

Joonas Järvinen

IoT-verkkoteknologioiden vertailu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

1.5.2017

Tekijä Otsikko	Joonas Järvinen IoT-verkkoteknologioiden vertailu
Sivumäärä Aika	31 sivua 1.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoverkot
Ohjaaja	Lehtori Erik Pätynen
<p>Insinööriyössä tarkoituksena oli vertailla IoT-verkkoteknologioita. Esineiden internet (Internet of Things, IoT) on jatkuvasti yleistynyt käsite, joka tulee mullistamaan niin kuluttajien arkea kuin yritysten liiketoimintaakin yhdistämällä miljardeja uusia laitteita ja esineitä internetiin.</p> <p>Työn tavoitteena oli selvittää eri IoT-verkkoteknologioiden teknisiä ominaisuuksia, niiden vahvuuksia ja heikkouksia sekä soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin. Työssä perehdyttiin yleisesti esineiden internetiin ja radiotekniikan perusteisiin. Tämän jälkeen perehdyttiin eri IoT-verkkoteknologioihin ja vertailtiin niitä. Vertailussa olleet teknologiat olivat LoRa, Sigfox, NB-IoT, Weightless ja 5G. Lopuksi selvitettiin myös teknologioiden tämänhetkistä saatavuutta Suomessa.</p> <p>Selvityksessä huomattiin, että samankaltaisuuksista huolimatta kaikilla eri verkkoteknologioilla on omat erityispiirteensä ja sopivat käyttökohteensa. Vertailuista teknologioista LoRa ja Sigfox ovat saatavilla Suomessa, ja lähitulevaisuudessa voidaan odottaa myös ainakin NB-IoT:n ja hieman myöhemmin 5G:n yleistyvän.</p>	
Avainsanat	IoT, Internet of Things, esineiden internet, LPWAN

Author Title	Joonas Järvinen Comparison of IoT network technologies
Number of Pages Date	31 pages 1 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Data Networks
Instructor	Erik Pätynen, Senior Lecturer
<p>The objective of this thesis was to compare in detail the different IoT network technologies. The Internet of things (IoT) is growing rapidly and it will revolutionize both the consumers' everyday life and the way businesses operate.</p> <p>The aim of the thesis was to study the technical features, strengths, weaknesses and possible use cases of different IoT network technologies. First, the thesis explored the concept of the Internet of things in general and presents some basics of radio technology. Following that, the different IoT network technologies were studied and a comparison between them was made. The technologies included in the comparison were LoRa, Sigfox, NB-IoT, Weightless and 5G. Finally, the current availability of these technologies in Finland was examined.</p> <p>The study came to a conclusion that despite the similarities, each different IoT network technology had its own unique set of features and proper use cases. Amongst the studied technologies, LoRa and Sigfox are currently readily available in Finland, and we expect NB-IoT, and a little later 5G, to make it to the markets.</p>	
Keywords	IoT, Internet of Things, LPWAN

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Esineiden internet	1
2.1	Määritelmä ja historia	1
2.2	Esimerkkejä IoT-sovelluksista	2
3	Radiotekniikasta yleisesti	5
3.1	Linkkibudjetti	6
3.2	Vapaan tilan vaimennus	8
3.3	Fresnelin alue	9
4	Verkkoteknologioiden vertailu	10
4.1	LoRa-teknologia	10
4.2	Sigfox-teknologia	14
4.3	NB-IoT-teknologia	18
4.4	Weightless-teknologiat	19
4.5	5G-teknologia	21
5	Teknologioiden saatavuus Suomessa	23
6	Yhteenveto	24
	Lähteet	27

Lyhenteet

3GPP	3rd Generation Partnership Project. Usean tietoliikennealan standardointijärjestön yhteistyöorganisaatio.
AES	Advanced Encryption Standard. Tietotekniikassa käytettävä lohkosalausmenetelmä.
ARQ	Automatic Retransmission Request. Automaattinen viestien uudelleenlähetyksen menetelmä.
FEC	Forward Error Correction. Virheenkorjaustekniikka.
ISM	Industrial, Scientific and Medical. Radiotaajuusalue, jonka käyttämiseen ei vaadita lupia.
IoT	Internet of Things. Esineiden internet.
LPWAN	Low Power Wide Area Network. Langaton vähävirtainen laajaverkko.
NB-IoT	Narrow Band IoT. LPWAN-standardi.
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output. Tietoliikennetekniikka, jossa käytetään samanaikaisesti useaa antennia.
RFID	Radio Frequency Identification. Radiotaajuinen etätunnistus.
TVWS	TV White Space. Televisiolähetysten taajuusalueilla olevat vapaat kaistaleet.
UNB	Ultra Narrow Band. Modulointitapa.
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkkotekniikka.

1 Johdanto

Esineiden internet (engl. Internet of Things, lyhyemmin IoT) on ollut yksi viime vuosien kuumimpia puheenaiheita teknologiamaailmassa. Sen on sanottu olevan yhtä suuri mulistus teollisuudelle ja kuluttajille kuin internetin tulo alun perin oli. Yhä useammat eri alojen yritykset ovat alkaneet hyödyntää IoT:n tuomia mahdollisuuksia, ja siihen liittyvä palveluntarjonta kasvaa jatkuvasti kiihtyvää tahtia.

Tässä insinööriyössä perehdytään yleisesti esineiden internetiin ja sen käyttötarkoituksiin sekä radioteknologiaan ja vertaillaan keskenään yleisimpiä IoT-verkkoteknologioita. Työn tavoitteena on tutkia eri teknologioiden teknisiä ominaisuuksia, niiden vahvuuksia ja heikkouksia sekä soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin.

Vertailtavat teknologiat ovat Sigfox, LoRa, NB-IoT, Weightless ja 5G. Lisäksi työssä selvitetään tämänhetkistä IoT-verkkoteknologioiden saatavuutta Suomessa.

2 Esineiden internet

2.1 Määritelmä ja historia

Esineiden internetillä on useita eri määritelmiä, ja laajimmillaan se voi käsittää jopa kaikki internetiin yhdistetyt laitteet, mutta yleisimmin sillä tarkoitetaan laitteita, sensoreita ja esineitä, jotka on yhdistetty olemassa olevaan internetverkkoon ja jotka pystyvät esimerkiksi havainnoimaan ympäristöään ja kommunikoimaan tietoverkon kautta tai toimimaan älykkäästi ja itsenäisesti [1].

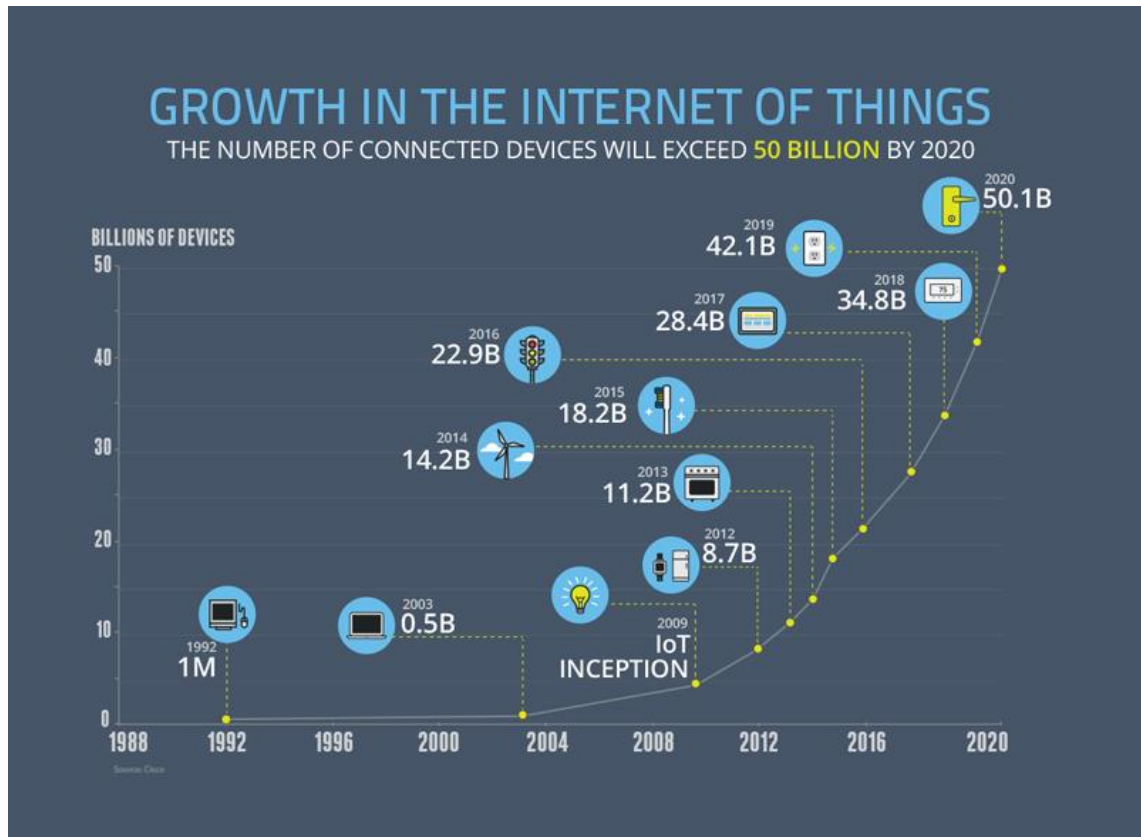
Termiä Internet of Things käytti tiettävästi ensimmäisen kerran brittiläinen Kevin Ashton vuonna 1999 puhuessaan RFID-teknologian hyödyntämisestä kulutustavaravalmistaja Procter & Gamblen toimitusketjussa. Esitelmässään Ashton toi esiin, kuinka lähes kaikki internetissä oleva tieto on ihmisten tuottamaa ja tallentamaa ja kuinka tämä on ongelmallista ihmisen rajoittuneen ajan, huomiokyvyn ja tarkkuuden vuoksi. Ashtonin mukaan

sellaisten älykkäiden laitteiden käyttäminen, jotka pystyisivät itsenäisesti aistimaan ympäröivää maailmaa ja keräämään tietoa olisi huomattavasti tehokkaampaa ja ratkaisisi suuren joukon ongelmia. [2.]

Esineiden internetiin lukeutuvia sovelluksia on ollut olemassa jo useiden vuosikymmenien ajan. Yhtenä ensimmäisistä IoT-laitteista pidetään Carnegie Mellon -yliopistossa vuonna 1982 sijainnutta Coca-cola-myyntiautomaattia, johon yliopiston opiskelijat asensivat mikrokytkimiä ja yhdistivät automaatin internetiin. Toteutuksen avulla ihmiset pystyivät tarkistamaan internetin kautta jäljellä olevien juomien määrän ja lämpötilan. [3.]

2.2 Esimerkkejä IoT-sovelluksista

IoT:n suosio on kuitenkin vasta viime vuosina kasvanut räjähdysmäisesti muun muassa pienikokoisten ja vähävirtaisten mikrosirujen ja sensorien, langattoman teknologian ja pilvilaskennan nopean kehittymisen, runsaan saatavuuden ja hintojen alentumisen myötä. Konsulttitoimisto McKinsey & Companyn tutkimuksen mukaan esineiden internetillä olisi 6,2 biljoonan dollarin markkinat vuoteen 2025 mennessä [4] ja maailman johtavan tietoliikenneyritys Ciscon arvion mukaan internetiin yhdistettyjä laitteita olisi vuoteen 2020 mennessä yli 50 miljardia [5] (kuva 1).

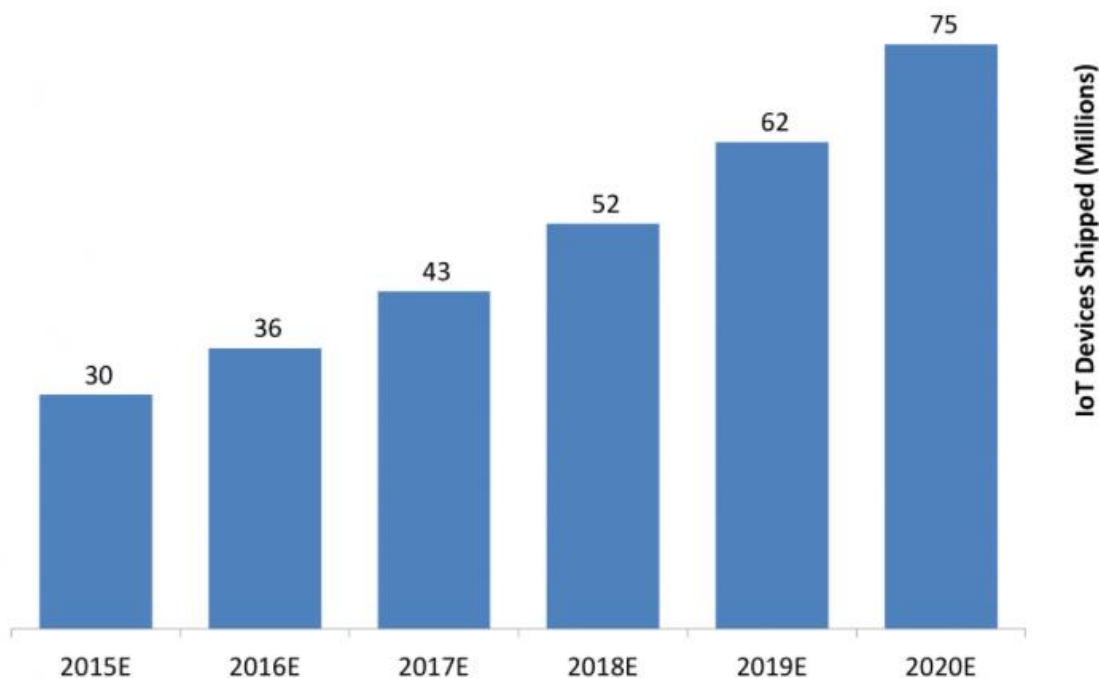


Kuva 1. Cison arvio internetiin yhdistettyjen laitteiden määrästä vuoteen 2020 mennessä [6].

Nykyään IoT-sovelluksia on käytössä jo erittäin laajalti eri tarkoituksissa. Kaupungit hyödyntävät esineiden internetiä esimerkiksi pysäköinninvalvonnassa ja vapaiden pysäköintipaikkojen seurannassa, rakennuksien ja siltojen materiaalien kunnon tarkkailussa, melutasojen kartoittamisessa, liikenneruuhkien seurannassa ja liikenteen optimoinnissa sekä älykkäiden katuvalojen käytössä. Kaupungit voivat myös käyttää IoT-laitteita jäteastioiden ja -säiliöiden tasojen seurannassa, mikä auttaa jätteenkeräysreittien optimoinnissa. [7.]

Maataloudessa esineiden internet nähdään yhtenä keinona vastata jatkuvaan globaaliin ruoantuotannon lisääntyneeseen tarpeeseen. Maanviljelijät pystyvät muun muassa sensorien avulla tarkkailemaan maaperän kosteutta, sadon kasvua ja kuntoa, seuraamaan karjan ruokasäiliöiden tilaa ja ohjaamaan sekä seuraamaan maatalouskoneiden ja älykkäiden kastelujärjestelmien toimintaa, kuntoa ja mahdollista huollon tarvetta. Näin kerätyn tiedon sekä muiden palveluiden kuten esimerkiksi sääennusteiden yhdistäminen tehostaa maanviljelijöiden tuotantoa ja edesauttaa parempaan päätöksentekoon. Kuten

kuvasta 2 käy ilmi, maataloudessa käytettäviä IoT-laitteita arvioidaan myytävän maailmanlaajuisesti 75 miljoonaa kappaletta vuonna 2020. [8.]



Kuva 2. BI Intelligencen arvio maataloudessa käytettävien IoT-laitteiden myynnistä maailmanlaajuisesti vuoteen 2020 asti [9].

Tehtaissa ja muissa tuotantolaitoksissa esineiden internetin tuoma muutos on ehkä suurempi kuin missään muualla. Yritykset asentavat älykkäitä sensoreita läpi tuotantolinjan ja saavat näin reaaliaikaista dataa tuotantoprosessin joka vaiheesta, minkä avulla he pystyvät tekemään tuotantoon tarvittavia muutoksia ja reagoimaan ongelmatilanteisiin huomattavasti aiempaa nopeammin. Tieto sensoreilta ja laitteilta välittyy myös internetin välityksellä lähes reaaliajassa mihin tahansa, mikä mahdollistaa uusien tehtaiden helpomman avaamisen esimerkiksi muihin maihin kun tuotantoprosessien valvonta ja päätöksenteko voidaan tehdä vaivattomasti etänä. Tutkimuksen mukaan vuonna 2015 yhdysvaltalaisista tehtaista 35 % oli jo ottanut käyttöön älykkäitä sensoreita ja hyödynsi niiden keräämää dataa tehostaakseen tuotantoaan [10], ja arvioiden mukaan vuoteen 2020 mennessä tuotantoyritykset tulevat käyttämään noin 267 miljardia dollaria IoT-laitteisiin. [11.]

Myös terveydenhuollossa esineiden internet on saamassa jalansijaa. Useat potilaiden elintoimintoja mittaavat laitteet ovat yhdistettynä internetiin, jolloin lääkärit ja hoitajat saavat jatkuvasti reaaliaikaista tietoa potilaiden kunnosta. Sairaalat ovat myös alkaneet ottaa käyttöön älykkäitä vuoteita, jotka tunnistavat kun ne ovat käytössä tai jos potilas yrittää nousta ylös. Vuoteet voivat myös eri sensoreita hyödyntäen automaattisesti vaihtaa potilaan asentoa tai tukea sitä sopivammaksi. Jatkossa myös älykkäät lääkkeiden annostelijat saattavat yleistyä, jolloin tieto lääkkeiden käytöstä siirtyy internetiin ja näin voidaan esimerkiksi hälyttää hoitohenkilökunta mikäli potilas ei muista ottaa lääkkeitä ajallaan. [12.]

Useimmille kuluttajille ehkä näkyvin esineiden internetin muoto on yleistyvä kotiautomaatio. Kodeissa voidaan käyttää älykästä valaistusta, joka osaa automaattisesti sammuttaa ja kytkeä valot päälle esimerkiksi kellonaikojen tai käyttäjän sijainnin perusteella. Valaistusta pystytään myös säätämään halutunlaiseksi etäisesti älypuhelimien sovelluksella. Toinen yleinen kotiautomaation sovellus on älykäs termostaatti tai ilmastointilaitte, joka voi laskea kodin lämpötilaa asukkaiden ollessa poissa kotoa ja näin säästää sähkönkulutusta. Muita esimerkkejä kotiautomaatiosta ovat älykkäät lukot, jotka voidaan avata matkapuhelimella tai käyttäjän äänellä, sekä älykkäät jääkaapit, jotka seuraavat mitä tuotteita jääkapissa on, ja sisältö voidaan myös tarkistaa etäisesti internetin kautta.

3 Radiotekniikasta yleisesti

IoT-verkkoteknologiat käyttävät tiedon siirtämiseen langatonta radioyhteyttä. Tässä luvussa perehdytään lyhyesti hieman radiotekniikan perusteisiin, mikä auttaa myöhemmin eri teknologioiden ominaisuuksien vertailussa.

Radioyhteyteen perustuvaa IoT-verkkoteknologiaa kehitettäessä pyritään yleensä kolmeen tärkeään ominaisuuteen: pitkään kantamaan, suureen lähetysopeuteen ja matalaan virrankulutukseen. Fysiikan lait kuitenkin määräävät, että kaikkien näiden kolmen yhdistäminen on käytännössä hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta. Voidaan sanoa yleisesti, että näistä ominaisuuksista voidaan valita kaksi suunnitellun käyttötarkoituksen mukaan. Yksinkertaistettuna: mitä suurempi kaistanleveys ja siten nopeampi lähetysopeus, sitä lyhempi kantama. Kantamaa voidaan pidentää lähetystehoa nostamalla, mutta

tämä taas kasvattaa huomattavasti virrankulutusta. Pitkän kantaman ja matalan virrankulutuksen lähetykset ovat mahdollisia pitämällä kaistanleveyden erittäin pienenä. [13.]

3.1 Linkkibudjetti

Linkkibudjetin avulla voidaan laskea radioyhteyden vastaanottimelle saapuva yhteyden teho ottamalla huomioon kaikki yhteyden varrella tapahtuvat vahvistukset ja vaimennukset. Linkkibudjettia voidaan käyttää apuna suunniteltaessa uusia yhteyksiä ja arvioitaessa niiden toimivuutta eri etäisyyksillä. Linkkibudjettia laskettaessa voidaan ottaa huomioon esimerkiksi seuraavat asiat:

- lähetysteho
- lähettimen ja lähetysantennin välissä olevan kaapelin vaimennus
- lähetysantennin vahvistus
- yhteysvälivaimennus tai vapaan tilan vaimennus
- vastaanottoantennin vahvistus
- vastaanottoantennin ja vastaanottimen välissä olevan kaapelin vaimennus. [14.]

Yksinkertaistettuna linkkibudjetin kaava näyttää seuraavanlaiselta:

vastaanotettu teho (dBm) = lähetetty teho (dBm) + vahvistukset (dB) – vaimennukset (dB)

Tyypillinen radioyhteyksissä käytetty linkkibudjettikaava on

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{FS} - L_P - L_{RX}$$

P_{RX} on vastaanotettu teho

P_{TX} on lähettimen lähetysteho (dBm)

G_{TX} on lähetysantennin vahvistus (dBi)

G_{RX} on vastaanottoantennin vahvistus (dBi)

L_{TX} on lähettimen ja lähetysantennin välissä tapahtuvat vaimennukset (dB)

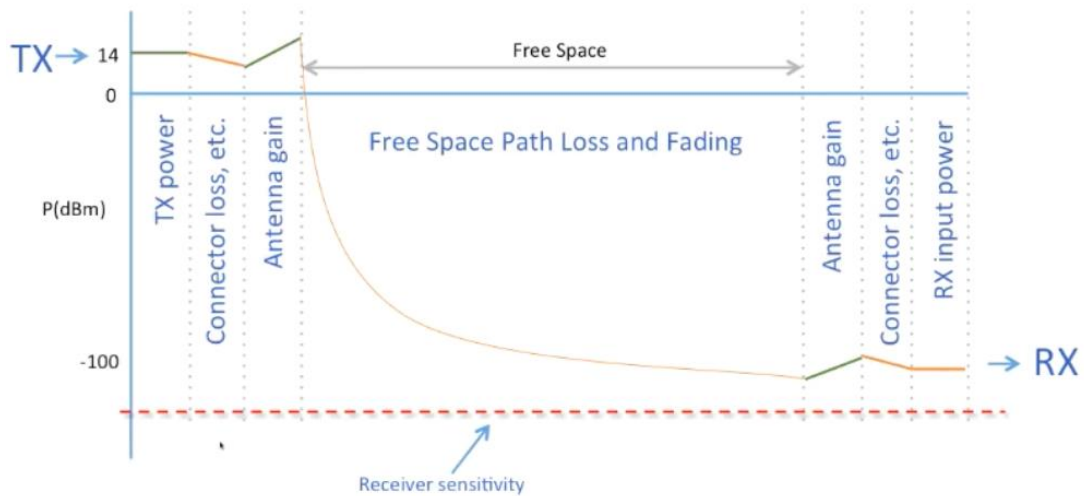
L_{FS} on yhteysvälivaimennus tai vapaan tilan vaimennus (dB)

L_P on sekalaiset muut signaalin etenemisessä tapahtuvat vaimennukset (dB)

L_{RX} on vastaanottoantennin ja vastaanottimen välissä tapahtuvat vaimennukset (dB).

[14.]

Kuvassa 3 on havainnollistettu signaalin tehon muutokset radiolähteyksen varrella linkkibudjetin avulla.

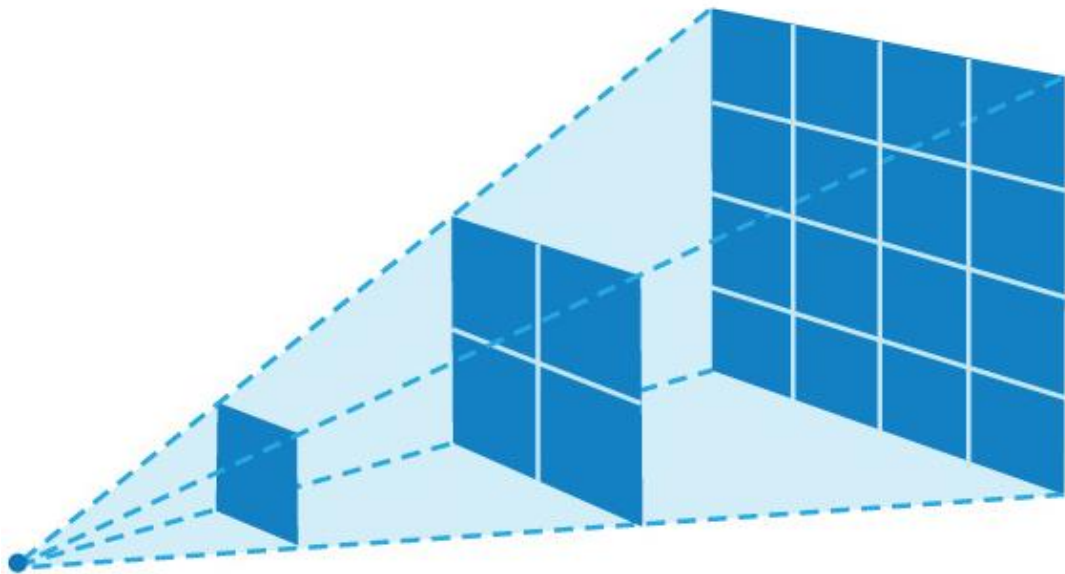


Kuva 3. Linkkibudjetin havainnollistaminen [13].

Alussa lähetin lähettää signaalia eteenpäin 14 dBm:n teholla. Tämän jälkeen teho laskee hieman matkalla antenniin muun muassa liittännöistä ja kaapelista johtuvien vaimennusten vuoksi, jonka jälkeen se taas kasvaa antennin vahvistuksen ansiosta. Antenni lähettää signaalin edelleen ilmakehään, jossa tapahtuu vapaan tilan vaimennusta ja muuta signaalin heikkenemistä. Seuraavaksi signaali saapuu vastaanottavaan antenniin, jonka vahvistuksen avulla signaalin teho jälleen kasvaa hieman, ennen kuin se taas hieman vaimenee ennen vastaanottimeen saapumista liittimistä ja kaapelista johtuen. Kuvan 3 alareunassa näkyvä punainen katkoviiva kuvaa vastaanottimen herkkyyttä (englanniksi receiver sensitivity). Jokaisella radiovastaanottimella on olemassa tietty herkkyys, ja saapuvan signaalin teho täytyy olla tätä herkkyyttä suurempi, jotta toimiva yhteys saadaan muodostettua. [13.]

3.2 Vapaan tilan vaimennus

Vapaan tilan vaimennus (engl. Free-space path loss, lyhyemmin FSPL) on yksi suurimmista signaalin tehoa laskevista tekijöistä. Signaalin lähtiessä antennista se hajaantuu tasaisesti joka suuntaan, mikä aiheuttaa sen, että signaalin tehon heikkeneminen on suoraan verrannollista etäisyyden neliöön. Kuvassa 4 on havainnollistettu, kuinka etäisyyden kaksinkertaistuksessa signaalin teho laskee neljäsosaan ja etäisyyden nelinkertaistuttua sen teho putoaa kuudestoistaosaan alkuperäisestä.



Kuva 4. Signaalin tehon heikkeneminen etäisyyden funktiona [14].

Vapaan tilan vaimennusta kuvataan yleisesti desibeleinä. Vaimennus riippuu etäisyyden d lisäksi myös signaalin taajuudesta f alla olevan kaavan mukaan

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right)$$

jossa c on valonnopeuden vakio tyhjiössä.

Logaritmin laskusääntöjä käyttämällä sekä sijoittamalla vakiot SI-järjestelmän yksiköinä, kaava tulee muotoon

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147,55$$

Kuten kaavasta huomataan, vapaan tilan vaimennus on taajuusriippuvainen. Tämä ei kuitenkaan johdu siitä, että sähkömagneettiset aallot vaimenisivat vapaassa tilassa, vaan siitä, että suurempia taajuuksia vastaanottavan antennin on oltava pienempi, jolloin se myös vastaanottaa vähemmän tehoa signaalista. [15.]

Tätä laskukaavaa käyttämällä esimerkiksi perinteisen 2,4 GHz:n WLAN-signaalin kantama vapaassa tilassa voisi olla teoreettisesti jopa yli 1 500 metriä, jos oletetaan tukiase-
man lähetystehon olevan 20 dBm ja vastaanottimen herkkyyden raja-arvon olevan -
84 dBm. Käytännössä tästä kantamasta jäädään kuitenkin vain murto-osaan, sillä sig-
naalit eivät tosiasias-
sa koskaan kulje täysin vapaassa tilassa. Todellisuudessa signaaliin
tielle osuu erilaisia esteitä, jotka haittaavat signaalin kulkua muun muassa vaimenta-
malla, taittamalla (diffraktio) ja heijastumalla. Signaali vaimenee esimerkiksi kulkiessaan
fyysisten esteiden läpi tai signaali voi myös vaimentua siitä, kun heijastuneen aallon
vaihe on vastakkainen alkuperäisen signaalin kanssa, jolloin ne kumoavat toisiaan.

3.3 Fresnelin alue

Yksi tärkeä huomioitava asia signaalin heikkenemisessä käytännön todellisuudessa on
niin sanottu Fresnelin ensimmäinen alue (engl. Fresnel Zone). Se on ellipsin muotoinen
alue kahden antennin välillä, jonka tulisi olla vapaana esteistä vähintään 60-prosentti-
sesti, mutta ihanteellisesti yli 80-prosenttisesti. Esteet Fresnelin ensimmäisellä alueella
aiheuttavat heijastumia, jotka heikentävät alkuperäistä signaalia. Fresnelin ensimmäisen
alueen suurin mahdollinen säde voidaan laskea kaavalla

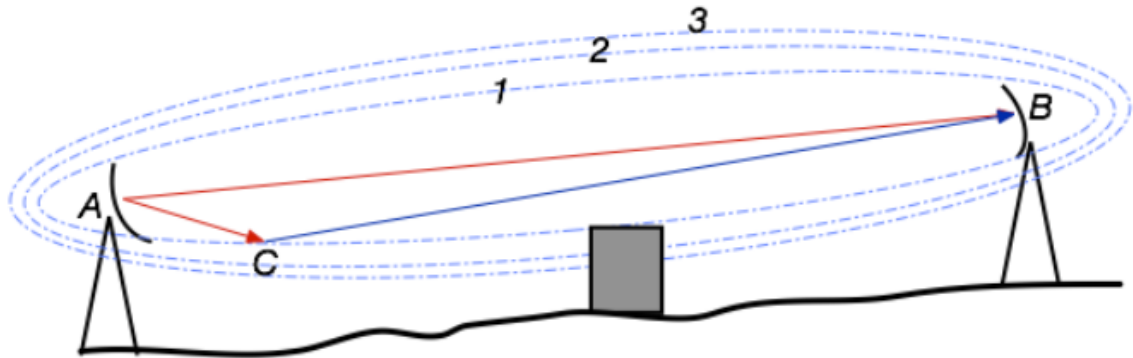
$$F_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{cD}{f}}$$

jossa c on valonnopeuden vakio, D on antennien välimatka ja f on signaalin taajuus.
Kaavasta saadaan johdettua käytännöllisempi versio

$$F_1 [m] = 8,656 \sqrt{\frac{D [km]}{f [GHz]}}$$

Kaavan perusteella laskettuna esimerkiksi, jos antennien välinen etäisyys on yksi kilo-
metri, 868 MHz:n taajuisen signaalin Fresnelin ensimmäisen alueen keskikohdan säde

olisi 9,3 metriä. Kuvassa 5 on havainnollistettu Fresnelin alueet ja se, kuinka kahden korkealla sijaitsevan antennin muodostama ensimmäinen alue on vapaana esteistä. [16.]



Kuva 5. Fresnelin alueet [16].

Erityisesti IoT-ratkaisuissa, joissa vähintään yhteyden toisen pään antenni on yleensä todella lähellä maanpintaa, Fresnelin ensimmäisellä alueella on usein reilusti esteitä, jotka vaimentavat signaalia ja lyhentävät kantamaa huomattavasti.

4 Verkkoteknologioiden vertailu

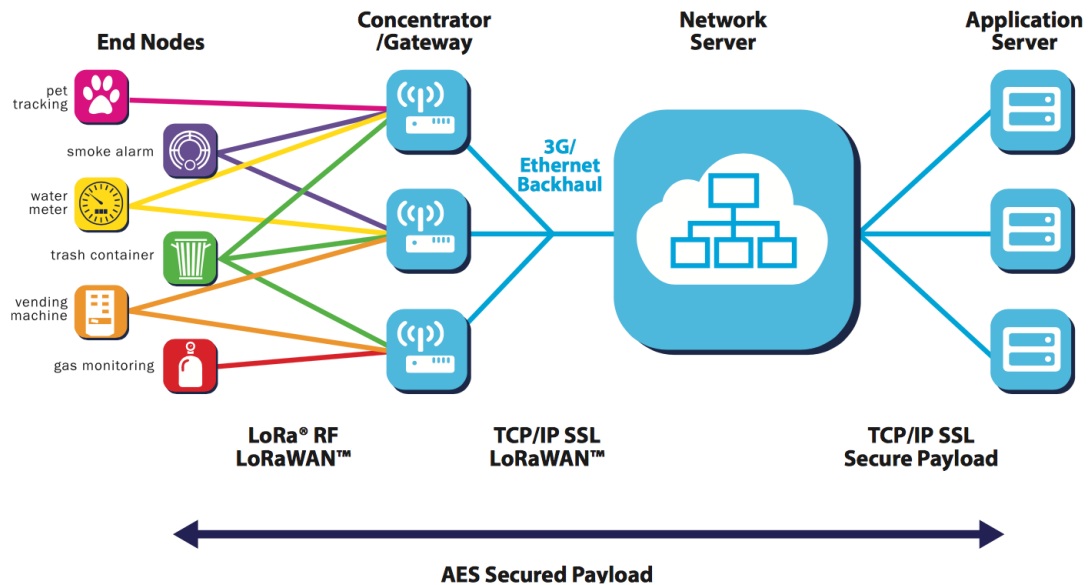
4.1 LoRa-teknologia

LoRa on langaton LPWAN-verkkoteknologia (Low Power Wide Area Network). Sen on kehittänyt ja patentoinut yhdysvaltalainen yritys nimeltä Semtech. Yritys myös valmistaa ja lisensoi yksinoikeudella LoRa-teknologiassa käytettäviä piirisarjoja. [17.]

LoRa-laitteet kommunikoivat kuitenkin keskenään käyttäen LoRaWAN-tietoliikenneprotokollaa, joka on globaali avoin standardi. Sen määrittelee ja sitä hallinnoi yleishyödyllinen LoRa Alliance -yhteisö. Yhteisöön kuuluu jo satoja yrityksiä ja järjestöjä, joista tunnetuimpina ovat muun muassa. Cisco ja IBM. [17.]

LoRa:n tavoitteena on mahdollistaa turvallinen kahdensuuntainen liikenne, liikkuvuus ja paikannuspalvelut. Verkko muodostuu päätelaitteista, yhdyskäytävistä (gateway) ja

taustalla toimivista palvelimista ja sovelluksista. Päätelaitteet ovat yhteydessä yhdyskäytävään LoRaWAN-protokollaa käyttäen, ja yhdyskäytävät välittävät tiedon eteenpäin taustajärjestelmiin käyttäen standardia IP-protokollaa, esimerkiksi Ethernetin, matkapuhelinverkon tai langattoman lähiverkon kautta [17]. Kuvassa 6 on esitetty LoRa-verkon topologia.



Kuva 6. LoRaWAN-verkon topologia [18].

LoRa-päätelaitteet eivät ole yhdistettynä vain yhteen määrättyyn yhdyskäytävään, vaan useat yhdyskäytävät voivat vastaanottaa päätelaitteiden lähettämää tietoa. Yhdyskäytävät siirtävät tiedon eteenpäin taustalla toimivalle palvelimelle, joka hoitaa kaikki laskentaa ja älyä vaativat tehtävät. Tämä mahdollistaa sen, että sekä päätelaitteet että yhdyskäytävät voivat olla erittäin yksinkertaisia ja halpoja laitteita [18]. Yksittäisen päätelaitteen hinnaksi voi jäädä vain muutamia euroja [19].

LoRaWAN toimii lisenssivapaalla niin sanotulla ISM-taajuusalueella (Industrial, Scientific and Medical). ISM-taajuusaluetta voi tietyin rajoituksin kuka tahansa käyttää ilman, että tarvitsee maksaa kalliita lisenssimaksuja. Esimerkiksi myös WiFi käyttää 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n ISM-kaistoja maailmanlaajuisesti. LoRaWAN käyttää tätä matalampia taajuuksia, joka mahdollistaa pidemmän kantaman. Euroopassa LoRaWAN käyttää 863–870 MHz, josta usein puhutaan vain 868 MHz:n kaistana, ja 433 MHz:n taajuuskaistoja. Yhdysvalloissa vastaavasti käytetyt taajuuskaistat ovat 902–928 MHz. [20.]

LoRaWAN-protokolla määrittelee kolme yleistä 125 kHz:n kanavaa 868 MHz:n kaistalla (868,10, 868,30 ja 868,50 MHz). Kaikkien LoRaWAN-laitteiden ja -verkkojen tulee aina tukea ja vastaanottaa näitä kanavia. Laitteet käyttävät kyseistä kolmea kanavaa liittyessään verkkoon, mutta yhteyttä muodostettaessa verkko voi myös ohjeistaa laitteita ottamaan käyttöön muitakin kanavia. Näitä kolmea kanavaa käytetään niin tiedon vastaanottamiseen kuin lähettämiseenkin. [20.]

Vaikka kyseessä on lisenssivapaa taajuusalue, taajuuksien käytölle on kuitenkin asetettu tiettyjä laillisia rajoituksia. Esimerkiksi Euroopassa on säännelty LoRaWAN:n käyttämälle taajuusalueelle 25 mW:n suurin sallittu lähetysteho ja maksimissaan 1 % hyötyaika. Tämä tarkoittaa sitä, että laite saa aktiivisesti käyttää kyseistä taajuutta vain yhden prosentin verran ajasta. [21.]

LoRaWAN-standardi jakaa käytetyt laitteet kolmeen eri luokkaan. Kaikkien LoRa-laitteiden tulee toteuttaa vähintään luokan A (Class A) määritelmä, ja laitteiden ominaisuuksia voidaan kasvattaa luokan B (Class B) tai C (Class C) määritelmien mukaan. [20.]

Luokan A laitteet tukevat kaksisuuntaista liikennettä päätelaitteen ja yhdyskäytävän välillä niin, että päätelaitteet voivat lähettää tietoa palvelimelle milloin tahansa. Kun laite on lähettänyt viestin palvelimelle, se avaa kaksi vastaanottoikkunaa sekunnin ja kahden sekunnin kuluttua lähetyksen jälkeen, jolloin se kuuntelee mahdollista vastausta palvelimelta. Mikäli palvelin ei lähetä vastausta kummankaan ikkunan aikana, seuraavan kerran sillä on mahdollisuus lähettää tietoa kun päätelaite siirtää uudelleen tietoa palvelimen suuntaan ja avaa täten jälleen vastaanottoikkunat. [20.]

Luokan B laitteet toimivat kuten luokan A laitteet, mutta ne avaavat myös vastaanottoikkunan säännöllisin väliajoin määrätyn aikataulun mukaisesti. [20.]

Luokan C laitteet pitävät vastaanottoikkunaa jatkuvasti auki, paitsi silloin kun laite lähettää itse tietoa palvelimen suuntaan. Tämä mahdollistaa vähäviiveisen kommunikoinnin ja siten monipuolisemman laitteen käytön, mutta moninkertaistaa myös energiankulutuksen. [20.]

Tietoturva LoRaWAN:ssa on toteutettu salauksella useassa eri kerroksessa seuraavasti:

- 128-bittiseen AES-salaukseen perustuva verkon salausavain (Network Session Key, NwkSKey), joka on jokaiselle päätelaitteelle yksilöllinen. Avain on jaettu päätelaitteen ja palvelimen välillä, ja se takaa turvallisen tiedonsiirron päätelaitteen ja palvelimen välillä.
- 128-bittiseen AES-salaukseen perustuva sovelluksen salausavain (Application Session Key, AppSKey), joka on jokaiselle päätelaitteelle yksilöllinen ja sitä käytetään salaamaan sovelluksen käyttämää dataa.
- Laitekohtainen avain (Device Address, DevAddr), joka yksilöi laitteet toisistaan ja mahdollistaa verkon käyttämään oikeita salausavaimia ja tulkita dataa oikein. [17; 22.]

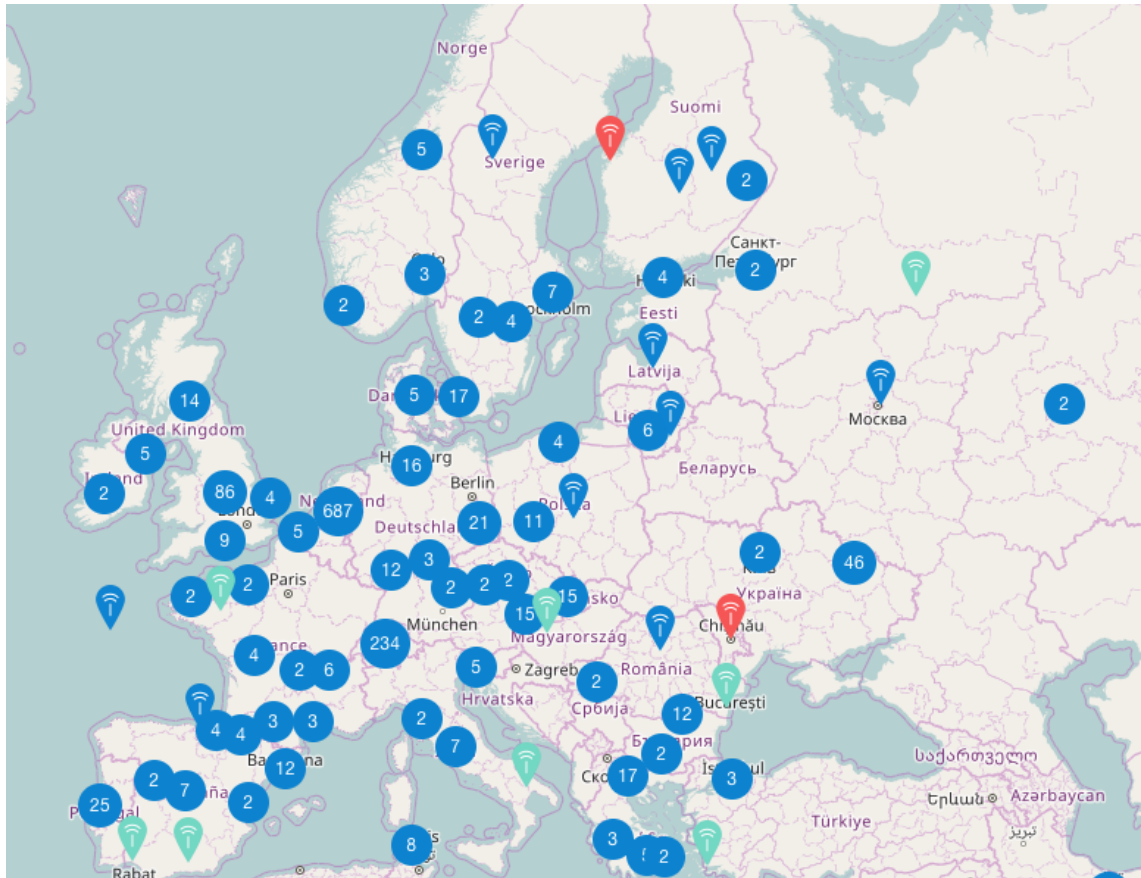
LoRaWAN käyttää Semantechin kehittämää ja omistamaa viserryspäättävää (engl. Chirp spread spectrum, CSS) pohjautuvaa LoRa-modulaatiota. Modulaation ominaisuuksiin kuuluu pitkä kantama, suuri häiriönsieto sekä muun muassa heijastumien ja diffraktion pieni vaikutus signaaliin. Tämä tekee modulaatiosta sopivan kaupunkikäyttöön. Modulaation pohjautuessa viserryspäättävään se ei myöskään altistu niinkään Doppler-ilmiölle, mikä tekee LoRa:sta hyvän vaihtoehdon liikkuviin kohteisiin ja esineisiin. [23]

LoRa:n tiedonsiirtonopeus vaihtelee välillä 0,3 kb/s ja 50 kb/s, ja kantama voi olla kaupunkialueella useita kilometrejä ja tasaisella haja-asutusalueella jopa yli kymmenen kilometriä. Myös päätelaitteiden akunkesto voi olla yli kymmenen vuotta. Näiden ominaisuuksien lisäksi myös sen vuoksi, että LoRa sietää hyvin esteistä johtuvia vaimennuksia ja häiriöitä ja koska se toimii myös hyvin liikkuvissa kohteissa, se voisi olla sopiva vaihtoehto esimerkiksi älykaupunkien IoT-ratkaisuissa, rakennuksien sisätiloissa sijaitseissa sensoreissa ja laitteissa, liikkuvan omaisuuden seurannassa tai autojen ja muiden kulkuvälineiden eri sensoreissa. [17]

Se ei kuitenkaan ole sopiva ratkaisu kohteissa, joissa päätelaitteisiin tarvitaan jatkuvaa tai hyvin usein toistuvaa yhteyttä tai jossa siirrettävän tiedon koko on suurempi. Esimerkiksi valvontakameran kuvia, videoita tai ääntä ei LoRa:lla pystytä lähettämään.

LoRaWAN-verkkoja tarjoavat sekä kaupalliset palveluntarjoajat, kuten teleoperaattorit, että yksityiset ei-kaupalliset järjestöt ja yhteisöt. Suurinta ja tunnetuinta ei-kaupallista LoRaWAN-verkkoa ylläpitää The Things Network -yhteisö. Yhteisössä on tällä hetkellä yli 13 000 jäsentä 84 maassa, ja sen verkossa on yli 900 toimivaa yhdyskäytävää ja suunnitteilla on lisäksi noin 1 500 yhdyskäytävää. The Things Network -verkkoon liittyminen

on käyttäjille ilmaista. [24.] Kuvassa 7 näkyy kartalla The Things Network -verkkoon yhdistettyjä yhdyskäytäviä Euroopan alueella.



Kuva 7. LoRaWAN-yhdyskäytäviä The Things Network -verkossa [24].

Kuvasta voidaan huomata, että yhdyskäytäviä on The Things Network -verkossa varsinkin Keski-Euroopan alueella jo useita satoja. Pohjoismaissa kuitenkin yhdyskäytäviä on vasta muutamia yksittäisiä.

4.2 Sigfox-tekнологia

Sigfox on vuonna 2009 perustettu ranskalainen yritys, joka on kehittänyt oman patentoidun LPWAN-verkkoteknologian. Yritys haluaa mahdollistaa yksinkertaiset ja helpon käyttöönoton energiatehokkaat IoT-ratkaisut. Sigfoxin ideana on toimia globaalina IoT-

teleoperaattorina. Se ei itse valmista eikä myy laitteita tai komponentteja, vaan sen tarkoitus on pelkästään tarjota yhdessä paikallisten kumppaneiden kanssa esineiden internetin tietoliikenneverkko, johon kaikki yhteensopivat laitteet voivat liittyä. [25.]

Sigfox-päätelaitteissa käytetty teknologia on täysin avointa, mikä tarkoittaa, että mikä tahansa laitevalmistaja voi valmistaa verkossa toimivia laitteita. Tämä edesauttaa kilpailua ja painaa siten laitteiden hintoja alaspäin. Jokainen käyttöönotettava laite täytyy rekisteröidä verkkoon ja niistä maksetaan hieman perinteisen matkapuhelinliittymän tavoin esimerkiksi vuosittaista tilausmaksua paikalliselle Sigfox-operaattorille.

Verkossa olevat päätelaitteet ovat suurimman osan ajasta toimeettomana (idle). Laite voi herätä esimerkiksi sille määrätyn tietyin väliajoin tai jonkin tapahtuman, kuten napinpainalluksen tai kytkimen aktivoitumisen, seurauksena. Herätessään laite lähettää viestin yleislähetyksenä (broadcast) Sigfox-tukiasemille. Tukiasemat vastaanottavat viestin ja siirtävät sen eteenpäin internetin kautta Sigfoxin palvelimille. Näiltä palvelimilta se lähetetään taas edelleen loppukäyttäjän omaan järjestelmään. [25.] Kuva 8 havainnollistaa Sigfox-verkon rakennetta.

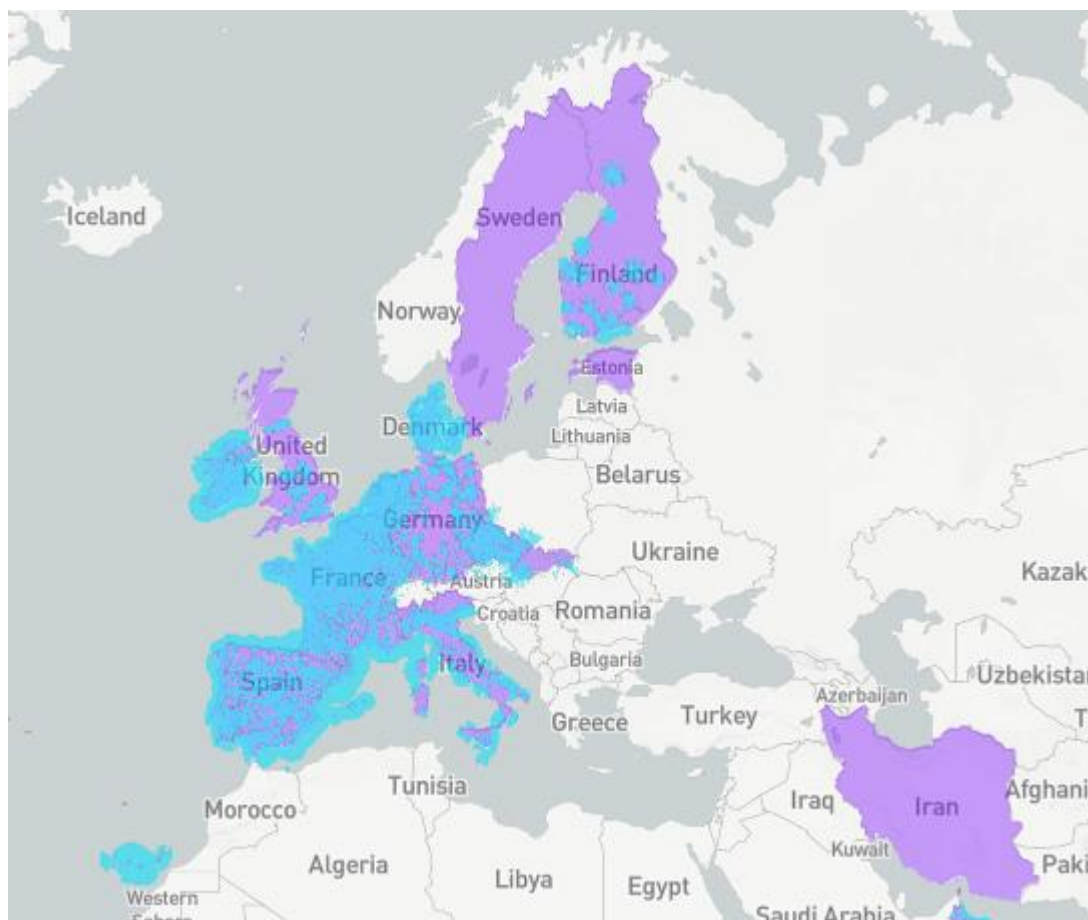


Kuva 8. Sigfox-verkon rakenne [26].

Sigfox-teknologia käyttää LoRa:n tavoin lisenssivapaita ISM-taajuuskaistoja, Euroopassa 868 MHz ja Yhdysvalloissa 902 MHz, ja se käyttää erittäin kapeaa, 100 Hz:n kaistanleveyttä (engl. Ultra Narrow Band, lyhyemmin UNB). Osittain ISM-taajuuskaistoja

koskevien määräysten vuoksi laitteiden lähettämän pakettien hyötykuorman koko on rajattu 12 tavuun, ja niitä voidaan lähettää enintään 6 tunnissa tai 140 päivässä. Päätelaitteet voivat vastaanottaa enintään neljä kertaa päivässä suurimmillaan 8 tavun viestejä. Lähetysnopeus on Euroopassa 100 bittiä sekunnissa, ja jokainen paketti lähetetään kolmeen kertaan, joten yhden viestin lähettämiseen kuluu noin kuusi sekuntia. Liikenne voi olla kaksisuuntaista, mutta vain päätelaite voi aktivoida yhteyden. Päätelaitteet voivat lähettää viestejä palvelimelle, tai se voi pyytää taustajärjestelmältä tietoa, mutta taustalla toimivat palvelut eivät voi itsenäisesti lähettää tietoa laitteen suuntaan [27; 28]. Hidas ja suhteellisen harvoin tapahtuva liikennöinti mahdollistaa vähäisen virrankulutuksen ja erittäin pitkän, jopa yli kymmenen vuoden akunkeston [29].

Sigfox-verkon kantama on käytännössä kaupunkiympäristössä useita kilometrejä ja haja-asutusalueilla kymmeniä kilometrejä. Ihanteellisissa olosuhteissa on saatu myös satojen kilometrien kantamia. Pitkän kantaman vuoksi ja koska yksi Sigfox-tukiasema pystyy palvelemaan jopa miljoonaa päätelaitetta [29], laajan verkon pystyttäminen on erittäin nopeaa ja kustannustehokasta. Esimerkiksi Ranskassa koko maan kattava Sigfox-verkko saatiin rakennettua vain 1 000 tukiasemalla, 100 kertaa halvemmalla kuin vastaava GSM-verkko [30]. Espanjassa koko maan kattava verkko saatiin toimintaan kymmenessä kuukaudessa [31]. Sigfoxilla on jo täysi kattavuus monissa maissa kuten Ranskassa, Espanjassa, Portugalissa, Hollannissa ja Luxemburgissa, ja sen lisäksi osittainen kattavuus lukuisissa muissa maissa [32]. Kuvassa 9 näkyy Sigfox-verkon tämänhetkinen kattavuus Euroopan alueella.



Kuva 9. Sigfox-verkon kattavuus Euroopassa. Sinisellä merkityillä alueilla on jo Sigfox-verkon kuuluvuus, ja violetit alueet ovat suunnitteilla tai rakenteilla [32].

Koska Sigfox-verkon rakentaminen ja ylläpitäminen on niin kustannustehokasta ja koska laitteiden valmistus on avointa, Sigfox pystyy tarjoamaan palveluita erittäin edulliseen hintaan. Yhden laitteen hinnaksi voi jäädä jopa vain yksi euro vuodessa. [33.]

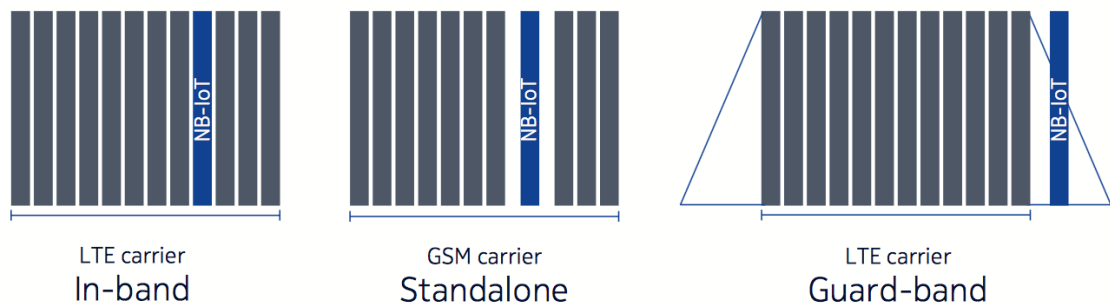
Sigfox sopii hyvin IoT-ratkaisuihin mitkä eivät vaadi jatkuvaa tai useaa yhteyttä laitteen ja taustajärjestelmän välillä. Hyviä kohteita voisivat olla esimerkiksi kaikenlaiset murtohälyttimet, joissa laite aktivoituu ja lähettää hälytyksen murron tapahtuessa, tai veden, sähkön tai kaasun kulutusmittarit, jotka lähettävät tiedon kulutuksesta eteenpäin vaikka kerran kuukaudessa. Myös maatalouden IoT-sovelluksissa Sigfox voisi toimia esimerkiksi maaperän kosteutta mittaavissa sensoreissa. Ranskassa postiyhtiö La Poste on ottanut käyttöön Sigfoxia hyödyntävän järjestelmän, jossa asiakkaat voivat lähettää postipaketteja sijoittamalla paketin postilaatikkoon ja tämän jälkeen painamalla laatikkoon asennettua nappia. Napinpainallus ilmoittaa tiedon postiyhtiölle, joka sitten noutaa ja lähettää paketin eteenpäin vastaanottajalle. [34]

4.3 NB-IoT-teknologia

Narrow Band IoT eli NB-IoT on matkapuhelinjärjestelmien teknisiä määrittelyjä luovan usean järjestön yhteistyöorganisaatio 3GPP:n standardoima LPWAN-teknologia. Sen kehittämiseen osallistui monia maailman suurimpia tietoliikenneyrityksiä, kuten Nokia, Ericsson, Huawei ja Intel. [35.]

NB-IoT eroaa LoRa:sta ja Sigfoxista siinä, että kun ne käyttävät lisenssivapaita ISM-taajuusalueita, NB-IoT toimii lisensoiduilla matkapuhelinverkon taajuuksilla. Tästä syystä NB-IoT-yhteyksiä pystyvät käytännössä tarjoamaan vain vakiintuneet teleoperaattorit.

NB-IoT käyttää kapeaa, 180 kHz:n kaistanleveyttä, ja sitä voidaan käyttää matkapuhelinverkossa kolmella eri tavalla. Sen kapea kaista voi olla joko jo käytössä olevien 3G- tai 4G-taajuuksien ”seassa” (in-band) tai sitä voidaan käyttää näiden taajuuksien välissä olevilla niin sanotuilla varokaistoilla (guard-band). Kolmas vaihtoehto on sijoittaa sen kaista kokonaan omalle taajuusalueelleen (stand-alone). [36, s. 10.] Kuva 10 esittää NB-IoT:n taajuuskaistan eri käyttövaihtoehtoja.



Kuva 10. NB-IoT:n kaistan sijoittuminen matkapuhelinverkossa [37].

Koska NB-IoT käyttää lisensoituja taajuuskaistoja, sen ei tarvitse noudattaa samoja laillisia rajoituksia kuin LoRa:n ja Sigfoxin. NB-IoT-teknologiassa ei ole määrättyä viestien suurinta lähetysmäärää, vaan se voi liikennöidä tarpeen mukaan kuinka monta kertaa päivässä tahansa. NB-IoT:n tiedonsiirtonopeus on myös suurempi: teoreettinen maksiminopeus on 235 kilobittiä sekunnissa. [36, s. 7.] Normaaliin 4G-yhteyteen verrattuna NB-IoT:illä on 20 dB suurempi linkkibudjetti, mikä parantaa kuuluvuutta varsinkin sisätiloissa ja maan alla [38]. Päätelaitteissa käytettävien moduulien hintojen arvioidaan asetuvan muutamien eurojen tietämille, ja akkukestoksi luvataan yli kymmentä vuotta [39].

Se, että NB-IoT pystyy käyttämään olemassa olevia 3G- ja 4G-taajuuksia, mahdollistaa teleoperaattoreille verkon helpon ja edullisen käyttöönoton. Olemassa olevat tukiasemat saadaan NB-IoT:n kanssa yhteensopiviksi yksinkertaisella ohjelmistopäivityksellä. [36, s. 10.] NB-IoT on kuitenkin vielä varsin uusi teknologia. Sen standardi saatiin valmiiksi kesäkuussa 2016, eikä se ole vielä laajalti kaupallisessa käytössä. Ensimmäinen kaupallinen NB-IoT-verkko otettiin käyttöön Espanjassa tammikuussa 2017. [40.]

NB-IoT:n mahdolliset käyttökohteet ovat varsin samanlaiset kuin LoRa:lla ja Sigfoxillakin. Kuitenkin esineissä ja kohteissa, joissa saatetaan tarvita hieman suurempaa pakettien kokoa tai useampien viestien lähettäminen on mahdollisesti tarpeellista, on NB-IoT varmempi ratkaisu. Se voisi olla sopiva vaihtoehto esimerkiksi mittareissa ja sensoreissa joiden tilaa täytyy päivittää useita kertoja tunnissa.

4.4 Weightless-teknologiat

Weightless on joukko LPWAN-standardeja, jotka on luonut voittoa tavoittelematon Weightless SIG -etujärjestö (Special Interest Group). Järjestön jäseninä ovat muun muassa Accenture, ARM, Sony, Telensa ja Ubiik. [41.] Weightless SIG sanoo standardien olevan täysin avoimia, mutta jos laitevalmistajat haluavat valmistaa tälle teknologialle sopivia moduuleita tai laitteita, niiden täytyy hakea järjestöltä lisenssiä. Myös protokollien tarkat määrittelyt saa vain liittymällä järjestön jäseneksi tai kehittäjäksi.

Weightless-W

Järjestön määrittelemiä LPWAN-standardeja on tällä hetkellä kolme, joista ensimmäinen oli vuonna 2013 julkaistu Weightless-W. Se hyödyntää maanpäällisten televisiolähetyksien taajuusalueella olevia vapaita kaistaleita (TV White Space, TVWS) 470 MHz:n ja 790 MHz:n väliltä. Tukiasemat käyttävät tietokantoja selvittääkseen mitkä taajuuskaistat ovat paikallisten TV-lähetyksen käytössä ja mitkä ovat vapaina. Näitä vapaita kaistoja hyödynnetään sitten taajuushyppelyä (engl. Frequency Hopping Spread Spectrum) käyttäen tukiaseman ja päätelaitteen välisessä yhteydessä. Taajuushyppelyssä laajempi taajuusalue jaetaan pieniin kanaviin ja signaali pilkotaan osiin, jotka lähetetään tietyin aikaväleihin eri kanavia käyttäen. Tämän on tarkoitus vähentää häiriöiden vaikutusta signaaliin ja näin pidentää kantamaa. [42; 43.]

Weightless-W on kuitenkin osoittautunut käytännössä vaikeaksi toteuttaa. TVWS-kaistat vaihtelevat suuresti alueittain ja niitä koskevat säännöt ja määräykset voivat olla myös hyvin erilaisia eri maissa. Tästä syystä myös halpojen laitteiden valmistus on erittäin vaikeaa. Pieni ja edullinen radiolaite ei kykene toimimaan samaan aikaan esimerkiksi 400 MHz:n ja 700 MHz:n taajuusalueilla, jolloin samaa laitetta ei välttämättä pystytä käyttämään useilla eri alueilla. [44.]

Weightless-W pystyy kuitenkin parhaimmillaan todella suuriin lähetysoopeuksiin, teoreettisesti jopa 10 Mb/s, mikä voi tehdä siitä hyvän vaihtoehdon IoT-ratkaisuihin missä vaaditaan suurta tiedonsiirtonopeutta [43].

Weightless-N

Weightless-N on toinen Weightless SIG -järjestön määrittelemä standardi ja se julkaistiin vuonna 2015. Se toimii yleisimmin lisenssivapailla alle gigahertsin ISM-taajuusalueilla, mutta protokollaa on mahdollista käyttää myös lisensoituilla taajuuksilla. Se käyttää erittäin kapean kaistan (Ultra Narrow Band, UNB) teknologiaa. [45.]

Liikenne voi olla vain yksisuuntaista päätelaitteelta tukiasemalle päin, mikä rajoittaa mahdollisia käyttötarkoituksia. Weightless-N-standardi edellyttää liikenteen salaamisen ja laitteiden todentamisen käyttäen 128-bittistä AES-salausta. Se tukee myös laitteiden liikkuvuutta tukiasemien ohjatessa liikenteen älykkäästi oikeaan määränpäähän, riippumatta siitä missä tai minkä yrityksen ylläpitämässä verkossa laite sijaitsee. Weightless SIG -järjestö lupaa yli viiden kilometrin kantamaa ja 10 vuoden akkukestoa. [45; 46.]

Weightless-N verkkoja on tällä hetkellä käytössä ainakin Tanskassa Kööpenhaminan ja Ejsbergin kaupungeissa sekä Englannissa Lontoossa [47; 48].

Weightless-P

Kolmas ja viimeisin Weightless SIG -järjestön julkaisema standardi on nimeltään Weightless-P. Se käyttää kapeita 12,5 kHz:n taajuuskanavia useilla eri alle gigahertsin ISM-taajuusalueilla.

Weightless-P mahdollistaa kaksisuuntaisen liikenteen monilla yhteyden laatua ja varmuutta parantavilla ominaisuuksilla. Se tukee muun muassa virheenkorjausta (Forward Error Correction, FEC) ja automaattista viestin uudelleenlähetystä (Automatic Retransmission Request, ARQ). Aikaisempien Weightless-standardien tapaan myös Weightless-P käyttää 128-bittistä AES-salausta tietoturvan parantamiseksi. Myös laitteiden radioyhteyden kautta tapahtuvat (Over-the-air, OTA) ohjelmistopäivitykset ovat mahdollisia.

Weightless-P:n tiedonsiirtonopeus vaihtelee välillä 200 b/s ja 100 kb/s. Weightless SIG:n mukaan kantama olisi noin kaksi kilometriä, ja akkukestoksi arvioidaan 3–8 vuotta. [46; 49.]

Lyhyemmän kantaman ja suuremman virrankulutuksen vuoksi Weightless-P ei välttämättä ole paras vaihtoehto laajoissa, koko maita kattavissa verkoissa, mutta pienemmissä yksityisissä verkoissa se voisi olla hyvä valinta. Esimerkiksi teollisuusalueilla tai kohteissa missä tiedonsiirron luotettavuus ja vahvistettavuus ovat ehdottomia, Weightless-P voi olla oikea ratkaisu.

4.5 5G-teknologia

5G eli 5th generation wireless systems, tarkoittaa viidennen sukupolven langattomia tiedonsiirtojärjestelmiä, jotka tulevat olemaan seuraava kehitysaskel nykyisten 4G eli neljännen sukupolven järjestelmien jälkeen. 5G:stä ei ole vielä olemassa olevaa standardia, mutta sen kehitystyö ja testaus on jo pitkälle edennyt. Standardi uskotaan saatavan valmiiksi ja teknologian tulevan yleisemmin kuluttajakäyttöön noin vuonna 2020 [50], mutta osa teleoperaattoreista aikoo tuoda kaupallisia 5G-verkkoja markkinoilla jo tätä aiemmin [51].

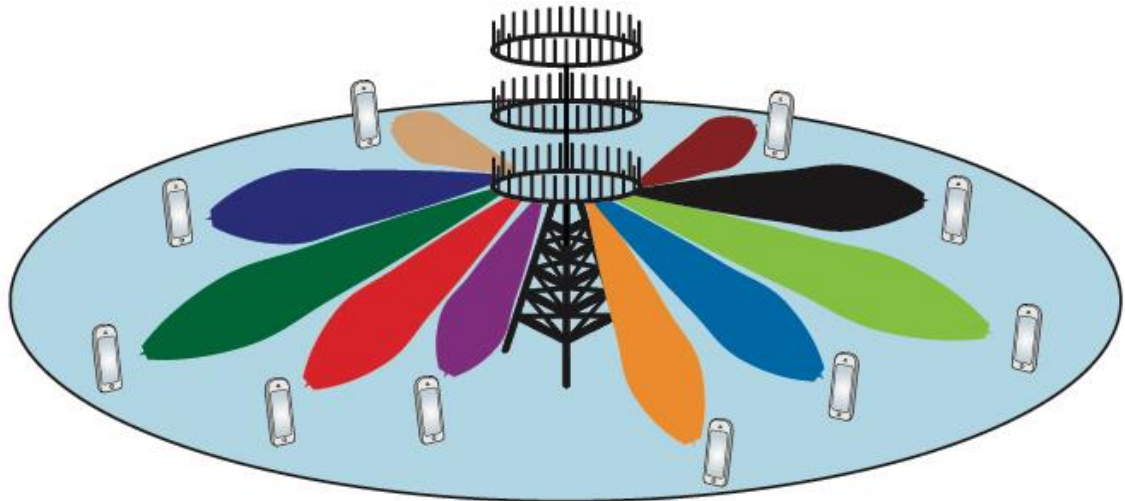
5G:llä on vielä monia erilaisia määritelmiä, mutta yleisinä kriteereinä pidetään muun muassa yli 1 Gb/s latausnopeutta, erittäin matalaa, lyhyillä välimatkoilla alle yhden millisekunnin latenssia ja huomattavasti parempaa energiatehokkuutta kuin 4G:llä [52].

Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on yritetty kehittää useita eri ratkaisuja. Yhtenä todennäköisenä vaihtoehtona on siirtyä käyttämään aiemmin käyttämättömiä, erittäin korkeita yli kuuden gigahertsin taajuusalueita. Yhdysvalloissa viranomaiset ovat jo osoittaneet joukon korkeita taajuusalueita, kuten 28 GHz, 37 GHz ja 39 GHz, tulevien 5G-yhteyksien käyttöön. [53.]

Käyttämällä korkeita taajuuksia yhteyden kapasiteettia saadaan nostettua ja latenssia laskettua huomattavasti, mutta se tuo myös mukanaan haasteita. Näin korkeat taajuudet vaimenevat ilmakehässä nopeasti, eivätkä ne läpäise esteitä kovin hyvin. Näiden ongelmien ratkaisemiseen on kaavailtu erilaisia tekniikoita.

Yhtenä keinona ratkaista korkeiden taajuuksien lyhempi kantama on lisätä tukiasemien määrää, mutta tämä olisi vaikea ja kallis toteuttaa. Se kuitenkin voitaisiin ratkaista ottamalla käyttöön suurien tukiasemien sijasta suuri määrä pienempiä tukiasemia, jolloin verkko muodostuisi lukuisista hyvin pienistä soluista. Tämä voisi toimia erityisesti tiheissä kaupunkiympäristöissä, joissa pieniä tukiasemia voitaisiin sijoittaa rakennuksiin tai esimerkiksi lyhtypylväisiin. [52.]

Toinen tapa on niin sanottu massive MIMO -tekniikan (Multiple-Input and Multiple-Output) käyttö. Tässä tekniikassa käytetään yhden vastaanotto- ja lähetysantennin sijasta lukuisia antennia sekä lähetykseen että vastaanottoon. Tämä moninkertaistaisi yhteyden kapasiteetin. Erittäin korkeita taajuuksia käytettäessä lukuisten antennien asentaminen tukiasemiin olisi myös entistä helpommin toteutettavissa, sillä korkeammat taajuudet käyttävät pienimpikokoisia antennia. Massive MIMO:n tuodessa käyttöön suuren määrän pieniä antennia, voidaan verkossa hyödyntää myös niin sanottua beamforming-tekniikkaa. Tässä tekniikassa ideana on signaalin tarkka kohdistaminen halutulle vastaanottajalle, sen sijaan että antenni lähettäisi sitä joka suuntaan. Näin saadaan signaalin vaimenemista pienennettyä ja linkkibudjettia kasvatettua. [52.] Kuvassa 11 on havainnollistettu massive MIMO- ja beamforming-tekniikoiden käyttöä.



Kuva 11. Massive MIMO- ja beamforming-tekniikat [54].

Vaikka 5G ei olekaan ensisijaisesti IoT-verkkoteknologia, sillä uskotaan olevan suuri vaikutus esineiden internetiin. Se ei kuitenkaan todennäköisesti tule kilpailemaan suoraan LPWAN-tekniikoiden kanssa. Vaikka 5G:n tulisikin olla huomattavasti energiatehokkaampi kuin edeltäjänsä, se ei kuitenkaan välttämättä pysty yhtä hyvään akunkestoon kuin useat LPWAN-tekniikat. Myös sekä sen signaalin kantavuus että kuuluvuus sisätiloissa ja maan alla jäänee heikommaksi. 5G:llä tulee kuitenkin olemaan useita käyttökohteita myös IoT-maailmassa. Yksi esimerkki voisi olla itseohjautuvat autot, jotka tarvitsevat jatkuvaa, nopeaa, matalaviiveistä ja luotettavaa yhteyttä. Toinen esimerkki voisi olla virtuaalitodellisuus, jossa langattomia virtuaalitodellisuuslaseja voitaisiin käyttää missä tahansa langattomasti 5G-yhteydellä. Myös älylasit ja muu puettava teknologia voisi hyödyntää 5G-verkkoa.

5 Teknologioiden saatavuus Suomessa

Verkkoyhtiö Digita ja tuotekehitysyritys Espotel ovat syksystä 2016 lähtien rakentaneet Suomeen LoRa-tekniikkaan pohjautuvaa IoT-verkkoa. Verkon on tarkoitus valmistuessaan peittää 85 % väestöstä. [55.] Tällä hetkellä Espotelin LoRa-verkolla on kuuluvuutta ainakin pääkaupunkiseudulla ja Tampereella [56]. Asiakkaat voivat käyttää verkossa joko omia laitteitaan ja maksaa operaattorille vain datasiirrosta, tai ne voivat ostaa tuotteen palveluna, jolloin Espotel myös suunnittelee asiakkaiden käyttöön sopivat laitteet

[56; 61]. Suomalaisista yrityksistä ainakin SKS Automaatio käyttää jo Espotelin ja Digitan LoRa-verkkoa teollisessa etämittausjärjestelmä IoTKey-palvelussaan [62]. Myös vuokra-asuntoyhtiö VVO käyttää LoRa-verkkoa Espoossa 200 vuokra-asunnossa keräämällä sensoreilla kosteus- ja lämpötietoja ja tekemällä tämän avulla tarvittavia muutoksia [63].

Tämän lisäksi myös The Things Network-yhteisön verkolla on Suomen alueella muutamia yhdyskäytäviä. Lisäksi LoRa:n avoimuudesta johtuen kuka tahansa voi perustaa omia yksityisiä verkkojaan.

Sigfox-verkkoa rakentaa ja ylläpitää Suomessa yksinoikeudella Connected Finland. Se aloitti verkon rakentamisen kesällä 2016, ja kaupalliseen käyttöön se avattiin saman vuoden syyskuussa. Laitteiden käytöstä maksetaan operaattorille laitekohtaista vuosimaksua, ja se voi olla noin 1–20 euroa. Sigfoxin kuulumuskartan mukaan verkko peittää jo lähes kaikki suurimmat kaupungit, ja tällä hetkellä se kattaa noin 80 % Suomen väestöstä. [57.] Suomessa Sigfox-verkkoa hyödyntää ainakin jo Centria Ammattikorkeakoulu BILINE-hankkeessaan, jossa tutkitaan ja kehitetään Kokkolan suurteollisuusalueella digitaalisesti työturvallisuutta [64]. Myös tamperelainen työkoneiden seurantaan erikoistunut yritys Pistel tarjoaa Sigfox-verkossa toimivaa paikannusmoduulia [65].

NB-IoT:ta ei ole vielä Suomessa kaupallisessa käytössä, mutta ainakin teleoperaattorit Telia ja Elisa ovat testanneet teknologiaa verkoissaan [58; 59]. Telia on myös sanonut tuovansa yhdessä Nokian kanssa kaupallisen 5G-verkon pääkaupunkiseudulle vuoden 2018 aikana [51]. DNA ja Elisa ovat suorittaneet testejä 5G-tekniikalla, mutta tarkempia aikatauluja kaupallisten verkkojen avaamisesta ei ole vielä kerrottu [59; 60].

6 Yhteenveto

Insinöörityön tarkoituksena oli vertailla eri IoT-verkkoteknologioiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin. Selvityksessä huomattiin, että vaikka monet eri verkoteknologiat ovatkin ominaisuuksiltaan melko samanlaisia, kaikista löytyi omia vahvuuksia ja heikkouksia sekä niille sopivia käyttökohteita.

Vertailtavista teknologioista lähimpinä toisiaan olivat LoRa ja Sigfox, joiden suurimpana erona ovat kehittäjien liiketoimintamallit. Siinä missä LoRa:n verkkoprotokolla on täysin

avoin, mutta laitteiden valmistus on Semantechin patentoima, on Sigfox ottanut päinvas-
taisen lähestymistavan tekemällä laitteiden valmistuksen avoimeksi, mutta samalla se
on itse kumppaneidensa kanssa ainoa verkon palveluntarjoaja. Teknisesti suurin eroa-
vaisuus tulee siinä, että Sigfoxin kohdalla pakettien koko ja liikennöintimäärät on tiukasti
rajattu, kun taas LoRa:n protokollassa ne ovat suhteellisen vapaita ja jätetty käyttäjän
itsensä päätettäväksi.

NB-IoT on mainittuja kahta uudempi teknologia, eikä se ole vielä laajalti käytössä. Se
eroaa kuitenkin huomattavasti LoRa:sta ja Sigfoxista toimiessaan lisensoituilla taajuus-
alueilla. Tämä tuo myös mukanaan sen suurimmat vahvuudet, sillä se ei LoRa:n ja Sig-
foxin tavoin altistu näitä taajuuksia koskeville teho- ja hyötyaikamääräyksille. Näin ollen
se soveltuu paremmin kohteisiin, jotka vaativat suurempaa pakettien kokoa tai jatkuvaa
kaksisuuntaista liikennettä.

Weightless-standardeista ei ole julkisesti saatavilla täysiä teknisiä määrittelyitä, mikä vai-
keuttaa tarkempaa vertailua, mutta näistä Weightless-N on lähellä sekä LoRa-protokol-
laa että Sigfoxia. Erona on, että se ei tue ollenkaan kaksisuuntaista liikennettä. Vahvu-
utena on liikenteen salaus. Weightless-P-standardilla on suuri määrä yhteyden laatua,
varmistusta ja salausta koskevia ominaisuuksia. Siinä on kuitenkin vertailtavista
LPWAN-teknologioista lyhin kantama ja suurin virrankulutus.

5G on vasta lähivuosina käyttöön tuleva teknologia, eikä sen standardi ole vielä valmis.
Todennäköisesti se ei kuitenkaan tule kilpailemaan suoraan tässä työssä vertailtujen
muiden teknologioiden kanssa, vaan sitä tullaan käyttämään enemmän IoT-sovelluk-
sissa, joissa tärkeintä on erittäin suuri tiedonsiirtonopeus ja matala viive, mutta ei niin-
kään pitkä akunkesto.

Johtopäätöksinä voidaan sanoa, että vertailuista teknologioista tällä hetkellä valmiimmat
IoT-ratkaisuiden käyttöön ovat LoRa ja Sigfox. LoRa:n vahvuutena on sen vähemmän
rajoittunut laitteisto, jolloin se sopii paremmin ratkaisuihin, joissa saatetaan tarvita use-
ampaa kaksisuuntaista liikennettä, hieman suurempaa pakettikokoa tai nopeampaa lii-
kennettä. Kuitenkin jos ollaan varmoja, että suunnitellussa käyttötarkoituksessa Sigfoxin
140 päivittäisen viestin ja 12 tavun paketin hyötykuorma riittää eikä kahdensuuntainen
liikenne ole usein tarpeellista, silloin Sigfoxin helppo ja nopea käyttöönotto sekä suuri,
globaali verkon kattavuus tekee siitä erittäin hyvän vaihtoehdon. Lähitulevaisuudessa

teleoperaattoreiden alkaessa tarjota NB-IoT-palveluita tulee myös siitä varmasti suuri kilpailija näille verkkoteknologioille. Palveluiden tuleva hinnoittelu on vielä kysymysmerkkinä, mutta varsinkin kohteissa, joissa vaaditaan turvallista, nopeaa, varmaa ja reaaliaikaisempaa yhteyttä, NB-IoT tulee olemaan vahvoilla. 5G-yhteydet tulevat markkinoille muutamien seuraavien vuosien aikana, mutta se tulee todennäköisesti palvelemaan enemmänkin täysin uudenlaisia IoT-ratkaisuita, joissa vaaditaan suurta yhteyden kapasiteettia.

Insinööriö antoi laajan yleisen katsauksen IoT-maailmaan ja langattomiin järjestelmiin yleisesti. Se sytytti myös mielenkiinnon ja innostuksen jatkaa alan tutkimista ja seuraamista.

Lähteet

- 1 Internet of Things. 2017. Verkkodokumentti. Gartner. <<http://www.gartner.com/it-glossary/internet-of-things/>>. Luettu 25.3.2017.
- 2 Ashton, Kevin. 2009. That 'Internet of Things' Thing. Verkkodokumentti. <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Luettu 25.3.2017.
- 3 Smith, Gary. 2015. From 1982 Coca-Cola vending machine to latest trend: What the Internet of Things means for business. Verkkodokumentti. <<http://realbusiness.co.uk/tech-and-innovation/2015/07/15/from-1982-coca-cola-vending-machine-to-latest-trend-what-the-internet-of-things-means-for-business/>>. Luettu 25.3.2017.
- 4 Bauer, Harald ym. 2014. The Internet of Things: Sizing up the opportunity. Verkkodokumentti. <<http://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/the-internet-of-things-sizing-up-the-opportunity>>. Luettu 25.3.2017.
- 5 Evans, Dave. 2011. The Internet of Things, How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. Verkkodokumentti. <http://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf>. Luettu 25.3.2017.
- 6 Wellers, Daniel. 2015. Is this the future of the Internet of Things?. Verkkodokumentti. <https://www.weforum.org/agenda/2015/11/is-this-future-of-the-internet-of-things/?utm_content=buffer10b03&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer>. Luettu 25.3.2017.
- 7 Adler, Laura. 2016. How Smart City Barcelona Brought the Internet of Things to Life. Verkkodokumentti. <<http://datasmart.ash.harvard.edu/news/article/how-smart-city-barcelona-brought-the-internet-of-things-to-life-789>>. Luettu 25.3.2017.
- 8 Smart Agriculture. 2017. Verkkodokumentti. ThingWorx. <<https://www.thingworx.com/ecosystem/markets/smart-connected-systems/smart-agriculture/>>. Luettu 25.3.2017.
- 9 Meola, Andrew. 2016. Why IoT, big data & smart farming are the future of agriculture. Verkkodokumentti. <<http://www.businessinsider.com/internet-of-things-smart-agriculture-2016-10?r=US&IR=T&IR=T>>. Luettu 25.3.2017.
- 10 Bono, Bobby. 2015. The Internet of Things has arrived in America's factories. Verkkodokumentti. <<http://usblogs.pwc.com/industrialinsights/2015/02/24/the-internet-of-things-has-arrived-in-americas-factories/>>. Luettu 25.3.2017.

- 11 Greenough, John. 2016. How the Internet of Things is revolutionizing manufacturing. Verkkodokumentti. <<http://www.businessinsider.com/internet-of-things-in-manufacturing-2016-10?r=US&IR=T&IR=T>>. Luettu 25.3.2017.
- 12 Internet of Things in Healthcare: Information Technology in Health. 2016. Verkkodokumentti. BI Intelligence. <<http://nordic.businessinsider.com/internet-of-things-in-healthcare-2016-8>>. Luettu 25.3.2017.
- 13 Telkamp, Thomas. 2016. LoRa Crash Course. Verkkodokumentti. <<https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/lora-crash-course-by-thomas-telkamp/3981>>. Luettu 27.3.2017.
- 14 Path Loss, Link Budget & System Operating Margins. 2017. Verkkodokumentti. 4Gon Solutions. <http://www.4gon.co.uk/solutions/technical_path_loss_link_budget_som.php>. Luettu 27.3.2017.
- 15 Free-space path loss. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Free-space_path_loss>. Luettu 27.3.2017.
- 16 Fresnel zone. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone>. Luettu 27.3.2017.
- 17 LoRa Alliance™ Technology. 2017. Verkkodokumentti. LoRa Alliance. <<https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>>. Luettu 3.4.2017.
- 18 A technical overview of LoRa® and LoRaWAN. 2015. Verkkodokumentti. LoRa Alliance. <<https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>>. Luettu 3.4.2017.
- 19 LoRa® FAQ. 2017. Verkkodokumentti. Semtech Corporation. <<http://www.semtech.com/wireless-rf/lora/LoRa-FAQs.pdf>>. Luettu 3.4.2017.
- 20 LoRaWAN. 2016. Verkkodokumentti. The Things Network. <<https://www.thethingsnetwork.org/wiki/LoRaWAN/>>. Luettu 3.4.2017.
- 21 Short Range Devices. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Short_Range_Devices>. Luettu 3.4.2017.
- 22 LoRaWAN 101, A Technical Introduction. 2017. Verkkodokumentti. LoRa Alliance. <http://portal.lora-alliance.org/DesktopModules/Inventures_Document/FileDownload.aspx?ContentID=1643>. Luettu 3.4.2017.
- 23 LoRa Modulation Basics. 2015. Verkkodokumentti. Semtech Corporation. <<http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>>. Luettu 3.4.2017.

- 24 Building a Global Internet of Things Network Together. 2017. Verkkodokumentti. The Things Network. <<https://www.thethingsnetwork.org>>. Luettu 3.4.2017.
- 25 Charbonnier, Anthony. 2016. 20 min technical intro to Sigfox. Verkkodokumentti. <<https://www.slideshare.net/oimctony/20-mins-technical-intro-to-sigfox>>. Luettu 4.4.2017.
- 26 Pitcher, Graham. 2015. Developers vie to create the communications standard of choice for the IoT. Verkkodokumentti. <<http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/developers-vie-to-create-the-communications-standard-of-choice-for-the-iot/110411/>>. Luettu 4.4.2017.
- 27 Sigfox Technology Overview. 2017. Verkkodokumentti. Sigfox. <<https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>>. Luettu 4.4.2017.
- 28 Radio Technology Keypoints. 2017. Verkkodokumentti. Sigfox. <<https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-radio-technology>>. Luettu 4.4.2017.
- 29 Smith, Ian. 2016. SIGFOX – A new network technology for IoT comms?. Verkkodokumentti. <<https://www.embeddedrelated.com/showarticle/926.php>>. Luettu 4.4.2017.
- 30 Emmerson, Bob. 2014. License-Free Spectrum Goes Cellular. Verkkodokumentti. <<http://www.nojitter.com/post/240168055/licensefree-spectrum-goes-cellular>>. Luettu 4.4.2017.
- 31 Neagle, Colin. 2016. How Sigfox plans to spread its low-power IoT network across the U.S. Verkkodokumentti. <<http://www.networkworld.com/article/3029253/internet-of-things/how-sigfox-plans-to-spread-its-low-power-iot-network-across-the-u-s.html>>. Luettu 4.4.2017.
- 32 Coverage. 2017. Verkkodokumentti. Sigfox. <<http://www.sigfox.com/en/coverage>>. Luettu 4.4.2017.
- 33 Saarelainen, Ari. 2016. Maailmanlaajuinen verkkoliittymä eurolla vuodessa? – "Yksi gigantinen verkko ilman mitään roamingia". Verkkodokumentti. <<http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/maailmanlaajuinen-verkkoliittyma-eurolla-vuodessa-yksi-gigantinen-verkko-ilman-mitaan-roamingia-6556382>>. Luettu 4.4.2017.
- 34 Millman, Rene. 2016. French postal services just got smart with the Internet of Things. Verkkodokumentti. <<https://internetofbusiness.com/french-postal-services-just-got-smart-with-the-internet-of-things/>>. Luettu 4.4.2017.
- 35 What is Narrowband IoT? Verkkodokumentti. 5G.co.uk. <<https://5g.co.uk/guides/what-is-narrowband-iot/>>. Luettu 5.4.2017.

- 36 Narrowband-IoT: pushing the boundaries of IoT. 2017. White paper. Vodafone.
- 37 LTE evolution for IoT connectivity. 2017. Verkkodokumentti. Nokia. <<http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200178>>. Luettu 5.4.2017.
- 38 Landström, Sara ym. 2016. NB-IoT: a sustainable technology for connecting billions of devices. Verkkodokumentti. <<https://www.ericsson.com/publications/ericsson-technology-review/archive/2016/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices>>. Luettu 5.4.2017.
- 39 NB-IoT – Enabling New Business Opportunities. 2015. Verkkodokumentti. Huawei. <http://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb_iot_whitepaper_en.pdf>. Luettu 5.4.2017.
- 40 Tenorio, Santiago. 2017. The future in our hands with the commercial launch of NB-IoT in Vodafone Spain. Verkkodokumentti. <<http://www.vodafone.com/content/index/what/technology-blog/nbiot-commercial-launch-spain.html>>. Luettu 5.4.2017.
- 41 Weightless SIG Board Members. 2015. Verkkodokumentti. Weightless SIG. <<http://www.weightless.org/about/weightless-sig-board-members>>. Luettu 6.4.2017.
- 42 Weightless (wireless communications). 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Weightless_\(wireless_communications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Weightless_(wireless_communications))>. Luettu 6.4.2017.
- 43 Purves, Duncan. 2015. Overview of Wireless Sensor Networks. Verkkodokumentti. <<https://www.slideshare.net/DuncanPurves/overview-of-wireless-sensor-networks>>. Luettu 6.4.2017.
- 44 What is Weightless?. 2015. Verkkodokumentti. LinkLabs. <<https://www.linklabs.com/blog/what-is-weightless>>. Luettu 6.4.2017.
- 45 Weightless-N. 2015. Verkkodokumentti. Weightless SIG. <<http://www.weightless.org/about/weightlessn>>. Luettu 6.4.2017.
- 46 Which Weightless Standard? 2015. Verkkodokumentti. Weightless SIG. <<http://www.weightless.org/about/which-weightless-standard>>. Luettu 6.4.2017.
- 47 Atkinson, James. 2015. Two Weightless-N IoT networks launched in Denmark. Verkkodokumentti. <<http://www.wireless-mag.com/News/36558/two-weightless-n-iot-networks-launched-in-denmark.aspx>>. Luettu 6.4.2017.

- 48 Scales, Ian. 2015. Weightless lifts off with an IoT network in London. Verkkodokumentti. <<http://www.telecomtv.com/articles/iot/weightless-lifts-off-with-an-iot-network-in-london-12546/>>. Luettu 6.4.2017.
- 49 Weightless-P. 2015. Verkkodokumentti Weightless SIG. <<http://www.weightless.org/about/weightlessp>>. Luettu 6.4.2017.
- 50 ITU towards "IMT for 2020 and beyond". 2017. Verkkodokumentti. ITU. <<http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>>. Luettu 8.4.2017.
- 51 Karismo, Anna. 2016. Sonera ja Nokia tuovat kaupallisen 5G-verkon Helsinkiin vuonna 2018. Verkkodokumentti. <<http://yle.fi/uutiset/3-9324136>>. Luettu 8.4.2017.
- 52 Best, Jo. 2015. The race to 5G: Inside the fight for the future of mobile as we know it. Verkkodokumentti. <<http://www.techrepublic.com/article/does-the-world-really-need-5g/>>. Luettu 8.4.2017.
- 53 Snider, Mike. 2016. FCC approves spectrum for 5G advances. Verkkodokumentti. <<https://www.usatoday.com/story/tech/news/2016/07/14/fcc-approves-spectrum-5g-advances/87081242/>>. Luettu 8.4.2017.
- 54 Björnson, Emil. 2016. Radio Resource Management in Massive MIMO Communication Systems. <<http://www.commsys.isy.liu.se/en/research/projects/CENIIT-Radio-Resource-Management>>. Luettu 8.4.2017.
- 55 Internet-yhteyden avulla laitteista saadaan älykkäämpiä. 2016. Verkkodokumentti. Digita. <http://www.digita.fi/yrityksille/ratkaisut/case_iot_ensimmainen_oma_radioverkko_suomessa>. Luettu 9.4.2017.
- 56 Network coverage map. 2017. Verkkodokumentti. Etteplan. <<http://lora.etteplan.io/map>>. Luettu 9.4.2017.
- 57 Suomen IoT-operaattori. 2017. Verkkodokumentti. Connected Finland. <<http://www.connectedfinland.fi>>. Luettu 9.4.2017.
- 58 Lehtiniitty, Markus. 2016. Uutta 4G-verkoissa – Nokia ja Sonera testasivat NB-IOT-yhteyksiä ensimmäisenä Suomessa. Verkkodokumentti. <<http://mo-biili.fi/2016/10/12/uutta-4g-verkoissa-nokia-ja-sonera-testasivat-nb-iot-yhteyksia-ensimmaisena-suomessa/>>. Luettu 9.4.2017.
- 59 Elisa vei mobiiliverkon pilveen – kohti 5G-verkkoja. 2017. Verkkodokumentti. Uusi teknologia. <<http://www.uusiteknologia.fi/2017/01/25/elisa-vei-mobiiliverkon-pilveen-kohti-5g-verkkoja/>>. Luettu 9.4.2017.

- 60 DNA testasi 5G-tekniikkaa – Ericssonin kanssa. 2017. Verkkodokumentti. Uusi teknologia. <<http://www.uusiteknologia.fi/2017/02/14/dna-testasi-5g-tekniikkaa-ericssonin/>>. Luettu 9.4.2017.
- 61 Asioiden internetille perustettiin Suomessa oma verkko. 2015. Verkkodokumentti. Tivi. <http://www.tivi.fi/Kaikki_uutiset/asioiden-internetille-perustettiin-suomessa-oma-verkko-6059070>. Luettu 10.4.2017.
- 62 IoT:n avulla älykästä tietoa liiketoiminnan tueksi. 2017. Verkkodokumentti. Etteplan. <http://www.etteplan.com/expertise-and-offering/customers-and-references/iot-provides-business-support-through-smart-data.aspx?sc_lang=fi-FI>. Luettu 10.4.2017.
- 63 VVO otti IoT-anturiverkot Espooseen. 2016. Verkkodokumentti. Uusi teknologia. <<http://www.uusiteknologia.fi/2016/05/09/digita-tuo-iot-anturiverkot-espooseen/>>. Luettu 10.4.2017.
- 64 SigFox paikannusmoduuli. 2017. Verkkodokumentti. Pistel. <<http://www.pistel.fi/Assets/1pager/SigFox%20laiteseuranta%20v2.0.pdf>>. Luettu 10.4.2017

