

Langattomat likiverkkotekniikat kotitalouksissa
Wireless personal area networks in households
Juuso Siltala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Juuso Siltala

Langattomat likiverkkotekniikat kotitalouksissa

2021

Kandidaatintyö.

30 s.

Tarkastaja: TkT Antti Kosonen

Ohjaajat: Kimmo Huoman, Toni Naukkarinen

asia-/hakusanat: likiverkkotekniikka, tiedonsiirto, iot, langaton

Tässä kandidaatintyössä tutustuttiin erilaisiin likiverkkotekniikoihin, joita voidaan käyttää kotitalouksissa langattomaan tiedonsiirtoon laitteiden välillä *Wireless Local Area Network* (WLAN) eli langattoman lähiverkon rinnalla. Työn tavoitteena oli vertailla tekniikoita keskenään niiden *Open Systems Interconnection Reference Model* (OSI)-mallin fyysisen ja *Medium Access Control* (MAC)-tason ominaisuuksien sekä tekniikoiden hintojen suhteen, ja selvittää mikä näistä sopisi parhaiten RS-485 sarjaliikenneväylän korvaajaksi.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja tutkittavien tekniikoiden lisäksi syvennyttiin myös tekniikoita koskeviin standardeihin, likiverkkojen erilaisiin topologioihin, signaalien vaimenemiseen, sarjakommunikointiin ja interferenssiin *Industrial, Scientific, Medicine* (ISM)-taajuusalueilla.

Työssä huomattiin, että 868 MHz taajuusalueita käyttävät tekniikat vaimenevat vähemmän väliaineessa, ja ne häiriintyvät vähemmän kotitalouksista usein jo löytyvistä WLAN-reitittimistä, jotka toimivat 2,4 GHz taajuusalueella. Korkeammalla 2,4 GHz taajuusalueella kuitenkin saavutetaan paljon suurempi tiedonsiirtonopeus.

Tiedonsiirtonopeudelta nopeimpia tekniikoita olivat Bluetooth Basic Rate, ja Bluetooth Enhanced Data Rate, ja hitaimpia olivat 868 MHz taajuusalueita käyttävä Zigbee sekä Lora. Mesh-topologian huomattiin olevan toimintavarmin, koska sitä käytettäessä verkko pystyy parantamaan itseään, jos jokin laite tippuu verkosta. Lisäksi sen avulla tietoa voidaan reitittää esteiden ympäri.

Tekniikoiden käyttöönoton kustannuksia selvitettiin jakamalla niitä ylläpitävien järjestöjen pienin mahdollinen jäsenmaksu ja vaadittavan sertifiointiprosessin hinta 1000 laitteen erälle. Kalleimmaksi tekniikaksi osoittautui Z-Wave, ja edullisimmaksi EnOcean, mutta tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska kaikkien tekniikoiden sertifiointiprosessin hintoja ei saatu selvitettyä.

Työn tuloksena todettiin, että mikä vain tekniikka käy RS-485 väylän korvaajaksi, jos tiedonsiirtotarve on tarpeeksi pieni. Langattomilla likiverkkotekniikoilla ei kuitenkaan päästä yhtä nopeaan tiedonsiirtonopeuteen, kuin langallisella RS-485:llä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Juuso Siltala

Wireless personal area networks in households

2021

Bachelor's Thesis.

30 p.

Examiner: D.Sc. Antti Kosonen

Instructors: Kimmo Huoman, Toni Naukkarinen

In this bachelor's thesis, various personal area network technologies that can be used in households for wireless data transmission between devices alongside *Wireless Local Area Network* (WLAN) were introduced. The aim of the work was to compare the technologies with respect to the physical and *Medium Access Control* (MAC)-level features of the *Open Systems Interconnection Reference Model* (OSI)-model and the prices of the technologies, and to find out which of these would be the most suitable as a replacement for the RS-485 serial communication bus.

The work was carried out as a literature review and in addition to the technologies under study, we also delved into standards of these technologies, different topologies of personal area networks, signal attenuation, serial communication and interference in the *Industrial, Scientific, Medicine* (ISM)-frequency bands.

The work found that technologies using the 868 MHz band are less attenuated in the medium and interfere less with WLAN-routers, which are often already found in households and use 2,4 GHz band. However, in the higher 2,4 GHz frequency range, a much higher data rate is achieved.

In terms of data transfer speeds, the fastest technologies were Bluetooth Basic Rate, and Bluetooth Enhanced Data Rate, and the slowest were Zigbee using the 868 MHz frequency band, as well as Lora. The mesh-topology was found to be the most reliable because when used, the network is able to heal itself if a device drops out of the network. In addition, it allows information to be routed around obstacles.

The costs of implementing these technologies were determined by dividing the minimum possible membership fee of the organizations maintaining them and the cost of the required certification process for a batch of 1000 devices. Z-Wave proved to be the most expensive technology, and EnOcean the cheapest, but the results are not fully comparable because the prices of the certification process could not be determined with all technologies.

As a result of the work, it was found that any technology can replace the RS-485 bus if the need for data transfer is small enough. However, wireless PAN-technologies do not achieve the same fast data transfer rate as wired RS-485.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	7
2.	Menetelmät ja rajaukset.....	8
2.1	Mitä langattomat likiverkot ovat?.....	8
2.2	WPAN:in ja WLAN:in vertailu.....	9
2.3	Oleelliset standardit.....	10
2.4	WPAN-verkkojen erilaiset laitteet ja topologiat.....	14
2.5	Signaalin vaimeneminen ja laatu.....	16
2.6	Sarjakommunikointi ja RS-485.....	17
2.7	Interferenssi ISM-taajuuksilla.....	19
3.	Tutkittavat tekniikat.....	20
3.1	Zigbee.....	20
3.2	Bluetooth BR/EDR ja BLE.....	21
3.3	Z-Wave.....	22
3.4	EnOcean.....	23
3.5	Thread ja 6LoWPAN.....	25
3.6	LoRa ja LoRaWAN.....	26
4.	Tulokset ja niiden tulkintaa.....	28
5.	Yhteenveto.....	29
	Lähteet.....	30

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

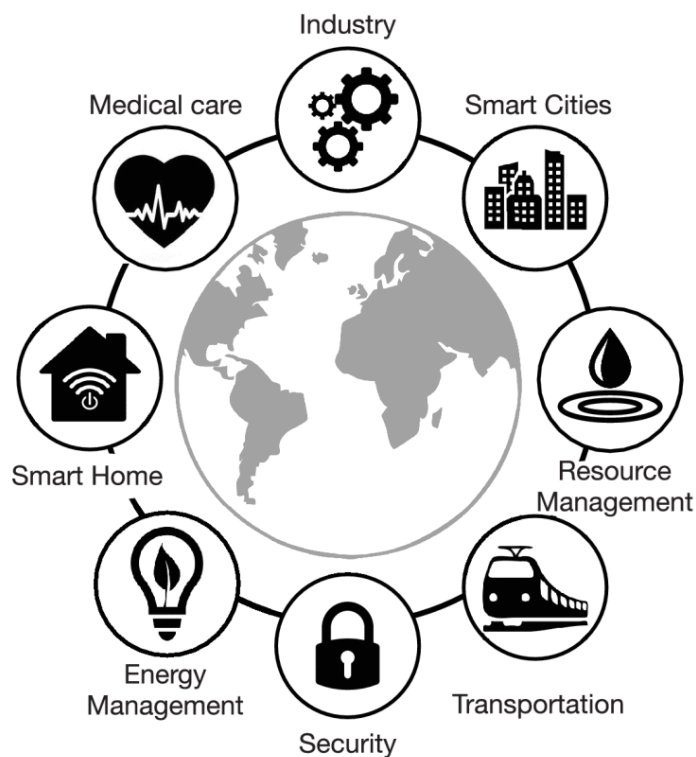
6LoWPAN	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks, likiverkkojen internetprotokolla
AFH	Adaptive Frequency Hopping, mukautuva taajuushyppely
BAN	Body Area Network, kehon alueen tiedonsiirtoverkko
BE	Beacon Enabled, merkkimajakkasignaali käytössä
BPSK	Binary Phase-Shift Keying, modulaatiotekniikka
BR	Basic Rate, Bluetoothin normaali tiedonsiirtonopeus
BT	Bluetooth
CAN	Campus/Corporate area Network, kampus-/yritysalueen tiedonsiirtoverkko
CAP	Contention Access Period, kilpailullinen aika
CCA	Clear Channel Assessment, vapaan kanavan kuuntelu
CFP	Contention Free Period, kilpailuvapaa aika
CH	Cluster Head, klusteripuu-topologiassa hierarkiatason johtajalaite
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, siirtotien varausmenetelmä
DLL	Datalink Layer, OSI-mallin toinen taso
DPSK	Differential Phase-Shift Keying, modulaatiotekniikka
EDR	Enhanced Data Rate, Bluetoothin parannettu tiedonsiirtonopeus
FFD	Full Function Device, täyden toiminnan laite
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum, taajuushyppely
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying, modulaatiotekniikka
GTS	Guaranteed Time Slot, taattu aikaväli
HS	High Speed, Bluetoothin korkean nopeuden tiedonsiirtonopeus, joka käyttää WLAN radiota
I/O	Input/Output, tulo ja lähtö
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
IOT	Internet Of Things, esineiden internet
IPV6	Internet Protocol Version 6, viimeisin internet protokolla
ISM	Industrial, Scientific, Medicine, lisenssivapaat taajuusalueet
ITU	International Telecommunication Union, kansainvälinen televiestintäliitto
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol, MAC-tason rakenne
LLC	Logical Link Controller, OSI-mallin toisen tason alataso
LMP	Link Manager Protocol,
LMP	Link Manager Protocol, MAC-tason rakenne
M2M	Machine To Machine, laitteiden välinen tiedonsiirto.
MAC	Medium Access Control, OSI mallin toisen tason alataso
MAN	Metropolitan Area Network, metropolialueen tiedonsiirtoverkko
MTU	Maximum Transfer Unit, suurin siirrettävä yksikkö
NBE	Non-Beacon Enabled, merkkimajakkasignaali ei käytössä
OQPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying, modulaatiotekniikka
OSI	Open Systems Interconnection Reference Model
P2P	Peer To Peer, vertaisverkko, kutsutaan myös mesh verkoksi
PHY	Physical Layer, fyysinen taso, OSI-mallin alin taso
RAN	Radio Access Network, radioyhtesverkko
RFD	Reduced Function Device, rajoitetun toiminnan laite
RX	Receiver, vastaanotin
SF	Spreading Factor, kertoo kuinka tiheästi tieto on pakattu kantaaltoon

SIG	Bluetooth Special Interest Group, Bluetooth teknologiaa ylläpitävä järjestö
SNR	Signal to Noise Ratio, signaali-kohinasuhde
TX	Transmitter, lähetin
WAN	Wide Area Network, laajan alueen tiedonsiirtoverkko
WLAN	Wireless Local Area Network, langaton lähialueen tiedonsiirtoverkko
WPAN	Wireless Personal Area Network, langaton likiverkko
ZBC	Zigbee Coordinator, Zigbee verkon koordinaattori
ZBR	Zigbee Router, Zigbee reititin
ZED	Zigbee End Device, Zigbee verkon päätelaite

1. JOHDANTO

Laitteiden välinen kommunikointi *Machine to Machine* (M2M) on saanut tärkeän merkityksen jo pitkään nousussa olleen Esineiden Internet, *Internet of Things* (IoT) teknologiaparadigman myötä. IoT:ssa kaikki esineet yhdistetään digitaaliseen ekosysteemiin, johon ne voivat tuoda uutta dataa, prosessoida sitä ja vaihtaa tietoa muiden esineiden, sekä ihmisten välillä. Koska esineitä on kaikkialla teollisuudesta kotitalouksiin, IoT:n mahdollisuudet ovat rajattomat. Esineiden tuodessa dataa, esim. kiinteistöjen sähkömittareilta ja kuormanohjauksilta pilvipalveluihin, tietoa voidaan analysoida suuressa mittakaavassa tuottaen uudenlaista prosessoitua tietoa (F. Montori et al., 2018). IoT:n avulla laitteet pystyvät tekemään erilaisia tehtäviä itsenäisesti, myös ilman ihmisen ohjausta (A. Nikoukar et al., 2018).

IoT on käytössä hyvin monella alalla ja kuvassa 1.1 on esitetty erilaisia markkinoita, joilla sitä hyödynnetään.



Kuva 1.1. Esineiden internetin monet toimialat (A. Nikoukar et al., 2018).

Tämän kandidaatintyön tavoite on tutustua kirjallisuuskatsauksella tarjolla oleviin laitteiden välisiin avoimiin tiedonsiirtotekniikoihin, jotka sopivat erityisesti käytettäväksi kotitauksien sisällä. Tutkittavien tekniikoiden minimikantamaksi asetettiin 30 metriä ja työssä keskitytään ns. langattomiin likiverkkotekniikoihin laitteiden välillä *Wireless Personal Area Network* (WPAN), joten *Wireless Local Area Network* (WLAN):in tarkastelu rajataan vertailusta pois. Tutkimuskysymyksenä on, kuinka paljon hyötydataa voidaan lähettää 10 sekunnin välein milläkin tekniikalla ja mihin eri tekniikat soveltuvat parhaiten. Tekniikoita vertaillaan keskenään mm. taajuusalueiden, rakenteiden läpäisevyyden ja tiedonsiirtonopeuksien osalta. Työssä tutustutaan myös sarjakommunikointiin ja tutkitaan, pystytäänkö jotakin vertailun likiverkkotekniikkaa käyttämään RS-485 sarjaliikenneväylän korvaajana.

Työ tehdään yhteistyössä Green Energy Finland Oy:n (GEF). GEF tarjoaa asiakkailleen aurinkopaneeliratkaisuja, sekä tuotannonseuraus- ja ohjauksjärjestelmiä, ja heillä on tarve siirtää kiinteistön sisälle asennettavien laitteiden välillä tila-, mittaus- ja ohjaustietoa. Laitteet asennetaan yleensä hajalleen eri puolille kiinteistöä, ja niiden välisen tiedonsiirtoyhteyden hoitaminen langallisesti on haastavaa, koska kaapeleiden asentaminen vaatii paljon aikaa, ja on siksi kalliimpaa. Kaikissa laitteissa ei ole vielä WPAN-tukea, joten laitteelta saatavat tiedot on ensin luettava jollakin teknologialla ja muunnettava WPAN-yhteydellä kuljetettavaksi.

Likiverkkotekniikoista on olemassa artikkeleita, jotka vertailevat niiden ominaisuuksia keskenään. Lisäksi nämä tekniikat perustuvat standardeihin, joista työn kannalta oleellisimpiin tutustutaan myös. Työssä käydään läpi myös erilaiset topologiat, joita WPAN-verkot voivat muodostaa, sekä perehdytään signaalin vaimenemiseen ja miten mm. taajuus vaikuttaa siihen.

2. MENETELMÄT JA RAJAUKSET

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena tutustumalla tarjolla olevaan valmiiseen tieteelliseen materiaaliin, sekä eri tekniikoita ylläpitävien yritysten ja järjestöjen tarjoamaan materiaaliin. Kirjallisuuskatsauksen avulla saatiin hyvin tutustuttua eri tekniikoihin ja muodostettua niistä kokonaiskuva. Eri tekniikoiden määrälliset ominaisuudet, mm. tiedonsiirtonopeudet, kerättiin pääosin tekniikoita ylläpitävien järjestöjen laatimista tekniikoiden datalehdistä.

Tekniikoiden vertailussa otettiin huomioon

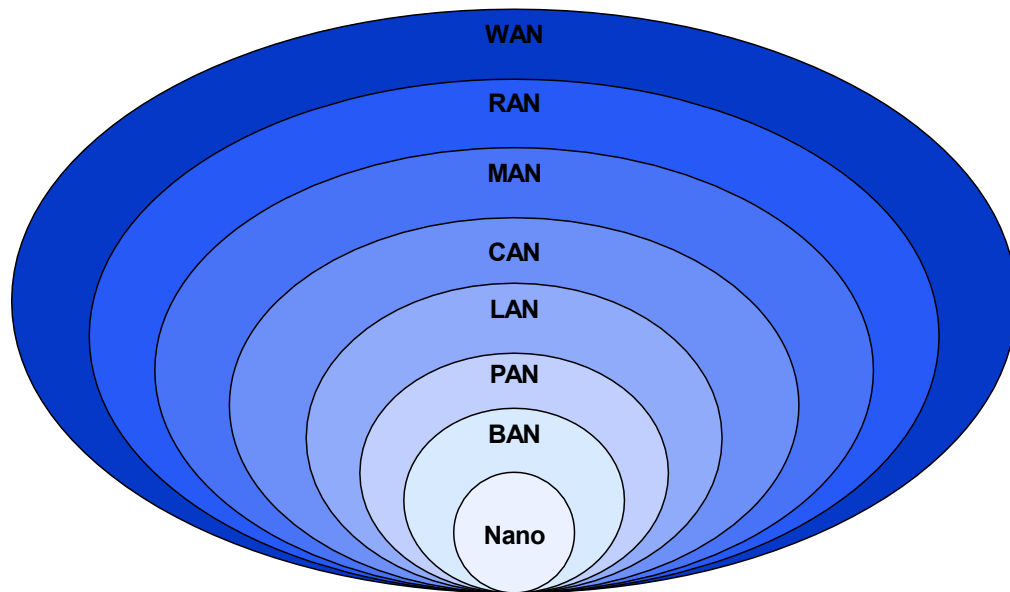
- Kantavuus
- Taajuusalueet
- Rakenteiden läpäisevyys
- Tiedonsiirtonopeus
- Lisensointi
- Häiriönsieto
- Tiedonsiirron tietoturvallisuus

Aineisto kerättiin taulukkomuotoon, joka lisättiin kokonaisuudessaan liitteeseen 1. Aineistoa analysoitiin ja muodostettiin kokonaiskuva valituista likiverkkotekniikoista, ja mihin mikään niistä voisi olla hyvä ja mihin ne eivät käy. Aineiston pohjalta myös selvitettiin voisiko jotakin näistä likiverkkotekniikoista käyttää langallisen RS-485 standardin ”langattomana vaihtoehtona”.

2.1 Mitä langattomat likiverkot ovat?

Langaton likiverkko, *Wireless Personal Area Network* (WPAN), kuvaa henkilökohtaisen lähialueen tiedonsiirtoverkkoa. Nämä tiedonsiirtoverkot toimivat yleensä langattomasti ja ovat M2M, eli *Machine to Machine* -laitteiden välisiä verkkoja, joissa laitteet siirtävät tietoja toisensa välillä. WPAN-verkkojen kantama on yleensä muutamasta kymmenestä metrillä saadaan metriin. (Federico M. et al., 2018).

Kuvassa 2.1 on esitetty, miten PAN-verkot rajataan muista tiedonsiirtoverkoista.



Kuva 2.1. PAN-verkon sijoittuminen muihin tiedonsiirtoverkkoihin nähden laitteiden välisten etäisyyksien perusteella. (Wikipedia)

PAN-verkot ovat siis kantavuudeltaan lähiverkkoa eli *local area network* (LAN) pienempiä, eivätkä ne tarkoita samaa asiaa. PAN-verkkoja seuraavaksi pienemmät tiedonsiirtoverkot ovat kehon tiedonsiirtoverkot, *body area network* (BAN), jolla tarkoitetaan ihmiskehoon asetettujen laitteiden muodostamia tiedonsiirtoverkkoja. Kuvan 2.1 muiden kohtien lyhenneet ovat järjestyksessä CAN *campus/corporate area network* kampus-/yritysalueen tiedonsiirtoverkko, MAN *metropolitan area network*, RAN *radio access network* ja WAN *wide area network*.

2.2 WPAN:in ja WLAN:in vertailu

Monet startup-yritykset tuovat markkinoille tuotteita, joilla kodin älylaitteita voidaan yhdistää WLAN-verkkoon, muutaman WLAN:in ilmeisen edun vuoksi. WLAN-verkon etu WPAN:iin nähden on helpompi tuotekehitys ja yleensä myös pienemmät tuotehinnat. Lisäksi monet WPAN-tekniikat vaativat erillisen gateway-laitteen, kun taas WLAN-verkoissa riittää jo valmiiksi löytyvä reititin. WLAN-verkoilla on kuitenkin haittapuolensa, joista suurin on pieni tiedonsiirtoturvallisuuden taso mm. internetyhteyden vuoksi. WPAN-laitteiden ei tarvitse olla yhteydessä internettiin, vaikka se usein onkin haluttu ominaisuus. Laitteet, jotka toimivat akulla, esim. lämpötila- ja kosteussensorit hyötyvät mahdollisimman pienestä virrankulutuksesta, joka kuitenkin WLAN-laitteilla on huomattavasti suurempaa kuin WPAN-laitteilla. Lisäksi WLAN-verkkoon voi useimmilla reitittimillä yhdistää 256 laitetta, kun taas esim. Zigbee-tekniikan WPAN-verkkoon voi teoreettisesti yhdistää 65000 laitetta. Gartnerin optimistisen 2014 vision mukaan tyypillisessä kotitaloudessa voisi olla peräti 500 älylaitta vuoteen 2022 mennessä, joten pelkän WLAN-verkon maksimilaitemäärä voi tulla vastaan. (Gartner, 2014)

WLAN-verkkojen topologiat ovat rajoittuneet vain tähteen, kun taas WPAN-verkot voivat muodostaa mm. monimutkaisempia mesh-verkkoja, joissa kaikki laitteet kommunikoivat keskenään niiden laitteiden kanssa, jotka ovat kuultavissa (G. Pan et al., 2018). WPAN:it

lisäksi skaalautuvat WLAN:ia paremmin, ja ovat toimintavarmempia, esim. mesh-verkot voivat reitittää tietoa eri reittejä, jos jokin laite putoaa verkosta (A. Nikoukar et al., 2018).

WPAN verkot perustuvat IEEE 802.15.X standardiperheeseen, joista esimerkiksi 802.15.4 standardiin perustuvat likiverkkotekniikat Zigbee ja Thread. WLAN-verkkotekniikat taas perustuvat standardiin IEEE 802.11.X, joka tukee myös internet protokollaa.

2.3 Oleelliset standardit

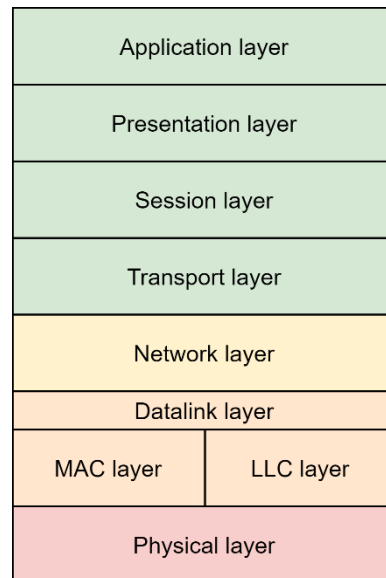
WPAN verkot perustuvat IEEE 802.15.X standardiperheeseen, joista tämän työn kannalta oleellisia ovat IEEE 802.15.4 ja 802.15.1.

IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 on *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) järjestön kehittämä standardi, ja se on ollut pitkään alhaisen viiveen eng. *low latency* langattomien likiverkkojen de facto standardi. Se perustettiin 2003 ja on siitä tähän päivään käynyt läpi monia muutoksia. Tunnetuin tämän standardin kaupallinen toteutus on Zigbee (A. G. Ramonet et al., 2020). Standardi kehitettiin pienen tiedonsiirtonopeuden ohjaus- ja seurantasovelluksille, jotka vaativat pienen virrankulutuksen. Se on hyvin laajasti käytetty standardi mm. kodin automaatiassa, teollisuusautomaatiassa, älykaupunkisovelluksissa ja WBAN-sovelluksissa. (A. Nikoukar et al., 2018)

Pääpiirteittäin standardi määrittelee OSI-mallin, *Open Systems Interconnection Reference Model*, tiedonsiirtoverkon MAC, eli *medium/media access control*, sekä PHY, eli *physical layer* tasot. Standardi käyttää CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* -tekniikkaa ollakseen yhteydessä tiedonsiirtomediaan ja tukee tähti- puu- ja P2P, *peer to peer*, topologioita. OSI-malli muodostuu seitsemästä tasosta, jolla jokaisella on oma tehtävänsä, ja ne käyttävät alempien tasojen palveluita, sekä tarjoavat omia palveluitaan ylemmille tasoille. OSI-malli on kuitenkin vain viitekehys, eikä sitä täysin noudattavia käytännön sovelluksia ole kehitetty paljoakaan. 802.15.4 ei ole tästä poikkeus, koska PHY ja MAC tasojen lisäksi standardi ei määrittele OSI-mallin ylempiä tasoja, eikä niihin syvennyttä tarkemmin työn rajauksen tähden (A. G. Ramonet et al., 2020).

OSI-malli on esitelty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. OSI-malli ja sen tasot. 802.15.4 standardi määrittelee ominaisuuksia ainoastaan PHY-tasoon, sekä tiedonsiirtotason MAC-alatasoon.

PHY-taso vastaa laitteen tiedonsiirtoliikenteestä jonkin väliaineen yli, esim. elektromagneettiset aallot tai sähköjohto. Fyysisesti PHY-tasoon lasketaan kuuluvan radiovastaanotin- ja lähetin, sekä muu tiedonsiirtoon vaadittava elektroniikka.

PHY tasolla 802.15.4 määrittelee laitteen toimintataajuuden, tiedonsiirtonopeuden, kanavien lukumäärän, kaistanleveyden sekä modulaatiotekniikan, jotka on esitetty taulukossa 1 (A. Nikoukar et al., 2018).

Taulukko 1. 802.15.4 standardin PHY tason tiedonsiirtomääritelmät.

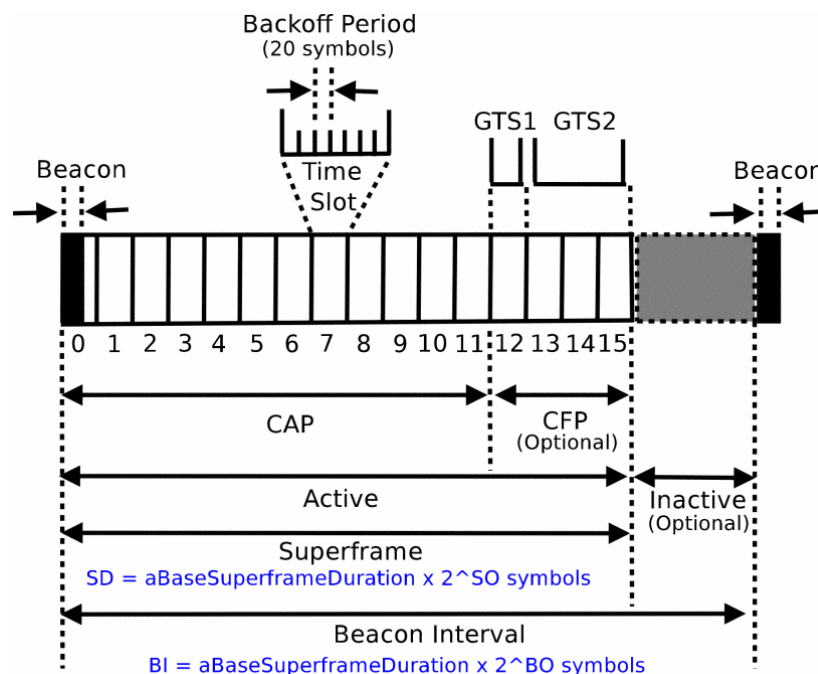
	Eurooppa	Amerikka	Maailmanlaajuinen
Taajuus [MHz]	868–868,6	902–928	2400–2483,5
Kanavien lukumäärä	1	10	16
Kanavan kaistanleveys	600 kHz	1,2 MHz	2 MHz
Tiedonsiirtonopeus	20 kbps	40 kbps	250 kbps
Modulaatiotekniikka	BPSK	BPSK	OQPSK
Tilat	1 bitti, 2 tilaa	1 bitti, 2 tilaa	2 bittiä, 4 tilaa

Standardin 2003 versio määrittelee kaksi PHY:tä, joista toinen käyttää *Offset Quadrature Phase-Shift Keying* (OQPSK) modulaatiotekniikkaa, jolla saavutetaan korkein tiedonsiirtonopeus 250 kbps ja käytetään taajuuskaistaa 2400–2483,5 MHz. Toisella harvemmin käytetyllä modulaatiotekniikalla *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) käytetään taajuuskaistoja 868–868,6 MHz nopeudella 20 kbps ja 902–928 MHz nopeudella 40 kbps. (A. G. Ramonet et al., 2020)

PSK-modulaatioissa tieto välitetään kanta-aallon vaiheen muutoksina amplitudin ja taajuuden pysyessä vakiona. Yksinkertaisin PSK-tekniikka on BPSK, jossa kanta-aallon 180° vaihe-erolla voidaan siirtyä kahden eri tilan välillä (0 ja 1). QPSK:ssa taas tiloja on neljä, ja ne ovat 90° päässä toisistaan. Neljän eri tilan esittäminen vaatii kuitenkin kaksi bittiä jokaiselle tilalle, (00, 01, 10 ja 11). OQPSK eroaa normaalista QPSK:sta siten, että siinä 180° vaihesiirto tehdään kahdessa näytteenottoajan puolikkaassa 90° kerrallaan. Näin vältetään suurilta amplitudin muutoksilta signaalin demodulaatioissa. (Tutorialspoint)

OSI-mallin datalink taso kehystää tiedonsiirtopaketin siirtoa varten ja lähettää sen PHY-tasolle. 802.15.4 standardi määrittelee datalink tason MAC-alitason ominaisuuksia tiedonsiirto-kanavaan pääsyn kannalta. MAC voi vaihtaa kahden toimintatilan välillä, joita ovat *beacon enabled* (BE) ja *non-beacon enabled* (NBE).

BE tilassa tiedonsiirto tapahtuu käyttäen apuna ns. *superframe* rakennetta, jossa tiedonsiirto tapahtuu beacon-jaksojen välissä olevien, 15 yhtä pitkän aikavälin *Time Slot* aikana. Superframen rakenne on esitelty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Superframe rakenne (A. G. Ramonet et al., 2020).

Superframe koostuu 16 yhtä pitkästä aikavälistä, joista ensimmäinen aikaväli on *beacon* tai majakka. Majakan aikana lähetetään superframen rakennetta koskevaa tietoa, esim. aktiivisen ajan pituus. Superframe rajataan kahden majakan väliin. (A. Nikoukar et al., 2018)

Superframen aktiivinen jakso koostuu *Contention Access Period* (CAP) eli kilpailullisesta ajasta sekä *Contention Free Period* (CFP) eli kilpailuvapaasta ajasta. CAP:in aikana WPAN-verkon laitteet kilpailevat tiedonsiirrosta käyttäen jaksotettua versiota CSMA/CA algoritmista. CFP on superframen valinnainen osa, joka koostuu *Guaranteed Time Slot* (GTS):istä eli taatuista aikaväleistä, joita CFP:n aikana voi olla maksimissaan 7. WPAN-verkon laitteet voivat pyytää GTS:iä käyttöönsä CAP:in aikana. Tällöin laitteella on yksinomains käyttöoikeus kanavalle, jota se voi käyttää tiedon lähettämiseen tai vastaanottamiseen. (A. G. Ramonet et al., 2020)

NBE-tilassa taattuja aikavälejä ei varata, vaan laitteet kilpailevat jatkuvasti lähetyks/vastaanotto-oikeudesta PHY:n tarjoaman *Clear Channel Assessment* (CCA) proseduurin avulla. CCA:ssa laite tunnustelee käytettävää kanavaa, ja toteaa onko se käytössä vai vapaana. Jos kanava on vapaa, laite voi lähettää dataa, mutta kanavan ollessa käytössä, se odottaa ja tunnustele kanavaa uudestaan myöhemmin. (P. Kaushik et al., 2011)

IEEE 802.15.1

IEEE 802.15.1 standardi tunnetaan parhaiten Bluetooth-teknologian pohjalta, joka alun perin suunniteltiin korvaamaan fyysiset sarjakommunikointikaapelit langattomilla yhteyksillä. Bluetoothin kehitys alkoi jo 1999-luvulla, mutta IEEE standardi 802.15.1 syntyi vasta 2002-luvulla ja sitä kehitetään edelleen. Vuonna 2016 standardi määritteli jo Bluetooth 5 teknologian, joka tukee mesh-topologioita.

Bluetoothista on olemassa useampia versioita, joita ovat *Bluetooth Basic Rate* (BR) ja *Bluetooth Enhanced Data Rate* (EDR). BR ja EDR-versiot Bluetoothista ovat pääasiassa kehitetty nopeaa tiedonsiirtoa vaativiin käyttökohteisiin, mm. audiodatan lähetykseen/vastaanottoon. (A. Nikoukar et al., 2018)

Standardissa määritellään OSI-mallin PHY- sekä DLL, eli *Datalink Layer* -tasot. PHY-tason ominaisuuksia on koottu taulukkoon 2.

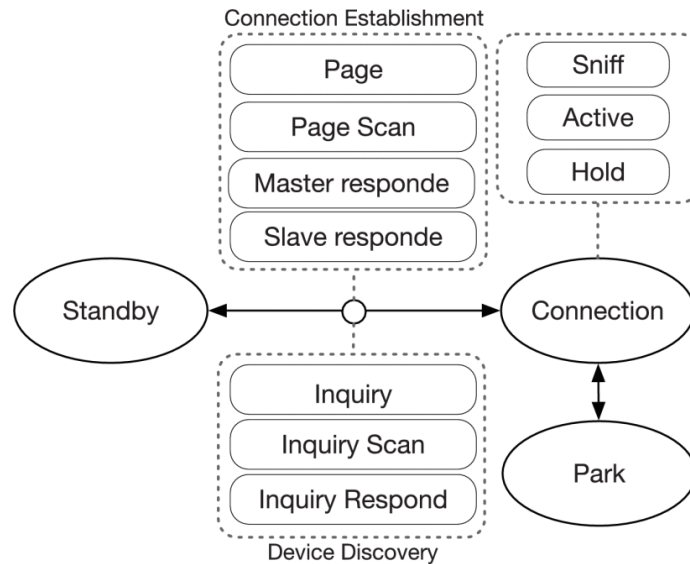
Taulukko 2. 802.15.1 PHY-tason ominaisuudet Bluetooth BR/EDR:ssä.

	Maailmanlaajuinen ISM
Taajuus [MHz]	2400–2483,5
Kanavien lukumäärä	79
Kanavan kaistanleveys	1 MHz
Tiedonsiirtonopeus [Mbps]	1,3,24
Modulaatiotekniikka	GFSK (BR), DPSK (EDR)
Teholuokat [mW]	100, 2,4, 1

PHY-tasolla Bluetooth käyttää samaa maailmanlaajuista ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) 2,4 GHz taajuusaluetta kuin IEEE 802.15.4. Kanavien kaistanleveys on 1 MHz ja Bluetoothin BR/EDR versioilla kanavia on yhteensä 79. Bluetoothin tiedonsiirtonopeus on 1 Mbps *Gaussian Frequency-Shift Keying* (GFSK) modulaatiolla, jota perinteinen Bluetooth BR käyttää. Vaihtamalla modulaatiotekniikka *Differential Phase-Shift Keying* (DPSK):ksi, saadaan tiedonsiirtonopeutta kasvatettua 3 Mbps asti, jolloin puhutaan EDR-Bluetoothista. Tiedonsiirtonopeus on mahdollista saada myös 24 Mbps asti suurta tiedonsiirtonopeutta vaativiin tarkoituksiin. Tällöin kyseessä on Bluetooth *High Speed* (HS) ja siinä suuri nopeus saadaan käyttäen 802.11 (WLAN-standardi) radiota. Tässä versiossa erillinen säädin vaihtaa 802.11 radion käytettäväksi suuren tiedonsiirtotarpeen tullessa, mutta pitää päällä BR/EDR radiota normaalisti virran säästämiseksi.

BR/EDR-radio tarjoaa myös eri teholuokkia, joista suurimmalla 100 mW teholuokalla voidaan saavuttaa jopa 100 m kantama ja 2,4 ja 1 mW teholuokilla kantama on noin 10 m. (A. Nikoukar et al., 2018)

DLL-tasolla on MAC ja LLC-alitasot. MAC-taso koostuu *Link Manager Protocol* (LMP):stä ja *Logical Link Control and Adaptation Protocol* (L2CAP):ista. Bluetoothilla yleensä puhutaan olevan oma, OSI-malliin sopimaton MAC-tasonsaa, jota kutsutaan *Link Controlleriksi*. Myöskään 802.15.1 ei määrittele PHY- ja link controller-tasojen lisäksi muita OSI-mallin tasoja. Kuvassa 2.4 on esitetty *Link Controllerin* eri tilat.



Kuva 2.4. BR/EDR Link Controllerin mahdolliset eri tilat. (A. Nikoukar et al., 2018).

Päätiloja on *Standby*, *Connection* ja *Park*. Standby eli valmiustilassa laite odottaa yhteyttä ja ainoastaan laitteen natiivi kello on päällä. Tilan avulla voidaan säästää energiaa sammuttamalla radio, kun se ei ole käytössä (IEEE 802.15.1, 2002). Connection eli yhteystilassa radiolähetin/-vastaanotin on päällä ja se voi lähettää tai vastaanottaa dataa nimensä mukaisesti. Park tilassa laite on ”syvässä unessa” säästääkseen virtaa, jos yhteyttä ei tulla tarvitsemaan pitkään aikaan. Laite kuuntelee kanavia toisinaan. Se myös luovuttaa MAC-osoitteen. Tämä tila on mahdollinen vain *slave*-laitteille. (A. Nikoukar et al., 2018)

2.4 WPAN-verkkojen erilaiset laitteet ja topologiat

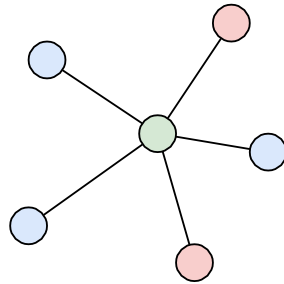
WPAN-verkkojen topologioilla tarkoitetaan tiedonsiirron ”kulkureittiä” laitteiden välillä ja niiden nimitykset perustuvat yleensä niiden visuaalisiin esityksiin.

WPAN-verkkojen laitteilla on erilaisia rooleja niiden käyttötarkoituksen mukaan, ja ne voivat olla joko täyden toiminnan laitteita *Full Function Device* (FFD) tai rajoitetun toiminnan laitteita *Reduced Function Device* (RFD). Täyden toiminnan laitteet sisältävät enemmän toiminnallisuksia kuin rajoitetun toiminnan laitteet, ja niiden virrankulutus ja laitekoko voivat olla suurempia. FFD:lle tyypillisiä rooleja WPAN-verkossa ovat koordinaattori ja reititin. Koordinaattori toimii verkon aivoina ohjaillen ja ylläpitäen verkon toimintaa ja joissakin tapauksissa se voi myös olla yhteydessä muihin tiedonsiirtoverkkoihin, esim. WLAN:iin ja se voi tukea internet protokollaa. Koordinaattorin nimi voi hieman vaihdella tekniikoiden välillä, esim. Zigbeellä se on *Zigbee Coordinator*, mutta toiminnaltaan ne ovat pääosin samanlaisia. Koordinaattoreita on verkossa yleensä vain yksi, mutta reitittämiä voi olla useampi. Reitittimet voivat siirtää tietoa muidenkin laitteiden välillä kuin koordinaattori mahdollistaen tähti-topologiaa monimutkaisemmat topologiat.

RFD:t eivät voi reitittää tietoa ja ne ovat yleensä toiminnallisuudeltaan yksinkertaisempia ja kuluttavat vähemmän virtaa. Ne toimivat verkon päätelaitteina ja ovat usein paristo- tai akkukäyttöisiä ja tulevat pitkään toimeen yhdellä latauksella.

Tähti

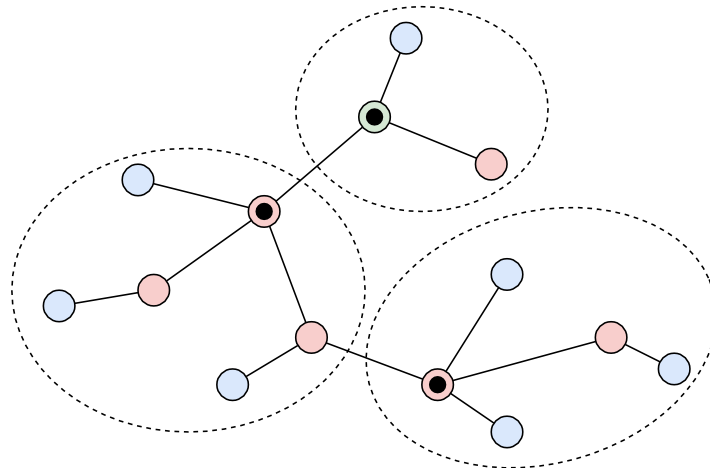
Tähti-topologiassa kaikki tiedonsiirtoverkon laitteet ovat yhteydessä verkon keskellä olevaan koordinaattoriin, joka on FFD. Muut verkon laitteet voivat olla rajoitetun toiminnan laitteita tai myöskin FFD:itä.



Kuva 2.5. WPAN-verkkojen tähti-topologia. Verkon keskellä on PAN-Coordinator, joka on FFD, ja verkon muut laitteet voivat viestiä vain koordinaattorin kanssa. Koordinaattori on kuvattu vihreällä taustalla, muut FFD:t punaisella ja RFD:t sinisellä taustalla.

Puu

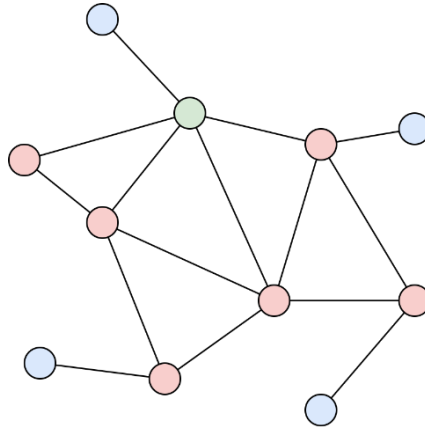
Puu-topologia muistuttaa hieman tähteä, mutta siinä voi olla useampi FFD, jotka reitittävät tietoa keskellä olevalle koordinaattorille. Viestit siis hyppäävät alemmilta tasoilta keskemälle. Nämä reitittimet eivät kuitenkaan ole koordinaattoreita, koska niitä on verkossa vain yksi. Puu-topologia on hierarkkinen rakenne. Kuvassa 2.6 on kuvattu *Cluster Tree* rakenne, jossa puun hierarkiatasot (klusterit) on ympyröity katkoviivalla. Mustalla ympyrällä merkatut FFD:t toimivat *Cluster Head* (CH):ina, johon klusterin muut laitteet ovat liittyneet.



Kuva 2.6. Puu-topologia. Tässä verkossa on koordinaattorin lisäksi reitittäjä. Reitittimet ovat FFD:itä ja muodostavat oman tähtiverkon, josta on yhteys viereisiin verkkoihin. FFD-tähtiverkkoja voidaan laajentaa RFD:illä.

P2P (Mesh)

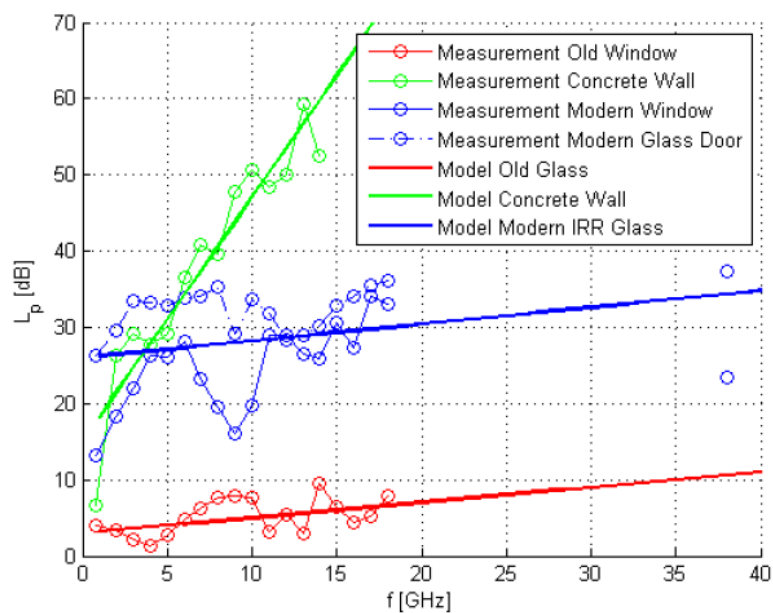
P2p-topologiassa (*Peer To Peer*) eli vertaisverkossa on myös useampi FFD, mutta hierarkisesta puurakenteesta poiketen, ne voivat lähettää tietoa mille vain kuuluvalle alueellaan olevalle FFD:lle. Näitä verkkoja kutsutaan myös mesh-verkoiksi, ja niiden suurin etu on verkkojen toimintavarmuus. Jos jokin laite lakkaa toimimasta, tieto voidaan siirtää jotakin muuta reittiä.



Kuva 2.7. P2p eli mesh-verkko. Vihreällä kuvataan koordinaattoria, joka on FFD, ja punaisella reitittiminä toimivia FFD:itä. Siniset nodet ovat RFD:itä, jotka voivat olla yhteydessä vain yhteen laitteeseen.

2.5 Signaalin vaimeneminen ja laatu

Langattomat teknologiat käyttävät tiedonsiirtoon sähkömagneettisia aaltoja, jotka vaimenevat kulkiessaan väliaineessa. Vaimenemiseen vaikuttaa muun muassa signaalin taajuus. Suuremmalla taajuudella signaali vaimenee enemmän, mutta suurempi kaistanleveys tarjoaa nopeamman tiedonsiirtonopeuden. Kuvassa 2.8 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn vaimeneminen erilaisissa materiaaleissa ja eri lähetystaajuuksilla (J. Hurska, 2016).



Kuva 2.8. Sähkömagneettisen säteilyn vaimeneminen eri materiaaleissa lähetystaajuuden funktiona (J. Hurska, 2016)

Kuvasta 2.8 havaitaan, että suuremmalla taajuudella signaali selvästi vaimenee enemmän varsinkin betonissa. Kuvan perusteella 868 MHz taajuinen signaali vaimenee alle 10 dB läpäistessään betoniseinän ja 2,4 GHz taajuinen signaali taas vaimenee jo yli 25 dB. Kaikilla materiaaleilla on kuitenkin havaittavissa vaimennuksen olevan suurempaa taajuuden kasvaessa.

Signaalin laadusta kertoo signaali-kohinasuhde, eng. *Signal to Noise Ratio* (SNR). SNR on hyötysignaalin tehon suhde kohinasignaalin tehoon ja sitä usein kuvataan desibeleinä kaavan 2.1 mukaan

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{hyöty}}}{P_{\text{kohina}}} \right) \text{ dB}, \quad (2.1)$$

jossa $P_{\text{hyöty}}$ on hyötysignaalin teho ja P_{kohina} on kohinasignaalin teho.

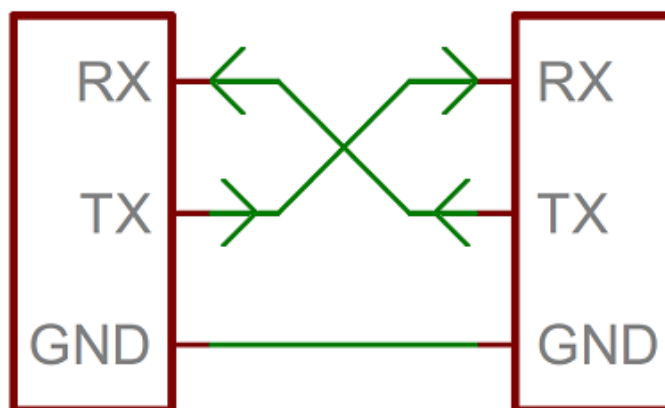
Desibeliasteikolla esitettynä SNR on joko positiivinen tai negatiivinen, ja negatiivinen SNR arvo tarkoittaa kohinasignaalin tehon olevan suurempi kuin hyötysignaalin, jolloin hyötysignaalia on mahdoton erottaa kohinasta, ellei käytetä hajaspektritekniikkaa. Silloin kohinasignaalin teho voi olla suurempi, koska sitä voidaan käyttää kantoaaltona (Electronicsnotes). Langattomat tiedonsiirtotekniikat vaativat mahdollisimman suuren signaali-kohinasuhteen, ja esim. 10 dB–15 dB vaaditaan epäluotettavan yhteyden muodostamiseen ja 41 dB tai korkeampi on jo erinomainen. Shannon-Hartley teoreeman mukaan signaali-kohinasuhde vaikuttaa myös tiedonsiirtonopeuteen, joka käytetyllä kaistalla on.

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_{\text{hyöty}}}{P_{\text{kohina}}} \right) \quad (2.2)$$

C on teoreettinen tiedonsiirtonopeus kaistalla [bps] ja W on kaistanleveys [Hz]. Teoreeman mukaan suuremmalla signaali-kohinasuhteella saavutetaan suurempi tiedonsiirtonopeus. (Cadence PCB solutions)

2.6 Sarjakommunikointi ja RS-485

Sarjakommunikoinnilla tarkoitetaan tiedon lähettämistä laitteiden välillä tiedonsiirtojohtoa pitkin yksi bitti kerrallaan. Sarjakommunikointi on mahdollista toteuttaa yhdellä kaapelilla, ja yleensä käytössä ei ole enempää kuin neljä kaapelia kerralla. Kuvassa 2.9 on yksinkertainen sarjakommunikointiväylä.



Kuva 2.9. Yksinkertainen sarjakommunikointiväylä (Sparkfun)

Yhdellä johdolla voidaan viestiä vain yhteen suuntaan, jolloin vain toinen laite voi lähettää ja toinen vastaanottaa tietoa. Kun tietoa halutaan siirtää molempiin suuntiin, tarvitaan vähintään kaksi kaapelia. Kuvassa laitteilla on RX ja TX portit, sekä yhteinen maa. RX tulee sanasta *Receiver* eli se tarkoittaa vastaanotinta. TX puolestaan tarkoittaa lähetintä ja tulee sanasta *Transmitter*. Lähettimet kytketään aina vastaanottiin, jotta tieto kulkee oikeaan suuntaan.

Sarjaväylät voivat olla synkronisia tai asynkronisia.

Synkronisissa verkoissa kaikki laitteet toimivat samalla kellosignaalinalla, joka vaatii oman johtonsa kaikille laitteille. Synkroniset väylät ovat yleensä nopeampia ja suoraviivaisempia, mutta ylimääräinen johto saattaa aiheuttaa vaikeuksia varsinkin pieniä mikrokontrollereita käytettäessä, jolloin I/O-pinnit ovat harvassa. Asynkroninen verkko taas toimii ilman kello-signaalia, mutta synkronointitietoa voidaan siirtää tiedonsiirtopaketeissa. (Sparkfun)

RS-485 on teollisuudessa laajalti käytetty sarjakommunikointistandardi, jolla on pitkä kuu-luvuus, nopea 10 Mbps tiedonsiirtonopeus ja hyvä häiriönsieto differentiaalisten signaalien takia. OSI-mallin fyysisellä tasolla se käyttää kahta tiedonsiirtolinjaa A ja B, joiden on oltava tasapainossa. Signaalien differentiaalisuudella tarkoitetaan sitä, että toinen signaaleista vastaa alkuperäistä signaalia, ja toinen on tämän peilikuva, eli komplementti. Sekä A ja B siirtolinjoilla, että lähettimellä ja vastaanottimella on oltava sovitettu impedanssi. RS-485 väylään voidaan liittää myös useampi laite. (J. Kelly)

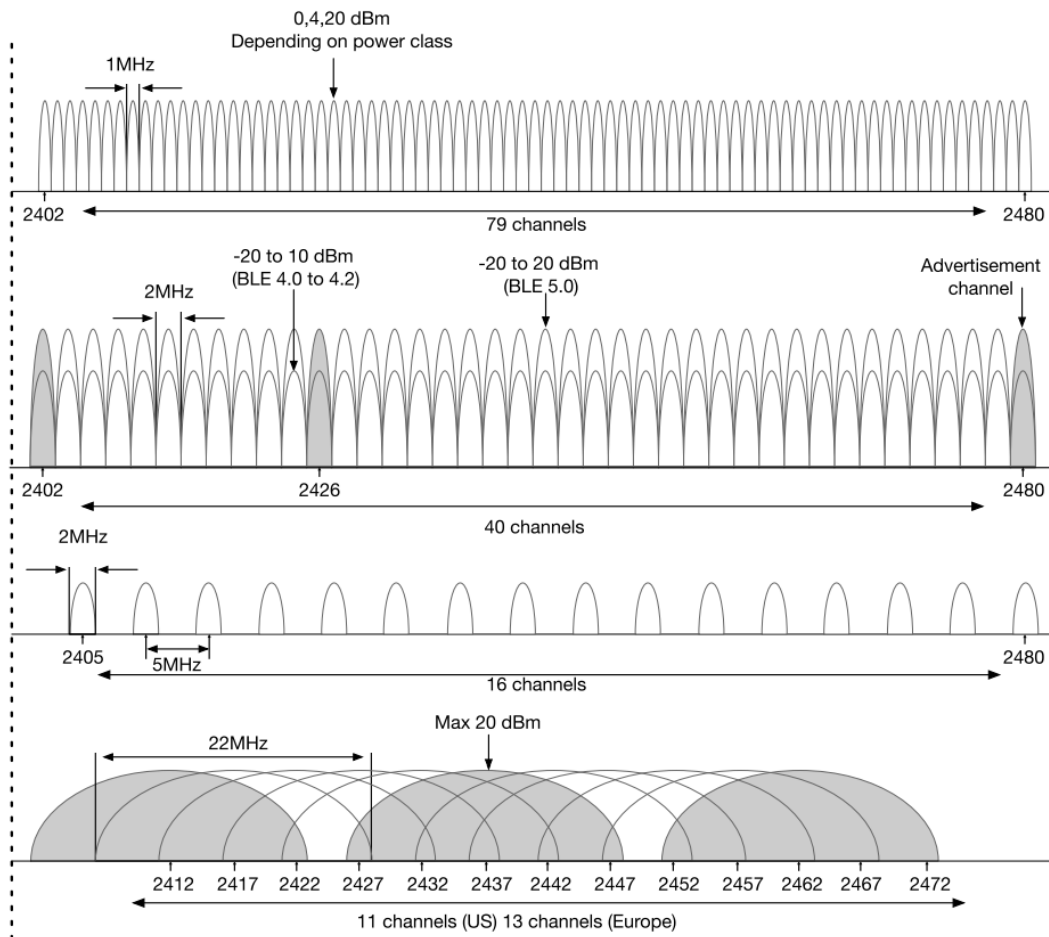
RS-485 määrittelee vain OSI-mallin fyysisen tason, joten langattoman likiverkkotekniikan käyttäminen tämän tilalla vaatii tiedon lukemisen fyysiseltä tasolta likiverkkotekniikalla lähetettäväksi. Jos laitteessa on valmiina RS-485 portti, josta tieto luetaan likiverkkotekniikalla lähetettäväksi, pitää myös tietää millaiset OSI-mallin ylempien tasojen määritelmät laitteelta ulos tulevalla datalla on, esim. minkälainen tietopaketti on käytössä. Tämän jälkeen tietopaketti muutetaan likiverkkotekniikalla lähetettäväksi, esim. jos paketti on suurempi, se pitää pilkkoa, kuten myöhemmin esitetään Thread tekniikan sovitteessa IPV6 ja IEEE 802.15.4 tiedonsiirtopaketteja. Lähes mikä vain likiverkkotekniikka sopii RS-485 väylästä luetun tiedon lähettämiseen, mutta väylästä saatava tieto on ensin muokattava likiverkkotekniikan tukemaan muotoon, esim. aiemmin esitettyyn IEEE 802.15.4 käyttämään Superframe-rakenteeseen.

2.7 Interferenssi ISM-taajuuksilla

Langattomat IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.1 likiverkkotekniikat toimivat ISM-taajuuksilla, joita muutkin teknologiat, kuten esim. WLAN käyttävät. Myös esim. mikroaaltouunit toimivat samalla 2,4 GHz taajuusalueella, joten taajuusalueilla on paljon kohinaa. Suuri liikenne kaistoilla aiheuttaa tiedonsiirtopakettien häviämistä, viivettä, viiveen vaihtelua, vääriä käskyjä ja hälytyksiä sekä synkronointivirheitä. (L. Angrisani et al., 2008)

Ongelman pienentämiseksi taajuusalueita on jaettu eri määrään kanavia, joita eri tekniikat käyttävät. Lisäksi kanavilla on erilaiset kaistanleveydet ja IEEE 802.11 eli WLAN jakaa koko 2,4 GHz ISM taajuusalueen 13 kanavaan, kun taas BR/EDR jakaa alueen peräti 79 kanavaan. WLAN:in suuri kanavien kaistanleveys, sekä suhteellisen suuri 20 dBm lähetysteho vaikeuttavat muuta liikennettä 2,4 GHz taajuusalueella eniten.

Kuvassa 2.10 on esitetty miten 2,4 GHz ISM taajuus on jaettu kanaviksi eri tekniikoilla.



Kuva 2.10 Ylin kuvaaja kuvaa BR/EDR tekniikan käyttämää kanavajakoa ja siitä alaspäin tekniikat ovat järjestyksessä BLE, IEEE 802.15.4 ja alimpana IEEE 802.11, jolla on suurin kanavien kaistanleveys (A. Nikoukar et al., 2018).

Kanavajaon lisäksi interferenssiongelmaan auttaa myös erilaiset taajuushyppely- ja kanavankuuntelu tekniikat, joita ovat mm. Bluetoothin käyttämä AFH, ja Zigbeeen käyttämä CCA. (A. Nikoukar et al., 2018)

3. TUTKITTAVAT TEKNIIKAT

Tässä kappaleessa tutustutaan vertailtaviin likiverkkotekniikoiden ominaisuuksiin PHY ja MAC-tasolla, sekä tutustutaan niitä ylläpitäviin järjestöihin.

3.1 Zigbee

Zigbee on *Zigbee Alliance* järjestön ylläpitämä likiverkkotekniikka, joka on tunnetuin IEEE 802.15.4 standardin kaupallinen toteutus. Zigbee julkaistiin 2005 ja se perustuu OSI-mallin PHY ja MAC-tasoilta 802.15.4:ään, mutta ei muuten noudata OSI-mallia. MAC-tason päällä on Zigbeeen oma *Network Layer* (NWK), sekä *Application Layer* tason framework eli viitekehys. Tämä viitekehys tarjoaa Zigbee tuotekehittäjille mahdollisuuksia muokata *Application Layer*istä tarpeidensa mukainen. (Zigbee Alliance, 2015)

Zigbee toimii siis PHY, sekä MAC-tasolla 802.15.4:n tavoin, tästä tarkemmin luvussa 2.3. Zigbee toimii Suomessa 2400–2483,5 MHz, tai 868–868,6 MHz taajuusalueilla. 2400 MHz taajuusalueella toimii monet laitteet, esim. WLAN, joten tästä saattaa koitua tiedonsiirto-ongelmia.

Zigbee tukee tähti-, puu- ja mesh-topologioita, ja näitä ohjailee NWK. Verkon laitteilla on erilaisia rooleja. Tähti-topologiassa keskimmäisenä FFD:nä on *Zigbee Coordinator* (ZBC), johon muut verkon RFD:t yhdistyvät. Se vastaa verkon muodostamisesta ja ylläpidosta ja muut laitteet, joita kutsutaan *Zigbee End Device* (ZED) eli päätelaitteiksi, viestivät pelkääntään ZBC:n kanssa. Mesh- ja puuverkoissa ZBC vastaa verkon muodostamisen lisäksi verkon parametrien asettamisesta. Verkot eroavat tähtiverkoista siten, että niitä voidaan laajentaa *Zigbee Router* (ZBR), eli reitittimien avulla, joka on myös koordinaattorin tavoin FFD. Puuverkossa Zigbee:n on mahdollista käyttää 802.15.4:ssä määriteltä BE tilaa, mutta mesh-verkot eivät tue tätä ominaisuutta. Toisaalta mesh-verkot mahdollistavat täyden P2P-kommunikoinnin.

Zigbee-laitteiden kehitys vaatii Zigbee Alliance:n jäsenyyden, ja jokaisesta Zigbee:tä käytävästä tuotteesta on maksettava sertifikaattimaksu.

Taulukko 3. Zigbee Alliancen jäsenyshinnasto (Zigbee Alliance, 2021)

Jäsenyyden taso	Promoter	Participant	Adopter
Hinta vuodessa	\$ 75 000	\$ 15 000	\$ 7 000

Korkeammalla jäsenyyden tasolla voi vaikuttaa enemmän Zigbee Alliancen toimintaan, mutta tuotteiden sertifikaattimaksut ovat samat jäsenyydestä riippumatta. Tuotteen kehitys ja sertifikaattimaksu on \$ 1000 per tuote ja oman johdannaistuotteen sertifikaattimaksu on \$ 500 per tuote. (Zigbee Alliance, 2021)

Tuotteen sertifiointi ja Zigbee Alliancen Adopter-tason jäsenyys jaettuna 1000 tuotteen erälle, lisää tuotteen hintaa \$ 8 verran.

Zigbee mahdollistaa laitteiden välisen langattoman kommunikoinnin kahteen suuntaan todella pienellä virrankulutuksella. Se sopii parhaiten käytettäväksi kuluttaja-elektroniikassa, koti-, rakennus- ja teollisuusautomaatioissa, PC:n lisäosissa, lääketieteellisten antureiden sovelluksissa, leluissa ja peleissä. (Zigbee Alliance, 2015)

3.2 Bluetooth BR/EDR ja BLE

Perinteinen Bluetooth BR kehitettiin jo 1999 luvulla korvaamaan langallisia tiedonsiirtoyhteyksiä. Bluetooth teknologiaa kehittää *Bluetooth Special Interest Group*, SIG, joka perustettiin jo 1998 luvulla, ja sen perustajajäseniä olivat Ericsson, IBM, Intel, Nokia ja Toshiba. IEEE 802.15.1 standardi määriteltiin 2002 luvulla juuri Bluetoothia ajatellen, ja tästä eteenpäin Bluetoothia on päivitetty paljon, 802.15.1 standardista lisää luvussa 2.3. Vaihtoehtoksi ovat nousseet myös BT EDR ja BLE.

Bluetooth toimii Zigbeeen tavoin 2400–2483,5 MHz taajuusalueella, mutta on tiedonsiirtonopeudeltaan nopeampi. Bluetooth BR:llä päästään 1 Mbps nopeuteen, EDR:llä 3 Mbps nopeuteen ja HS:llä peräti 24 Mbps nopeuteen. Bluetoothista on olemassa myös alhaisen tehonkulutuksen versio, Bluetooth Low Energy, BLE. BLE toimii myös samalla taajuusalueella perinteisen Bluetoothin kanssa, mutta sillä on BR/EDR:än 79 kanavan sijasta vain 40 kanavaa, joiden kaistanleveys on 2 MHz (BT Radio versions).

Bluetooth käyttää samaa ISM 2,4 GHz taajuuskaistaa kuin useat IEEE 802.15.4 teknologiat, jolloin tiedonsiirtopakettien törmäys on mahdollista. Bluetooth ratkaisee ongelman käyttäen pienikokoista ja nopeaa tiedonsiirtopakettia, jolloin törmäyksen riski pienenee. Bluetooth-paketit ovat tyypillisesti kooltaan puolet pienempiä muihin alhaisen tehonkulutuksen likiverkkotekniikoihin verraten, ja ajallisesti neljä kertaa nopeampia. Bluetooth käyttää myös tietynlaista taajuushyppelyteknologiaa, eng. *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) nimeltä *Adaptive Frequency Hopping* (AFH), mukautuva taajuushyppely. Taajuushyppelyssä laitteet käyvät koko taajuusalueensa kanavat läpi jonkun tietyn algoritmin mukaisesti, ja lähettävät paketteja vapailla kanavilla, sekä välttävät kanavia, joilla on ruuhkaa. Näistä varoimista huolimatta tiedonsiirtopaketteja kuitenkin häviää aina toisinaan. Tätä varten Bluetooth-laitteet voivat lähettää kuittauksen eng. *acknowledgement* takaisin laitteelle, jolta ovat tiedonsiirtopaketin saaneet, jolloin se tietää paketin päässeensä perille. Kuittausten odottelu ei kuitenkaan aina ole käytännöllistä esim. älykatkaisijoilla, jotka ohjaavat useampia laitteita. Kuittausten lisäksi Bluetooth laitteet voivat käyttää uudelleenlähetysominaisuutta, jolloin samasta paketista lähetetään useampi kopio nopealla aikavälillä eri kanavilla, jolloin paketin katoamisen todennäköisyys pienenee. (The Challenge of Interference, 2021)

Bluetooth-teknologia tukee tietynlaista tähti-topologiaa, jonka kutsunanimi on *piconet*. Tässä tähden tapaan kaikki laitteet ovat yhteydessä keskellä olevaan täyden toiminnan *master*, eli mestarilaitteeseen. Muut verkon laitteet ovat rajatun toiminnan *slaveja*, tai orjia. Piconetissä voi olla kerralla yksi mestarilaitte, seitsemän aktiivista orjalaitetta ja jopa 255 parktilassa olevaa orjalaitetta. Piconetit voivat myös kommunikoida keskenään ja muodostaa puu-topologiaa (kts. kuva 2.6) muistuttavan *Scatternet*-rakenteen, jossa puun klusterit muodostuvat tähtimuotoisista piconeteista, ja aktiiviset orjalaitteet voivat toimia reitittiminä piconettien välillä. Reitittimet voivat olla myös mestarilaitteita ja ne voivat vaihtaa roolia tarvittaessa (A. Nikoukar et al., 2018).

Bluetooth tavaramerkin käyttö ja teknologiaa käyttävien tuotteiden kehittäminen vaatii Bluetooth Special Interest Groupin jäsenyyden. Jäsenyydessä on kaksi eri tasoa. Adopterjäsenyydelle liittyminen on ilmaista ja jäsenyydellä pääsee käyttämään vain jäsenille luovutettavaa materiaalia, sekä kehittämään, sertifioimaan, brändäämään ja myymään Bluetooth teknologiaa käyttäviä tuotteita. Associate-jäsenyydessä taas on vuosihinta yrityksen liikevaihtoon perustuen, joka on \$ 7 500 liikevaihdon ollessa alle 100 miljoonaa USA:n dollaria ja tätä suurempien liikevaihtojen yrityksille jäsenyyden hinta on \$ 35 000. Jäsenyy-

dellä saa pääsyn mm. tilaustyönä tehtyihin tutkimusraportteihin, sekä voi osallistua teknologiaa kehittäviin työryhmiin ja komiteoihin johtoroolissa. Associate-jäsenyydellä saa myös tiettyjä alennuksia.

Kun markkinoille tuodaan Bluetooth:ia käyttäviä laitteita, täytyy laitteiden käydä läpi sertifiointi ja ilmoitusprosessi. Prosessissa maksetaan ilmoitusmaksu, joka on associate-jäsenille \$ 4 000 ja adoptereille \$ 8 000. (Bluetooth SIG, 2021)

Taulukko 4. Bluetooth Special Interest Group (SIG):n jäsenyshinnasto (Bluetooth SIG, 2021)

Jäsenyyden taso	Adopter	Associate
Hinta vuodessa, liikevaihto < \$100M USD	\$ 0	\$ 7 500
Hinta vuodessa, liikevaihto > \$100M USD	\$ 0	\$ 35 000

Adopter-tason jäsenyydellä tuotteen sertifiointi ja ilmoitusprosessi jaettuna 1000 tuotteen erälle, lisää tuotteen hintaa \$ 8 verran.

3.3 Z-Wave

Z-wave on langaton likiverkkotekniikka, jonka tanskalainen yritys Zensys perusti vuonna 1999 laitteiden ohjausta ja tilanluentaa varten. Z-Wave teknologiaa ylläpitää Z-Wave Alliance järjestö, joka perustettiin 2005. Sigma Designs osti Z-Wave teknologian Zensysiltä 2008.

Z-Wave perustuu PHY ja MAC-tasoiltaan kansainvälisen teleliiton *International Telecommunication Union* (ITU) standardiin ITU-T G.9959 (Z-Wave Alliance, 2021a). PHY tasolla Z-Wave käyttää alle 1 GHz ISM taajuuskaistaa, joita on Euroopassa 868,4 MHz ja 869,85 ja esim. Yhdysvalloissa 908,4 MHz ja 916 MHz (Z-Wave Alliance, 2021b). Z-Wavella saavutetaan maksimissaan 100 kbps tiedonsiirtonopeus, mutta modulaatiotekniikasta riippuen nopeuksia on myös 9,6 ja 40 kbps. Hitaimmat kaksi tiedonsiirtonopeutta saadaan FSK modulaatiolla, ja nopein GFSK modulaatiolla. Z-Wave käyttää taajuusalueillaan kolmea kanavaa, joilla on erilaiset alueelliset ITU-T G.9959 standardin määrittelemät radioprofiilit. (ITU-T G.9959)

Taulukossa 5 esitetty EU alueen Z-Wave PHY ominaisuudet.

Taulukko 5. Z-Waven fyysisen tason ominaisuudet EU-alueella.

	Euroopan ISM
Taajuudet [MHz]	868,4/869,85
Kanavien lukumäärä	3
Kanavan kaistanleveys [kHz]	400/300/300
Tiedonsiirtonopeus [kbps]	9,6/40/100
Modulaatiotekniikka	FSK, GFSK

MAC-tasolla Z-Wave käyttää CSMA/CA tekniikkaa, jota myös IEEE 802.14.4 käyttää.

Z-Wave-verkot tukevat mesh-topologiaa, jonka ansiosta verkkoja on helppo laajentaa ja laitteiden välinen kantama on sisällä 30 m ja ulkona 100 m. Laitteiden roolit verkossa ovat *Controller* ja *Slave*. *Primary Controller* eli pääohjaajalaite muodostaa verkon ja nimensä mukaan ohjaa slave-laitteita, joita voivat olla esim. kiinteistön valot. *Primary controller* on verkon WPAN-koordinaattori ja aiemmin esitetyn mesh-verkko viitekehyksen mukaan Z-Wave verkossa myös jotkut slave-laitteet ovat täyden toiminnan laitteita, koska ne voivat reitittää viestejä. Verkossa voi olla myös useampi toissijainen ohjauslaite. (Vesternet, 2020)

Z-Wave teknologian kulmakivi on kaikkien laitteiden yhteensopivuus, ja tämän takaamiseksi kaikki markkinoille tuotavat tuotteet on testattava. Sertifiointiprosessi vaatii vähintään valmistaja *Manufacturer* tason Z-Wave Alliance jäsenyyden tai ylemmän. Taulukkoon 6 on kerätty Z-Wave Alliancen jäsenyyksien tasot.

Taulukko 6. Z-Wave Alliancen jäsenyyden tasot (Z-Wave Alliance, 2021c)

Jäsenyyden taso	Installer / reseller	Affiliate	Brander	Manufacturer	Principal	Founding
Hinta vuodessa	\$ 250	\$ 1500	\$ 5000	\$ 10000	\$ 65 000	\$ 65 000

Tuotteen sertifiointissa myös erilaiset testit maksavat ja hinnat riippuvat testattavien laitteiden tyypistä. Esimerkiksi testit markkinoille tuotaville tuotteille, jotka ovat vain slave-laitteita ja Z-Wave ohjaajia kustantavat \$ 4000. (Silicon Labs Inc., 2019)

Manufacturer-tason jäsenyys Z-Wave Allianceen, sekä sertifiointiprosessin testit jaettuna 1000 tuotteen erälle lisäävät Z-Wave teknologiaa käyttävän laitteen hintaa \$ 14.

Z-Waven suurin hyöty on sen käyttämä taajuusalue, joka poikkeaa WLAN:in ja Bluetoothin käyttämästä ISM 2,4 GHz alueesta, jolloin tiedonsiirtopakettien törmäyksen riski on pienempi. Tiedonsiirtonopeus on kuitenkin suhteellisen pieni, joten Z-Wave käy parhaiten pieniä tiedonsiirtopaketteja käyttävään ohjaustarkoitukseen.

3.4 EnOcean

EnOcean on langaton likiverkkotekniikka, jota voidaan käyttää myös ilman paristoja energian talteenoton avulla. Energian talteenotolla tarkoitetaan energian ottamista ympäristöstä, esim. valosta aurinkokennon avulla, ja tätä energiaa voidaan käyttää tiedon lähettimeen. EnOcean GmnH perustettiin vuonna 2001 ja se on Siemens AG:n tytäryhtiö. EnOcean-tekniikkaa ylläpitää EnOcean Alliance, jonka tavoitteena on standardisoida energian talteenottoa langattomille tekniikoille, ja se tekeekin yhteistyötä Bluetooth SIG:in ja Zigbee Alliancen kanssa.

Tekniikka perustuu standardiin ISO/IEC 14543.3.1x, joka otettiin käyttöön 2012. EnOcean toimii alle 1 GHz taajuusalueella, Euroopassa 868 MHz ja Yhdysvalloissa 902 MHz. Sen tiedonsiirtonopeus on maksimissaan 125 kbps ja se käyttää ASK ja FSK-modulaatiota. Tekniikan kantama on 30 m sisällä ja 300 m ulkona. EnOceanin PHY-tason ominaisuudet on esitetty taulukossa 7. (EnOcean, 2021)

Taulukko 7. EnOceanin PHY tason ominaisuuksia

	Euroopan ISM
Taajuudet [MHz]	868,3
Kanavan kaistanleveys [kHz]	280 kHz
Tiedonsiirtonopeus [kbps]	125 kbps
Modulaatiotekniikka	ASK, FKS

EnOcean verkot ovat mesh-verkkoja, joissa täyden toiminnan laitteita ovat verkon *Gateway*-laite ja *Room Controller* eli huoneohjainlaite. Gateway-laite toimii linkkinä toisen tiedonsiirtotekniikan (esim. jokin sarjaväylä) välillä ja se pystyy huoneohjainlaitteen kanssa ohjaamaan verkossa olevia toimilaitteita, jotka voivat toimia mm. valon katkaisijana. Toimilaitteet voivat ainoastaan vastaanottaa tietoa. Verkkoon voi kuulua myös paristottomia katkaisijoita ja sensoreita, jotka voivat ainoastaan lähettää tietoa huoneohjainlaitteelle tai gateway:lle. Käyttöenergiansa paristottomat laitteet ottavat ympäristönsä liikkeestä/paineesta, valosta, lämpötilanmuutoksesta, pyörimisliikkeestä tai värinästä. (EnOcean, 2011)

EnOcean Alliancen jäsenyydellä on kolme tasoa. Mitä korkeampi taso, sitä enemmän voi vaikuttaa EnOcean Alliancen toimintaan, ja pääsee osallistumaan työryhmiin ja vain jäsenille tarkoitettuun materiaaliin, jäsenyyden hinnat esitetty taulukossa 8 (EnOcean Alliance, 2021a).

Taulukko 8. EnOcean Alliancen jäsenyyden hinnat. (EnOcean Alliance, 2021)

Jäsenyyden taso	Promoter	Participant	Associate
Hinta vuodessa	\$ 35 000	\$ 6 000	\$ 500 (kaksi vuotta)

Markkinoille tuotavat tuotteet kannattaa sertifioida yhteensopivuuden takaamiseksi muiden markkinoilla olevien tuotteiden kanssa. Sertifioinnin jälkeen tuotteessa voi käyttää EnOceanin logoa. EnOcean teknologian käyttäminen tuotteissa ei kuitenkaan vaadi sertifiointia, eikä edes EnOcean Alliancen jäsenyyttä. (EnOcean Alliance, 2021b)

EnOcean Alliancen Associate-jäsenyys antaa oikeuden käyttää tuotteissa EnOcean logoa sertifiointiprosessi lisää tuotteiden luotettavuutta. 1000 Tuotteen erälle näistä tulisi lisähintaa 0,5 \$. Hinnassa ei ole huomioitu sertifiointin kuluja.

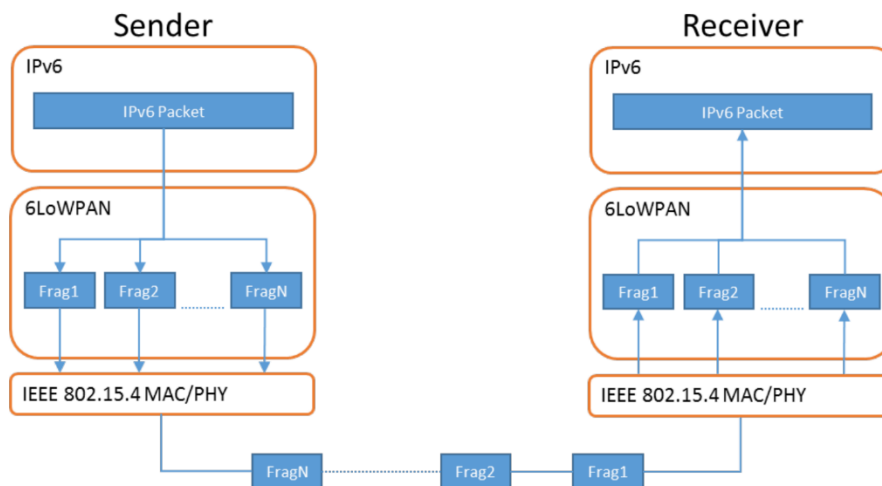
EnOcean sopii hyvin kohteisiin, joissa halutaan käyttää energian talteenottoa käyttäviä ratkaisuja. Taajuusalueensa ja mesh-topologia tukensa ansiosta sen kuuluvuus on myös hyvä rakennusten sisällä ja kohteissa, joissa on 2,4 GHz taajuusaluetta käyttäviä laitteita, kuten WLAN. Tiedonsiirtonopeus ei ole suurimmasta päästä, mutta ohjaus ja tilanluentatarkoitukseen se riittää hyvin.

3.5 Thread ja 6LoWPAN

Thread on avoin langaton likiverkkotekniikka, jota monet suuret ja tunnetut yritykset, kuten Google, Nest, Apple ja Samsung tukevat. Threadia ylläpitää Thread Group-järjestö. Thread on rakennettu 6LoWPAN-teknologian päälle, joka on *Internet Engineering Task Force* (IETF):n kehittämä likiverkkotekniikka. 6LoWPAN:in tavoite on integroida IPv6, eli internetprotokolla IEEE 802.15.4 standardiin OSI-mallin PHY ja DLL tasojen osalta. Tekniikan nimi 6LoWPAN tulee sanoista *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*. (F. Montori et al., 2018), (A. G. Ramonet et al., 2020)

Suurin ongelma IP:n sovittamisesta 802.15.4:ään on näiden standardien erikokoiset tiedonsiirtorakenteet (katso kuva 4, jossa 802.15.4. superframe) ja maksimi siirtoyksikkö eli *Maximum Transfer Unit*, MTU. Yhden 802.15.4 tiedonsiirtorakenteen koko on maksimissaan 127 tavua ja IPv6 tiedonsiirtorakenteen koko on 1280 tavua. Yhdellä 802.15.4 tiedonsiirtorakenteella ei siis voida lähettää kokonaista IPv6 pakettia, ja tähän 6LoWPAN teknologia tarjoaa ratkaisun. Se toimii ylimääräisenä sovitustasona näiden tiedonsiirtorakenteiden välillä hajottaen IPv6 paketin useaan 802.15.4 pakettiin siirrettäväksi. Vastaanottajassa taas 802.15.4 paketeista voidaan rakentaa IPv6 paketti. (F. Montori et al., 2018)

Thread tekniikka käyttää 6LoWPAN:in 802.15.4 ja IPv6 sovitusta, kuvassa 9 on esitetty IPv6 paketin lähetys ja vastaanotto 802.15.4 PHY ja MAC tasolla.



Kuva 3.1. IPv6 paketin hajottaminen ja kokoaminen Threadin ja 6LoWPAN:in avulla. (Thread Group, 2015)

6LoWPAN:illa ja Threadilla on sama PHY ja MAC-taso, joka on esitelty tarkemmin luvussa 2.3.

Thread tukee mesh-topologiaa, jonka koordinaattorina toimii *Leader* eli johtajalaite. Johtajalaite voi olla *Border Router* eli reunareititin niminen laite tai normaali reititin. Reunareitittimiä voi olla verkossa useampia, ja ne ovat FFD:itä. Reunareititin toimii samoin kuin gateway-laite, eli se on linkkinä tiedonsiirtoverkkojen, esim. WLAN:in ja Thread-verkon välillä. Thread-verkossa on näiden lisäksi myös päätelaitteita sekä unisia päätelaitteita, eng. *Sleepy End Device*. Päätelaitteet voivat sammuttaa radionsa säästääkseen energiaa ja ne kommunikoi vain reititinlaitteen kanssa. Thread-verkossa voi olla vain yksi johtajalaite, 32 reititinlaitetta ja 511 päätelaitetta per reititin. (A. Nikoukar et al., 2018), (OpenThread, 2020)

Thread-teknologian käyttäminen vaatii Thread Groupin jäsenyyden, ja jäsenyystasoja on 5 erilaista. Jäsenyydellä saa käyttöönsä teknologiaan liittyviä dokumentteja ja muita etuja. Jäsenyyden tasot ja hinnat on esitetty alla.

Taulukko 9. Thread Groupin jäsenyshinnasto (Thread Group, 2021)

Jäsenyyden taso	Academic	Affiliate	Implementer	Contributor	Sponsor
Hinta vuodessa	\$ -	\$ 750	\$ 5000	\$ 15000	\$ 65000

Omille tuotteille voi hakea tekijänoikeusmaksuttomia immateriaalioikeuksia *Implementer* tasolta ylöspäin. Tämä vaatii markkinoille tuotavan tuotteen sertifiointin.

Implementer-tason jäsenyys Thread Groupiin, sekä sertifiointiprosessin testit jaettuna 1000 tuotteen erälle lisäävät Thread-teknologiaa käyttävän laitteen hintaa \$ 5. Hinnassa ei ole huomioitu sertifiointiprosessin maksuja, kuten testauksen kuluja.

Thread-teknologia sopii hyvin IoT-käyttöihin, joissa laitteet halutaan lisätä internettiin ja hyötyä 802.15.4:n pienestä virrankulutuksesta. Thread toimii myös yhteistyössä Bluetoothin kanssa, ja Thread-verkkoon on mahdollista liittyä myös BT-radiolla. (J. Kennis, 2018) Koska Threadilla ja Zigbeellä on sama PHY/MAC-taso käytössä, on todennäköistä, että ne jossakin vaiheessa yhdistyvät (A. Nikoukar et al., 2018).

3.6 LoRa ja LoRaWAN

LoRa on pienen tehontarpeen pitkän kantaman langaton verkkotekniikka, jonka Semtech on patentoinut. LoRa-teknologia pitää sisällään radiolähettimet ja vastaanottimet sekä modulaatiotekniikan ja PHY-taso on Semtech:in omistama. LoRaWAN taas on LoRan päälle rakennettu avoin verkkotekniikka, jonka LoRa Alliance on kehittänyt ja ylläpitää. LoRa ei siis ole likiverkkotekniikka, mutta se otettiin tarkasteluun vertailun vuoksi. (A. Nikoukar et al., 2018)

LoRa toimii Euroopassa 868 MHz taajuusalueella ja esim. Amerikassa 915 MHz taajuusalueella. Taajuuskaista on jaettu 8–15 kanavaan, riippuen käyttöalueesta. Kanavien kaistanleveydet ovat 125, 250 ja 500 kHz. Suuremmalla kaistanleveydellä saadaan nopeampi tiedonsiirtonopeus, mutta silloin laitteen tehonkulutus ja interferenssin riski kasvaa. Lisäksi lähetysten kantama kasvaa käytettäessä leveämpää kaistaa. LoRaWAN tarjoaa kahdeksan erilaista modulaatiovaihtoehtoa PHY-tasolla ja näistä kuusi käyttää LoRa-modulaatiota SF:n eli *Spreading Factor*:in arvoilla 7–12 ja 125 kHz kaistanleveydellä. SF kertoo kuinka tiheään lähetettävä tieto on pakattu kantaan. Suuremmalla SF:n arvolla saadaan kasvatettua lähetysten kantamaa, mutta samalla tehonkulutus kasvaa. Seitsemäs mahdollinen PHY-tila käyttää 250 kHz kaistanleveyttä SF arvolla 7 ja kahdeksannella tilalla saadaan suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus 50 kbps käyttäen GFSK-modulaatiota. (A. Nikoukar et al., 2018), (Petäjäjärvi J. et al, 2017).

Taulukossa 10 on esitetty LoRan PHY-tason ominaisuudet.

Taulukko 10. LoRa verkkoteknologian PHY tason ominaisuuksia (A. Nikoukar et al., 2018).

Taajuusalue [MHz]	868–915
Kanavien lukumäärä	8–15
Kanavan kaistanleveys [kHz]	125/250/500
Tiedonsiirtonopeus	0,3–50 kbps (GFSK:lla suurin)
Modulaatiotekniikka	LoRa, GFSK

LoRa:n MAC-taso on suunniteltu muistuttamaan mahdollisimman paljon IEEE 802.15.4:n MAC-tasoa, jotta yhteensovittaminen muiden 802.15.4:än MAC-tasoa käyttävien tekniikoiden, kuten Zigbeeen kanssa olisi yksinkertaista (M. Centenaro et al., 2016).

LoRa tukee klusteripuutopologiaa muistuttavaa tähtitopologiaa. Siinä päätelaitteet ovat aina yhteydessä vähintään yhteen gateway-laitteeseen, joka taas lähettää tietoa eteenpäin verkon koordinaattorille, *LoRa NetServer*:ille. Gateway-laitteet toimivat siis CH:ina klusteripuuverkossa, jonka päätelaitteet eivät voi reitittää tietoa. (F. Montori et al., 2018)

LoRa-verkossa olevilla laitteilla on kolme mahdollista luokkaa, jotka määrittelevät niiden toimintaa. A-luokan laitteet heräävät tietyin väliajoin lähettämään tiedonsiirtopaketteja, jonka jälkeen se odottaa vastausta samalla kanavalla ja SF:n arvolla. Saatuaan kuittauksen gateway-laitteelta, se vaipuu takaisin unitilaan. Tällä luokalla on pienin tehonkulutus, mutta se ei sovi reaaliaikaisiin sovelluksiin. Luokan B laitteet taas heräävät vain, kun gateway-laitteelta on tulossa tietoa. Gateway lähettää majakkasignaalin, jolla asetetaan heräämisaika päätelaitteille. Mitä tiheämmät heräämisajat, sitä enemmän tehoa kuluu. C-luokan laitteet sopivat käyttöihin, joissa ne ovat kytkettynä virtalähteeseen, eikä tehonkulutuksella ole väliä. Tässä luokassa laitteet kuuntelevat jatkuvasti kanavaa, paitsi lähettäessään tietoa. Nämä laitteet sopivat hyvin reaaliaikaiseen käyttöön. (A. Nikoukar et al., 2018)

LoRa Alliancen toimintaan pääsee vaikuttamaan jäsenenä sitä enemmän, mitä korkeampi jäsenyyden taso. Kaikilla tasoilla kuitenkin saa täydet markkinointihyödyt, mm. LoRaWAN-logon käyttöoikeuden. Kaikilla tasoilla voi myös hakea tuotteilleen sertifikaattia. Sertifiointi on maksutonta LoRa Alliancen jäsenille. (LoRa Alliance, 2021)

Taulukko 11. LoRa Alliancen jäsenmaksut (LoRa Alliance, 2021).

Jäsenyyden taso	Sponsor	Contributor	Institutional	Adopter
Hinta vuodessa	\$ 50 000	\$ 20 000	Ilmainen	\$ 6000 (\$ 3000 Start-upeille)

LoRa Alliancen Adopter-tason jäsenyys jaettuna 1000 tuotteen erälle, tuo tuotteelle lisähintaa \$ 5.

LoRa sopii hyvin käyttöihin, joissa tarvitaan pidempää kantamaa ja alhaista virrankulutusta esim. mittaus- tai ohjaustietojen lähettämiseen. Sillä saadaan kuitenkin maksimissaankin vain 50 kbps tiedonsiirtonopeus käyttäen GFSK-modulaatiota, joten se ei sovi käyttöihin, joissa on suuri tiedonsiirtotarve.

4. TULOKSET JA NIIDEN TULKINTAA

Käytettävän likiverkkotekniikan valinta riippuu monesta asiasta ja tuotteille asetetuista vaatimuksista. Tässä työssä tutustuttiin näihin tekniikoihin ja vertailtiin niitä keskenään. Tekniikoita ylläpitäviin järjestöihin tutustuttiin myös hieman, sekä kartoitettiin tekniikoita käytävien markkinoille tuotavien tuotteiden hintaa tuhannen laitteen erää kohti. Likiverkkotekniikoiden ominaisuuksia koottiin liitteeseen 1.

Likiverkkotekniikoista Bluetooth BR/EDR on tiedonsiirtonopeudeltaan huomattavasti nopeampi kuin muut. Tekniikka on myös alusta asti suunniteltu nimenomaan korvaamaan sarakommunikointikaapeleita, joten se on erinomainen vaihtoehto, jos tarkoitus on siirtää suurempia tietomääriä. Bluetooth BR/EDR tukee kuitenkin vain tähti-topologiaa, joten suuremmalle verkon koon tarpeelle esim. Zigbee tarjoaa sopivampaa mesh-topologiaa.

Zigbeeen virrankulutus on myös paljon pienempää kuin Bluetoothin, joten se sopii erinomaisesti paristokäyttöisiin sovelluksiin. Z-Wave, EnOcean ja LoRa käyttävät 868 MHz ISM-taajuuskaistaa, jolla on vähemmän liikennettä ja pienempi tiedonsiirtopakettien törmäysriski. Lisäksi matalammalla taajuudella säteily vaimenee vähemmän väliaineessa, ja verkkojen kuuluvuus on parempi. Tekniikat, joissa on reitittiminä toimivia laitteita parantavat myös kuuluvuutta huomattavasti. Varsinkin mesh-topologiaa tukevat tekniikat pystyvät laajentamaan verkkoaan ja ovat toimintavarmoja, koska tiedonsiirtoreittiä voidaan muuttaa jonkun laitteen pudotessa verkosta.

BR/EDR-verkkoon voi kytkeä vain 8 laitetta, mutta Zigbee-verkkoon laitteita saa teoriassa 65000. Myös muilla likiverkkotekniikoilla verkkoihin mahtuu yli 200 laitetta. Jos tavoitteena on perustaa satojen laitteiden verkko, käytetty taajuusalue saattaa ruuhkautua. Koska tyypilliset kotitalouksista löytyvät WLAN-reitittimet käyttävät 2,4 GHz taajuusaluetta, niiden toiminta häiriintyisi vähemmän, jos usealaitteinen likiverkko toimisi esim. 868 MHz taajuusalueella.

Verraten likiverkkotekniikoihin, LoRa on myös mielenkiintoinen tekniikka. Se tukee tähti-topologiaa ja sen avulla voidaan ottaa suurempia alueita käyttöön. LoRan 868 MHz-taajuusalue myöskin kuormittaa yleisiä WLAN-taajuusalueita vähemmän. Kotitalouskäyttöihin se voi kuitenkin olla hieman haastava, koska kaikkien LoRa-päätelaitteiden on oltava yhteydessä suoraan gateway-laitteeseen, eikä tietoa voi reitittää esim. kellarista toisen LoRa-laitteen välityksellä esim. olohuoneessa olevalle gateway-laitteelle, kuten mesh-topologiaa tukevilla verkkotekniikoilla voisi.

Thread oli vertailussa mielenkiintoinen tekniikka, koska se tukee IEEE 802.15.4 standardia PHY- ja MAC-tasolta sekä IPv6-protokollaa. Lisäksi Bluetooth-laitteiden liittäminen Thread-verkkoon parantaa niiden skaalautuvuutta muihin likiverkkotekniikoihin nähden.

EnOceanin paristottomat laitteet erottavat sen muista tekniikoista ja tiivis yhteistyö Zigbee Alliancen ja Bluetooth SIG:in kanssa tekevät siitä hyvin kiinnostavan tekniikan tulevaisuuden kannalta.

Tuhannen laitteen erälle eniten lisähintaa laitetta kohti toi Z-Wave-tekniikka ja vähiten taas EnOcean. Z-Wave Alliance tarjosi hyvin selkeät hinnat sivuillaan koko sertifiointiprosessin osalta, eli myös vaaditun testauksen. Kaikilla tekniikoilla testauksen hinnoista ei ollut tietoa,

jolloin lisähinnan laskentaan käytettiin pelkkää jäsenyyden hintaa. Tästä syystä lisähintaver-
tailun tuloksia on vaikea vertailla keskenään.

RS-485 väylän korvaaminen onnistuu lähes millä vain tekniikalla, mutta yhtä suurta tiedon-
siirtonopeutta ei saada millään esitetyistä tekniikoista.

5. YHTEENVETO

Työn tuloksena muodostettiin kokonaiskuva likiverkkotekniikoista, joita voidaan käyttää
kotitalouksissa WLAN:in rinnalla. Työssä tutkittiin Zigbee-, Bluetooth-, Z-Wave-,
EnOcean-, 6LoWPAN-, Thread- sekä Lora-tekniikoita ja vertailtiin niiden ominaisuuksia
toisiinsa. Selvitettiin mihin käyttöihin mitkäkin tekniikat sopivat, ja mihin eivät. Tekni-
koista muodostettiin työn liitteeksi taulukko, jossa esitetään tekniikoiden vertailtavat omi-
naisuudet.

Työssä tutustuttiin myös standardeihin, joihin useimmat WPAN-tekniikat perustuvat ja lait-
teiden erilaisiin rooleihin verkoissa. Työssä myös selvitettiin, millaisia laitteiden välisiä to-
pologioita langattomissa likiverkoissa esiintyy ja mitkä teknologiat tukevat mitäkin topolo-
gioita. Lisäksi tutustuttiin signaalin vaimenemiseen ja laatuun, sarjakommunikaatioon ja RS-
485 sarjakommunikaatiostandardiin, sekä interferenssiin ISM-taajuusalueella.

Likiverkkotekniikat toimivat pääosin 868 MHz ja 2,4 GHz ISM-taajuusalueilla, joista jäl-
kimmäinen on ruuhkaisempi WLAN-reitittimien takia. 868 MHz taajuusalueella tiedonsiir-
tonopeus on hitaampaa, mutta säteily vaimenee väliaineessa vähemmän.

Tekniikoiden topologioista mesh-topologia on toimintavarmin, koska tietoa voidaan reitittää
laitteiden välillä, ja jonkun laitteen pudotessa verkosta, tietoa voidaan välittää toista reittiä.

Vertailuista tekniikoista Z-Wave:lla on suurimmat kustannukset ja EnOcean:illa pienim-
mät. Tekniikoiden käyttämisen hinnat 1000 tuotteen erää kohti eivät kuitenkaan ole täysin
vertailukelpoisia, koska kaikki tekniikoita ylläpitävät järjestöt eivät ilmoittaneet sertifiointi-
prosessin hintoja mm. vaadittujen testien osalta.

RS-485 väylä voidaan korvata millä vain tekniikalla, jos tiedonsiirtonopeuden ei tarvitse olla
liian suuri, koska millään vertailun langattomalla likiverkkotekniikalla ei päästä yhtä nope-
aan tiedonsiirtonopeuteen kuin langallisella RS-485 sarjakommunikaatiostandardilla.

Työssä käytetty lähdemateriaali koostuu pääosin ajankohtaisista ja luotettavista tieteellisistä
artikkeleista. Työssä käytettiin myös eri tekniikoita ylläpitävien järjestöjen julkaisemaa ma-
teriaalia, joka ei välttämättä ole täysin puolueetonta ja saattaa hieman kaunistella tekniikan
ominaisuuksia.

Työssä tutkittiin vain yleisimpiä langattomia likiverkkotekniikoita valituilla rajauksilla,
mutta tekniikoita on tarjolla enemmänkin ja niitä voisi ottaa vertailuun mukaan jatkotutki-
muksena. Lisäksi voisi tutustua markkinoilta löytyviin tekniikoita tukeviin radiomoduulei-
hin, jotta kunkin tekniikan käyttämisen hintaa tuotetta kohti saisi tarkemmin selvitettyä.

LÄHTEET

A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, Fourthquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095

A. G. Ramonet and T. Noguchi, "IEEE 802.15.4 Now and Then: Evolution of the LR-WPAN Standard," 2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Phoenix Park, PyeongChang,, Korea (South), 2020, pp. 1198-1210, doi: 10.23919/ICACT48636.2020.9061514.

A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Güneş and B. Dezfouli, "Low-Power Wireless for the Internet of Things: Standards and Applications," in IEEE Access, vol. 6, pp. 67893-67926, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879189

Bluetooth SIG, Benefits comparison, 2021, Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/develop-with-bluetooth/join/membership-benefits/>

Bluetooth SIG, BT Radio versions, 2021, Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/radio-versions/>

Bluetooth SIG, The Challenge of Interference, 2021, Saatavissa: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/reliability/>

Cadence PCB solutions, What is Signal to Noise Ratio and How to calculate it?, Saatavilla: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-signal-to-noise-ratio-and-how-to-calculate-it>

CUI Devices, J. Kelly, RS-485 Serial Interface Explained, Saatavissa: <https://www.cuidevices.com/blog/rs-485-serial-interface-explained>

Electronicsnotes, Direct Sequence Spread Spectrum: the basics, Saatavissa: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/dsss/what-is-direct-sequence-spread-spectrum.php>

EnOcean Alliance, How To Certify A Product, 2021b, Saatavissa: <https://www.enocean-alliance.org/products/how-to-certify-a-product/>

EnOcean Alliance, Members Benefits, 2021a, Saatavissa: <https://www.enocean-alliance.org/about-us/membership/membership-benefits/>

EnOcean, EnOcean Technology – Energy Harvesting Wireless, 2011

EnOcean, Radio Technology, 2021, Saatavissa: <https://www.enocean.com/en/technology/radio-technology/>

Extremetech, J. Hurska, Qualcomm unveils its first 5G modem: 5Gbps peak downloads, beam forming, and 800MHz of spectrum, 2016, Saatavissa: <https://www.extremetech.com/mobile/237866-qualcomm-unveils-its-first-5g-modem-5gbps-peak-downloads-beam-forming-and-800mhz-of-spectrum>

Federico Montori, Luca Bedogni, Marco Di Felice, Luciano Bononi, Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues, *Pervasive and Mobile Computing*, Volume 50, 2018, Pages 56-81, ISSN 1574-1192, <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.08.002>.

G. Pan, J. He, Q. Wu, R. Fang, J. Cao and D. Liao, "Automatic stabilization of Zigbee network," 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), Chengdu, 2018, pp. 224-227, doi: 10.1109/ICAIBD.2018.8396199.

Gartner, Gartner Says a Typical Family Home Could Contain More Than 500 Smart Devices by 2022, 2014, Saatavilla: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2014-09-08-gartner-says-a-typical-family-home-could-contain-more-than-500-smart-devices-by-2022>

IEEE Std 802.15.1, 2002, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)

IEEE Std 802.15.4, 2003, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)

J. Kennis, OSRAM Standardization Office, How Thread Can Work Seamlessly With Bluetooth For Commissioning And Operation, 2018, Saatavilla: <https://www.thread-group.org/news-events/blog/ID/196/How-Thread-Can-Work-Seamlessly-With-Bluetooth-For-Commissioning-And-Operation#.YGLvWa8zaUI>

Kooker, J. (2008). Bluetooth, Zigbee, and wibree: A comparison of wpan technologies. *CSE* 237A, 20.

L. Angrisani, M. Bertocco, D. Fortin and A. Sona, "Experimental Study of Coexistence Issues Between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 Wireless Networks," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 8, pp. 1514-1523, Aug. 2008, doi: 10.1109/TIM.2008.925346.

LoRa Alliance, Membership Benefits, 2021, Saatavilla: <https://lora-alliance.org/membership-benefits/>

M. B. Yassein, W. Mardini and A. Khalil, "Smart homes automation using Z-wave protocol," 2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Agadir, Morocco, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMIS.2016.7745306.

M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, October 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7721743.

M. J. Lee et al., "IEEE 802.15.5 WPAN mesh standard-low rate part: Meshing the wireless sensor networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 7, pp. 973-983, September 2010, doi: 10.1109/JSAC.2010.100902.

OpenThread, Node Roles and Types, 2020, Saatavissa: <https://openthread.io/guides/thread-primer/node-roles-and-types>

Petäjärvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, Janhunen J, Iinatti J. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. International Journal of Distributed Sensor Networks. March 2017. doi:10.1177/1550147717699412

Praveen Kaushik, Nilesh kumar R. Patel, Jyoti Singhai, Energy Efficient Clear Channel Assessment for LR-WPAN, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 3, No. 2, May 2011

Silicon Labs Inc., INS12578, Z-Wave Certification Fee Schedule, 2019

Sparkfun, Serial Communication, Saatavilla: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication/all>

Thread Group, Membership Benefits, 2021, Saatavissa: <https://www.thread-group.org/thread-group#Membershipbenefits>

Thread Group, Thread Usage of 6LoWPAN, 2015

Tutorialspoint, Digital Communication - Phase Shift Keying, Saatavissa: https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_phase_shift_keying.htm

Vesternet, Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices, 2020, Saatavissa: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices>

Wikipedia, Computer Network, 2021, Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_network

Zigbee Alliance, Join the Zigbee Alliance, 2021, Saatavissa: <https://Zigbeealliance.org/join/>

Zigbee Alliance, Zigbee Specification, 2015

Z-Wave Alliance, About Z-Wave Technology, 2021a, Saatavissa: https://z-wavealliance.org/about_z-wave_technology/

Z-Wave Alliance, Z-Wave Global Regions, 2021b, Saatavissa: <https://z-wavealliance.org/z-wave-global-regions/>

LIITTEET

Liite 1, Likiverkkotekniikat

Likiverkko- tekniikka	Kantama	Tiedonsiirtono- peus [kbits/s]	Taajuusalueet [MHz]	Kaistanle- veys [kHz]	Kanavien lkm	Modulointi	MAC access	Standardi johon pe- rustuu	Topologiat	Max laitteiden määrä verkossa	Lisenssihintaa / 1000 laitetta
Zigbee	10-75 m	250	2400	2000	16	OQPSK	CSMA/CA	IEEE 802.15.4	tähti, puu, mesh	65000 (teoreettinen)	\$ 8
Zigbee	10-75 m	40	902-928	1200	10	BPSK	CSMA/CA	IEEE 802.15.4	tähti, puu, mesh	65000 (teoreettinen)	\$ 8
Zigbee	10-75 m	10	868-868,6	600	1	BPSK	CSMA/CA	IEEE 802.15.4	tähti, puu, mesh	65000 (teoreettinen)	\$ 8
Bluetooth BR	10-100 m	1000	2400-2483,5	1000	79	GFSK	FHSS	IEEE 802.15.1	tähti	8	\$ 8
Bluetooth EDR	10-100 m	3000	2400-2483,5	1000	79	8DPSK, $\pi/4$ DQPSK	FHSS	IEEE 802.15.1	tähti	8	\$ 8
Bluetooth LE	10-100 m	125-2000	2400-2483,5	2000	40	GFSK	TDMA	IEEE 802.15.1	tähti, mesh		\$ 8
Z-Wave	30 m	9,6/40/100	868,4-869,85	400/300/300	3	FSK, GFSK	CSMA/CA	ITU-T G.9959	mesh	232	\$ 14
EnOcean	30 m	125	868,3	280		ASK, FSK	TDMA	ISO/ IEC 14543-3-1X	mesh		\$ 0,5 (ei sisällä testejä)
Thread/ 6LoWPAN	10-75 m	250	2400	5000		OQPSK	CSMA/CA	IEEE 802.15.4, IPv6	tähti, puu, mesh	250+	\$ 5 (ei sisällä testejä)
LoRa	10 km	0,3-50	868-915	125/250/500	8-15	LoRa, GFSK	LoRaWAN		tähti	1000	\$ 5