se perustuu avoimeen lähdekoodiin ja on kehitetty IBM:n toimesta. Node-RED sopii tapahtumaperusteisiin sovellutuksiin, kuten REST APIen ja järjestelmien väliseen integrointiin. Käytettävissä on valmiita ohjelmointikomponentteja ja sovelluksen elementtejä voidaan tallentaa ja jakaa uudelleenkäytettäväksi. Sovellukset toteutetaan solmuilla (node), joiden ketjuista muodostuu virtaus (flow). Solmuja voidaan ohjelmoida myös itse JavaScript-kielellä. Node-RED:issä luodut sovellukset voidaan tallentaa ja jakaa JSON-muodossa. Ympäristö on käy-

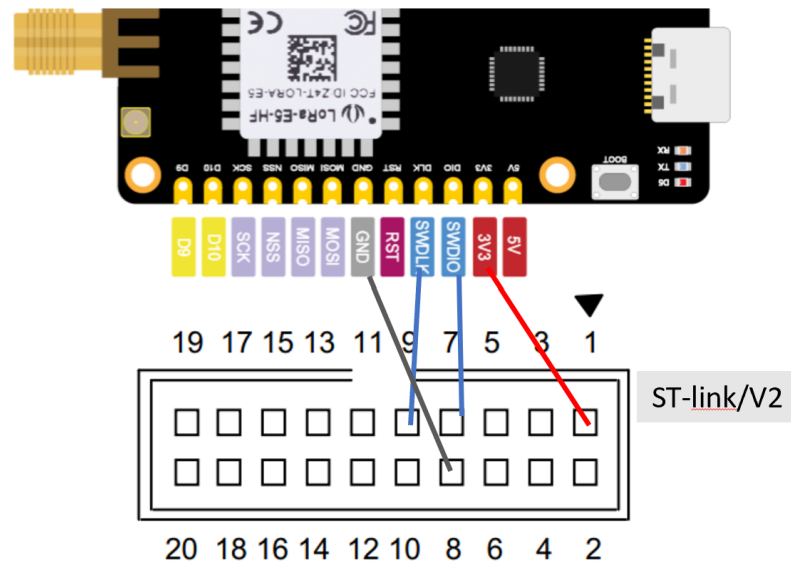
tössä myös kaupallisissa ratkaisuissa. Esimerkiksi STMicroelectronicsin STMCubeMonitor-ohjelmisto, joka on toteutettu laitteiden monitorointiin ja hallintaan, pohjautuu myös Node-RED-kehitysympäristöön. Node-RED valikoitui myös siitä syystä, että kehitysympäristössä ohjelmisto voitiin asentaa käytössä olevan Home Assistant-kotiautomaatioalustan lisäosaksi (“Home Assistant” 2023; “Home Assistant Community Add-on” 2023). Ajatuksena tässä oli jatkossa mahdollinen Home Assistant ja LoRaWAN-verkon integrointi.

Kuviossa 18 on esitelty yksinkertainen Node-RED-vuo, jolla voidaan ohjata B-luokan laitetta.

4.3 B-luokan downlink-viestintä - PoC

Toteutus koostui muutamasta päätelaitteesta, jotka kommunikoivat yhden yhdyskäytävän kanssa. Ensimmäisessä vaiheessa verkkoon liitettiin päätelaite, jossa oli tehdasasennettu firmware. Laitteohjelmistolla oli helppohko testata verkkoympäristön toimivuutta. Laitteen ohjaaminen tapahtui AT-komennoilla (“LoRa-E5 AT Command Specification_V1.0” 2023) USB-UART-liitynnän kautta, käytännössä tähän käytettiin Arduino IDE:n sarjamonitoria (9600 baudia). Päätelaitteelle määriteltiin DevAddr, DevEUI, AppEUI, AppKey tiedot ja vastaavat tiedot määriteltiin myös ChirpStack-verkkopalvelimelle. Tutkielman liitteessä A on kuvattu AT-komennot sekä konfiguraatiot verkkopalvelimella, joilla B-luokan viestintää voitiin todentaa.

Toiselle päätelaitteelle asennettiin STMicroelectronicsin STM32Cube MCU-paketti, joka sisältää STM32WL-sarjan laitteille useita esimerkkisovelluksia. Näistä hyödynnettiin LoRaWAN End Node-projektia. LoRaWAN End Node-kirjastosta on useita versioita, laitetoimittaja oli päivittänyt kirjaston tukemaan STM32Cube MCU paketin v1.1.0-versiota. Kehitystyökaluina oli käytössä STM32CubeIDE, ohjelmointiin ja kääntämiseen sekä laiteohjelmointiin STM32CubeProgrammer. SDK:n käyttö vaati, että tehdasasennettu firmware tuli poistaa, eikä sitä enää voitu palauttaa laitteelle. Ohjelmointi vaati ST-LINK-ohjelmointilaitteen, joka kytkettiin tietokoneen ja päätelaitteen väliin. Projektin Github-sivulta (“LoRa-E5-LoRaWAN-End-Node” 2023) löytyi melko kattava ohjeistus laitteen peruskonfigurointiin ja laitteen liittämiseen verkkoon. Tämä vaati lora_app.h ja se-identity.h tiedostojen muokkausta. Käännet-



Kuvio 14. ST-LINK/V2 kytkentä

ty ohjelmisto ohjelmoitiin LoRa-E5-laitteelle STM32CubeProgrammer-ohjelmistolla. ST-LINK-laitteen kytkentäohje oli hieman epäselvä ja ainakin oma ympäristö vaati vielä 3.3V-jännitteen tuomisen päätelaitteelle. Kuviossa 14 toimiva kytkentä. Ohjelmointia oli mahdollista tehdä myös kehitysympäristöön integroidulla STM32CubeMX-työkalulla, joka generoi konfiguroinnin mukaista koodia. Jos työkalua käyttää, on syytä huomioida, että se ylikirjoittaa tiedostoihin käsin tehtyä ohjelmakoodia. Kaikki ohjelmointikoodi tulee kirjoittaa `/* USER CODE BEGIN */` merkinnän alle. Kaikkineen ohjelmointiympäristö oli melko moninainen ja haastava, koska aiempaa kokemusta laiteohjelmoinnista oli vain Arduino ja MicroPython-kehitysalustoista.

Esimerkkitoteutuksen koodi löytyi projektin LoRaWAN/App/lora_app.c-tiedostosta. Ohjelmointiin käytettiin C-kieltä. Koska tarkoitus oli todentaa LoRaWAN-verkon B-luokan toimivuutta, niin esimerkkitoteutus muokattuna riitti tähän. Lähdekoodin `SendTxData-` ja `OnTxData-` funktiot määrittelevät, mitä laite lähettää ja vastaanottaa. Esimerkkitoteutuksessa uplink-viesteinä lähetettiin verkkoon ns. dummy-dataa säännöllisesti, tätä hieman muutettiin niin, että dataa lähetettiin minuutin välein. Esimerkissä päätelaitteelle integroitua led-valoa voitiin ohjata downlink-viesteillä. Tämä todettiin riittäväksi esimerkiksi, myös omassa toteutuksessa.

Luokka B ei ollut oletuksena käytössä. B-luokka määriteltiin oletusluokaksi tiedostossa `lor_app.h`, lisäksi ping-aikaväliksi määriteltiin $P=5$ (32s). Tämä tarkoitti, että käynnistyttyään laite siirtyi B-luokan tilaan ja prosessi käynnistyi Beacon-viestin haulla. Vaihtoehtoisesti A-luokka voitiin jättää oletusluokaksi ja määritellä B-luokka käyttöön `lorawan_conf.h` tiedostossa. Laiteluokkaa oli mahdollisuus vaihtaa sovelluspalvelimen lähettämällä downlink-viestillä. Mikäli laiteluokan vaihtoa hallitaan verkosta, tulee päätelaitteen lähettää A-luokan tilassa uplink-viestejä, niin että luokan muutosta ohjaava downlink-viesti saadaan lähetettyä päätelaitteelle. Portti (FPort) 2 oli toteutuksessa määritelty sovellusdatalle ja portti 3 laiteluokan vaihtamiseen. Päätelaitteen lokia voitiin seurata Arduino-sarjamonitorilla (115200 baudia).

Päätelaitteiden kirjautumismenetelmänä oli käytössä OTAA. Laitteet käyttivät tiedonsiirtonopeuksia DR0:sta ($SF = 12$) DR5:een ($SF = 7$), jotka muuttuivat ADR:n toimesta dynaamisesti päätelaitteen signaalivoimakkuuden mukaan. Uplink-lähetykset lähetettiin ilman ACK-pyyntöä ja vastaanottoikkunat RX1 ja RX2-pidettiin oletusasetuksissa. Downlink-kanavan taajuuskaistana 869.525 MHz ja tiedonsiirtonopeutena DR3 ($SF9$). Yhdyskäytävässä otettiin yksinkertaisuuden vuoksi käyttöön Semtechin UDP Packet Forwarder (portissa 1700) ja Beacon-viestit määriteltiin käyttöön taajuudella 869.525 MHz, DR3 ja Beacon Tx Power 16. Beacon-jakson pituus oli oletus 128 sekuntia.

Verkkopalvelimena käytössä oli paikalliselle tietokoneelle asennettu Chirpstack Docker-asennus ("Docker - ChirpStack" 2023) osoitteessa <http://localhost:8080/>. Verkkopalvelimelta löytyi päätelaitteelle sopiva laiteprofiili (device profile) WioE5 Dev Kit. Laiteprofiilit tuli ensin asentaa Docker-asennuksen ohjeistuksen mukaan (import-lorawan-devices). Laiteprofilissa otettiin B-luokka käyttöön kuvion 15 mukaisesti. Kuviossa 16 on kuvattu verkkopalvelimen B-luokan määrittelyt. Tämän jälkeen verkkopalvelimelle luotiin uusi Applikaatio (application), johon kaikki päätelaitteet konfiguroitiin.

Downlink-viestien lähettämistä on helpointa testata ensin verkkopalvelimen käyttöliittymästä. ChirpStackissa tällainen löytyy laitekohtaisista tiedoista, välilehdeltä Queue. Downlink-viestille määritellään portti ja payload, sekä onko kyseessä vahvistamaton vai vahvistuksen vaatima viesti. Payload voidaan lähettää HEX, BASE64 tai JSON-muodossa. Kuviossa 17 esitetään ChirpStackin käyttöliittymä, josta voidaan nähdä myös downlink-viestijono.

Device profiles Add device profile						
Name	Region	MAC version	Revision	Supports OTAA	Supports Class-B	Supports Class-C
Wio-E5 Dev Kit, for Long Range Application	EU868	LoRaWAN 1.0.3	RP002-1.0.3	yes	yes	yes

Kuvio 15. ChirpStack laiteprofiili

Wio-E5 Dev Kit, for Long Range Application device profile id: cf63f0e9-7871-419b-9950-eacb29212472

[General](#)
[Join \(OTAA / ABP\)](#)
[Class-B](#)
[Class-C](#)
[Codec](#)
[Tags](#)
[Measurements](#)

Device supports Class-B

* Class-B confirmed downlink timeout (seconds) [?]

* Class-B ping-slot periodicity [?]

* Class-B ping-slot data-rate [?]

* Class-B ping-slot frequency (Hz) [?]

Kuvio 16. ChirpStack B-luokan konfiguraatio

Enqueue

Confirmed: FPort:

[HEX](#)
[BASE64](#)
[JSON](#)

[Enqueue](#)

ID	Is pending	Frame-counter	Confirmed	FPort	Data (HEX)
5f51c77b-4e77-4a28-a0fd-5680e9b6249a	no		no	3	01
1b82ec4d-b677-4b91-9531-d9f6b4431c64	no		no	2	01

Kuvio 17. ChirpStack käyttöliittymä. Downlink-viestien lähettäminen.

PoC-toteutuksen integraatio Node-RED-sovelluspalvelimen kanssa toteutettiin MQTT-viestinvälitys protokollalla. MQTT-perustuu julkaisuja-tilaaja -arkkitehtuuriin, jossa laitteet lähettävät viestejä JSON-muodossa MQTT-välittäjälle (MQTT Broker), joka välittää ne edelleen tilaajille. Protokolla on yleisesti käytössä monissa IoT-sovelluksissa. ChirpStack Docker-asennuksessa asentui samalla Eclipse Mosquitto MQTT-broker (“ChirpStack Docker” 2023). Vaihtoehtoisesti voidaan verkkopalvelimen integraatioista luoda yhteys mihin tahansa MQTT-välittäjään. Projektissa hyödynnettiin myös MQTT Explorer-työkalua MQTT-viestien tutkimiseen ja testaamiseen.

ChirpStackin dokumentaatioissa esitellään kaikki MQTT-integraation Event-tyypit (“MQTT - ChirpStack” 2023). Oletusarvoisesti kanava (topic) on muotoa:

```
application/APPLICATION_ID/device/DEV_EUI/event/EVENT.
```

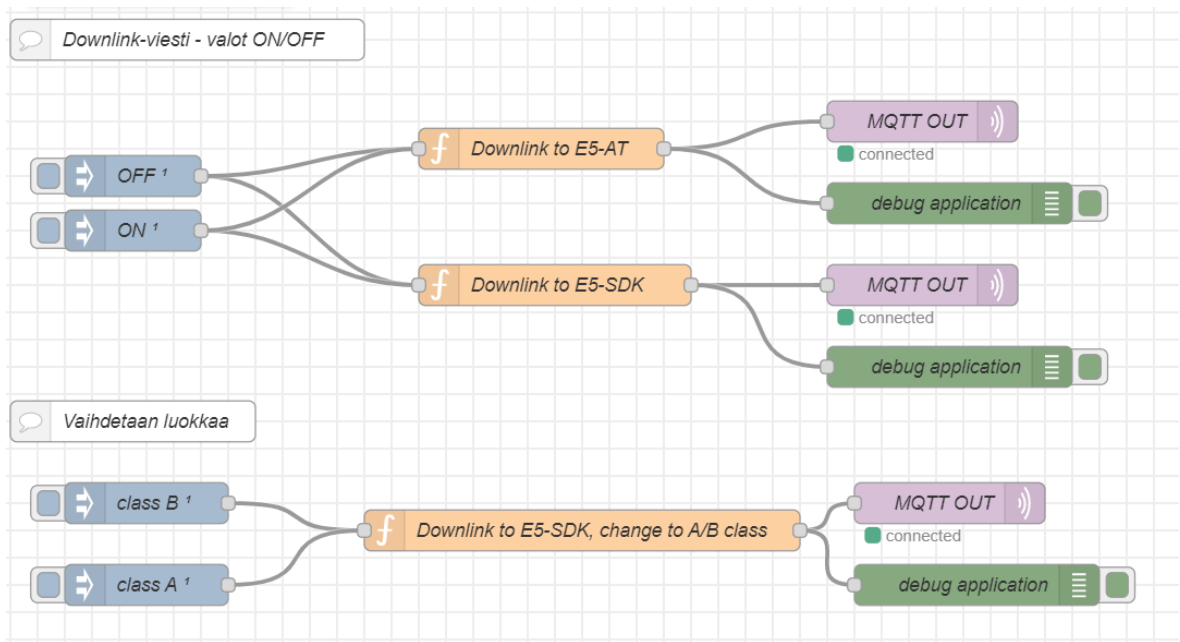
Aikataulutettujen downlink-viestien lähettämisen osalta oletuskanava on:

```
application/APPLICATION_ID/device/DEV_EUI/command/down.
```

Dokumentaatiosta löytyy myös esimerkki downlink-viestistä JSON-muodossa.

```
{
  "devEui": "0102030405060708",
  "confirmed": true,
  "fPort": 10,
  "data": "...."
  "object": {
    "temperatureSensor": {"1": 25},
    "humiditySensor": {"1": 32}
  }
}
```

PoC-toteutuksen sovelluspalvelin on Node-RED:llä toteutettu yksinkertainen virtaus, joka lähettää päätelaitteelle ohjaustiedon (01 tai 00). Päätelaitteella (SDK) tämä sytyttää ja sammuttaa päätelaitteeseen integroidun ledin. Tarkoitus on tällä todentaa B-luokan toimivuus ja ymmärtää periaate. Ratkaisua voidaan tämän jälkeen laajentaa eri ohjelmointikomponen-



Kuvio 18. Node-Red sovelluspalvelin. Downlink-viestintää päätelaitteelle.

teilla tai API-toteutuksilla sovelluspalvelimen päässä sekä vastaavasti päätelaitteessa, kytke-
mällä siihen esim. aktuaattoreita. Lisäksi toteutettiin Node-RED-vuo, jolla laiteluokkaa voi-
daan vaihtaa sovelluspalvelimelta käsin (SDK). Node-RED:issä luodut virtaukset voidaan
tallentaa JSON-muodossa. Projektiin liittyvät Node-RED-vuot ovat ladattavissa githubista
(Ahonen 2023). Kuviossa 18 on esitelty yksinkertaiset Node-RED-virtaukset, joilla voidaan
ohjata B-luokan laitetta sekä vaihtaa laiteluokkaa.

Päätelaitteen sarjaporttiliikennettä seuraamalla voitiin havainnoida laiteluokan vaihtoa sekä
päätelaitteen ohjaamista:

Vaihtaminen B-luokkaan.

Sovelluspalvelin lähettää: portti 3, payload 01 (B-luokka)

Päätelaite vastaanottaa Beacon-viestin:

```
===== BC_RECEIVED
```

```
BTIME:1368861184 | GW DESC:0 | GW INFO:00 00 00 00 00 00
```

```
FREQ:869525000 | DR:3 | RSSI:-70 | SNR:10
```


Päätelaite toimii B-luokassa.

```
===== MCPS-Confirm =====
```

```
U/L FRAME:0047 | PORT:0 | DR:5 | PWR:7 | MSG TYPE:UNCONFIRMED  
Switch to Class B done
```

Päätelaitteen ledin ohjaaminen Node-Red-sovelluspalvelimelta:

Sovelluspalvelin lähettää: portti 2, payload 01

Ledi syttyy:

```
===== MCPS-Indication XXX =====
```

```
D/L FRAME:0014 | SLOT:B Ping-Slot | PORT:2 | DR:0 | RSSI:-70 | SNR:5  
LED ON
```

Sovelluspalvelin lähettää: portti 2, payload 00

Ledi sammuu:

```
===== MCPS-Indication XXX =====
```

```
D/L FRAME:0012 | SLOT:B Ping-Slot | PORT:2 | DR:0 | RSSI:-69 | SNR:5  
LED OFF
```

Luokan vaihtaminen A-luokkaan.

Sovelluspalvelin lähettää: portti 3, payload 00 (A-luokka)

```
===== MCPS-Indication =====
```

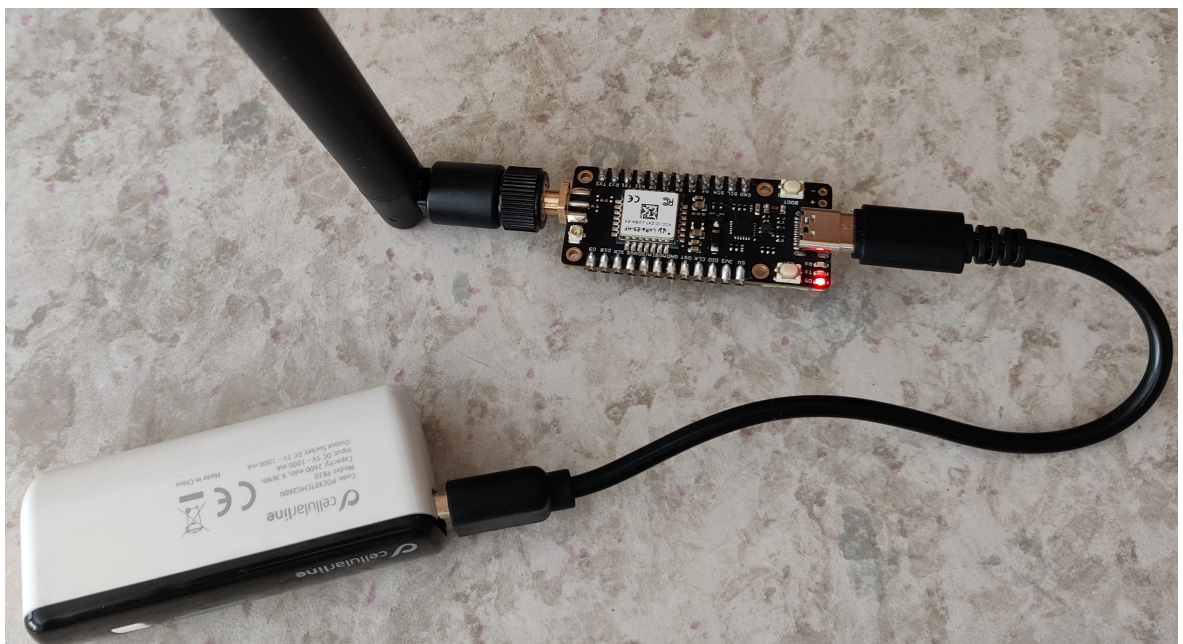
```
D/L FRAME:0006 | SLOT:B Ping-Slot | PORT:3 | DR:3 | RSSI:-59 | SNR:11  
Switch to Class A done
```

B-luokan tilassa uplink-kehysrakenteen kehyksen otsikon Frame Control (FCtrl)-kentän bitti saa arvon True. Näin voidaan todeta, että päätelaite toimii B-luokan tilassa (kuviot 19). Kuvio 20 nähdään, kun päätelaite on saanut sovelluspalvelimelta viestin sytyttää ledi.

Edellä esiteltiin PoC-toteutus LoRaWAN-verkon downlink-viestinnästä, jossa päätelaitteen lediä voidaan ohjata verkosta. Myös laiteluokkaa voidaan vaihtaa sovelluspalvelimelta. Toteutus on hyvin yksinkertainen ja käyttää esimerkkikirjastoja, mutta kertoo teknologian potentiaalini ja mahdollistaa jatkokehittämisen.

```
f_ctrl: { 6 keys
  ack: false
  adr: true
  adr_ack_req: false
  class_b: true
  ...
```

Kuvio 19. Uplink-viesti. Päätelaitte toimii B-luokan tilassa. FCtrl: class_b: true



Kuvio 20. LoRa-E5 mini. Ledi palaa, ohjaus Node-Red sovelluspalvelimelta.

Ehkä suurin haaste toteutuksessa oli, että tehdasasennetuissa laitteissa downlink-viestit eivät tulleet perille yhdyskäytävältä. Lopulta ongelmaan löytyi ratkaisu. Päätelaitteen ping-slot tiedonsiirtonopeudeksi oli määritelty DR3 sekä vastaavasti laitteen profilitietoihin verkkopalvelimelle (kuvio 16). Kuitenkaan verkkopalvelin ei käyttänyt tätä tietoa, vaan lähetti datan DR0-tiedonsiirtonopeudella yhdyskäytävälle. Verkkopalvelimen docker-asennuksen konfiguraatitiedostossa `region_eu868.toml` ping-slot tiedonsiirtonopeus oli DR0 ja tähän laitekohtainen muutos ei näyttänyt vaikuttavan. Sekaannusta aiheutti, että SDK-päätelaite toimi kyseisellä konfiguroinnilla.

```
chirpstack-docker/configuration/chirpstack$ nano region_eu868.toml
# Class-B configuration.
[regions.network.class_b]
# Ping-slot data-rate. Oletuksena arvo on 0
ping_slot_dr=3
```

Tässä esiteltiin toteutus, joka käytti ChirpStack-verkkopalvelinta. Työn aikana kuitenkin tehtiin toimivia B-laiteluokan testejä myös Digitan verkkopalvelimella. Mahdollisesti yhdyskäytävien käyttörajoituksista johtuen kokeiluissa ilmeni erinäisiä haasteita, eikä toimintavarmaa toteutusta saatu aikaan. Näitä haasteita ei kuitenkaan läpikäydä tässä tutkielmassa sen tarkemmin.

4.4 B-luokan multicast - PoC

Multicast-toiminnallisuutta päädyttiin testaamaan ainoastaan kahdella päätelaitteella, joissa molemmissa oli tehdasasennettu firmware. Laiteohjelmisto tuki niin B- ja C-luokan multicast-lähtämistä. Toteutuksessa oli käytössä yksi yhdyskäytävä. Konfiguraatio niin laitteiden kuin verkkoympäristön osalta pidettiin vastaavana kuin edellisessä kappaleessa ja kaksi päätelaitetta kommunikoi verkkoon B-luokan tilassa. Lisäksi laitteissa otettiin käyttöön multicast-toiminnallisuus ja määriteltiin laitteille multicast-osoite ja salausavaimet sekä kehyslaskuri. Nämä määriteltiin suoraan laitteille komennolla:

```
AT+LW=MC,["ON/OFF"],["DEVADDR"],["NWKSKEY"],["APPSKEY"],["COUNTER"]
```

valocast multicast-group id: de17800d-f486-453b-8865-e04ba0dfeb5c

Devices Gateways Configuration

* Multicast-group name
valot

* Multicast address
36b7629b

* Multicast network session key
.....

* Multicast application session key
.....

* Region EU868

* Data-rate ② 3

* Frame-counter 44

* Frequency (Hz) ② 869525000

* Group type ② Class-B

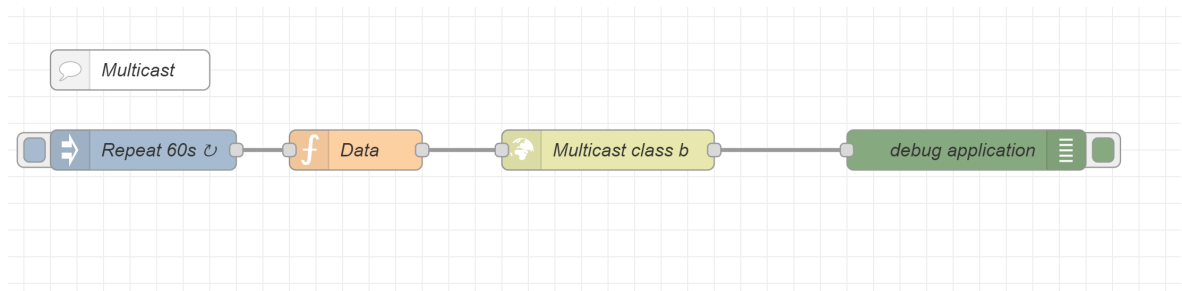
Class-B ping-slot periodicity Every 32 seconds

Class-C scheduling type ② Delay

Kuvio 21. ChirpStack - Multicast ryhmän konfigurointi

ChirpStack-verkkopalvelimelle määritellylle sovellukselle (Application) tuli lisätä myös multicast-ryhmä vastaavilla tiedoilla, jonka konfiguraatio esitetty kuviossa 21. Tiedonsiirtonopeudeksi asetettiin DR3, taajuuskaistaksi 869.525 MHz ja ping-aikaväli (ping period) 32 sekuntia (P=5). Lisäksi verkkopalvelimen multicast-ryhmään tuli määrittellä ryhmään kuuluvat pääte-laitteet sekä yhdyskäytävät. Nämä olisi voinut lisätä Chirpstack web-käyttöliittymän kautta, mutta tässä tiedot määriteltiin HTTP REST API:n avulla.

Chirpstackin Docker-asennuksessa asentui myös ChirpStack REST API ja sen Swagger-käyttöliittymä osoitteeseen <http://localhost:8090>. API-rajapintaa käytettiin määrittelemään laitteet ja päätelaitteet ryhmäkohtaisesti. Nämä määriteltiin nyt Swagger-käyttöliittymästä HTTP POST-pyynnöillä, mutta vastaavasti ne olisi voinut tehdä ohjelmallisesti esimerkiksi Node-RED-sovelluspalvelimelta. Myös multicast-ryhmä voidaan luoda dynaamisesti API:n avulla. Huomioitavaa on, että ChirpStackin versiossa 4 ei REST API-liittymä asennu ole-tuksena, vaan suosituksena on käyttää gRPC-liittymää. Jo aiemmissa versioissa on REST-pyyntö muutettu sisäisesti gRPC-pyyntöiksi. Tässä esimerkissä hyödynnettiin kuitenkin REST API:a, koska se teknologiana tunnettiin parhaiten ja oli ympäristössä valmiina. ChirpStack ei tällä hetkellä tue MQTT-protokollaa multicast-viestinnässä. Tarvittavat REST API-pyyntö esitelty liitteessä B.

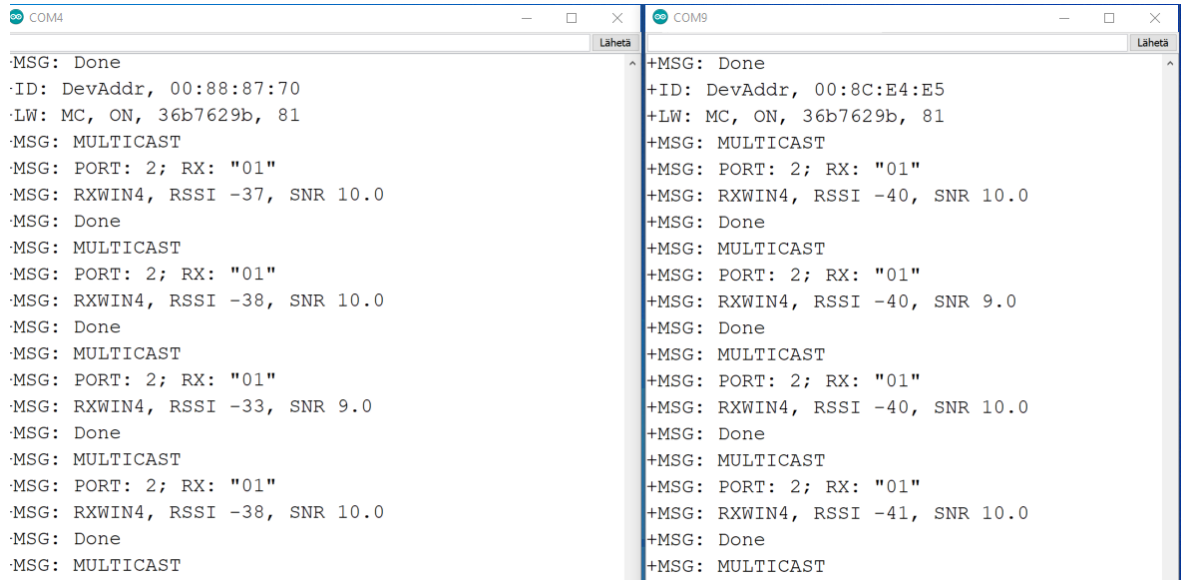


Kuvio 22. Node-Red - multicast-lähetys päätelaitteille.

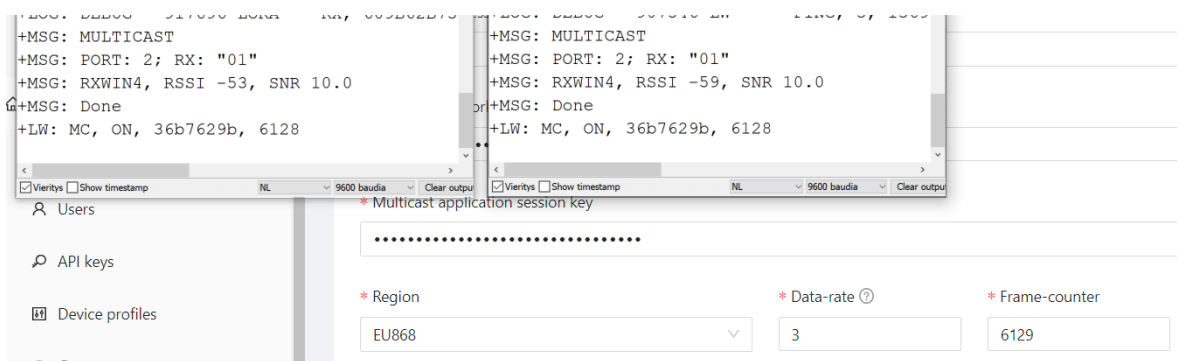
Node-RED-sovelluspalvelimelle toteutettiin yksinkertainen virtaus, joka lähettää verkkopalvelimen REST API:n välityksellä ohjaustiedon (01) multicast-viestinä ryhmän päätelaitteille (kuvio 22). Toteutuksessa sama viesti lähetetään minuutin välein. Tarkoitus on tällä todentaa B-luokan multicast-viestinnän toimivuus ja ymmärtää periaate. Projektiin liittyvät Node-RED-vuot ovat ladattavissa githubista (Ahonen 2023).

Kuviosta 23 voidaan todeta viestien saapuminen päätelaitteille. PoC-toteutuksessa päätelaitteet olivat noin 10 metrin päässä tukiasemasta ja vastaanottivat viestejä vierekkäin. Tämän voi todeta myös RSSI-arvoista, jotka molemmissa laitteissa hyvin vastaavat. Pienimuotoisen testauksen aikana, kaikki viestit saapuivat perille samaan aikaan. Kuviosta 24 nähdään päätelaitteiden ja verkkopalvelimen kehyslaskurin arvot. Arvot täsmäävät päätelaitteiden osalta ja ainoastaan yksi paketti on koko kokeilun aikana kadonnut. Kuviosta 25 nähdään ChirpStack-verkkopalvelimen lokitiedoista lähetettyjä multicast-paketteja.


Voidaan todeta, että multicast-viestintä saatiin LoRaWAN-ympäristössä toimimaan. Toteutus oli hyvin yksinkertainen, mutta kertoo teknologian potentiaalista.



Kuvio 23. Laitteet vastaanottavat multicast-viestejä. Multicast-osoite: 36b7629b



Kuvio 24. Päätelaitteiden ja verkkopalvelimen kehyslaskurin arvot



2023-05-11 21:47:52	UnconfirmedDataDown	DevAddr: 36b7629b	Gateway ID: ac1f09fffe0ba5ae
2023-05-11 21:46:50	UnconfirmedDataDown	DevAddr: 36b7629b	Gateway ID: ac1f09fffe0ba5ae
2023-05-11 21:46:19	UnconfirmedDataDown	DevAddr: 36b7629b	Gateway ID: ac1f09fffe0ba5ae
2023-05-11 21:45:05	UnconfirmedDataDown	DevAddr: 36b7629b	Gateway ID: ac1f09fffe0ba5ae

Kuvio 25. ChirpStack - LoraWAN-paketteja multicast-osoitteeseen: 36b7629b

5 Yhteenveto

LoRaWAN-verkkojen haasteena on, että teknologia on suunniteltu erityisesti lähettämään päätelaitteen keräämää tietoa verkkoon, kun taas tiedon lähettämiseen päätelaitteelle liittyy viiveitä ja rajoituksia. Tässä tutkielmassa on esitelty LoRaWAN-verkkoihin liittyvää teknologiaa (laiteluokka B), jonka avulla tiedon lähettämistä IoT-toimilaitteelle voidaan paremmin ohjata ja aikatauluttaa verkosta. Tutkimus myös esittelee monilähetystekniikkaa (multicast), jonka avulla sama tieto voidaan lähettää useammalle laitteelle yhdellä kertaa. Tutkielman tavoitteena oli tutustua LoRaWAN teknologiaan ja erityisesti B-luokan mahdollisuuksiin käytännön tasolla. Tavoitteiden mukaan työssä esitellään käytännön tasolla B-laiteluokan downlink-viestintää sovelluspalvelimelta päätelaitteisiin niin unicast kuin multicast-lähettämässä. Esimerkkitoteutukset ovat hyvin yksinkertaisia, mutta luovat kuitenkin ymmärrystä aiheesta ja antavat mahdollisuuksia laajempiin käytännön toteutuksiin. Työssä esitelty teoria ja aiemmat tutkimukset antavat myös oman panoksensa tähän. Aineistohauissa löydettiin myös materiaaleja, joita toivoisi hyödynnettävän laajemminkin, kuten Savoie Mont Blanc -yliopiston LoRaWAN kirjat.

Työn aikana havainnoitiin niitä haasteita, joita on esitelty kirjallisuudessa, erityisesti verkoissa, joissa downlink-viestintä on rajoitettua. B-luokan hyödyntämispotentiaali on kuitenkin merkittävä, kun vaaditaan kontrolloidumpia ja viiveettömämpiä ratkaisuja akkukäyttöisten toimilaitteiden ohjaamiseen. Lisäksi multicast-ratkaisuilla voidaan downlink-viestintää vähentää merkittävästi esimerkiksi ohjelmistopäivityksissä (FUOTA) tai reunalaskennan toteutuksissa.

Vaikka LoRaWAN olikin osittain tuttu ennestään, niin käytetyt laitteet ja B-luokka kaikineen oli teknologiana uutta. Työssä opittiinkin tarvittavat pohjatiedot B-luokan toiminnallisuuksien hyödyntämiseksi ja laajentamiseksi todellisiin sovelluksiin tai jatkokehitykseen. Työssä saatiin myös ymmärrystä testiympäristöjen tärkeydestä. Jälkikäteen ajateltuna alun lähtökohta hyödyntää toteutuksessa Digitan verkkoa testiympäristönä, jossa downlink-rajoitukset olivat tiukat, ei ollut paras. Toisaalta oli hienoa ja opettavaista saada mahdollisuus hyödyntää kansallista verkkoa. Tarvitaan kuitenkin vielä lisää käytännön toteutuksia ja kokemuksia siitä, miten laajoissa verkoissa käyttörajoitukset vaikuttavat suorituskykyyn. Kan-

sallisten verkkojen kokemukset teknologian hyödyntämisestä ovat vasta tulossa (“KPN Activates Class B” 2022), ja on kiinnostavaa nähdä, miten teknologiaa voidaan niissä hyödyntää ottaen huomioon verkkojen mahdolliset rajoitukset. Lisäksi on mielenkiintoista seurata, miten B-luokan tuki yleistyy laitteissa.

Työssä nousi esiin useita mahdollisia jatkotutkimuksen aiheita. Kiinnostavia ja toivottavia-kin jatkotutkimuksen kohteita olisivat laajemmat ja kattavammat käytännön tutkimukset todellisissa kohteissa. Niitä voisivat olla esimerkiksi jonkin organisaation julkinen tai yksityinen LoRaWAN-verkko, jossa kyseisestä teknologiasta olisi merkittävää hyötyä verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Jatkotutkimukseen soveltuisi myös hyvin hajautetun koneoppimisen menetelmien (Federated Learning / TinyML) soveltaminen LoRaWAN-päätelaitteissa, joissa B-luokan multicast-viestintää voitaisiin hyödyntää parannetun koulutusmallin siirtämisessä ja päivittämisessä päätelaitteisiin. Tämä aihepiiri oli tämänkin tutkielman alkuvaiheessa mukana ja kirjallisuushakujen perusteella aihealueen tutkimus on vielä aivan alussa. Myös FUOTA-prosessista kaikkineen löytyy vielä melko vähän kirjoitettua. Yksi tutkimussuunta voisi olla LoRaWAN yhdyskäytävät. Tulisiko yhdyskäytävän ja verkkopalvelimen liikenne standardoida paremmin, perustuen avoimeen lähdekoodiin. Yksi jatkotutkimuksen paikka voisi olla myös LoRa Basics Stationin tarkempi tutkiminen ja testaaminen sisätilojen yhdyskäytävissä, joissa ei ole GPS-laitetta. Tässä tutkimuksessa voitaisiin selvittää tarkemmin, miten dokumentaatioissa esitelty aikasykronointi toimii ja miten se vaikuttaa B-luokan toimintaan sisätilojen laitteissa.

Lähteet

Abdelfadeel, Khaled, Tom Farrell, David McDonald ja Dirk Pesch. 2020. "How to Make Firmware Updates over LoRaWAN Possible". Teoksessa *2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*, 16–25. 2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM). Elokuu. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM49955.2020.00018>.

Ahonen, Mika. 2023. "Miahon/Node-Red-Lorawan-Classb", 30. toukokuuta 2023, 12:25 ip. (Z). Viitattu 30. toukokuuta 2023. <https://github.com/miahon/node-red-lorawan-classb>.

Almuhaya, Mukarram A. M., Waheb A. Jabbar, Noorazliza Sulaiman ja Suliman Abdulmalek. 2022. "A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions". *Electronics* 11, numero 1 (1): 164. ISSN: 2079-9292, viitattu 4. lokakuuta 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>. <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/164>.

"An In-depth Look at LoRaWAN Class B Devices". 2023. Viitattu 26. toukokuuta 2023. <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lorawan-class-b-devices/>.

"AWS IoT Core for LoRaWAN". 2023. Amazon Web Services, Inc. Viitattu 5. toukokuuta 2023. <https://aws.amazon.com/iot-core/lorawan/>.

Catalano, Julien. 2021. "LoRaWAN Firmware Update Over-The-Air (FUOTA)". *Journal of ICT Standardization* (30. huhtikuuta 2021): 21–34. ISSN: 2246-0853, viitattu 17. syyskuuta 2022. <https://doi.org/10.13052/jicts2245-800X.913>. <https://journals.riverpublishers.com/index.php/JICTS>.

Chaudhari, Bharat S. ja Marco Zennaro. 2020. "1 - Introduction to Low-Power Wide-Area Networks". Teoksessa *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, toimittanut Bharat S. Chaudhari ja Marco Zennaro, 1–13. Academic Press, 1. tammikuuta 2020. ISBN: 978-0-12-818880-4, viitattu 20. huhtikuuta 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818880-4.00001-6>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128188804000016>.

“ChirpStack Docker”. 2023, 5. toukokuuta 2023, 9:22 ip. (Z). Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://github.com/chirpstack/chirpstack-docker>.

Delobel, Francois, Nancy El Rachkidy ja Alexandre Guitton. 2017. “Analysis of the Delay of Confirmed Downlink Frames in Class B of LoRaWAN”. Teoksessa *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1–6. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Kesäkuu. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108412>.

“Docker”. 2022, 10. toukokuuta 2022, 8:10 ap. (-07:00). Viitattu 23. toukokuuta 2023. <https://www.docker.com/>.

“Docker - ChirpStack”. 2023. Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://www.chirpstack.io/docs/getting-started/docker.html>.

Elbsir, Housseem, Mohamed Kassab, Sami Bhiri ja M.H. Bedoui. 2022. “Evaluation of LoRaWAN Class B Performances and Its Optimization for Better Support of Actuators”. *Computer Communications* 198 (1. marraskuuta 2022). <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.11.016>.

Elbsir, Housseem Eddin, Mohammed Kassab, Sami Bhiri ja Mohamed Hedi Bedoui. 2020. “Evaluation of LoRaWAN Class B Efficiency for Downlink Traffic”. Teoksessa *2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 105–110. 2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Lokakuu. <https://doi.org/10.1109/WiMob50308.2020.9253405>.

Ertürk, Mehmet Ali, Muhammed Ali Aydın, Muhammet Talha Büyükakkaşlar ja Hayrettin Evirgen. 2019. “A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies”. *Future Internet* 11, numero 10 (10): 216. ISSN: 1999-5903, viitattu 15. joulukuuta 2022. <https://doi.org/10.3390/fi11100216>. <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/10/216>.

Finnegan, Joseph, Stephen Brown ja Ronan Farrell. 2018. “Evaluating the Scalability of LoRaWAN Gateways for Class B Communication in Ns-3”. Teoksessa *2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 1–6. 2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Lokakuu. <https://doi.org/10.1109/CSCN.2018.8581759>.

“Firmware Updates Over-the-Air”. 2023. Viitattu 19. toukokuuta 2023. <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/firmware-updates-over-the-air/>.

Gumaa, Motasim. 2022. “Design and Implementation of CI/CD over LoRaWAN : Continuous Integration and Deployment in LoRaWAN Edge Computing Applications” (28. heinäkuuta 2022). Viitattu 14. huhtikuuta 2023. <https://www.utupub.fi/handle/10024/154573>.

Haxhibeqiri, Jetmir, Eli De Poorter, Ingrid Moerman ja Jeroen Hoebeke. 2018. “A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application”. *Sensors* 18, numero 11 (11): 3995. ISSN: 1424-8220, viitattu 19. huhtikuuta 2023. <https://doi.org/10.3390/s18113995>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995>.

“Home Assistant”. 2023. Home Assistant Community. Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://community.home-assistant.io/>.

“Home Assistant Add-on: Node-RED”. 2023, 11. toukokuuta 2023, 6:25 ip. (Z). Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://github.com/hassio-addons/addon-node-red>.

“Kari Lukka: Konstruktiivinen Tutkimusote”. 2014. Viitattu 28. toukokuuta 2023. <https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/>.

Kolehmainen, Heikki. 2022. “Sensorimittausta LoRaWAN radioteknologialla”, viitattu 4. lokakuuta 2022. <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/81070>.

“KPN Activates Class B”. 2022. Actility, 25. tammikuuta 2022, 8:45 ap. (Z). Viitattu 29. toukokuuta 2023. <https://www.actility.com/kpn-activates-class-b-to-level-up-its-lorawan-network/>.

“Lora Alliance”. 2023. LoRa Alliance®, maaliskuu. Viitattu 14. maaliskuuta 2023. <https://lora-alliance.org/>.

“LoRa Basics Station”. 2023. Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://lora-developers.semtech.com/build/software/lora-basics/lora-basics-for-gateways/>.

“LoRa Modulation Basics”. 2023. Viitattu 7. toukokuuta 2023. <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JeIG/a/2R0000001OJu/xvKUc5w9yjG1q5Pb2IIkpolW54YYqGb.frOZ7HQBcRc>.

“Lora Network Packet Forwarder Project”. 2023, 30. huhtikuuta 2023, 6:08 ap. (Z). Viitattu 13. toukokuuta 2023. https://github.com/Lora-net/packet_forwarder.

“LoRa-E5 AT Command Specification_V1.0”. 2023. Viitattu 3. toukokuuta 2023. https://files.seeedstudio.com/products/317990687/res/LoRa-E5%20AT%20Command%20Specification_V1.0%20.pdf.

“LoRa-E5 Module datasheet_V1.0”. 2023. Viitattu 3. toukokuuta 2023. https://files.seeedstudio.com/products/317990687/res/LoRa-E5%20module%20datasheet_V1.0.pdf.

“LoRa-E5-LoRaWAN-End-Node”. 2023. GitHub. Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://github.com/Seeed-Studio/LoRaWan-E5-Node>.

“LoRaWAN 1.0.4 Class B and C for End Devices”. 2023. Viitattu 19. toukokuuta 2023. <https://lorawan-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lorawan-1.0.4-class-b-and-c-for-end-devices/lorawan-1.0.4-class-b-and-c/>.

“LoRaWAN Fragmented Data Block Transport Specification v1.0.0”. 2023. LoRa Alliance®. Viitattu 19. toukokuuta 2023. https://hz1.37b.myftpupload.com/resource_hub/lorawan-fragmented-data-block-transport-specification-v1-0-0/.

“LoRaWAN Remote Multicast Setup Specification”. 2018. LoRa Alliance®. Viitattu 14. huhtikuuta 2023. https://hz1.37b.myftpupload.com/resource_hub/lorawan-remote-multicast-setup-specification-v1-0-0/.

“LoRaWAN® Specification v1.0.3”. 2018, 1. heinäkuuta 2018. Viitattu 11. huhtikuuta 2023. <https://resources.lora-alliance.org/document/lorawan-specification-v1-0-3>.

“LoRaWAN® Specification v1.1”. 2017. LoRa Alliance®, kesäkuu. Viitattu 16. maaliskuuta 2023. https://hz1.37b.myftpupload.com/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/.

Montagny, Sylvain. 2022. “LoRaWAN for Advanced Users”. LoRaWAN. Viitattu 15. marraskuuta 2022. <https://www.univ-smb.fr/lorawan/en/free-book/>.

“MQTT - ChirpStack”. 2023. Viitattu 13. toukokuuta 2023. <https://www.chirpstack.io/docs/chirpstack/integrations/mqtt.html>.

Network, The Things. 2023. “The Things Network”. The Things Network. Viitattu 5. toukokuuta 2023. <https://www.thethingsnetwork.org/>.

“Node-RED”. 2023. Viitattu 5. toukokuuta 2023. <https://nodered.org/>.

Pasetti, Marco, Stefano Rinaldi, Emiliano Sisinni, Paolo Ferrari ja Alessandra Flammini. 2019. “On the Use of Class B LoRaWAN for the Coordination of Smart Interface Protection Systems”. Teoksessa *2019 IEEE 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 1–6. 2019 IEEE 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). Syyskuu. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2019.8897774>.

Pasetti, Marco, Emiliano Sisinni, Paolo Ferrari, Stefano Rinaldi, Alessandro Depari, Paolo Bellagente, Davide Della Giustina ja Alessandra Flammini. 2020. “Evaluation of the Use of Class B LoRaWAN for the Coordination of Distributed Interface Protection Systems in Smart Grids”. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 9, numero 1 (1): 13. ISSN: 2224-2708, viitattu 4. lokakuuta 2022. <https://doi.org/10.3390/jsan9010013>. <https://www.mdpi.com/2224-2708/9/1/13>.

Ron, Dara, Chan-Jae Lee, Kisong Lee, Hyun-Ho Choi ja Jung-Ryun Lee. 2020. “Performance Analysis and Optimization of Downlink Transmission in LoRaWAN Class B Mode”. *IEEE Internet of Things Journal* 7, numero 8 (elokuu): 7836–7847. ISSN: 2327-4662. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2994958>.

“RP2-1.0.3 LoRaWAN Regional Parameters”. 2018. LoRa Alliance®, helmikuu. Viitattu 14. maaliskuuta 2023. https://hz1.37b.myftpupload.com/resource_hub/rp2-1-0-3-lorawan-regional-parameters/.

“Semtech Network Server”. 2023. Viitattu 4. toukokuuta 2023. <https://lora-developers.semtech.com/build/network-server/>.

“Sending and Receiving Messages with LoRaWAN”. 2023. Viitattu 19. toukokuuta 2023. <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/sending-and-receiving-messages-with-lorawan/sending-and-receiving-messages/>.

Shiferaw, Yonatan, Apoorva Arora ja Fernando Kuipers. 2020. “LoRaWAN Class B Multicast Scalability”. Teoksessa *2020 IFIP Networking Conference (Networking)*, 609–613. 2020 IFIP Networking Conference (Networking). Kesäkuu.

“ThingPark Community”. 2023. Viitattu 5. toukokuuta 2023. <https://community.thingpark.org/>.

“Things You Need to Know about LoRaWAN-based Gateways”. 2023. Viitattu 26. toukokuuta 2023. <https://tech-journal.semtech.com/expert-series-5-things-you-need-to-know-about-lorawan-based-gateways>.

Todoli-Ferrandis, David, Javier Silvestre-Blanes, Víctor Sempere-Payá ja Ana Planes-Martínez. 2020. “Analysis of Bidirectional ADR-Enabled Class B LoRaWAN Networks in Industrial Scenarios”. *Applied Sciences* 10, numero 22 (22): 7964. ISSN: 2076-3417, viitattu 25. toukokuuta 2023. <https://doi.org/10.3390/app10227964>. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/7964>.

“TTN Duty Cycle”. 2023. The Things Network. Viitattu 15. toukokuuta 2023. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>.

“Wio-E5 Mini”. 2023, 30. tammikuuta 2023. Viitattu 3. toukokuuta 2023. https://wiki.seeedstudio.com/LoRa_E5_mini.

“WisGate Edge Pro Datasheet”. 2023. Viitattu 4. toukokuuta 2023. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7289-V2/Datasheet/>.

“WisGate OS 2 User Manual”. 2023. Viitattu 4. toukokuuta 2023. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/Software-APIs-and-Libraries/WisGateOS-2/Overview/>.

Yegin, Alper, Thorsten Kramp, Pierre Dufour, Rohit Gupta, Ramez Soss, Olivier Hersent, Derek Hunt ja Nicolas Sornin. 2020. “3 - LoRaWAN Protocol: Specifications, Security, and Capabilities”. Teoksessa *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, toimittanut Bharat S. Chaudhari ja Marco Zennaro, 37–63. Academic Press, 1. tammikuuta 2020. ISBN: 978-0-12-818880-4, viitattu 17. syyskuuta 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818880-4.00003-X>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012818880400003X>.

Liitteet

A LoRa-E5, AT-testaaminen

Laitteen ohjaaminen tapahtui AT-komennoilla ("LoRa-E5 AT Command Specification_V1.0" 2023) USB- UART-liitynnän kautta, käytännössä tähän käytettiin Arduino IDE:n sarjamonitoria (9600 baudia).

AT-komentoja:

```
AT+ID // Lueataan DevAddr, DevEui, AppEui
AT+ID=DevAddr,"devaddr" // Asetetaan uusi DevAddr
AT+ID=DevEui,"deveui" // Asetetaan uusi DevEui
AT+ID=AppEui,"appeui" // Asetetaan uusi AppEui
AT+KEY=APPKEY,"16 tavua" // Muutetaan avain

AT+MODE=OTAA // Vaihdetaan kirjautumistapa LWOTAA
AT+LOG=DEBUG // debug lokitus päälle
AT+ADR=ON // ADR käyttöön
AT+LW=DC // Duty-cycle-käyttöjakso ei päätelaitteella testissä päällä
+LW: DC, OFF, 0 // muoto +LW=DC, "ON/OFF", MaxDCycle

AT+JOIN // Lähetetään JOIN pyyntö
+JOIN: Network joined
+JOIN: NetID 000000 DevAddr 01:D5:CD:E5

Todetaan uplink-viestillä luokka A:n toiminta:
AT+MSGHEX="44" // Lähetetään uplink-viesti HEX-muodossa

AT+CMSGHEX="44" // Vahvistettu uplink-viesti, ACK-vahvistus
+CMSGHEX: Start
+CMSGHEX: Wait ACK
+CMSGHEX: FPENDING
+CMSGHEX: ACK Received
+CMSGHEX: RXWIN1, RSSI -52, SNR 10.0
+CMSGHEX: Done
```


Vastaanotetaan downlink-viesti A-luokan tilassa (Viesti jonossa verkkopalvelimella)

```
+MSGHEX: Start
+MSGHEX: PORT: 8; RX: "99"
+MSGHEX: RXWIN1, RSSI -50, SNR 9.0
+MSGHEX: Done

AT+BEACON // Beacon asetukset
+BEACON: 5, DR3, 869525000, DR3, 869525000 // Ping slot = 5 eli 32 sekuntia,
//Ping-Slot data-rate = DR3

A+RTC
+RTC: 2000-01-01 04:52:53 // tarkistetaan kellonaika.
// alkaa aina 2000-01-01 00:00:00

AT+CLASS=? // tarkistetaan luokka
+CLASS: A

AT+CLASS=B // Siirrytään B-luokkaan, Beacon haku käynnistyy.

+CLASS: B (S0) // Kellon synkronointi
+CLASS: B (S1) // Beacon-haku

+LOG: DEBUG 17896523 LW beacon acq
+LOG: DEBUG 17896523 LW lwb to 256000
+LOG: DEBUG 17896523 LW DeviceTimingAns, 17895329, 1367350400, 62324
// synkroinoin kellon

AT+RTC // tarkistetaan kello
+RTC: 2023-05-05 19:34:43 // kello nyt synkronoitu

+BEACON: LOCKED // Beacon vastaanotettu
+BEACON: DONE // kaikki ok ja siirryttiin B-laiteluokkaan
+CLASS: B

+LOG: DEBUG 18471115 LW BEACON, 1, 1367351040, 18470959, 1367351040, 18470957,
//Beacon-viestit yhdyskäytävältä
```

```
+MSG: PORT: 2; RX: "01" // downlink-viesti sovelluspalvelimelta
+MSG: RXWIN4, RSSI -58, SNR 10.0 // RXWIN4, B-luokan viesti
+MSG: Done
+LOG: DEBUG 1534577 LORA RX, 869525000, SF9, 125KHz, 13 // lähetysparametrit

+MSG: PORT: 2; RX: "00" // downlink-viesti sovelluspalvelimelta
+MSG: RXWIN4, RSSI -58, SNR 9.0
+MSG: Done
```

B Multicast konfigurointi

Wio-E5 mini -tehdasasennetun firmwaren multicast määrittäykset:

```
AT+LW=MC,["ON/OFF"],["DEVADDR"],["NWKSKEY"],["APPSKEY"],["COUNTER"]
```

Määritellään ChirpStack-verkkopalvelimelle multicast-ryhmä vastaavilla tiedoilla. Konfiguraatio esitetty kuviossa 21

Liitetään laitteet multicast ryhmään. Chirpstack REST API-pyyntö:

```
curl -X 'POST' \
  'http://localhost:8090/api/multicast-groups/"MULTICAST-GROUP-ID"/devices' \
  -H 'accept: application/json' \
  -H 'Grpc-Metadata-Authorization: Bearer APIKEY' \
  -H 'Content-Type: application/json' \
  -d '{
    "devEui": "DEVEUI"
  }'
```

Liitetään yhdyskäytävä multicast-ryhmään:

```
curl -X 'POST' \
  'http://localhost:8090/api/multicast-groups/"MULTICAST-GROUP-ID"/gateways' \
  -H 'accept: application/json' \
  -H 'Grpc-Metadata-Authorization: Bearer APIKEY' \
  -H 'Content-Type: application/json' \
  -d '{
```

```
"gatewayId": "GATEWAYID"
}'
```

Lähetetään multicast-viesti ryhmälle:

```
curl -X 'POST' \  
  'http://localhost:8090/api/multicast-groups/"MULTICAST-GROUP-ID"/queue' \  
  -H 'accept: application/json' \  
  -H 'Grpc-Metadata-Authorization: Bearer APIKEY' \  
  -H 'Content-Type: application/json' \  
  -d '{  
    "queueItem": {  
      "data": "AQ==",  
      "fCnt": 0,  
      "fPort": 2  
    }  
  }'
```