



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

KANDIDAATINTYÖ

IOT-VERKKOTEKNOLOGIOIDEN SUORITUSKYKY

Tekijä: Pekka Jaakola
Ohjaaja(t): Tuomo Hänninen, Heikki Karvonen

Toukokuu 2019

Jaakola P. (2019) IoT-verkkoteknologioiden suorituskyky. Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 34 s.

TIIVISTELMÄ

Jotta maailmasta voidaan tehdä älykkäämpi ja entistä automatisoidumpi tarvitaan teknologia, joka osaa kerätä, käsitellä, lähettää ja vastaanottaa dataa. Esineiden internet eli Internet of Things (IoT) on luotu juuri sitä varten. IoT on jo tähän hetkeen mennessä mullistanut maailmaa, mutta suurin osa sen kapasiteetista on vielä käyttämättä. IoT-verkkoteknologiat ovat juuri se osa IoT:tä, joka mahdollistaa datan lähetyksen ja vastaanottamisen.

Tämän kandidaatin tutkielman aiheena on IoT verkkoteknologioiden suorituskyky keskittyen neljään teknologiaan. Teknologiat ovat Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN ja Narrowband IoT (NB-IoT). Tutkielmassa etsitään sopivinta teknologiaa sovellukseen, jossa kerätään anturidataa ja etäohjataan laitteita lähes reaaliaikaisesti internetin yli. Teknologioita tutkiessa keskitytään erityisesti niiden energiatehokkuuteen, verkkotopologioihin, laitteiden maksimimäärään verkossa, datansiirtonopeuteen ja viiveeseen. Jokaiseen mainittuun teknologiaan pureudutaan yksitellen esitellen myös niiden perustoimintatavat.

Lopullisessa vertailussa teknologioita vertaillaan sen mukaan, että millaiseen sovellukseen teknologia on sopiva ja miten se soveltuu tutkielmassa esitettyyn sovellukseen. Tuloksista nähdään, että LoRaWAN ei ole ideaali teknologia, mikäli laitteita halutaan ohjata reaaliaikaisesti ilman viivettä. Bluetooth Low Energy:n todetaan olevan sopiva teknologia, jos sovelluksessa tarvitaan nopeaa tiedonsiirtonopeutta. NB-IoT:n toiminnan rajaaminen vain sinne, missä 4G kuuluvuus on hyvä, tekee siitä epäsopean teknologian sovellukseen silloin, kun 4G kuuluvuus on huono. ZigBee on sopiva teknologia tutkielmassa mukana olleeseen sovellukseen sen pitkän kantaman, energiatehokkuuden, suuren kapasiteetin ja toimintavarmuuden vuoksi silloin, kun NB-IoT ei toimi.

Avainsanat: esineiden internet, verkkoteknologiat, ZigBee.

Jaakola P. (2019) Performance of the IoT Network Technologies. University of Oulu, Degree Program in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 34 p.

ABSTRACT

The modern world is becoming more and more automated and intelligent. Hence, the importance of having a technology that is capable of collecting, processing, sending and receiving data is essential. Internet of Things, or IoT for short, is made for that. IoT has already revolutionized the world, but still most of its capacity is unused. IoT network technologies are the part of the IoT that makes sending and receiving data possible.

The topic of this Bachelor's thesis is the performance of the IoT network technologies, concentrated on four technologies. The technologies are Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN and Narrowband-IoT. One main point on this thesis is to find a suitable technology for an application that collects sensor data and remotely controls devices over the Internet in near real-time. The most important features of the studied technologies for this thesis are energy efficiency, network topologies, maximum number of devices on the network, data transfer rate and latency. The basic structure of the technologies is also presented.

At the final comparison, technologies are compared by for which application technology is suitable and how it suits the mentioned application. The given results show that LoRaWAN is not an ideal technology when devices need to be controlled in near real-time without latency. Bluetooth Low Energy is a suitable technology when the application needs fast bit rate. Narrowband-IoT is suitable technology when the reception of the 4G is strong enough. ZigBee's wide range, good energy efficiency, large capacity and reliability makes it a suitable technology when the reception of the 4G is not strong enough.

Key words: Internet of Things, network technology, ZigBee.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
ALKULAUSE.....	5
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET.....	6
1 JOHDANTO	8
2 IOT-VERKKOTEKNOLOGIAT	10
2.1 Bluetooth Low Energy	12
2.1.1 BLE spesifikaatiot	14
2.2 ZigBee	16
2.2.1 ZigBee spesifikaatiot	16
2.3 Long Range Wide Area Network	19
2.3.1 LoRaWAN spesifikaatiot	20
2.4 Narrowband IoT	23
2.4.1 NB-IoT spesifikaatiot	24
3 VERKKOTEKNOLOGIOIDEN VERTAILU	26
4 YHTEENVETO.....	29
5 LÄHDELUETTELO	31

ALKULAUSE

Kandidaatintyöni IoT-verkkoteknologioiden suorituskyvystä on tehty osana kandidaatintutkintoa. Työn tarkoituksena on tutkia nykyaikaisten langattomien IoT-tiedonsiirtoteknologioiden suorituskykyä keskittyen erityisesti energiatehokkuuteen, datansiirtonopeuteen, viiveeseen, verkkotopologiaan sekä laitteiden maksimimäärään verkossa. Kandidaatin johtopäätöksenä keskitytään esittämään vertailua siitä, että millaisessa sovelluksessa tutkitut tekniikat toimivat parhaiten ja löytämään sopiva tekniikka sellaiseen sovellukseen, jossa IoT-verkkoa hyödyntäen kerätään anturidataa tai etäohjataan laitteita lähes reaaliaikaisesti internetin kautta. Kandidaatin tutkielma aloitettiin tammikuussa 2019 ja tutkielma saatiin loppuun toukokuun alussa 2019. Väliin mahtui aikoja, jolloin tutkielman tekeminen eteni hyvin ja aikoja, jolloin tutkielman tekemiseen ei riittänyt kunnolla aikaa. Tutkielma sai kuitenkin vähän enemmän pituutta kuin aluksi olin suunnitellut. Aiheena IoT-verkkoteknologiat ovat minulle henkilökohtaisesti kiinnostavia, joten motivaatio tutkielman tekemiseen oli todella hyvä. Haluan antaa kiitokset ohjaajilleni Tuomo Hänniselle ja Heikki Karvoselle mahdollisuudesta näin mielenkiintoiseen aiheeseen. Isot kiitokset myös opiskelukavereilleni, läheisille ja tyttöystävälleni Roosalle tuesta kevään kiireiden keskellä.

Oulussa 13.5.2019

Pekka Jaakola

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

3G	Kolmannen sukupolven tietoliikenneverkko
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Neljännän sukupolven tietoliikenneverkko
5G	Viidennen sukupolven tietoliikenneverkko
6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network
AES	Advanced Encryption Standard
ATT	Attribute Protocol
BLE	Bluetooth Low Energy
Bluetooth 5.0	Viidennen sukupolven Bluetooth -standardi
CCM	Cipher Block Chaining-Message Authentication Code
CIoT	Consumer Internet of Things
CISCO	Maailman johtava IT- ja verkkoratkaisujen toimittaja
connInterval	Connection interval
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FFD	Full Function Devices
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GAP	Generic Access Profile
GATT	Generic Attribute Profile
GSMA	Global System for Mobile Communications
HCI	Host Controller Interface
IC	Integrated circuit
IEEE 802.15.4	Standard for Low-power Wireless Personal Area Networks
IIoT	Industrial Internet of Things
IoE	Internet of Everything
IoRT	Internet of Robotic Things
IoT	Internet of Things
IPv6	Uusin Internet protokolla
ISM	Industrial Scientific Medical
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LoWPANs	Low-power Wireless Personal Area Network
LPWAN	Low-power Wide Area Network
MCU	Microcontroller
NB-IoT	Narrowband IoT
NFC	Near Field Communication
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RDIF	Radio Frequency Identification
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Devices
SF	Spreading Factor
SIG	Bluetooth Special Interest Group
SIGFOX	Ensimmäinen maailmanlaajuinen IoT-verkko
SMP	Security Manager Protocol
SoC	System-on-Chip
WiFi/WLAN	Langaton lähiverkkoteknologia
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZigBee	Lyhyen kantaman tietoliikenneverkko

μA	mikroampeeri, sähkövirran yksikkö
dBm	desibeli-milliwatti, tehon yksikkö
kbps	kilobittia sekunnissa, tiedonsiirto yksikkö
kHz	hertzi, taajuuden yksikkö
mA	milliampeeri, sähkövirran yksikkö
mAh	milliampeeritunti, sähkövarauksen yksikkö
MBit/s	megabittia sekunnissa, tiedonsiirto yksikkö
ms	millisekunti, ajanyksikkö
V	volti, jännitteen yksikkö

μ	mikro
k	kilo
M	mega
m	milli

1 JOHDANTO

Internet of Things (IoT) on konsepti, jonka avulla maailmasta voidaan tehdä älykkäämpi. IoT on terminä todella laaja kokonaisuus ja se ei ole yksikäsitteinen. IoT terminä tarkoittaa esineiden internetiä. Termi ja sen sisältö on monelle tuntematon, joten selvitetään mitä esineiden internet todellisuudessa tarkoittaa.

IoT terminä tarkoittaa mitä tahansa esinettä tai laitetta, joka lähettää tietoa, vastaanottaa tietoa tai tekee molempia. Se on siten esineiden tai laitteiden välinen verkko ja verkossa tapahtuva laitteiden välinen viestintä. Se tarkoittaa myös teknologioita, standardeja ja sovelluksia, jotka mahdollistavat laitteiden välisen kommunikaation. IoT mahdollistaa tuhansia innovaatioita ja parannuksia teollisuudelle, kuluttajille, terveydenhuollolle, kaupungeille ja yhteiskunnille.

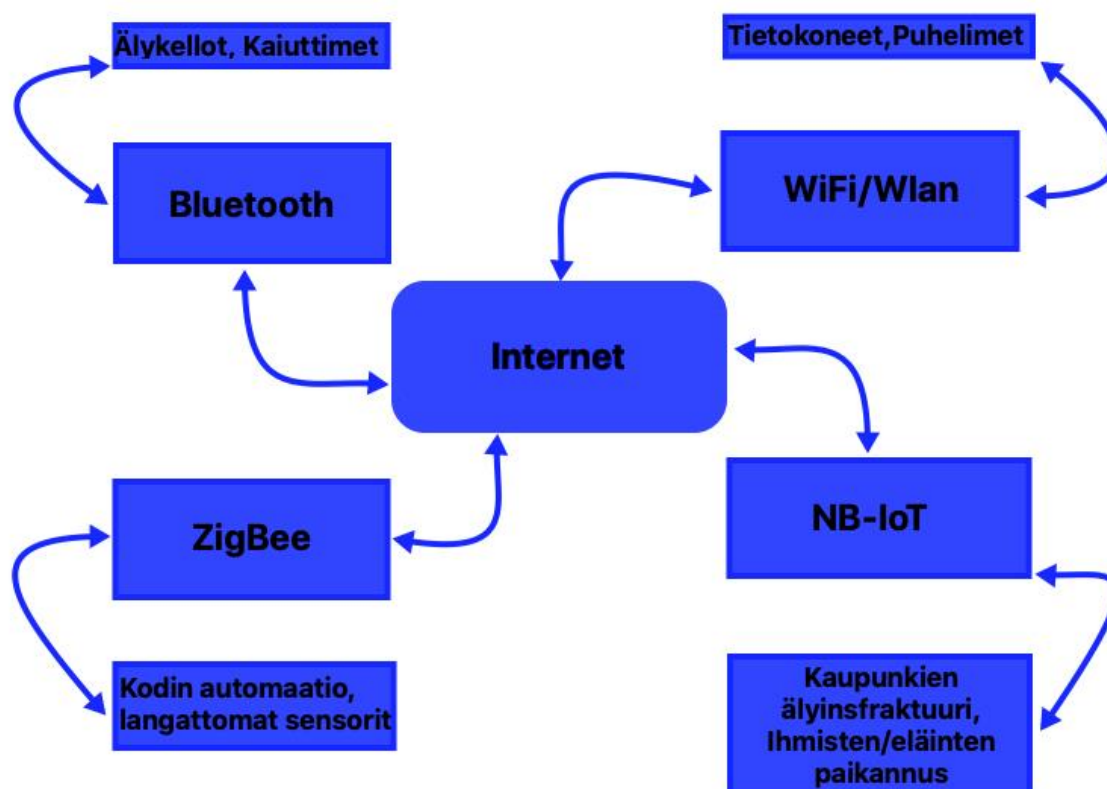
Käyttökohteita ovat esimerkiksi terveydentilan valvonta, henkilöiden, eläinten, esineiden tai tuotteiden seuranta ja paikannus, kodin ja teollisuuden automaatio, ympäristön seuranta sekä laitteiden etäohjaus. IoT:n mahdollistamia tekniikoita ovat esimerkiksi älyvaatteet, jotka jatkuvasti mittaavat käyttäjänsä pulssia tai sensori, joka nielaistaa ja ihmisen lävitse kulkiessaan lähettää tietoa terveydentilasta. Käyttökohteena voivat olla myös kodinkoneet, kuten jääkaappi, joka automaattisesti tunnistaa jonkin elintarvikkeen loppuneen ja tilaa tarvittaessa lisää. Älykkyys pohjautuu dataan, jota kerätään esimerkiksi antureilla. Data on välttämättömyys älykkyyden luomisessa. Dataa pitää pystyä keräämään, lähettämään, vastaanottamaan ja hyödyntämään. [1]

Näkemyksinä IoT:stä on se, että esineistä tulee osa internetiä. Jokaisella esineellä on verkossa yksilöllinen identiteetti ja esineet ovat löydettävissä verkossa. Esineiden paikka ja status ovat tiedossa, esineiden äly ja palvelut lisäävät laajennetun internetin toiminnollisuuksia. Digitaalinen ja todellinen maailma fuusioituvat yhdeksi kokonaisuudeksi sekoittaen ammatillista, yksilöllistä ja sosiaalista ympäristöä. [2]

IoT jaetaan myös käyttökohteiden mukaan alaluokkiin. Alaluokkia ovat esimerkiksi Industrial Internet of Things (IIoT), Consumer Internet of Things (CIoT), Internet of Everything (IoE) ja Internet of Robotic Things (IoRT) [1]. Alaluokat jaetaan siis teollisuuden, kuluttajan, liiketoiminnan ja robotiikan mukaan. IoT-sovelluksia on jo käytössä, mutta ne lisääntyvät ja monipuolistuvat vuosi vuodelta. CISCO on arvioinut, että vuoteen 2020 mennessä käytössä olisi yli 20 miljardia laitetta esineiden internetissä. On selvää, että tulevaisuudessa suurin osa laitteista on jollain tapaa kytkettynä internetiin, joka lisää painetta tietoturva-alalla. Haasteena

on myös verkkoteknologioiden kapasiteetti, mutta viidennen sukupolven tietoliikenneverkko (5G) on tulossa helpottamaan tilannetta. [1]

Tässä työssä tutkitaan eri IoT-verkkoteknologioiden suorituskykyä ja niiden mahdollisia käyttökohteita. Tutkittavia tekniikoita ovat Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) ja Narrowband-IoT (NB-IoT). Työn tarkoituksena on selvittää sopivin tekniikka sellaiseen sovellukseen, jossa kerätään anturidataa ja etäohjataan laitteita internetin yli lähes reaaliaikaisesti. Kuvassa 1 esitellään IoT-verkkojen arkkitehtuuria ja tunnetuimpia käyttökohteita.

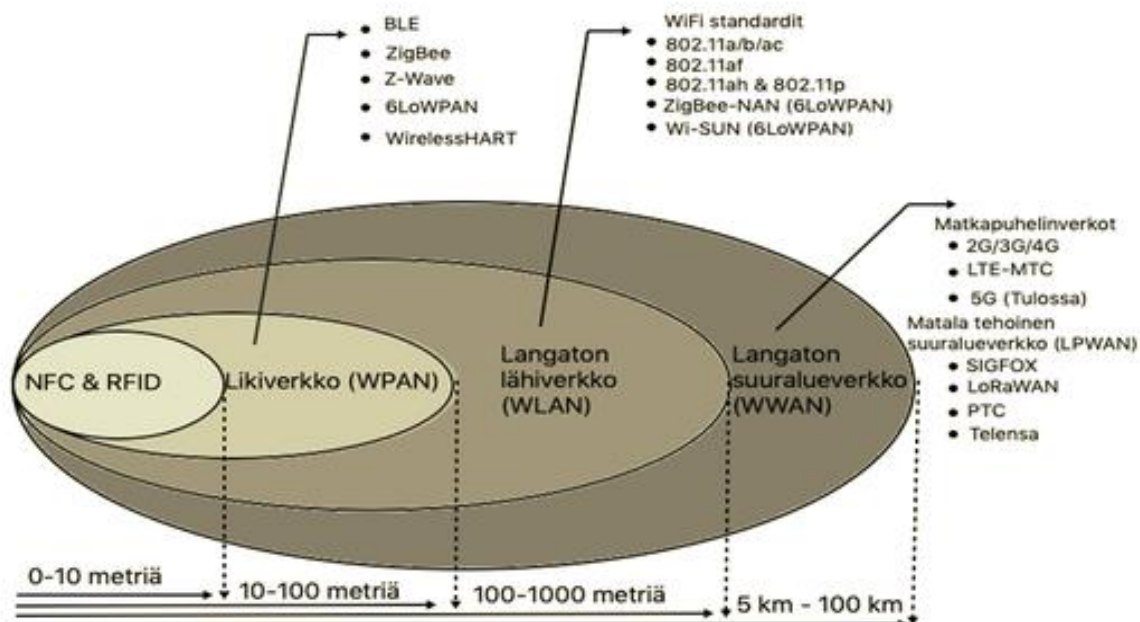


Kuva 1. IoT-verkko arkkitehtuuri ja käyttökohteet

2 IOT-VERKKOTEKNOLOGIAT

IoT:n kannalta on olemassa useita olennaisia langattomia verkkoteknologioita. Näiden teknologioiden kantamat vaihtelevat muutamasta senttimetristä useisiin jopa useisiin kymmeneen kilometreihin. Lyhyen ja keskipitkän matkan langattomia verkkoteknologioita ja lähiverkkoteknologioita ovat esimerkiksi Bluetooth, Near Field Communication (NFC), Radio Frequency Identification (RFID), ZigBee, IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN) ja WiFi. Pitkän kantaman tiedonsiirtoon käytetään Wireless Wide Area Network (WWAN) teknologioita, jotka voidaan jakaa kahteen kategoriaan: luvanvaraisiin langattomiin tiedonsiirtoteknologioihin, kuten 2G, 3G, 4G ja 5G, tai lupavapaisiin langattomiin tiedonsiirtoteknologioihin, kuten LoRaWAN ja SIGFOX. [3]

Tunnetuimpia IoT-verkkoteknologioita näistä ovat Bluetooth, NFC, RFID ja WiFi [3]. NFC:tä käytetään muun muassa pankkikorttien etäluennassa, Bluetooth tunnetaan tiedonsiirrosta kahden puhelimen välillä tai puhelimen avulla tapahtuvasta musiikin etätoistosta ulkoisen kaiuttimen kautta. RFID on käytössä muun muassa teollisuudessa varastojen hallinnassa ja tuotteiden seurannassa. Kuvassa 2 on esitetty langattomia IoT-verkkoteknologioita [3].



Kuva 2. Langattomia IoT verkkoteknologioita

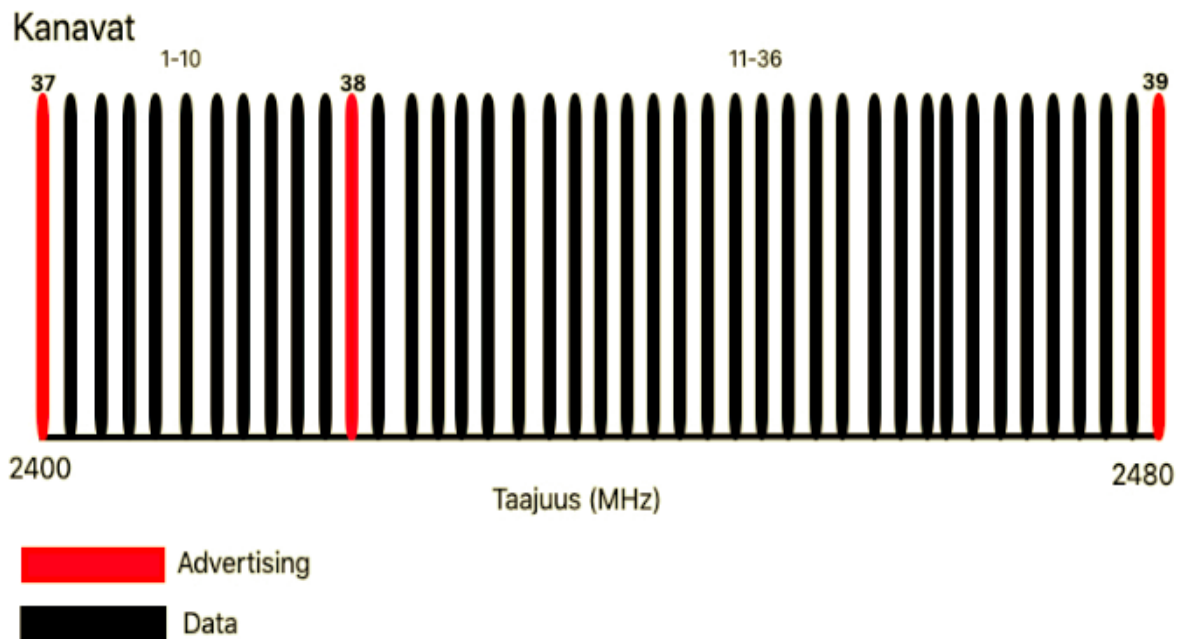
Suurin haaste IoT-verkkoteknologioiden kehityksessä on, että halutaan mahdollisimman pieni tehonkulutus, mutta kuitenkin mahdollisimman pitkä kantama ja tuki suuren datamäärän lähetykseen. Ideaalisesti optimaalisin järjestelmä IoT-sovelluksiin on järjestelmä, missä sensori toimii vuosia yhdellä AAA-paristolla [3]. Pariston kestoon vaikuttaa sovelluksessa käytettävä langattoman tiedonsiirron protokolla, protokollan kanssa käytetty moduuli, kantama, sensorien välimatka ja sovelluksen luonne. Ratkaisu rajoitetun virtalähteen ongelmaan on esimerkiksi IEEE 802.15.4 -protokolla. Se on protokolla Low-power Personal Area Networks (LoWPANs) -verkoille. ZigBee Alliance julkaisi ZigBee -laitteen, joka perustuu IEEE 802.15.4 -protokollaan sekä on halpa ja tuottaa matala tehoista langatonta mesh-verkkoa. Laite on suunnattu langattomaan ohjaukseen ja monitorointiin. 6LoWPAN -protokolla on myös matalatehoinen ja se tarjoaa mahdollisuuden IPv6-pakettien lähettämisen IEEE 802.15.4 standardisoidun verkon yli. [3]

Tietoturvallisuus on erityisen tärkeä aihe myös IoT-teknologioissa. Yksi seuraus teknologian nopeassa kehittämisessä ja globalisaatiossa on, että informaation kerääminen ja jakaminen on kasvanut huomattavasti jokaisella sektorilla yhteiskunnassa. Käyttäjien suurimpana huolenaiheena on henkilökohtaisten tietojen menettäminen hakkereiden käyttöön. Väärinkäytösten kohteena voi olla myös IoT-laitteiden paikannusominaisuus, jonka avulla ei halutut henkilöt saattavat päästä käsiksi sijaintietoihin sekä määrittää niiden avulla esimerkiksi kodin sijainnin. Näillä on merkittävä vaikutus IoT:n suosion leviämiseen. [4]

2.1 Bluetooth Low Energy

BLE on lyhyen kantaman kommunikointiin suunniteltu verkko. BLE-verkon on kehittänyt Bluetooth Special Interest Group (SIG). BLE on energiatehokkaampi versio yleisimmin tunnetusta Bluetooth -verkosta ja se on kehitetty ratkaisuksi ohjaus- ja monitorointisovelluksiin. BLE erosi aikaisemmin monesta muusta energiatehokkaasta verkkoteknologiasta sillä, että se ei käytä niin sanottua multihop -ratkaisua vaan käytössä on single-hop -ratkaisu [5]. Multihop- ja single-hop -ratkaisun ero on se, että single-hop:issa lähetetty paketti kulkee vain yhden päätelaitteen kautta päästäkseen vastaanottimeen. Multihop -ratkaisussa paketti kulkee kahden tai useamman päätelaitteen kautta päästäkseen päämääräänsä [6]. Bluetooth 5 -standardiin on lisätty multihop -ominaisuus [7]. BLE -teknologiaa hyödynnetään esimerkiksi terveydenhuollossa, kuluttajaelektronikassa, älykkäissä energiaratkaisuissa ja turvallisuussovelluksissa [5].

Kuten tavallinen Bluetooth, BLE koostuu kahdesta pääosasta: Controllerista ja Hostista. Controller sisältää fyysisen- ja siirtokerroksen ja ne on tyypillisesti toteutettu integroidulla radiolla pienelle System-on-Chip (SoC) -järjestelmäpiirille. Host pitää huolen prosessorin toiminnasta ja se sisältää ylemmän kerroksen toiminnollisuudet, kuten Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP), the Attribute Protocol (ATT), the Generic Attribute Profile (GATT), the Security Manager Protocol (SMP) and the Generic Access Profile (GAP). Kommunikaatio Controller:in ja Host:in välillä on standardisoitu Host Controller Interface (HCI) -standartiksi. Huolimatta siitä, että suurin osa BLE Controllerin ominaisuuksista ovat periytyneet klassisesta Bluetooth Controllerista, ovat ne silti yhteen sopimattomia. On odotettu, että useisiin laitteisiin tullaan toteuttamaan molemmat teknologiat [5]. Näitä laitteita kutsutaan ”dual-mode” -laitteiksi. On olemassa kahdenlaisia BLE Radio Frequency (RF) -kanavia: ”advertising channels” ja ”data channels”. Advertising -kanavia käytetään laitteiden etsimiseen, yhteyden luomiseen ja lähetyksien lähettämiseen. Data -kanavia käytetään yhdistettyjen laitteiden väliseen kaksisuuntaiseen viestintään. [5] Kuvassa 3 havainnollistetaan data- ja advertising -kanavia [8].



Kuva 3. Data- ja advertising -kanavat BLE:ssä

BLE määrittää laitteille kaksi roolia, niin sanotut isäntä (master)- ja renki (slave) -laitteet. Isäntä pystyy muodostamaan useita yhtäaikaista yhteyksiä eri renkien kanssa, mutta renki voi olla yhdistyneenä vain yhteen isäntään. Isäntä- ja renki -tyyppistä verkkoa kutsutaan Piconet -verkoksi [5]. Piconet -verkko tukee normaalisti kahdesta kahdeksaan laitetta. Piconet-verkossa yksi laite toimii isäntänä ja loput renkeinä. Renkit käyttävät isäntiä keskuksena, jonka kautta ne kommunikoivat keskenään [9]. Uusin Bluetooth spesifikaatio ei kuitenkaan enää säädi erillistä rajoitusta laitteiden määrälle Piconet-verkossa. Piconet-topologia muistuttaa muodoltaan tähtitopologiaa. [5]

BLE käyttää useita turvallisuutta parantavia ominaisuuksia kahden laitteen välisen tiedonsiirron salaukseen. Suurin osa BLE -turvallisuusominaisuuksista voidaan kuvata kahden turvallisuustilan LE Security Mode 1 ja LE Security Mode 2 avulla. BLE Link Layer käyttää salaukseen Cipher Block Chaining-Message Authentication Code (CCM) -algoritmia ja 128-bit AES block cipher -standardia. Näiden kuvailtujen ominaisuuksien lisäksi BLE tukee yksityisyyttä parantavaa toimintoa, joka antaa laitteelle mahdollisuuden käyttää yksityistä osoitetta ja mahdollisuuden osoitteen säännölliseen vaihtamiseen. [5]

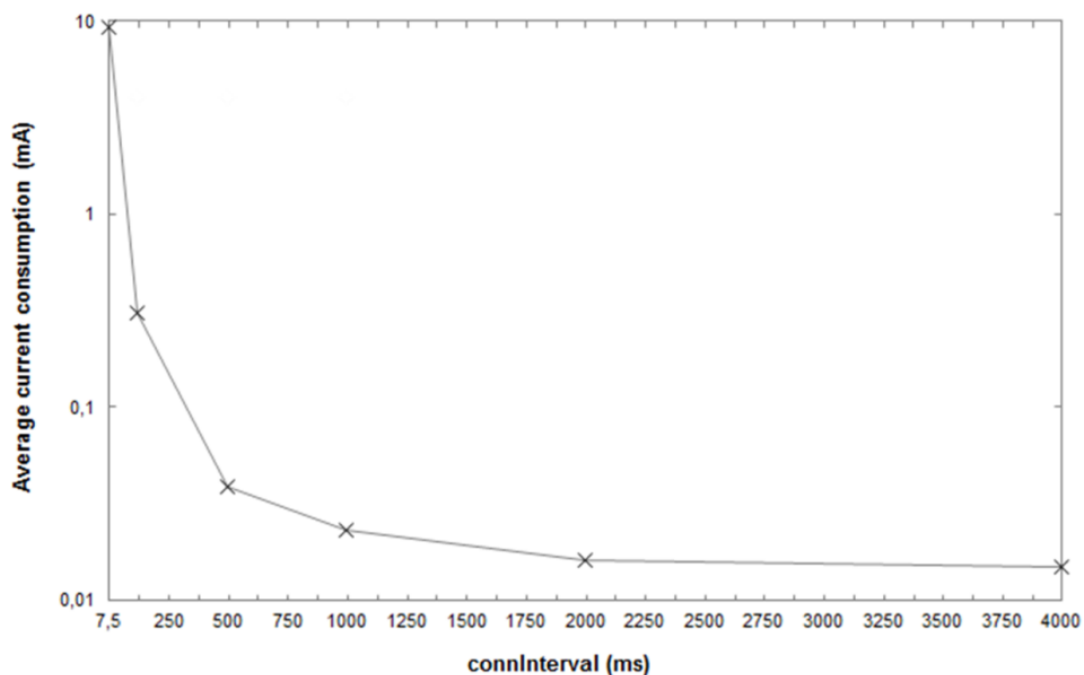
2.1.1 BLE spesifikaatiot

BLE tiedonsiirtonopeus oli Bluetooth 4.0 -standardissa 1 Mbit/s, mutta Bluetooth 5 -standardissa nopeus on 2 Mbit/s. BLE käyttää lähetystaajuutena 2.4 GHz Industrial Scientific Medical (ISM) -taajuusalue ja käytössä on neljäkymmentä kanavaa 2 MHz kaistanleveydellä. Verkkotopologia on Piconet -topologia, joka muistuttaa muodoltaan tähtitopologiaa. Lähetysteho vaihtelee -20 dBm ja 10 dBm välillä. Kantama BLE-verkolla Bluetooth 5:ssä nousi Bluetooth 4.0:aan verrattuna noin sadasta metristä kahteen sataan metriin ulkotiloissa ja sisätiloissa kahdestakymmenestä metristä neljäänkymmeneen metriin [5][10]. Viive pysyy alle 3ms:ssa [5]. Taulukossa 1 esitellään BLE -spesifikaatioita [5].

Taulukko 1. BLE -spesifikaatiot

Datansiirtonopeus	2 Mbit/s
Maksimi virrankulutus	10 mA
Kantama	40-200 m
Laitteiden maksimimäärä verkossa	Rajoittamaton

BLE virrankulutus määräytyy monen tekijän summana, mutta yksi parametri Connection Interval (*connInterval*) vaikuttaa eniten virrankulutukseen. Connection interval -parametri määrittää kahden lähetyksen välisen viiveen eli kuinka kauan laite odottaa seuraavan paketin lähetystä edellisen paketin lähetyksen jälkeen. ConnInterval -parametrin arvot voivat vaihdella välillä 7.5 ms ja 4000 ms. Mitä suurempi connInterval -parametri on, sitä pienempi on virrankulutuksen keskiarvo [5][11]. 3 voltin jännitteisellä 220 mAh paristolla laitteen maksimaalinen toiminta-aika 4000 ms connInterval -arvolla on 14.1 vuotta yhdensuuntaisella yhteydellä. Tällöin virrankulutus on mikroampeerien luokkaa. Lyhin akunkesto 7.5 ms connInterval -arvolla on 2 päivää, jolloin virrankulutus on noin 10 mA:n luokkaa. [5] Kuvaajassa 2 esitellään connInterval -parametrin vaikutusta BLE -virrankulutukseen [5].



Kuvaaja 1. BLE virrankulutuksen keskiarvot eri connInterval -parametrin arvoilla

Bluetooth 4.0- ja Bluetooth 5 -versiot eivät anna teoreettisia rajoituksia laitteiden määrälle verkossa. Yksi isäntä pystyy kuitenkin todellisuudessa tukemaan rajoitetun määrän laitteita Bluetooth 4.0:ssa. ConnInterval -parametri vaikuttaa myös renkien lukumäärään. 7.5 ms ConnInterval -arvolla renkien lukumäärä yhtä isäntää kohti on kahden ja yhdentoista laitteen välillä. Arvolla 4000 ms laitteiden teoreettinen lukumäärä voi olla noin 5900 laitetta yhdensuuntaisella yhteydellä. Esimerkiksi STMicroelectronics on ilmoittanut, että heidän BLE-laitteeseensa voidaan kytkeä maksimissaan kahdeksan renkityyppistä laitetta. Texas Instruments ilmoittaa, että renkityyppisten laitteiden maksimimäärä heidän laitteissansa riippuu käytössä olevasta integrated circuit (IC) -piirin keskusmuistista. Bluetooth 5 tukee rajoittamattoman määrän laitteita. [10][12]

2.2 ZigBee

ZigBee on langaton tiedonsiirtoteknologia, jossa on alhainen tiedonsiirtonopeus, matala teho ja se on erittäin kustannustehokas. ZigBee on suunnattu automaatioon ja etäohjaussovelluksiin. ZigBee Alliance yhdessä IEEE -komitean kanssa standardisoi IEEE 802.15.4 protokollan ja kehitti ZigBee -standardin. ZigBee tarjoaa mahdollisuuden sovelluksiin, joiden halutaan olevan pieni tehoisia ja kustannustehokkaita sekä akunkeston vaatimukset ovat useista kuukausista useisiin vuosiin. ZigBee:n avulla voidaan luoda suurempia mesh-verkkoja, kuin esimerkiksi Bluetoothilla. Ulkotiloissa ZigBee:n kantama on jopa 150 metriä, joka saavutetaan Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) -tekniikalla. DSSS -tekniikka kuluttaa vähemmän energiaa verrattuna Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) -tekniikkaan, jota käytetään esimerkiksi WLAN-verkoissa. [13].

ZigBee-laitetyypit jaetaan kahteen kategoriaan: Full Function Devices (FFD) ja Reduced Function Devices (RFD). FFD-laitteet voivat toimia jokaisessa laiteroolissa. Laiterooleja ovat koordinaattori (coordinator), reititin (router) ja päätelaite (end-device). Koordinaattori luo verkon ja määrittää verkon parametrit. Verkossa on aina tasan yksi koordinaattori. Reititin välittää dataa ja reitittimien avulla voidaan laajentaa verkon kantamaa. Päätelaite on kuten reititin, mutta yksinkertaisempi ja ei reititä dataa muille verkossa oleville laitteille. Reititin on yleensä paristo- tai akkukäyttöinen laite, kuten sensori tai kytkin. FFD -laite, kuten koordinaattori, on yleensä jatkuvassa aktiivisessa tilassa, joten se on usein kytkettynä verkkovirtaan. RFD-laite, kuten päätelaite, on yleensä lepotilassa ja käyttää virransäästöominaisuuksia. [13][14]

ZigBee käyttää 128-bittistä Advanced Encryption Standard (AES) -lohkosalausmenetelmää datan salaukseen. ZigBee:n myös ylläpitää listaa verkossa olevista luotetuista laitteista, joka mainitaan yhtenä turvallisuusominaisuutena [15].

2.2.1 ZigBee spesifikaatiot

ZigBee:n kantama on jopa 150 metriä ja tehonkulutus normaalisti 1 mW tai alle. ZigBee toimii maailmanlaajuisesti 2.4 GHz taajuudella, jossa sen tiedonsiirtonopeus on maksimissaan 250 kbit/s ja kanavia on käytössä kuusitoista. Euroopassa on myös käytössä 868 MHz taajuusalue, jossa maksiminopeus on 20 kbit/s ja kanavia on käytössä yksi. Pohjois-Amerikassa ja Australiassa on käytössä 915 MHz taajuusalue, jossa maksiminopeus on 40 kbit/s ja kanavia on käytössä kymmenen. IEEE 802.15.4 -standardi käyttää 64 bitin ja 16 bitin

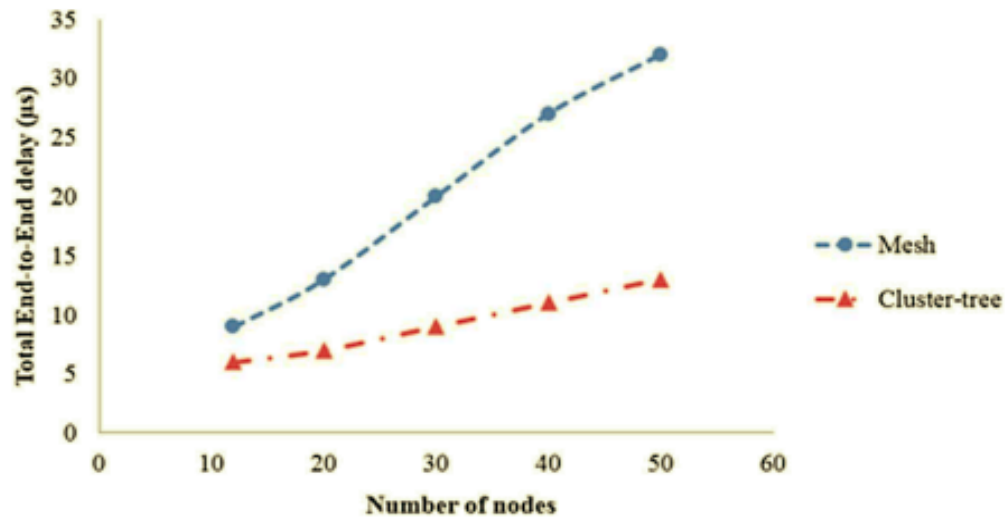
osoitteita, joten teoreettisesti IEEE 802.15.4 -standardi tukee 65000 solmupistettä verkossa. ZigBee -verkossa voi olla kuitenkin jopa 65335 laitetta ja ZigBee -laitteiden välimatka voi olla jopa 50 metriä. ZigBee:llä on näiden ominaisuuksien vuoksi kapasiteetti todella suurien verkkojen luomiseen. [14][16]

ZigBee tukee useita eri verkkotopologioita. Topologioita ovat muun muassa tähtitopologia (Star Topology), ”Cluster Tree” -topologia, mesh-topologia, vertaisverkkotopologia (Peer-to-Peer topology) ja ”Tree” -topologia [14][16]. Esimerkiksi tähtitopologiassa jokainen solmupiste on yksilöllisesti kytkettynä yhteen keskuslaitteeseen, kuten kytkimeen. Tähtitopologian etu on, että yhden yhteyden katkeaminen ei vaikuta muun verkon käyttöön [17]. Mesh-topologia on näistä topologioista joustavin. Mesh-topologiassa koordinaattori ja reititin pystyvät viestimään jokaiseen suuntaan. Yhden reitittimen sammussa verkko pystyy etsimään uuden reitin viestille. Vertaisverkkotopologia on näistä verkkotopologioista yksinkertaisin. ”Cluster tree” -topologia on vertaisverkkotopologian erikoistapaus, jossa suurin osa laitteista on reitittämiä ja mikä tahansa reitittimistä voi toimia koordinaattorina [16]. Koordinaattorin tehonkulutus todella alhaisella tiedonsiirtonopeudella voi mennä jopa alle 200 μ W. Normaalisti tehonkulutus vaihtelee 1 mW:n ja 10 mW:n välillä [18]. Virrankulutus vaihtelee lähetystilassa 25mA:n ja 35 mA:n välillä ja lepotilassa virrankulutus on noin 3 μ A [19].

Idealisessa tilanteessa ZigBee:n viive voi olla jopa vain kymmeniä mikrosekunteja. Viive ZigBee -verkossa riippuu esimerkiksi käytettävästä verkkotopologiasta ja laitteiden määrästä verkossa [20]. Taulukossa 2 esitellään ZigBee:n spesifikaatiot [14,16,19]. Kuvaajassa 2 on esitetty kahden eri topologian viive-ero [20]. Kuvassa 4 on esitetty ZigBee:n eri verkkotopologiat [16].

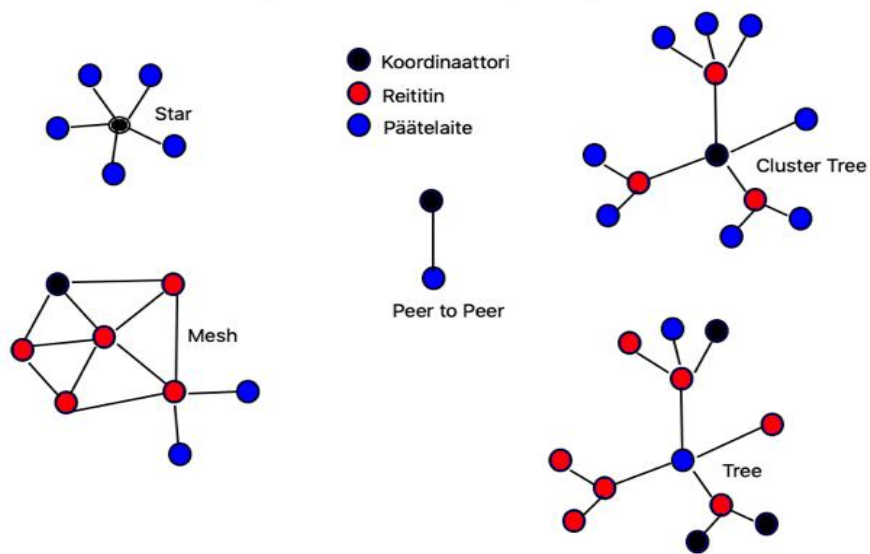
Taulukko 2. ZigBee:n spesifikaatiot

Tiedonsiirtonopeus	20-250 kbit/s
Maksimi virrankulutus	25-35 mA
Kantama	150 m
Laitteiden maksimimäärä verkossa	65 335



Kuvaaja 2. Viive kahdella eri verkkotopologialla.

ZigBee verkkotopologiat



Kuva 4. ZigBee verkkotopologiat.

2.3 Long Range Wide Area Network

LoRaWAN on pitkän kantaman kommunikointi protokolla ja arkkitehtuuri verkolle. LoRaWAN lukeutuu Low-power Wide Area Network (LPWAN) verkkoihin eli matalatehoisiin laajan kantaman verkkoihin. LPWAN verkot tarjoavat usean vuoden akunkeston. LPWAN on suunniteltu sensoreille ja sovelluksiin, jotka lähettävät pieniä määriä dataa, pitkän matkan päähän, muutamia kertoja tunnissa ja vaihtelevissa ympäristöissä. LoRaWAN käyttää lisenssivapaita ISM -taajuusalueita. [21]

LoRaWAN:issa verkon solmupisteitä (node) ei ole liitetty tiettyyn yhdyskäytävään (gateway). Sen sijaan solmupisteen kautta lähetetty data tyypillisesti vastaanotetaan useamman yhdyskäytävän kautta. Jokainen yhdyskäytävä lähettää eteenpäin päätesolmupisteeltä (end-node) vastaanotetun paketin pilvipohjaiseen serveriin, tyypillisesti jonkin runkoliitetyhteyden avulla, kuten Ethernet, WiFi tai mobiiliverkko. [21]

LoRaWAN solmupisteet ovat asynkronisia ja lähettävät valmiin datan joko ajatetusti tai jonkun tapahtuman liipaisemana. Tämän tyyppistä protokollaa kutsutaan tyypillisesti Aloha-menetelmäksi. Mesh-tyyppisessä verkossa tai synkronoidussa verkossa, kuten matkapuhelinverkko, solmupisteiden täytyy käynnistyä ja synkronisoida verkon kanssa sanoman tarkastamiseksi. Synkronoinnit kuluttavat huomattavan määrän energiaa ja huonontavat akunkestoja. LoRaWAN on noin viisi kertaa energiatehokkaampi kuin perinteinen GSM-verkko. [21]

LoRaWAN:illa on korkea verkkokapasiteetti eli se tukee suuria määriä laitteita. Korkea verkkokapasiteetti saavutetaan hyödyntämällä mukautuvaa tiedonsiirtonopeutta ja käyttämällä monikanavaista lähetinvastaanotin -järjestelmää yhdyskäytävissä, jolloin voidaan vastaanottaa viestejä useilta kanavilta samanaikaisesti. LoRa on hajaspektriin pohjautuva modulaatio, jonka signaalit ovat käytännössä kohtisuorassa toisiaan vastaan, kun LoRa:n Spreading Factor (SF)-parametri on säädetty oikein [21]. SF on lyhyesti niin sanotun chirp:in ajallinen pituus. Chirp on pulssi, jonka taajuus pyyhkäisee taajuuskaistan yli chirp -pulssin keston ajan. LoRa:n Spreading Factor vaihtelee seitsemän ja kahdentoista välillä. Arvolla SF 7 saadaan lyhin ilmassa vietetty lähetysaika ja arvolla SF 12 pisin ilmassa vietetty aika. Jokainen SF-askel kaksinkertaistaa lähetysajan samalle määrälle dataa. [22]

LoRaWAN soveltuu vastaanottamaan dataa samanaikaisesti samalle kanavalle useilla eri tiedonsiirtonopeuksilla. Jos solmupisteellä on voimakas yhteys ja solmupiste on lähellä yhdyskäytävää, ei ole tarvetta käyttää alhaisinta tiedonsiirtonopeutta, koska ei kannata tuhhlata

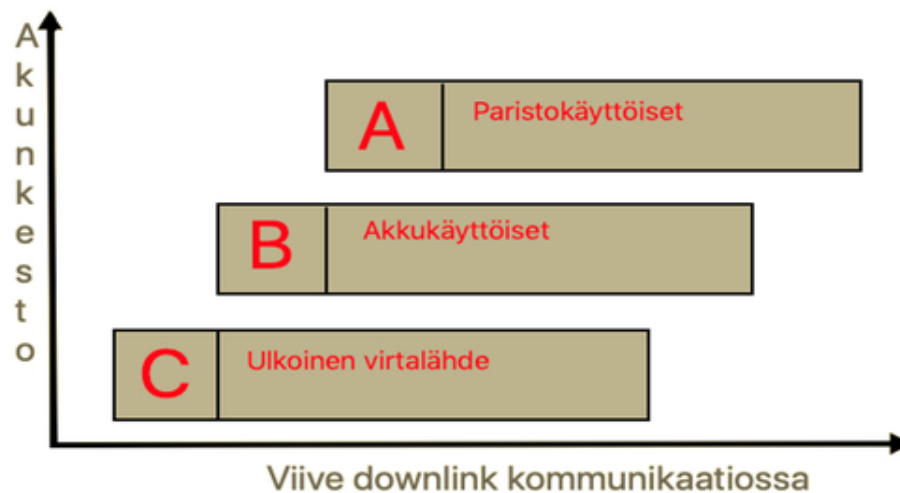
käytettävissä olevaa kaistaa yhtään sen kauemmin kuin tiedonsiirto lyhimmillään vaatii. Nostamalla tiedonsiirtonopeutta lähetysaika lyhenee ja samalla avautuu tilaa muille solmupisteille datan lähettämiseen. Mukautuva tiedonsiirtonopeus optimoi akunkestoa. Mukautuva tiedonsiirtonopeus vaatii symmetrisen up- ja downlink:in, joka myös mahdollistaa LoRaWAN:ille todella suuren kapasiteetin ja tekee verkosta skaalattavan. [21]

LoRaWAN hyödyntää kaksi kerroksista turvajärjestelmää. Verkolla ja sovelluksilla on molemmilla omat suojaukset. Verkkosuojaus takaa solmupisteiden turvallisuuden ja sovelluksien suojaus pitää huolen, että verkon ylläpitäjä ei pääse käsiksi käyttäjän tietoihin.

2.3.1 LoRaWAN spesifikaatiot

LoRaWAN:in tiedonsiirtonopeus vaihtelee välillä 250 bit/s – 50 kbit/s eli maksiminopeus vastaa 0.05 Mbit/s. Euroopassa on käytössä kymmenen kanavaa ja kaistanleveys on 125 kHz, 250 kHz tai 500 kHz. LoRaWAN käyttää lisenssivapaita ISM-taajuusalueita. Lähetystaajuutena on 867-869 MHz. Suomessa 800MHz taajuusalueelta on varattu kaistoja myös LTE-verkkojen käyttöön. LoRaWAN:in verkkotopologia on tähtitopologia. [21]

LoRaWAN:ille on määritelty kolme laiteluokkaa: luokka A, luokka B ja luokka C. Luokka A ja luokka B ovat yleensä paristo- tai akkukäyttöisiä, mutta luokka C on ulkoisella virtalähteellä. Luokka A:n laitteilla on oletuksena parhaat virransäästöominaisuudet. Luokka A lähettää ja vastaanottaa tietoa vain tietyillä ajastetuilla ajanhetkillä, luokan B laitteilla on useampia mahdollisuuksia tiedon lähettämiseen ja vastaanottamiseen kuin luokan A laitteilla. Luokan C laitteet voivat olla jatkuvasti lähetys- ja vastaanottovalmiudessa, koska niillä ei ole ongelmaa virran riittävyden kanssa. Luokan A laitteille on ilmoitettu kaksi energiansäästötilaa, ”Deep Sleep” ja ”Standby” [23]. Kuvaajassa 3 esitellään LoRaWAN:in akunkestoa ja sen säädettävyyttä eri tehonlähteillä [21].



Kuvaaja 3. LoRaWAN akunkesto

Taulukossa 3 on virrankulutuksen arvoja eri LoRaWAN -laitteille [24]. ”Sleep” -tilassa virrankulutus vaihtelee $2\mu\text{A}$ ja 34mA välillä. Lähetystilassa alhaisin virrankulutus on 23.9mA (2dBm lähetysteholla) ja korkein virrankulutus 133.4mA (20dBm lähetysteholla). Vastaanottotilassa arvot vaihtelevat 11mA ja 46mA välillä [24].

Taulukko 3. Virrankulutuksen arvoja taulukoituna eri LoRaWAN -laitteille

Laitteen tyyppi	Laitteen nimi	Lepo	Lähetys	Vastaanotto
Semtech SX1272	LoRaWAN Multitech mDot	$2\text{-}40\ \mu\text{A}$	$26\text{-}41\ \text{mA}$	$11\text{-}12\ \text{mA}$
Semtech SX1272	NetBlocks XRange	$70\ \mu\text{A}$	$109\ \text{mA}$	$20\ \text{mA}$
Microchip RN2483	Microchip RN2483 LoRa mote	$3.4\ \text{mA}$	$38.9\text{-}47.9\ \text{mA}$	$14.2\text{-}17.2\ \text{mA}$
Microchip RN2483	Custom 1	-	$23.9\text{-}38.5\ \text{mA}$	-
Microchip RN2483	Custom 2	$24\ \text{mA}$	$70\ \text{mA}$	$46\ \text{mA}$
Semtech SX1276	Custom 3	$0.17\ \text{mA}$	$46\text{-}103\ \text{mA}$	$14\ \text{mA}$
Semtech SX1276	LoRaBug	$3.7\ \text{mA}$	$120.7\ \text{mA}$	$16.6\ \text{mA}$
Hope RF HM-TLRR-LF/HPS	iLoad (custom)	$7.66\ \mu\text{A}$	$133.3\ \text{mA}$	$16.3\ \text{mA}$

LoRaWAN:in viive on pienimmällä SF-arvolla SF7 todella pienille kymmenen bitin paketeille

on noin 40ms. Mitä suuremmaksi SF-arvo kasvatetaan, niin sitä pidemmäksi viive kasvaa [25]. LoRaWAN:in kantama on kaupunkialueella 2-5 km ja maaseudulla jopa yli 15 km [25]. LoRaWAN:in vahvuus on, että se tukee suurta määrää laitteita verkossa. Taulukossa 4 on esitetty laitteiden maksimimäärää LoRaWAN -verkossa [26].

Taulukko 4. Laitteiden maksimimäärä verkossa eri skenaarioissa

Skenaario	maksimimäärä	Optimaalinen määrä
Tieviitat	15 928	2 930
Liikennevalot/sensorit	34 715	6 385
Kotisovellukset	39 778 804	7 316 902
Maksulaitteet	568 140	104 504
Kodinturva	208 775	38 402

Laitteiden maksimimäärä verkossa riippuu sovelluksesta missä verkkoa halutaan hyödyntää, lähetettävien viestien määrästä, viestin koosta, kaistanleveydestä ja käytettävien kanavien lukumäärästä [26]. Taulukossa 5 esitellään LoRaWAN -verkkojen spesifikaatioita [21,24][25, [26].

Taulukko 5. LoRaWAN spesifikaatiot

Tiedonsiirtonopeus	0.25-50 kbit/s
Maksimi virrankulutus	26-133.4 mA
Kantama	>10 km
Laitteiden maksimimäärä verkossa	39 778 804

2.4 Narrowband IoT

Kuten LoRaWAN, myös NB-IoT kuulu LPWAN -kategoriaan eli matalatehoisiin pitkän kantaman verkkoihin. Kyseiset teknologiat ovat optimoitu IoT-laitteiden tarpeita ajatellen. Teknologioiden vahvuutena ovat edullisuus, pieni energian kulutus ja sopivuus pienten datamäärien siirtoon. Heikkoutena on, että teknologiat ovat yleensä yhden yrityksen hallussa, komponenttien valmistajia on rajallinen määrä tai verkkojen kattavuus on puutteellinen. NB-IoT on kehitetty ratkaisemaan nämä ongelmat. NB-IoT eroaa LoRaWAN:ista siinä, että LoRaWAN käyttää lisenssivapaita ISM-taajuusalueita, mutta NB-IoT toimii lisensoituilla matkapuhelinverkon taajuuksilla. [27]

NB-IoT standardisoitiin 3rd Generation Partnership Project (3GPP) kolmannessatoista julkaisussa vuonna 2015. NB-IoT käyttää kännykkäverkkoihin pohjautuvaa tekniikkaa ja se voidaan tuoda nykyisiin 4G-tukiasemiin pelkällä ohjelmistopäivityksellä. Tämän vuoksi verkon kattavuutta on helppo lisätä nopeasti ja edullisesti [27]. Tässä työssä ei tutkita NB-IoT:ta vastaavaa, mutta tehokkaampaa LTE-M -verkkoa, koska sitä ei juurikaan ole tällä hetkellä tarjolla suomalaisilla matkapuhelinoperaattoreilla.

NB-IoT -teknologia on integroitu 4G-standardiin, mutta on haluttu pitää mahdollisimman yksinkertaisena, jolloin laitteiden hinnat ja energiankulutus on saatu mahdollisimman alhaisiksi. Samalla on kuitenkin menetetty joitain LTE-standardissa olevia ominaisuuksia, kuten kahdensuuntainen yhteys ja tukiasemien kaistanleveyksien yhdistäminen eli niin sanottu ”carrier aggregation”. [28]

NB-IoT käyttää samoja lisensoituja taajuuskaistoja ja samaa Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) -modulaatiota kuin 4G LTE. Downlink käyttää Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)-menetelmää ja kahtatoista 15kHz levyistä alikantoaaltoa. OFDM-menetelmässä tiedonsiirto tapahtuu lukuisilla toisiaan häiritsemättömillä kanavilla yhtä aikaa. Uplink käyttää Single-Carrier frequency-division multiplexing access (SC-FDMA) -menetelmää 3,75kHz välein 15kHz apukantoaalloilla. SC-FDMA:ssa eli yksinkertaisessa radiotien kanavanvaraustekniikassa käytettävä taajuusalue jaetaan osa-alueisiin, joissa tiedonsiirto tapahtuu. [28]

NB-IoT:ssa synkronointi tapahtuu harvoin mutta säännöllisesti, joka hieman lisää energiankulutusta. OFDM ja FDMA vuoksi NB-IoT vaatii suuremman huippuvirran kuin vastaava LPWAN-teknologia LoRaWAN. LoRaWAN:iin verrattuna NB-IoT tarjoaa lyhyemmän viiveen ja suuremman tiedonsiirtonopeuden. [28]

2.4.1 NB-IoT spesifikaatiot

NB-IoT käyttää samoja taajuuskaistoja kuin LTE eli 800- ja 1800 MHz taajuuksia. Kaistanleveys on 180 kHz, joka on jaettu kahteentoista 15 kHz levyiseen kaistaan [28]. NB-IoT:n kapea kaista voi olla käytössä 4G-verkossa kolmella eri tavalla. Kaista voi olla jo käytössä olevien 4G-taajuuksien seassa (in-band). Toinen vaihtoehto on, että kaista on niin sanotuilla varokaistoilla (guard-band). Kolmas vaihtoehto on, että kaista sijoitetaan kokonaan omalle taajuusalueelleen (stand-alone). [29] Kuvassa 5 esitellään NB-IoT:n kaistan kolme mahdollista sijaintia [30].



Kuva 5. NB-IoT:n kaistan kolme mahdollista sijaintia

Tiedonsiirron maksiminopeus downlink:issä on 234.5 kbit/s ja uplink:issä 204.8 kbit/s. Maksimi virrankulutus vaihtelee 120mA:n ja 300 mA:n välillä ja virrankulutus lepotilassa on

5 μ A. Alhaisen tehonkulutuksen vuoksi akunkesto on yleisesti noin kymmenen vuotta [28]. Viiveeseen vaikuttaa todella usea tekijä, muun muassa etäisyys, tiedonsiirtonopeus ja yhteyden voimakkuus. NB-IoT on kuitenkin suunniteltu saavuttamaan alle 10 sekunnin viive sovelluksessa, jossa lähetetään esimerkiksi hälytyssignaali. [31]

Downlink:in lähetysteho on 46 dBm ja uplink:in lähetysteho on 23 dBm [32]. 3GPP kolmannessatoista julkaisussa NB-IoT:n kapasiteetiksi ilmoitettiin 6×10^4 laitetta kilometriä kohden ja neljännessätoista julkaisussa ilmoitettiin 5G:n avulla kapasiteetiksi 6×10^6 laitetta neliökilometriä kohden [33]. Yksi solu tukee noin 55000 laitetta [28].

NB-IoT:lla on 20 dB suurempi linkkibudjetti verrattuna perinteiseen 4G-yhteyteen, joten NB-IoT:lla on parempi kuuluvuus varsinkin maan alla ja sisätiloissa [29]. Kuuluvuus NB-IoT -verkolla on rajattu melko pitkälti 4G-verkon kuuluvuuteen, mutta suuremman linkkibudjetin vuoksi kantama NB-IoT -verkolla on kaupunkialueella noin yhden kilometri ja maaseudulla noin kymmenen kilometriä [34]. Taulukossa 9 on esitetty NB-IoT spesifikaatiot [28,34].

Taulukko 6. NB-IoT -spesifikaatiot

Tiedonsiirtonopeus	234.7 kbit/s
Maksimi virrankulutus	120-300 mA
Kantama	~ 10 km
Laitteiden maksimimäärä verkossa	55 000

3 VERKKOTEKNOLOGIOIDEN VERTAILU

Aikaisemmissa kappaleissa keskityttiin tutkimaan neljän eri IoT-verkkoteknologian toimintaperiaatteita ja spesifikaatioita. Tässä kappaleessa tutkitaan kyseisten teknologioiden soveltuvuutta, esimerkiksi anturidatan keräämiseen ja laitteiden etäohjaamiseen sellaisessa sovelluksessa, jossa täytyy pystyä lähes reaaliaikaisesti lähettämään ja vastaanottamaan dataa sekä monitoroimaan antureiden ja laitteiden tilaa.

LoRaWAN:in heikkoutena voidaan pitää lisenssivapaiden taajuusalueiden käyttöä, koska niille on säännelty Euroopassa 25mW:n suurin sallittu lähetysteho ja 1 % hyötyaika. Maksimissaan 1 % hyötyaika tarkoittaa sitä, että laite saa aktiivisesti käyttää kyseistä taajuutta vain yhden prosentin verran ajasta [29]. Näiden rajoitusten vuoksi LoRaWAN soveltuu vain sovelluksiin, joissa lähetetään pieni määrä dataa esimerkiksi muutamia kertoja päivässä. LoRaWAN:in pitkä kantama tekee siitä kuitenkin hyödyllisen moniin sovelluksiin, joissa etäisyys on suuri, mutta kuitenkin ei tarvita lähes reaaliaikaista yhteyttä. LoRaWAN:in virrankulutus on lähetys- ja vastaanottotilassa pieni ja lepotilassa minimaalinen, joten näiden ominaisuuksien vuoksi LoRaWAN on soveltuva sovellukseen, jossa vaaditaan äärimmäistä akunkestoa.

NB-IoT, BLE ja ZigBee soveltuvat kaikki lähes reaaliaikaiseen tiedon lähettämiseen ja vastaanottamiseen sekä reaaliaikaiseen monitorointiin. BLE on tutkittavista teknologioista kärkinimi tiedonsiirtonopeudessa. BLE:n tiedonsiirtonopeus on lähes kahdeksankertainen verrattuna ZigBee:n ja NB-IoT:in maksimi tiedonsiirtonopeuksiin.

BLE:n kantama on noin 200 metriä ulkotiloissa ja 40 metriä sisätiloissa, joka on verrattain lyhyt sisätiloissa verrattuna muihin työssä tutkittuihin sovelluksiin. ZigBee:n kantama on jopa 150 metriä ja NB-IoT:n kantama on jopa yhden kilometrin kaupunkialueella ja maaseudulla noin 10 kilometriä. BLE on tasavertainen vertailussa laitteiden maksimimäärästä verkossa ZigBee:n ja NB-IoT:n kanssa. STMicroelectronics:in ilmoittama kahdeksan renkilaitetta yhtä isäntää kohden Bluetooth 4.0:ssa on vähän verrattuna NB-IoT:n 55000 laitteeseen solua kohden, mutta Bluetooth 5 -spesifikaatio tukee rajoittamattoman määrän laitteita, jolloin BLE tukee vähintään yhtä paljon laitteita kuin NB-IoT ja ZigBee. ZigBee tukee 65335 laitetta verkossa.

BLE:n virrankulutus on kuitenkin näistä kolmesta kaikkein pienin. Maksimi virrankulutus BLE:llä on noin kolme kertaa pienempi kuin ZigBee:llä ja noin 10 kertaa pienempi kuin NB-IoT:lla. BLE soveltuu sovelluksiin, jossa halutaan pitkää akunkestoa. BLE:llä saadaan

siirrettyä suurikin määrä dataa nopeasti, jolloin se on optimaalinen sovelluksiin, jossa käsiteltävä datamäärä on suurehko.

Tutkittavista teknologioista jäljelle vielä jää NB-IoT ja ZigBee. ZigBee:n heikkoutena voidaan pitää, että ZigBee:lle ei löydy valmiita kaupallisia verkkoja, vaan halutut verkot täytyy rakentaa itse. NB-IoT on integroituna 4G-tukiasemiin, joten verkon saa hankittu kuukausimaksulla teleoperaattoreilta. ZigBee:lle on kuitenkin saatavilla valmiita kotiautomaatiopaketteja ja järjestelmiä on helppo laajentaa kaupoista saatavilla lisäosilla. Näiden ominaisuuksien vuoksi ZigBee-verkko on helppo rakentaa esimerkiksi omaan kotiin. NB-IoT:n heikkous on, että se ei toimi siellä, missä ei ole matkapuhelinverkkoja tai 4G-yhteyksiä. NB-IoT:n virrankulutus on myös noin neljäkertainen suurempi kuin ZigBee:n virrankulutus. NB-IoT pystyy kymmenen vuoden akunkestoon, jos lähetettävän datan määrä keskiarvoltaan on noin 200 bittiä päivässä [34].

Näiden kahden teknologian väliltä valittaessa valinta riippuu melkein ainoastaan kuuluvuudesta ja hinnasta. Operaattoreille lisensoitujen taajuusalueiden käyttö voi maksaa jopa 500 miljoonaa dollaria MHz:ltä. NB-IoT:n päivittäminen jo olemassa oleviin LTE-tukiasemiin voi maksaa 15000 dollaria kappaleelta. Kuluttajalle nämä hinnat näkyvät kuukausimaksuina, jota kuluttaja maksaa matkapuhelinoperaattorille NB-IoT -verkon käyttöoikeudesta. [35]

ZigBee:ssä kuluttaja maksaa vain ostamastaan laitteesta, mutta ei kuukausittaisia liittymämaksuja.

Molemmilla teknologioilla tiedonsiirtonopeudet ovat melkein samat. Maailmanlaajuista 2.4 GHz taajuusaluetta käyttäessä ZigBee:n maksimi tiedonsiirtonopeus on 250 kbps. Euroopassa on myös käytössä 868 MHz alue, jossa maksimi tiedonsiirtonopeus on vain 20 kbps. NB-IoT:lla maksimi tiedonsiirtonopeus on aina 250 kbps. Teknologiat tukevat melkein yhtä paljon laitteita verkossa. ZigBee tukee teoreettisesti noin 10000 laitetta enemmän kuin NB-IoT, mutta se ei ole NB-IoT:n kannalta rajoittava tekijä.

ZigBee:llä viive on todella paljon lyhyempi kuin NB-IoT:lla. Ihanteellisessa tilanteessa ZigBee:n viive on vain muutamia kymmeniä mikrosekunteja, kun taas NB-IoT on suunniteltu toteuttamaan alle kymmenen sekunnin viive. Molemmissa teknologioissa viiveeseen vaikuttaa todella moni tekijä, esimerkiksi laitteiden määrä verkossa, ympäristö ja lähetettävän datan määrä.

NB-IoT:ta voidaan hyödyntää siellä, missä matkapuhelinverkkojen kuuluvuus on hyvä ja missä ei vaadita todella lyhyttä viivettä. ZigBee toimii oman kantaman kokoisella alueella

missä tahansa, minne on rakennettu ZigBee-verkko käyttämällä kaupasta ostettavia laitteita. ZigBee:n kantamaa voidaan laajentaa helposti lisäämällä verkkoon reitittimiä.

NB-IoT:tä voidaan käyttää sen kuuluvuusalueella, mutta ZigBee:n ominaisuudet vastaavat NB-IoT:n ominaisuuksia ja ZigBee-verkko on helppo rakentaa myös sinne, missä NB-IoT ei toimi. NB-IoT:n toimiessa lisensoituilla taajuusalueilla ei sitä voi tavallinen kuluttaja rakentaa omaan käyttöönsä ZigBee on täten sopiva teknologia reaaliaikaiseen anturidatan keräämiseen ja laitteiden etäohjaukseen silloin, kun ei toimita NB-IoT:n kuuluvuusalueella BLE on toinen teknologia, jota voidaan hyödyntää silloin, kun NB-IoT ei toimi. BLE-verkkoa voidaan hyödyntää myös silloin, kun ollaan NB-IoT:n kuuluvuusalueella, koska BLE:llä saavutetaan tutkituista teknologioista suurin tiedonsiirtonopeus. Taulukossa 7 on esitetty jokaisen työssä tutkitun teknologian neljä tärkeintä ominaisuutta.

Taulukko 7. Laitteiden tärkeimmät ominaisuudet

Spesifikaatio	BLE	ZigBee	LoRaWAN	NB-IoT
Tiedonsiirtonopeus	2 Mbit/s	20-250 kbit/s	0.25-50 kbit/s	234.7 kbit/s
Maksimi virrankulutus	10 mA	25-35 mA	26-133.4 mA	120-300 mA
Kantama	40-200 m	150 m	>10 km	~ 10 km
Laitteiden maksimimäärä verkossa	Rajoittamaton	65 335	39 778 804	55 000

4 YHTEENVETO

Kandidaatintyössä vertailtiin neljän eri teknologian ominaisuuksia keskittyen teknologioiden datansiirtonopeuteen, energiatehokkuuteen, viiveeseen, verkkotopologiaan ja laitteiden enimmäismäärään verkossa. Työn perimmäinen tarkoitus oli löytää sopivin teknologia sellaiseen sovellukseen, joka soveltuu anturidatan keräämiseen ja laitteiden etäohjaukseen internetin kautta lähes reaaliaikaisesti. Työssä pyrittiin myös saavuttamaan ymmärrys siihen, että mitä IoT tarkoittaa ja mitkä ovat sen käyttökohteet. Työssä tutkitut teknologiat olivat Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN ja Narrowband-IoT. Kappaleessa 2. perehdyttiin hieman myös muihin tunneimpiin IoT-verkkoteknologioihin, kuten WiFi, NFC ja RFID.

IoT eli esineiden Internet tarkoittaa mitä tahansa laitetta tai esinettä, joka lähettää tietoa, vastaanottaa tietoa tai tekee molempia. IoT on teknologiat, standardit ja sovellukset, jotka mahdollistavat laitteiden välisen verkossa tapahtuvan viestinnän. IoT mahdollistaa tulevaisuudessa älykkäämmän maailman esimerkiksi älykkäiden anturien keräämän datan avulla.

IoT-verkkoteknologiat ovat perusta IoT-teknologioille. IoT-verkot luovat alustan esineiden ja laitteiden väliseen kommunikaatioon. Työssä tutkittavat teknologiat olivat Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN ja NB-IoT. Kappaleissa 2.1, 2.2, 2.3. ja 2.4. esiteltiin teknologiat ja niiden perustoimintatavat. Kappaleissa 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1. ja 2.4.1. pureuduttiin teknologioiden ominaisuuksiin ja spesifikaatioihin.

Kappaleessa 3. suoritettiin varsinainen vertailu neljän eri teknologian välillä. Teknologioita vertailtiin sen perusteella mihin sovellukseen teknologia soveltuu parhaiten ja miten se soveltuu anturidatan keräämiseen ja laitteiden etäohjaukseen internetin yli lähes reaaliaikaisesti. Tutkimuksen tulokseksi saatiin, että LoRaWAN ei ole ideaali teknologia, mikäli laitteita halutaan ohjata reaaliaikaisesti ilman viivettä. LoRaWAN:in toiminta lisenssivapailta ISM-taajuusalueilla osoittautui ongelmaksi, koska näiden taajuusalueiden käyttöä ja maksimi lähetystehoja rajoitetaan Euroopassa. BLE osoittautui sopivaksi teknologiaksi sellaiseen sovellukseen, joka vaatii nopeaa tiedonsiirtonopeutta. Se soveltuu hyvin myös tutkielmassa esiteltyyn sovellukseen.

Vertailussa todettiin, että ZigBee:n ja NB-IoT:n ominaisuudet eroavat hyvin vähän toisistaan. ZigBee:n pienempi virrankulutus ja toiminta myös siellä, missä NB-IoT ei toimi, tekee siitä sopivan teknologian anturidatan keräykseen ja laitteiden etäohjaukseen silloin, kun NB-IoT ei toimi.

Täten NB-IoT, ZigBee, BLE, sekä varauksin myös LoRaWAN, sopivat kaikki kyseisen sovelluksen toteuttamiseen riippuen vain siitä, että mitä ominaisuuksia sovellukselta halutaan. Jos halutaan pitkää kantamaa, silloin NB-IoT on sopiva teknologia sovellukseen. Jos halutaan suurta tiedonsiirtonopeutta, silloin BLE on sopiva teknologia sovellukseen. ZigBee:tä voidaan hyödyntää, kun halutaan varmatoiminen ja kuluttajan kannalta helposti laajennettavissa oleva verkko IoT-sovelluksiin.

5 LÄHDELUETTELO

- [1] The Internet of Things (IoT) – essential IoT business guide. (luettu 04.02.2019)
URL: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/>
- [2] Coetzee, L. and Eksteen, J. « The Internet of Things – promise for the future? An introduction, » 2011 IST-Africa Conference Proceedings, Gaborone, 2011, pp. 1-9.
- [3] Mahmoud, M. and Mohamad, A. (2016) A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications. (luettu 7.2.2019) *Advances in Internet of Things*, 6, 19-29. doi: 10.4236/ait.2016.62002.
- [4] Parashar, R. (2016). Security and privacy issues in internet of things. *Global Sci-Tech*, 8(4), 233. doi:10.5958/2455-7110.2016.00026.4
- [5] Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. (2012). Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, 12(9), 11734-11753.
- [6] Single Hop vs Multi Hop-Difference between Single Hop and Multi Hop (luettu 21.2.2019) URL: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Single-Hop-vs-Multi-Hop.html>
- [7] Leonardi, L., Patti, G., & Bello, L. L. (2018). Multi-Hop Real-Time Communications Over Bluetooth Low Energy Industrial Wireless Mesh Networks. *IEEE Access*, 6, 26505-26519
- [8] Tosi, Jacopo & Taffoni, Fabrizio & Santacatterina, Marco & Sannino, Roberto & Formica, Domenico. (2017). Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review. *Sensors*. 17. 2898. 10.3390/s17122898
- [9] Christensson, P. (2008). *Piconet Definition*. (luettu 25.02.2019), from <https://techterms.com>
- [10] Collotta, M., Pau, G., Talty, T., & Tonguz, O. K. (2018). Bluetooth 5: A concrete step forward toward the IoT. *IEEE Communications Magazine*, 56(7), 125-131
- [11] Understand BLE connection intervals and events in under 5 minutes. (luettu 26.02.2019) URL: <https://www.novelbits.io/ble-connection-intervals/>

- [12] Tosi, J., Taffoni, F., Santacatterina, M., Sannino, R., & Formica, D. (2017). Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17(12), 2898. doi:10.3390/s17122898
- [13] Ergen, S. C. (2004). ZigBee/IEEE 802.15. 4 summary. *UC Berkeley, September, 10*, 17.
- [14] Chellappa, Muthu & Madasamy, Shanmugaraj & Prabakaran, R. (2011). Study on ZigBee technology. 297-301. 10.1109/ICECTECH.2011.5942102.
- [15] Ahamed, S. S. (2009). The role of zigbee technology in future data communication system. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 5(2)
- [16] Hammoshi, M & Sayed, Awany. (2014). An analysis for a cluster tree Zigbee topology. 64. 674-680.
- [17] Star topology. (luettu 20.02.2019) URL: <http://www.telecomabc.com/s/star.html>
- [18] Kohvakka, M., Kuorilehto, M., Hännikäinen, M., & Hämäläinen, T. D. (2006). Performance analysis of IEEE 802.15. 4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications. Paper presented at the *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks*, 48-57.
- [19] Asaduzzaman, A., Chidella, K. K., & Mridha, M. F. (2015, April). A time and energy efficient parking system using zigbee communication protocol. In *SoutheastCon 2015* (pp. 1-5). IEEE.
- [20] Moridi, M. A., Kawamura, Y., Sharifzadeh, M., Chanda, E. K., Wagner, M., & Okawa, H. (2018). Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 201-209.
- [21] Liebman, D., & Porter, L. (2012). A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. Lanham, Md: Scarecrow Press.

- [22] Data Rate and Spreading Factor. (luettu 19.02.2019) URL: https://docs.exploratory.engineering/lora/dr_sf/
- [23] Cheong, Phui San & Bergs, Johan & Hawinkel, Chris & Famaey, Jeroen. (2017). Comparison of LoRaWAN Classes and their Power Consumption. 10.1109/SCVT.2017.8240313.
- [24] Casals, L., Mir, B., Vidal, R., & Gomez, C. (2017). Modeling the energy performance of LoRaWAN. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17(10), 2364. doi:10.3390/s17102364
- [25] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34-40.
- [26] Mikhaylov, K., Petaejaevaervi, J., & Haenninen, T. (2016). Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. Paper presented at the *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, 1-6.
- [27] Mikä juttu NB-IoT oikein on? Miksi se olisi kiinnostavaa? (luettu 26.3.2019) URL: <https://www.unseen.fi/blogi/mika-juttu-nb-iot-oikein-on-miksi-se-olisi-kiinnostava/>
- [28] Sinha, R. S., Wei, Y., & Hwang, S. (2017). *A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT* doi://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004
- [29] Järvinen, J. (2017). IoT-verkkoteknologioiden vertailu.
- [30] Devopedia. 2018. "NB-IoT." Version 8, November 28. Accessed 2019-05-03. <https://devopedia.org/nb-iot>
- [31] Wang, Y. E., Lin, X., Adhikary, A., Grövlén, A., Sui, Y., Blankenship, Y., . . . Razaghi, H. S. (2016). A primer on 3GPP narrowband internet of things (NB-IoT). *arXiv Preprint arXiv:1606.04171*,
- [32] Adhikary, A., Lin, X., & Eric Wang, Y. -. (2017). Performance evaluation of NB-IoT coverage. Paper presented at the *IEEE Vehicular Technology Conference*, doi:10.1109/VTCFall.2016.7881160

- [33] Høglund, A., Lin, X., Liberg, O., Behravan, A., Yavuz, E. A., Van Der Zee, M., . . . Eriksson, D. (2017). Overview of 3GPP release 14 enhanced NB-IoT. *IEEE Network*, 31(6), 16-22. doi:10.1109/MNET.2017.1700082
- [34] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment* doi://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005
- [35] Schmidbauer, H., Lora Alliance (2016) NB-IoT vs LoRa Technology