



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ville Korpua

Sensoriverkot ja toimilaitteet

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikka

Insinöörityö

30.11.2018

Tekijä Otsikko	Ville Korpua Sensoriverkot ja toimilaitteet
Sivumäärä Aika	34 sivua 30.11.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Tietotekniikka
Ammatillinen pääaine	Tietoverkot
Ohjaajat	Lehtori Marko Uusitalo
<p>Tutkimusten, ohjelmistojen ja laitteiston kehittyessä langattomia sensoriverkkoja voidaan käyttää yhä useammassa käyttötarkoituksessa. Laitteiston monimutkaisuuden ja virrankulutuksen väheneminen johtaa pidempään sensoriverkon käyttöikänsä. Lisääntynyt tieteellinen, lääkinnällinen ja teollinen investointi lisää parempia tutkimustuloksia paremman tasapainon löytämiseksi viestinnän ja tiedon prosessoinnin välillä. Tässä työssä käsitellään langattomien sensoriverkkojen ja toimilaitteiden ohjelmistoja, standardeja, taajuuksia, operaattoreita, verkon topologioita, eri valmistajia, käyttötarkoituksia ja mahdollisuuksia.</p> <p>Lähtökohta työssä oli selvittää, millä eri tavoilla antureista voidaan siirtää tietoa palvelimille. Työ laajeni itse antureiden sijoitteluun ja noodien verkon rakentamiseen, energiatehokkuuteen ja käytännön tarkoituksiin erimerkiksi teollisesti. Työssä käsitellään niin IPv4-, kuin IPv6-verkkoja ja pohditaan hyötyjä ja haittoja.</p> <p>Lukijalle työ on hyvää tietoa sensoriverkoista ja erityisesti vanhemmille ihmisille, jotka eivät välttämättä tiedä paljoa aiheesta. Lyhenteet on selitetty lyhenneosassa, ja teksti on hyvin ymmärrettävää. Työ sopii hyvin lukijalle, joka ei ole kiinnostunut niin paljoa teknisestä puolesta. Tekniseen puoleen on kuitenkin panostettu eri puolella työtä, mutta helposti ymmärrettävästi.</p>	
Avainsanat	sensori, sensoriverkko, noodit, anturi, toimilaite

Author Title	Ville Korpua Sensor networks and equipment
Number of Pages Date	34 pages 30 November 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information and Communications Technology
Professional Major	Data Networks
Instructors	Senior Lecturer Marko Uusitalo
<p>Research for applications and technology is enabling more use for wireless sensor networks. The declining complexity of equipment and consuming less energy is leading to longer life time for sensor networks. Rising investment from research, industrial and medical corporations are making development on the balance of data transferring and processing. This work is about sensor network applications, standards, operators, network topologies, manufacturers and opportunities.</p> <p>The starting point for this work was to define how the data ends from sensors to servers. The work expanded to placement of sensors, engineering the node network, energy efficiency and uses in corporate life. Also IPv4 and IPv6 pros and cons will be defined.</p> <p>The work is good information about sensor networks, especially for older people who might not know as much of the rising trend. Abbreviations are inclusive at the start of the work and text is well comprehensive. It is a good read for someone who might not be interested in so much in the technical side. However the work is also very technical in a way that it is well comprehensible.</p>	
Keywords	sensor, sensor network, node, actuator

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sensoriverkot	2
2.1	Langaton sensoriverkko (WSN)	2
2.1.1	Käyttötarkoitus	2
2.1.2	Sensorit ja noodit	2
2.1.3	Sensoriverkon noodien sijoittelu	3
2.1.4	Etäisyys	4
2.2	Verkon topologia	5
2.2.1	Tähtitopologia	5
2.2.2	Puutopologia	6
2.2.3	Vajaa mesh-topologia	7
2.2.4	Mesh-topologia. Itsestään järjestävä sensoriverkko.	8
2.2.5	Itsestään järjestävä ja tiedonsiirtoa kontrolloiva teknologia	9
2.3	Esineiden Internet	10
2.4	Teollisuus ja tulevaisuus	10
2.4.1	Lakiasiat	10
2.4.2	Yritykset	10
2.5	Sensoriteknologian miniatyrisointi perustuen mikrosysteemeihin (MEMS)	11
2.6	Energiantuotanto	11
2.7	Langattoman sensoriverkon operaattorit	12
2.8	Virrankulutus	12
2.9	Virrankulutuksen mallinnus	13
2.9.1	Suora	13
2.9.2	Multihop	14
2.9.3	Klusterointi	14
2.9.4	Patterimallinnus	15
3	Sensoriverkkojen toimilaitteita valmistavat yritykset	15
3.1	Bluetooth	15
3.1.1	Luokat	15
3.1.2	Yhteyksien luominen	16
3.1.3	Laitteiden yhdistäminen	17
3.2	Bluetooth Mesh	17

3.2.1	Bluetoothin kehitys	17
3.2.2	Many-to-many	19
3.2.3	Hukuttaminen	19
3.3	RFID	20
3.3.1	Siru	20
3.3.2	Virtalähteet	20
3.3.3	Tietoturva ja häiriöt	20
3.4	Near-field communication (NFC)	21
3.4.1	Toimitilat	21
3.4.2	Tietoturva	21
3.4.3	Vertailu	22
3.5	ZigBee	23
3.6	ANT	26
3.6.1	Noodit	26
3.6.2	Markkinat	26
3.7	GPS	27
3.8	6LoWPAN	27
3.9	LoRaWaN ja LoRa	29
3.9.1	Päätelaitteet	30
3.9.2	LoRaWAN tiedonsiirto	31
3.10	Sigfox	31
3.10.1	Arkkitehtuuri	32
3.10.2	Teknologia	32
4	Yhteenveto	34
	Lähteet	35

Lyhenteet

AD HOC	Langaton "ad hoc"-verkko on lyhenne hajasijoitetusta langattomasta verkosta. Se ei tarvitse laitteiden välille infrastruktuuria, kuten reitittämiä tai tukiasemia, joihin langattomat laitteet yhdistävät. Sen sijaan jokainen noodi osallistuu tiedon reitittämiseen dynaamisesti asetetuilla reititysalgoritmeilla.
Back end	Front end on se, mikä näkyy päätelaitteilla, ja back end on se, mikä tuottaa käsittelyn tuloksia. Back end on ohjelmisto, fyysinen infrastruktuuri tai laitteisto.
CCA	Clear Channel Assesment. 802.11-standardia käyttävät radiot pystyvät tarkistamaan CCA:lla onko kanava vapaana ennen tiedonsiirtoa.
CSMA/CA	Tietoliikenteen siirtotien varausmenetelmä (engl. Carrier Sense Multiple Access ja Collision Avoidance).
DL	Liittyen radiokommunikointipalveluun downlink (DL) on osa syöttölinjaa (engl. feeder link), mitä käytetään signaalien lähettämiseen esimerkiksi avaruudesta maahan. Tietotekniikassa DL on yhteys tietoliikenne laitteistosta terminaaliin.
ED	Energy Detection havaitsee signaaleja.
ERP	Effective radiated power on määritelmä radiolähettimen lähettämälle signaalille.
Geolokaatio	Geolokaatio on arvio kohteen geograafisesta sijainnista tutkassa, puhelimesta tai Internetiin yhteydessä olevassa päätelaitteessa. Sijainti annetaan geograafisilla koordinaateilla.
GPS	Global Positional System on satelliittipaikannusjärjestelmä ja sillä tarkoitetaan yleisesti satelliittipaikannusta.

IOT	Esineiden internet toisella nimellä teollinen internet (engl. Internet of Things, lyhemmin IoT). Tarkoittaa internetverkon laajentamista fyysisiin laitteisiin, joita voidaan kontrolloida verkon avulla.
ISM band	ISM-taajuusalue (Industrial, Scientific ja Medical) suunniteltiin alun perin teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön, mutta on sallittu nykyään kaikille. Taajuusaluetta käyttävät laitteet voivat aiheuttaa elektromagneettista häirintää radioviestinnälle käyttämällä samaa taajuutta, joten laitteet on rajoitettu tietyille taajuuksille. Samoilla taajuuksilla käyttäjillä ei ole mitään suojautumiskeinoa muiden laitteiden elektromagneettiselta häiriöltä.
LISTA	Linkitetty lista on lineaarinen tietokokoelma. Lineaarista järjestystä ei anneta sen fyysisen muistisijoituksen mukaan. Sen sijaan jokainen osatekijä osoittaa seuraavaan tietorakenteeseen. Tietorakenne koostuu noodeista mitkä muodostavat jonon. Noodit ovat linkitetty toisiinsa. Linkitetty lista on yksinkertainen tietorakenne. Siihen voi myös implementoida abstrakteja tietotyyppejä. Linkitettyt listat ovat dynaamisessa tietorakenne muodossa. Listaa voidaan kasvattaa tai pienentää samalla, kun ohjelma on päällä. Noodien lisäys ja poisto on helppoa ja käytännöllistä myös keskeltä listaa. Yksinkertaisella listauksella on kuitenkin heikkouksia. Osoittimien käyttö vie paljon muistia. Listan luku pitää aloittaa alusta ja edetä järjestyksessä. Käytäntö vaatii enemmän aikaa ja muistia.
LPWAN	A low-power wide-area network (LPWAN) mahdollistaa viestinnän alhaisella bittinopeudella vähävirtaisesti esimerkiksi sensoreiden välillä. Tiedonsiirtonopeus vaihtelee 0.3 kbit/s ja 50 kbit/s välillä per kanava. LPWAN-verkolla voidaan luoda yksityinen langaton sensoriverkko. On myös mahdollista ostaa palvelu tai infrastruktuuri kolmannelta osapuolelta ilman investointia yhdyskäytävään.
LQI	Link Quality Indication mittaa linkin laatua.
MAC	Medium Access Control on verkon varaamisen ja liikennöinnin hoitava osajärjestelmä.

MLME	MAC sublayer Management Entity on rajapinta SSCS ja PHY-kerroksen välille.
MPDU	MAC Protocol Data Units on paketti tietoa, mikä sisältää ylätunnisteen (engl. header), yhteyden osoitteen ja protokollan tiedot. MPDU:ta käytetään siirtämään tietoa radiokanavilla.
Multi-hop	Monihyppy reititys (engl. Multi-hop routing or multihop routing) on kommunikointitapa radio- tai sensoriverkoissa, missä verkon kattavuus on isompi kuin verkon yksittäisten noodien etäisyys. Näin noodi voi käyttää muita noodeja avukseen halutun kohteen saavuttamiseksi.
NFC	Near Field Communication on RFID-tekniikkaa hyödyntävä tiedonsiirtoteknologia lyhyille matkoille.
NODE	Suomeksi solmu tai noodi. Laitte tai tietopiste (engl. data point) on osa suurempaa tietoverkkoa. Henkilökohtaisia tietokoneita, matkapuhelimia tai tulostimia kutsutaan noodeiksi. Käytännössä noodiksi voi kutsua kaikkia laitteita, tai tietopisteitä joille voi antaa IP-osoitteen. Sensoreiden noodit sisältävät pääkohtaisesti neljä osaa: sensorin, virtalähteen ja sen hallintamoduulin, langattoman lähetin-vastaanottimen ja mikrokontrollerin. Sensori vastaa myös signaalien muuntamisesta ja vastaanottamisesta. Värähtely, valo ja kemialliset signaalit muunnetaan digitaaliseen muotoon ja lähetetään mikrokontrollerille käsiteltäväksi. Käyttäjälle datan muuntaa sopivaksi lähetin-vastaanotin. Noodit eivät ole pelkästään fyysisiä laitteita. Ne ovat osia isommassa tietostruktuurissa, kuten linkitetty puu tai lista.
PAN	Suomeksi Personal Area Network tarkoittaa likiverkkoa. Personal Area Network (PAN) on datan välittämiseen puhelimien, tablettien ja tietokoneiden välillä. Likiverkon laitteilla voidaan kommunikoida muiden verkossa olevien laitteiden kanssa. Laitteet voidaan yhdistää isompi tasoiseen verkkoon ja Internetiin missä yksi master-laite ottaa roolin yhdyskäytävänä (engl. gateway). Esimerkiksi Bluetooth ja Zigbee ovat Wireless PAN -laitteita.

PHY	Fyysinen kerros (engl. Physical Layer) on ensimmäinen taso OSI-mallissa. PHY tehtäviin kuuluu siirtää bittejä fyysisten laitteiden välillä.
PLME	Physical Layer Management Entity ilmoittaa esimerkiksi onko kaapeli kiinni laitteessa.
PPDU	Physical Protocol Data Units on osa OSI-mallia.
Protok.pino	Protokollapino (engl. protocol stack) on protokollasarjan (engl. Protocol suite) tai protokollaperheen toimeenpano. Protokollasarjaa käytetään viestinnässä ja pino on ohjelmiston toteutus. Yksilölliset protokollat sarjassa on usein suunniteltu yhdelle tarkoitukseen. Yksi protokollamoduuli kommunikoi yleensä kahden muun kanssa ja kuvitellaan yleisesti kerrokseksi protokollapinossa. Alin protokolla käsittelee alempien tasojen kanssakäymistä viestintälaitteen kanssa. Kaikki ylemmät tasot antavat lisää ominaisuuksia ja kapasiteettia. Käyttäjäsovellukset työskentelevät yleensä vain ylimpien kerroksien kanssa.
PUU	Puu on tietorakennetyyppi, mihin on linkitetty noodeja. Puu simuloi hierarkkista rakennetta juuriarvoilla. Vanhemmalla on kaksisoluinen alapuu lapsia muistuttavalla rakenteella. Tietorakenne on rekursiivinen tarkoittaen, että silmukkaa ei voi syntyä. Puu lähtee juuriarvosta, missä jokainen noodi on tietorakenne koostuen arvoista. Lista on yhteys vertaisarvoista noodeihin (lapsiin), missä yksikään arvo ei kopioitu, eikä osoita juureen.
RFID	Radio Frequency Identification käyttää sähkömagneettisia kenttiä tunnistamaan tägejä. Passiiviset tägeit käyttävät lukijan radioaaltoa sähkölähteenä.
SAP	Service Access Point käytetään valitsemaan protokollan käsittelijä saapuvalla paketille. Tasolla voidaan pyytää palveluita muilta tasoilta.
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer on AAL2:n alataso mikä auttaa kartoittamaan palveluita ATM-soluihin.

TTL	Time To Live tarkoitus on kontrolloida tarvittavien hyppyjen määrää sensoriverkossa määränpään saavuttamiseksi.
Tägi	Engl. tag tai transponder. Mikrosiru, mikä ottaa yhteyttä tägin antenniin; antenni- ja siru-yhdistelmää kutsutaan RFID-tägiksi.
UNB	Ultra-Narrow Band on nimitys teknologialle, mikä lähettää tietoa erittäin kapealla kanavalla.
UL	Liittymän radiokommunikointipalveluun uplink on se yhteys maasta esimerkiksi avaruuteen. Tietotekniikassa UL on yhteys laitteistosta runkoverkkoon (engl. backbone network).
WLAN	Langaton verkko (engl. Wireless Area Network) on lähiverkkotekniikkaa, joka välittää Internet-yhteyden mikroaaltosäteilyn avulla.
6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless personal Area Networks on tarkoitettu erityisesti vähävirtaisille ja langattomille laitteille, mitkä toimivat IPv6-verkossa.

1 Johdanto

Langattomien sensoriverkkojen käyttö ja tutkimus kasvaa eksponentiaalisesti mm. teollisella, lääkinnällisellä ja tieteellisellä alalla. Langatonta sensoriverkkoa voidaan kutsua noodien verkoksi. Verkko ottaa vastaan tietoa ympäristöstä ja luo yhteyden ihmisen, tai koneen ja ympäristön välille. Ohjelmistojen kehitys tuo uusia mahdollisuuksia markkinoille. Lisäksi mikrosysteemien paraneminen ja halventuminen merkitsee sitä, että antureita voidaan sijoittaa pienimpäänkin laitteeseen. [1.]

Insinööriyön tarkoituksena on antaa lukijalle kattavaa tietoa anturiverkkojen rakenteesta, muodostumisesta ja toiminnasta. Lyhenteissä on paljon tietoa verkon eri osista ja ohjelmistoista, jotka kannattaa lukea. Alkuosassa työtä käsitellään, miten verkko rakentuu ja mitä ohjelmia ja laitteita se tarvitsee toimiakseen. Kuvataan, kuinka yleisiä sensorit ovat nykyään ja missä olosuhteissa niitä tarvitaan ja voidaan käyttää. Käsitellään teollista puolta ja markkinoita. Esitellään yritysten tulevaisuuden suunnitelmia ja annetaan hyvä kuva, mihin sensoriverkkoja ollaan viemässä.

Ensimmäisessä osassa kuvaillaan langattomien verkkojen suunnittelua ja rakennetta, erityisesti energiatehokkaan verkon rakentamista, mikä voidaan saavuttaa sijoittelemalla noodeja algoritmeilla, operaattoreilla ja oikealla topologialla. Noodin ollessa lähetystilassa vastaanotin kuluttaa paljon enemmän virtaa kuin mikroprosessori aktiivisessa tilassa. Energian tarve lähetykseen tai datan prosessointiin voi olla sata- tai tuhatkertainen. Tästä syystä kommunikointiprotokollan pitää olla suunniteltu energiatehokkaaksi. Vanhempi materiaali langattomista sensoriverkoista käsittelee paljon energiatehokkaita sensoriverkkoja, mutta ei käsittele paljoa virran kulutusta noodin sisällä tapahtuvasta tiedon prosessoinnista ja lopputuloksena on väite, että lähetin-vastaanotin kuluttaa enemmän virtaa. Toisaalta tiedon prosessointi langattomissa sensoriverkoissa voi käyttää paljon tehtäviä mikroprosessorissa, jopa enemmän kuin lähetin-vastaanotin käyttää aikaa lähetystilassa. Tiedon prosessointi mikroprosessorissa voi aiheuttaa yhtä suuren virrankulutuksen lähetys- ja vastaanottotilassa kuin lähetystila. Sen takia väite, että viestintäprotokollan suunnittelu on tärkeämpää kuin mikroprosessorin tehtävien hallinta ei ole aina totta.

Loppuosassa tarkastellaan ja vertaillaan eri valmistajien laitteita ja verkkoja. Työn viimeisessä osassa käsitellään kanavia, taajuuksia ja miten protokollan eri tasot

toimivat. Taulukot ovat laitteiden vertailemiseksi. Kuvia on verkon osa-alueiden havainnollistamiseksi.

2 Sensoriverkot

2.1 Langaton sensoriverkko (WSN)

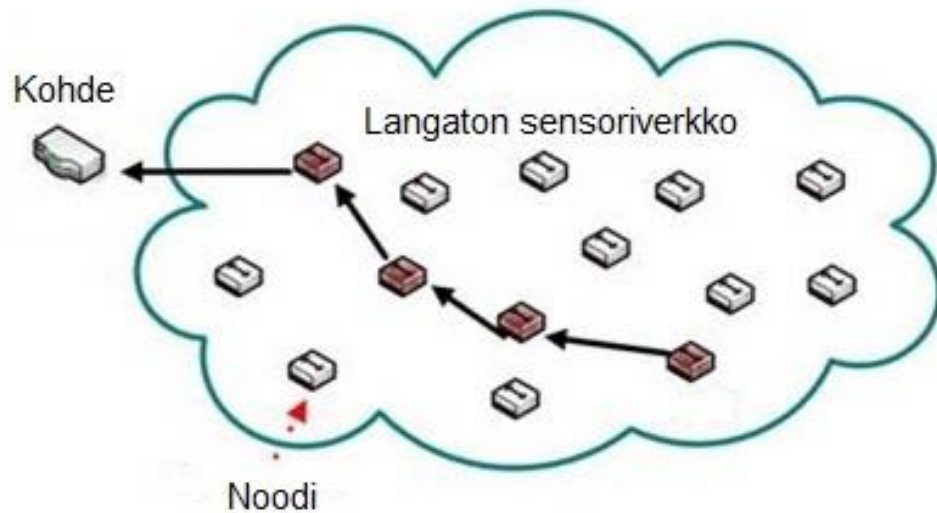
2.1.1 Käyttötarkoitus

Nykyaikana sensoreita on joka puolella. Asiaa ei välttämättä ajattele tai sitten se on itsestäänselvyys. Sensoreita on älypuhelimissa, ajoneuvoissa ja jopa puutarhoissa maaperän monitorointia varten. Tutkimustyö langattomille sensoriverkoille aloitettiin 1980 ja 2000-luvun jälkeen kysyntää on riittänyt teollisilla aloilla. Se johtuu vähävirtaisten ja halpojen komponenttien, kuten prosessoreiden, radioiden ja sensoreiden halventumisesta. Komponentteja voidaan integroida yhdelle sirulle.

2.1.2 Sensorit ja noodit

Sensori on laite, mikä mittaa fyysisiä olosuhteita ja muuttaa ne signaaleiksi. Esimerkiksi termopari muuntaa lämpötilan jännitteeksi, että volttimittari voi lukea sen. Suurin osa sensoreista voidaan kalibroida tarkempien tulosten saavuttamiseksi.

Langatonta sensoriverkkoa voidaan kuvailla noodien verkoksi, mikä toimii yhteistyössä ympäristön, ihmisen ja tietokoneen välillä [2]. Nykyään sensoriverkko pitää sisällään toimilaitteen - ja sensorin noodit, portin ja asiakasohjelman. Iso määrä sensorinoodeja sijoitetaan tarkkailtavalle alueelle, ja ne muodostavat verkon. Noodit tarkkailevat ja keräävät tietoa ja siirtävät sitä toisilleen hyppäämällä (engl. hopping). Tietoa voidaan siirtää useammalta noodilta samaan aikaan portin noodille monihyppy reitityksen jälkeen (engl. multihop routing), ja sen jälkeen se voi saapua hallintanoodille internetin tai satelliitin välityksellä. Hallintanoodin (engl. management node) avulla voidaan hallita verkkoa, julkaista monitorointitehtäviä ja nähdä tiedon keräyksen tulokset. [3.]

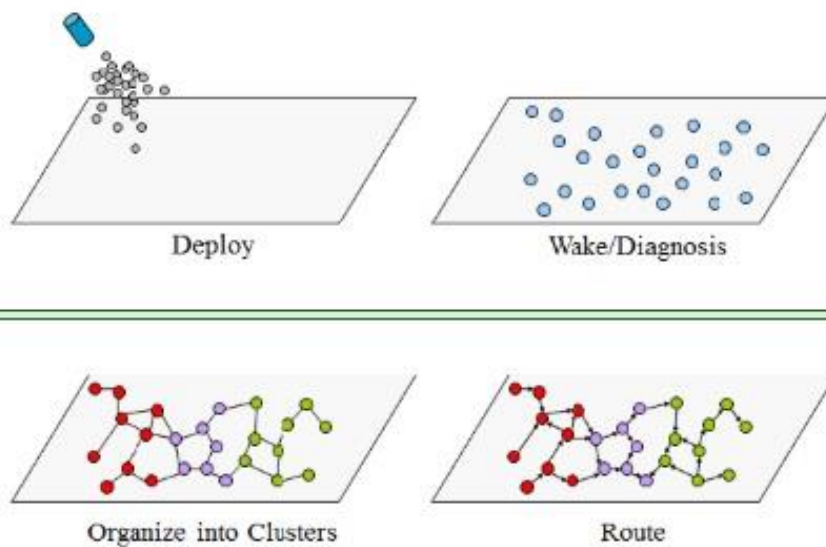


Kuva 1. Noodit sensoriverkossa.

2.1.3 Sensoriverkon noodien sijoittelu

Yleisesti langaton sensoriverkko koostuu noodeista ja terminaalista internetiin. Sensoriverkon käyttöönotto tapahtuu niin, että ensiksi sensoriverkon noodit lähettävät sijaintitietonsa ympärille ja vastaanottavat muiden noodien tilan. Toiseksi sensoriverkon noodit organisoituvat yhdistyneeksi verkoksi riippuen topologiasta. Sopivat reitit luodaan verkkoon lopuksi tiedon lähettämiseksi.

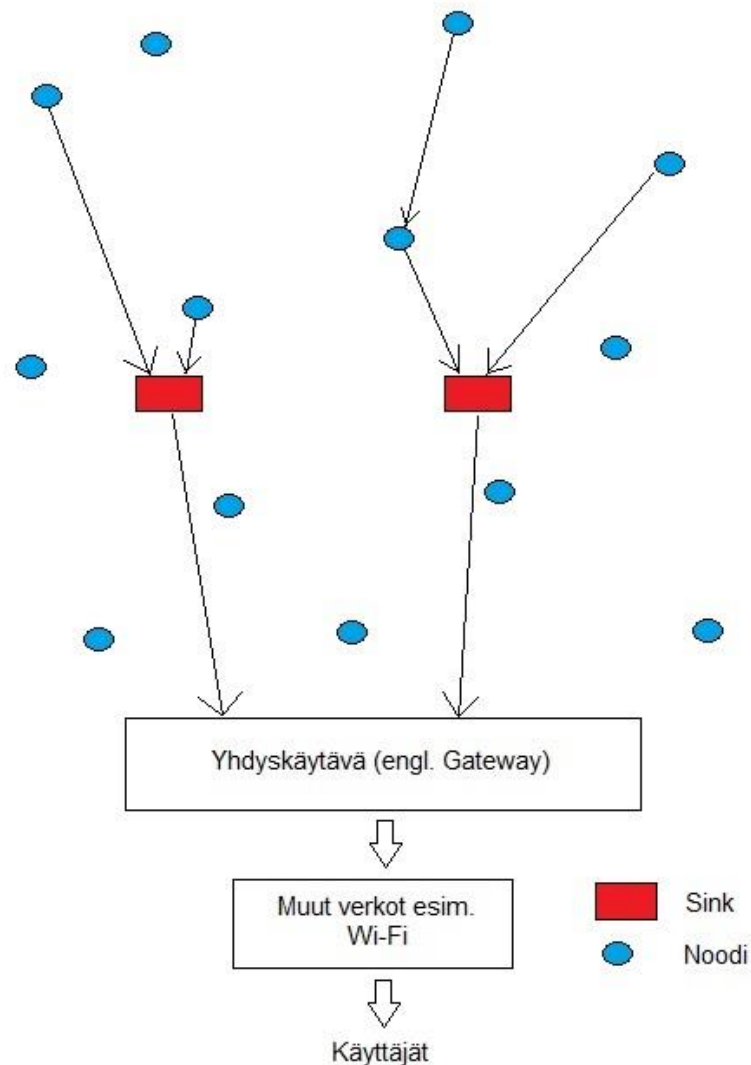
Sensor Network Initialization



Kuva 2. Noodien organisoituminen.

2.1.4 Etäisyys

Noodien virta voi tulla aktiivisesti pattereista tai passiivisesti vastaanottimesta. Lähetysmatka voi olla ulkona esteettömällä yhteydellä jopa 800 m. - 1000 m. Matka pienenee sisällä muutamalla metrillä. Verkon laajentamiseksi voidaan käyttää multi-hop-reititystä jos noodit ovat lähettäjiä ja vastaanottajia. Ensimmäinen sensoriverkon noodi lähettää tietoa läheiseltä noodilta eteenpäin muille noodeille. Seuraava noodi lähettää dataa eteenpäin portin reitillä oleville sink noodeille. Tiedon välittämistä jatketaan, kunnes tieto saapuu määränpähän portille (engl. gateway). [4.]



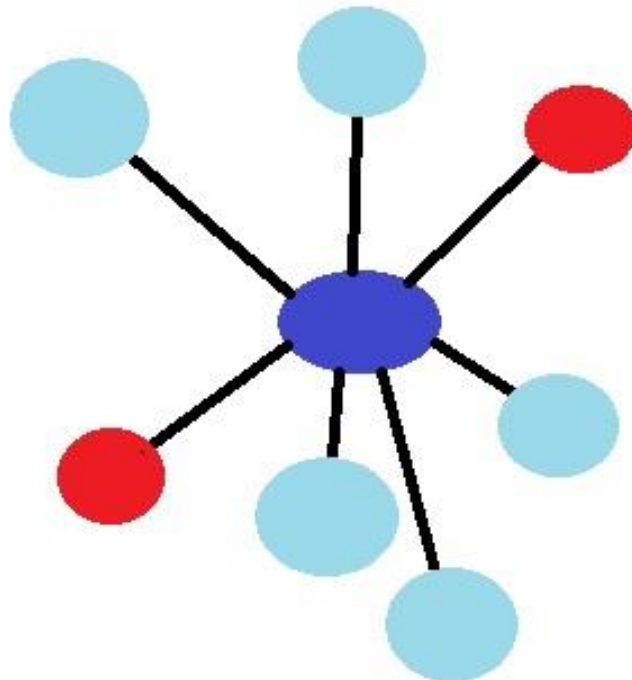
Kuva 3. Multi-sink-skenaario.

2.2 Verkon topologia

Topologia on verkon rakenne, missä kommunikoivat laitteet on määritelty noodeiksi ja yhteydet niiden välillä ovat linkkejä. Topologia voi olla joko looginen tai fyysinen. Fyysinen topologia on laitteiden ja kaapeleiden sijainti. Looginen topologia havainnollistaa datan kulkua verkossa. Noodien ja linkkien järjestys riippuu käytetystä topologiasta. Esimerkiksi ZigBee-verkkolla voidaan käyttää tähti-, puu- tai ”mesh”-topologiaa.

2.2.1 Tähtitopologia

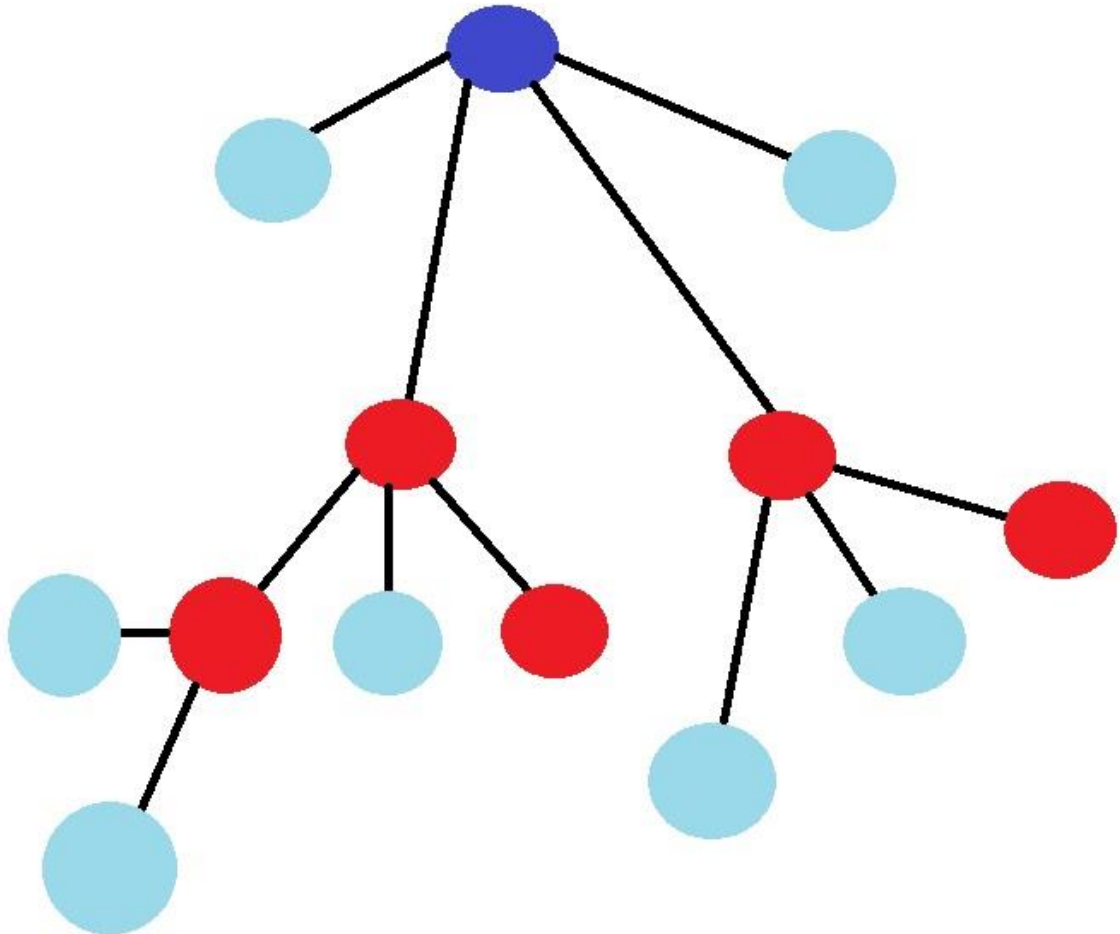
Tähtitopologiassa on keskinoodi, mikä on linkitetty kaikkiin verkon noodeihin. Kaikki data kulkee keskinoodin kautta. Verkon ei tarvitse olla tähden muotoinen. Topologian huomattava etu on, että yhden linkin rikkoutuminen ei vaikuta muun verkon toimintaan. [5.]



Kuva 4. Tähtitopologia.

2.2.2 Puutopologia

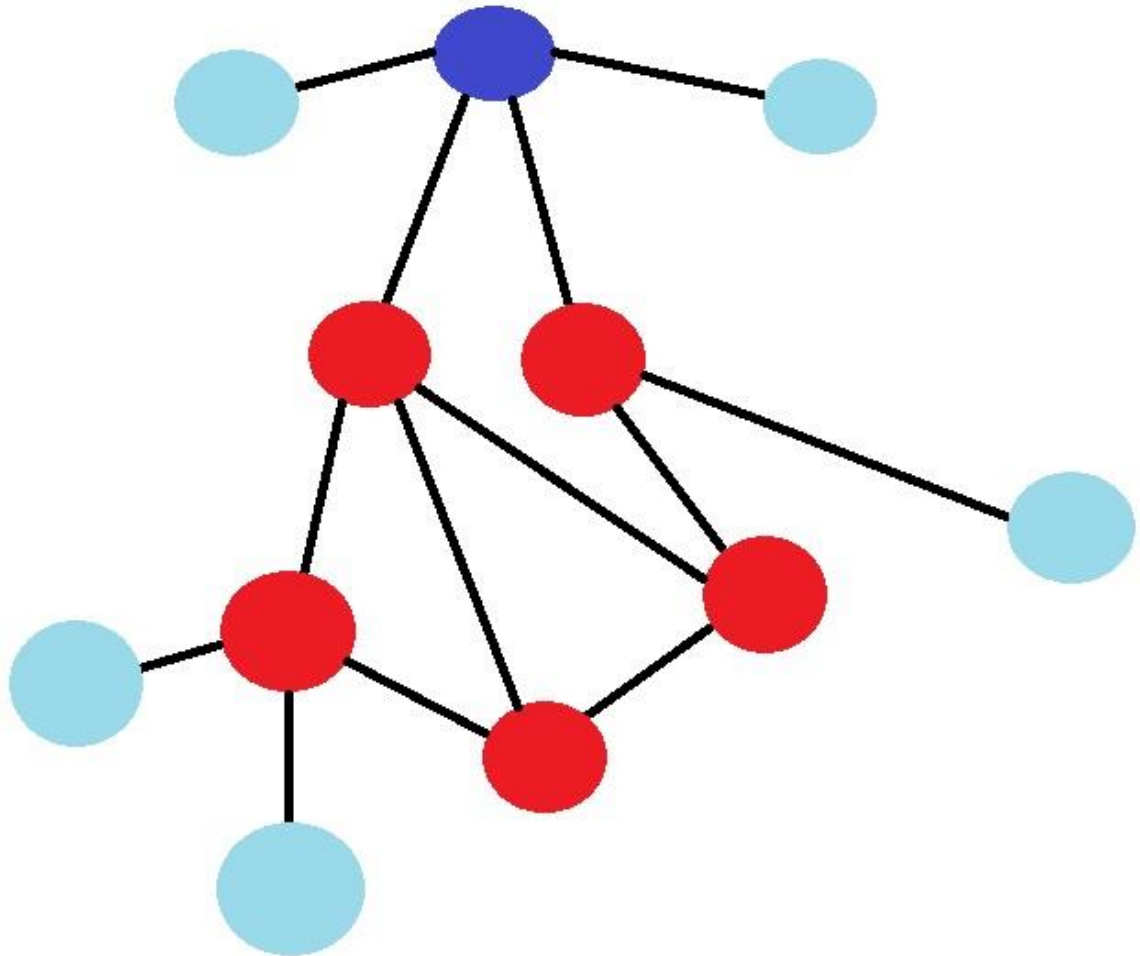
Puutopologialla on noodi ylempänä tai alempana muita. Noodin ollessa ylhäällä noodista lähtee varsi- tai lehtimäinen rakenne alaspäin. Dataa siirtäessä viesti kulkee ylöspäin niin pitkälle kuin on tarpeellista ja sitten alaspäin. [6.]



Kuva 5. Puutopologia.

2.2.3 Vajaa mesh-topologia

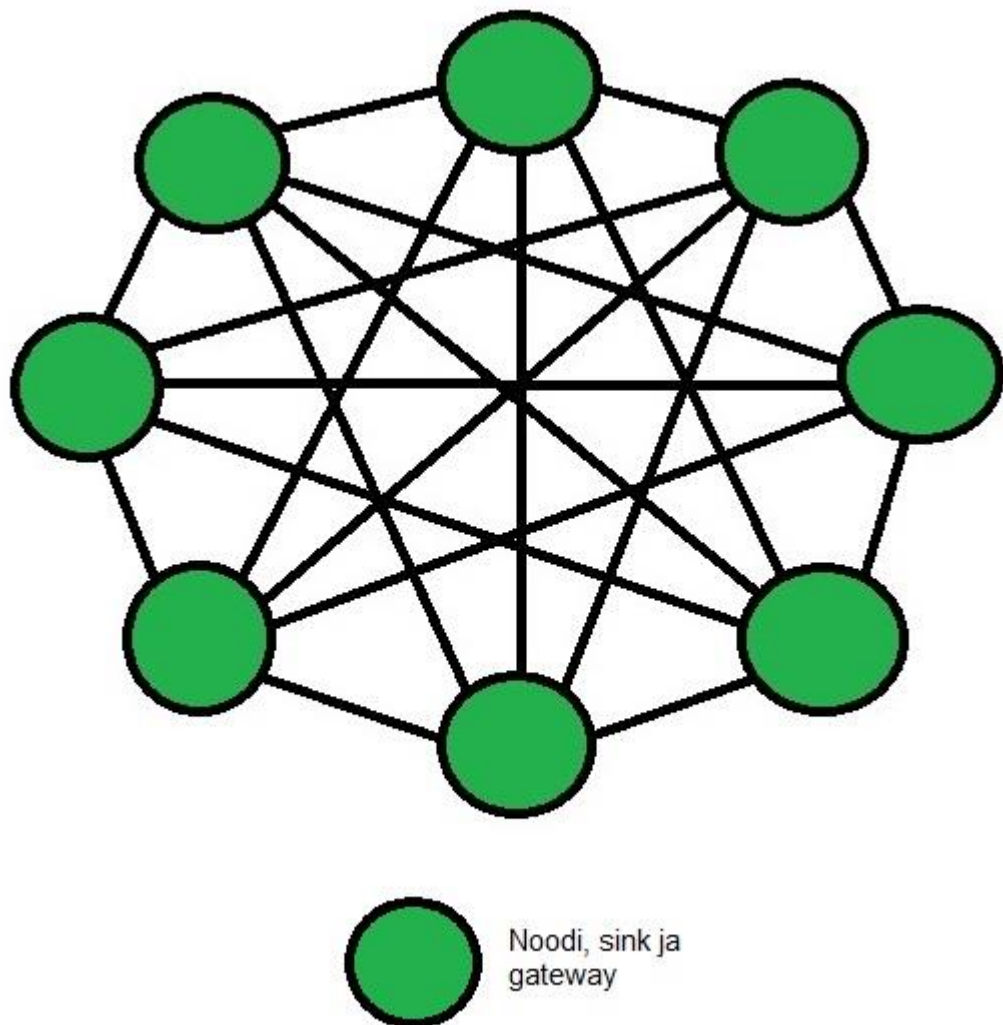
Mesh-verkossa on puumainen rakenne, missä osat lehdistä on linkitetty toisiinsa. Dataa voi kulkea puun läpi, kun sopiva reitti on käytettävissä. Mesh-topologia voi välittää dataa käyttämällä hukuttamis- (engl. flooding) tai reititystekniikkaa. Reititystekniikalla data kulkee reitillä hyppimällä noodilta noodille, kunnes se saavuttaa määränpään. [7.]



Kuva 6. Vajaa mesh-topologia.

2.2.4 Mesh-topologia. Itsestään järjestävä sensoriverkko.

Solmuverkot (engl. mesh network) ovat joustavia ja luotettavia. Itsestään organisoituvat noodit parantavat verkon laatua. Hyvin luodussa verkossa noodit havaitsevat naapurinsa ja valitsevat sopivan paikan synkronisointia ja liittymistä varten. Sen jälkeen läheinen noodi lähettää portille tiedon. Solmuverkossa voidaan lähettää tietoa useammassa noodissa samaan aikaan laadun parantamiseksi. Ajan synkronoivaa solmuverkko protokollaa (engl. TSMP) voidaan käyttää itsestään organisoituvassa sadan noodin verkossa. [8.]



Kuva 7. Mesh-topologia.

Noodien sijainti voi olla sattumanvarainen ja niitä voidaan siirrellä. Noodit ovat dynaamisesti yhteydessä niin moneen muuhun noodiin kuin mahdollista. Noodit eivät ole riippuvaisia toisistaan, mikä mahdollistaa jokaisen noodin osallistumisen datan lähetykseen.

Itsestään järjestyvät verkot vähentävät kustannuksia asentamis- ja huoltokuluissa automaattisilla mekanismeilla. Konfiguraatiovaihe laukeaa tarkoituksellisista tekijöistä esimerkiksi lisäämällä uuden palvelun tai verkko-ominaisuuden. Yritykset käyttävät paljon resursseja asennuspalveluihin. Itsestään konfiguraatio tuo säästöjä paikan päällä tapahtuviin operaatioihin esimerkiksi perusasetusten ja päivitysten suorittamiseen syntyvistä kuluista.

Itse optimointivaiheessa ajetaan parametrejä, kuten antennien parametrejä, virta-asetuksia, naapurilistoja, pakettien- ja ruuhkan aikatauluista [9]. Vaihe voi vähentää yritysten työmäärää liittyen sivujen valvonnassa ja verkon suorituskyvyn analysoinnissa.

Itsestään parantumisvaihe tapahtuu sattumanvaraisesti, kuten kennon tai sivun kaatuessa. Vaihe pyrkii ratkaisemaan suorituskyvyn heikentymisen kattavuuden. Tämä tehdään säätämällä parametreja ja algoritmeja viereisissä kennoissa. Kaikki parametrit palautetaan alkuperäisille asetuksille, kun häiriö korjataan. [9.]

2.2.5 Itsestään järjestävä ja tiedonsiirtoa kontrolloiva teknologia

Yksi langallisten ja langattomien sensoriverkkojen ero on langattomien yhteyksien epävakaus. Langattomat verkot ovat haavoittuvaisia häiriötekijöille, ja sen takia tiedonsiirron signaali voi katketa. Langallisissa verkoissa tietoa voi menettää vain ruuhkan takia. Tietovirtauksen vuoronohjausteknologia (engl. flow control) tarkoitus on, että tiedon määrä on juuri oikea riippuen verkon rasituksesta. Kun datapaketteja katoaa, lähettäjä vähentää tiedonsiirtoa ja nopeuttaa sitä heti kun mahdollista. Langattomissa verkoissa ei kuitenkaan voida käyttää tätä teknologiaa. [9.]

2.3 Esineiden Internet

Esineiden Internetin (IOT) esitteli Kevin Ashton vuonna 1991 [10], joka referoi uniikiksi tunnistettavia objekteja ja niiden virtuaalisia representaatioita internet muotoisessa rakenteessa. Nämä objektit voivat olla teollisista koneista, lentokoneisiin, isoja rakennuksia, autoja ja jopa ruumiinosia. Langaton viestintäteknikka tulee olemaan yleisin tiedonsiirtomekanismi. Vähävirtaiset, halvat ja kestävät langattomat sensoriverkon sensorit tuovat esineiden Internetin pienille laitteille jokaiseen ympäristöön.

2.4 Teollisuus ja tulevaisuus

2.4.1 Lakiasiat

Tulevaisuudessa on luvassa paljon lakeihin liittyvää asiaa, mikä koskee sensoriverkoilla kerättyä dataa. Yksi tärkeimmistä käsiteltävistä asioista on tiedon omistajuus. Tiedon välittäjillä tulee olemaan kukoistava ammatti. Tietojen yhdistely eri pakoista luo uusia liikevaihtomahdollisuuksia. Uusimmat skandaalit ovat osoittaneet, että tietoa kerätään isolla intressillä eri käyttötarkoituksia varten.

2.4.2 Yritykset

DARPA julkaisi tutkimusohjelman nimeltä SensIT [11]. Se tarjosi sensoriverkoille uusia ominaisuuksia, kuten ad-hoc-verkon, dynaamisen kyselyn ja tehtävänannon, uudelleenohjelmoinnin ja moniajon. Nykyaikana sensoriverkkoja pidetään yhtenä 21. vuosisadan tärkeimmistä teknologioista [12]. Kiina on ottanut sensoriverkot osakseen kansallisen strategisen tutkimustyön ohjelmaan [13]. Tuloksena sensoriverkot kaupallistuvat yhä enemmän, ja uusia suuria yrityksiä syntyy.

Vaikka yksi tärkeimmistä alueista on teollinen automatisointi, nykyään yksi kolmasosa teollisen sensoriverkon tuloista tulee prosessointiteollisuudesta. Energian tuotanto ja öljyteollisuus ovat nopeimmin kasvavat alat. Esimerkiksi PetroChinalla on IoT-projektina suunnitelmassa uudelleen rakentaa 200 000 öljylähdettä. Lähteiden öljyn tuotantoa voidaan valvoa turvallisesti, kun sensortekniikan yhdistää digitaaliseen

konvertointiin. Energiantuotannossa käytetään sensoriverkkoja energian siirtämisen ja muunnokseen vaadittavien laitteiden turvallisuuden monitoroimiseksi.

2.5 Sensoriteknologian miniatyrisointi perustuen mikrosysteemeihin (MEMS)

Sensoreiden nooidien miniatyrisointi, mikä perustuu mikrosysteemeihin, on kehittynyt paljon viime vuosina. Mikrosysteemeissä yhdistellään mikroelektroniikkaa ja mikrokoneistoa. Mikroelektroniikalla ja mikrokoneistolla voidaan luoda 2D- ja 3D-sensitiivisiä 2- ja 3D sensitiivisiä ympäristöjä, jotka toimivat pienoisympäristöinä. Nämä tunnistinosatekijät voidaan integroida virtalähteeseen ja signaalinkäsittelyn piireihin mikrosysteemisensoreiksi.

Markkinoilla on mikrosysteemisensoreita, millä voidaan mitata kemiallisia tai fyysisiä signaaleja, biomassasignaaleja, nopeutta, kiihtyvyyttä, painetta, jännitystä, rasiutusta, venymistä, kuormitusta, ääntä, valoa, sähköä, magnetismia, lämpöä, ph-arvoa, uppoamista ja paikaltaan siirtymistä. [14.]

2.6 Energiantuotanto

Noodit tarvitsevat energianlähteen ja ympäristöstä energian keräysmenetelmän ulkoisista lähteistä. Nämä laitteet vaativat monesti vähän virtaa, mutta niiden monitorit toimivat pattereilla. Ympäristöstä voidaan kerätä energiaa pietsosähköllä, oskillaattoreilla, lämpötilaeron avulla (termosähköisellä ilmiöllä) tai sähkömagneettisia aaltoja vastaanottamalla. [15; 16.]

Esimerkiksi Saksassa EnOcean toimittaa teknologiaa, jolla saadaan energiaa valosta, väreilystä ja lämpötilan vaihtelusta rakennusten automatisoituihin valo- ja lämpömonitoreihin. Laitteiston- ja rakennustenvilvonta monitoreihin on saatavilla pietsosähköllä kerättyä energiaa väreilystä. Esimerkiksi englantilainen Perpetuum-yhtiö toimittaa laitteita, joilla kerätään energiaa mekaanisesta värähtelystä. Sähköllä ylläpidetään huoltoa vaatimattomia teollisia sensorinoodeja. Koputtamalla pöytää saadaan energiaa tarpeeksi lähettämään 2 kB tietoa sadan metrin päähän 60 sekunniksi. Putkien monitorointiin on kehitetty paljon lämpötilan vaihtumiseen perustuvaa virrankeräys teknologiaa. Esimerkiksi Nextreme Companyn laitteet pystyvät tuottamaan 0,25 W 60°C lämpötilaerosta 3.2 mm x 1.6 mm tilassa. [1.]

2.7 Langattoman sensoriverkon operaattorit

Virrankulutus määrittää sensoriverkon toiminnan pituuden, jos virtalähteissä on vain rajattu määrä energiaa noodeille. Energian optimointi on tärkeä osa sensoriverkon suunnittelua. Tiedonkeruussa eli sensoreiden datafuusiossa käytetään apuna operaattoreita pienentämään energiankulutusta vähentämällä virheellisen datan lähettämistä ja sitä kautta pienentämällä data lähetyksien määrää. Operaattorit sijoitetaan verkkonodeihin (engl. network node). Verkkonoodien tehtävänä on kerätä tietoa, prosessoida ja lähettää sitä seuraaviin operaattoreihin tai yhdyskäytävään (engl. sink node). Tiedon lähettäminen operaattorista eri operaattoriin kuluttaa virtaa. Virrankulutuksen vähentämiseksi operaattorit tulisi sijoittaa verkkonodeihin niin, että verkon prosessoinnista aiheutuva energian kulutus on pieni. Algoritmejä [17; 18] voidaan käyttää operaattoreiden sijoittamiseen.

2.8 Virrankulutus

Tärkeä osa langattomien sensoriverkkojen suunnittelua on rajoitettu energian määrä. Akku voi tyhjentyä vuodessa tai jopa viikossa. Sen takia laitteiden suunnittelijoiden on pyrittävä parhaimpiin ratkaisuihin virrankulutuksen vähentämiseksi. Verkon eliniän selvittämiseksi on määriteltävä laitteiston virrankulutus.

Paras tapa tutkia laitteiston virrankulutusta on suoraan fyysisistä laitteista mittaamalla jäljellä olevan virran määrän akussa, kuten [19; 20] käytettiin. Prosessissa on kuitenkin muutama ongelma. Virran kulutuksen laskeminen vaatii rahallista sijoitusta, uudestaan testailua ja on otettava huomioon laitteiston ja ihmisen tekemät virheet.

Mallinnus on toinen tutkimustapa. Mallinnuksia voidaan simuloida ja arvioida analyttisesti. Mallinnus on hieman epätarkempaa kuin mittaaminen. Se on kuitenkin joustavampaa ja mahdollistaa luotettavan testiympäristön. Ohjelmistotasolla sensoriverkkojen arviointi luo monen edun, mutta varmaankin suurin hyöty on vähäisen ajan vaatimus analyysiin. [21.]

Yksinkertaisia mallinnuksia luotiin, kun suunnittelijat tiedostivat virrankulutuksen tärkeyden. Teho (P) / MHz on yleisesti käytetty esitysmuoto. Tehoa tarkastellessa huomataan, että virrankulutus ei ole vakio, koska sähkövirta ei ole vakaa toimenpiteen aikana. Huippuvirta on tärkeä osatekijä, koska laitteessa tulee olemaan toimintahäiriötä

elektromigraation ja jännitteen putoamisesta johtuen, vaikka keskiarvoinen virrankulutus on pieni. Keskiarvoinen virrankulutus on annettu kaavassa 1.

$$\text{Kaava 1: } P_{avg} = P_{dynamic} + P_{short} + P_{leakage} + P_{static} \quad (1)$$

Osatekijät ovat dynaaminen, oikosulku, häviö ja staattinen virrankulutus. Osatekijöiden suuruus riippuu käyttösovelluksesta ja teknologiasta. [22.]

2.9 Virrankulutuksen mallinnus

Radiomallinnuksiin perustuen [19; 23] on lisätty virrankulutuksesta aiheutuvaa toimitilan vaihtumista toimintahäiriöiden tapahtuessa lähetin-vastaanottimessa. Yleisesti noodit voivat kommunikoida viereisten noodien ja yhdyskäytävän kanssa, mitkä ovat tehokkaalla tiedonsiirtoetäisyydellä kolmella eri tavalla: suora (engl. direct), multihop tai klusterointi (engl. clustering). Jokaiselle lineaariselle ja epälineaarille kommunikointitavalle on mallinnettu tilanne.

2.9.1 Suora

Jokainen noodi kommunikoi suoraan yhdyskäytävän kanssa ilman muiden noodien yhteistyötä [24]. Tarvittava virta A -noodilta B -noodille lähetettävässä paketissa K -bittinä etäisyydellä d on yhtä kuin:

- 1) Ilman kuuntelua:

$$E_{AB} = E_{transmit} * K * d^{\alpha} \quad (2)$$

- 2) Kuuntelua käyttäen:

- a) Ilman releitä paketin lähettämiseksi noodista yhdyskäytävään kuuntelemalla toisilta N noodeilta, mitkä ovat kuuntelutilassa:

$$E_{AB} = E_{transmit} * K * d^{\alpha} + N * E_{receive} * K \quad (3)$$

- b) Tietoa välittävillä noodeilla (engl. relays):

$$E_{AB} = E_{transmit} * K * d^{\alpha} + N * E_{receive} * K + \sum E_{D(i)B} \quad (4)$$

missä $D(i)$ merkitsee jokaisen noodin matkaa B noodista.

2.9.2 Multihop

Noodit kommunikoivat yhdyskäytävän kanssa käyttäen muita noodeja välityspisteinä [24].

- 1) Lineaarinen malli: Olettaen, että verkko n noodeilla ja matka noodien välillä on yhtä kuin r . Virran kulutus reititys protokollaa käyttäen yhden K -bitin viestin lähettämiseen noodilta sijainnilla nr yhdyskäytävään merkitsee myös sitä, että jokainen noodi lähettää matkan varrella viestin lähimmälle noodille. Täten noodi matkalla $(n-1)r$ yhdyskäytävästä vaatisi n lähetyksiä matkalla r ja $n-1$ vastaanottaisi plus yhden matkalla d . Tarvittava energia kilobitin paketin lähettämiseen noodilta yhdyskäytävään olisi yhtä kuin:

$$E_{AB} = (n-1)(E_{transmit} * K * r^{\alpha} + E_{receive} * K) + E_{transmit} * K * d^{\alpha}. \quad (5)$$

- 2) Epälineaarinen malli: Vain osa noodeista n välittää lähetyksen, koska epälinearisessa verkkotopologiassa L noodit kuuntelevat (engl. overhearing) lähetyksen ja reititysprotokolla estää suurimman osan siirroista. Olettaen, että tarvittava energia K -bitin paketin lähetykseen paikasta A paikkaan B on (sillä edellytyksellä, että ne ovat tehokkaalla siirtomatkalla d):

$$E_{AB} = E_{transmit} * K * n * d^{\alpha} + E_{receive} * K * L. \quad (6)$$

2.9.3 Klusterointi

Tämäntyyppinen kommunikointirakenne vaatii noodin, mikä palvelee pääklusterina (engl. cluster head). Tämä noodi on vastuussa tiedon keräämisestä ja fuusiosta sille määritellystä alueesta ja turvallisuustehtävistä klusterialueella noodien sekä yhdyskäytävän välillä. [24.] Tarvittava virta K -bitin paketin siirtämiseen noodilta A pääklusterille B (matka d) on yhtä kuin:

$$E_{AB} = E_{transmit} * K * d^{\alpha} + E_{receive} * K * N + E_{ReceiveClusterHead} * K. \quad (7)$$

2.9.4 Patterimallinnus

Virran saatavuus ja siitä johtuen noodin käyttöikä riippuu käytettävän akun tai pariston sisältämästä energiamäärästä. Patterin virtaa mitataan milliampeeritunneilla (mAh). Teoriassa se tarkoittaa, että 10 mA tunnissa kuluttava noodi pystyy käyttämään 100 mAh patteria kymmenen tuntia. Tämä ei kuitenkaan vastaa oikean maailman tilannetta. Virran saatavuus on patteriteknologian ja virran purkautumisen toiminto, mikä liittyy paljon patterin kemiaan. Patterimalleja on olemassa paljon. Yksi niistä on lineaarinen virtalähde. [25.]

3 Sensoriverkkojen toimilaitteita valmistavat yritykset

3.1 Bluetooth

Bluetooth on yksi yleisimmistä langattomista tiedonsiirtomekanismeista lyhyillä välimatkoilla. Se on suunniteltu kuluttamaan vähän virtaa kahden laitteen välisille edullisille mikrosiruille. Keskilähetystaajuus on 2,45 GHz, eli sama kuin mikroaaltouuneissa ja langattomissa lähiverkoissa. Hajaspektritekniikka mahdollistaa häiriöttömän tiedonsiirron. Sitä pidetään infrapunaa korvaajana. Se on toimintavarmempi ja monipuolisempi tiedonsiirtomekanismi. Nykyaikana on tärkeää olla tiedonsalaus ja todennus, mitä infrapunasta ei löydy. [26.]

3.1.1 Luokat

Bluetooth 2.0 (Enhanced Data Rate) uudistus pystyy siirtämään dataa 3,0 Mbps:n nopeudella. Pienin milliwatin datansiirto (luokka 3) toimii metrin lähetysetäisyydellä. 2,5 milliwatin teholla (luokka 2) toimii kymmenen metrin sisällä. Luokka 1 vie tehoa 100 mW ja toimii 100 metrin etäisyydellä. [27.]

Kolmannen luokan radiot toimivat yhden metrin kantomatalla. Useimmista kännyköistä löytyy toisen luokan Bluetooth-yhteys ja sen kantomata on noin 10 metriä. Teollisuusympäristössä käytetty luokka 1 toimii jopa 100 metrin etäisyydellä. Bluetooth-yhteyden tehokas etäisyys vaihtelee kuitenkin materiaalin laadusta, antennin asetuksista ja akusta. Useimmat Bluetooth-yhteydet on suositeltu sisätiloihin. Yhteyttä vaimentavat seinät ja signaalin heijastumat. Sen takia yhteys on parhaimmillaan

esteettömällä kantamalla. Yhdistämällä kaksi ensimmäisen luokan Bluetooth-laitteistoa ja riittävällä virralla päästään yli sataan metriin. Yksinkertaisella sovelluksella laitteiden välillä aukinuisella alueella samankaltaisilla laitteilla päästään yhden kilometrin kantomatkaan lainmukaisilla säästörajoitteilla.

Bluetooth 5 julkaistiin kesällä 2016. Sen uudet ominaisuudet keskittyvät pääosin Internet of Things (IoT) -teknologiaan. Vuotta myöhemmin viides versio julkaistiin uusissa iPhoneissa ja Galaxy-älypuhelimissa. Bluetooth Low Energy (BLE) sai uuden ominaisuuden tuplata nopeus (2Mbit/s sarja) kantomatkan kustannuksella, tai jopa nelinkertaisen kantomatkan tiedonsiirron kustannuksella. [28.]

Taulukko 1. Bluetooth- ja BLE-vertailu

Tekniset tiedot	Bluetooth	Bluetooth Low Energy
Matka	100 m	>100 m
Siirtonopeus	1-3 Mbit/s	125 kbit/s – 1 Mbit/s – 2Mbit/s
Tietoturva	56/128 bit	128-bit AES ja Counter Mode CBC-MAC
Latenssi	100 ms	6 ms
Pienin tiedon lähetys aika	0.625 ms	3 ms
Verkon topologia	Scatternet	Scatternet
Virrankulutus	1 W	0.01-0.50 W

Nostamalla paketin pituutta voidaan tiedonlähetykseen saada kahdeksankertainen kapasitanssi. Maksimitiedonlähetyksen määrän mahdollistaminen on tärkeää esineiden internetlaitteille.

3.1.2 Yhteyksien luominen

Yhteyden luomiseksi vaaditaan lupaa omistajalta, mutta yhteys itsessään voidaan muodostaa millä tahansa laitteella ja sitä voidaan pitää yllä millä tahansa laitteella niin pitkään kuin virtaa ja kantomatkaa löytyy. Joihinkin laitteisiin voidaan yhdistää yksi laite kerrallaan ja myös estää muiden laitteiden yhdistymisen. Jokaisella laitteella on uniikki 48-bittinen osoite. Kuitenkaan näitä osoitteita ei näytetä kyselyissä vaan laitteen voi nimetä itse.

3.1.3 Laitteiden yhdistäminen

Monet Bluetooth-palvelut voivat paljastaa henkilökohtaista tietoa käyttäjästä tai mahdollistaa erillisen käyttäjän yhdistää laitteeseen ja kontrolloida sitä. Tietoturvasyistä on tarpeellista tunnistaa tietyt laitteet ja antaa vain halutuille laitteille tai käyttäjille pääsy. Samaan aikaan on tilanteita, joilloin on hyödyllistä antaa laitteelle käyttöoikeus ilman turvallisuustarkistusta. Bluetooth on kehittänyt tälle ongelmalle ratkaisun nimeltä liitos (engl. bonding). Liitosprosessi aktivoituu käyttäjän pyynnöstä. Ensimmäistä kertaa palveluun yhdistäessä vaaditaan laitteen identiteetti.

3.2 Bluetooth Mesh

Uusin toteutus Bluetoothilta on nimeltään Bluetooth mesh. Nimestä päätellen uusi tekniikka tukee mesh-topologiaa. Ominaisuus mahdollistaa useasta laitteesta samaan aikaan tiedon lähetyksen (engl. many-to-many). Se on suunniteltu toimimaan isoilla alueilla ja monilla laitteilla rakennus automatisoinnissa, sensoriverkoissa ja muissa IoT -ratkaisuissa, missä tuhannet laitteet tarvitsevat luotettavan ja turvallisen yhteyden. [29.]

Bluetooth mesh -verkko hyödyntää hallittua hukuttamista (engl. flooding) viestintään. Hukutus on yksinkertainen ja luotettava tapa välittää viestejä vähävirtaisessa langattomassa mesh-verkossa, erityisesti monikanavaisessa liikenteessä (engl. multicast traffic). Tiedon välitys hukuttamisella on ideaalinen tapa välittää signaaleja luotettavassa, joustavassa ja tehokkaassa verkossa. [29.]

Bluetooth mesh julkaistiin tärkeänä aikana sensoriverkkojen teollista kehitystä. ABI Research on ennustanut, että vuoteen 2021 mennessä 48 biljoonalla laitteella on internetyhteys ja kolmasosa laitteista on Bluetooth-tekniikkaa. Lisäksi Bluetooth meshin odotetaan tekevän suurimman vaikutuksen kaupallisiin ja teollisiin markkinoihin. [29.]

3.2.1 Bluetoothin kehitys

Bluetoothia voidaan kutsua yhdeksi maailman parhaimmista brändeistä ja kaikista läsnäolevaksi langattomaksi teknologiaksi. 2000-luvun jälkeen se on löytänyt tiensä biljooniin laitteisiin. 2016 vuonna tehtiin yli biljoona Bluetooth-laitetta. Bluetoothin matka ei ole missään vaiheessa keskeytynyt vaan kehitystä on tapahtunut tasaisesti ja

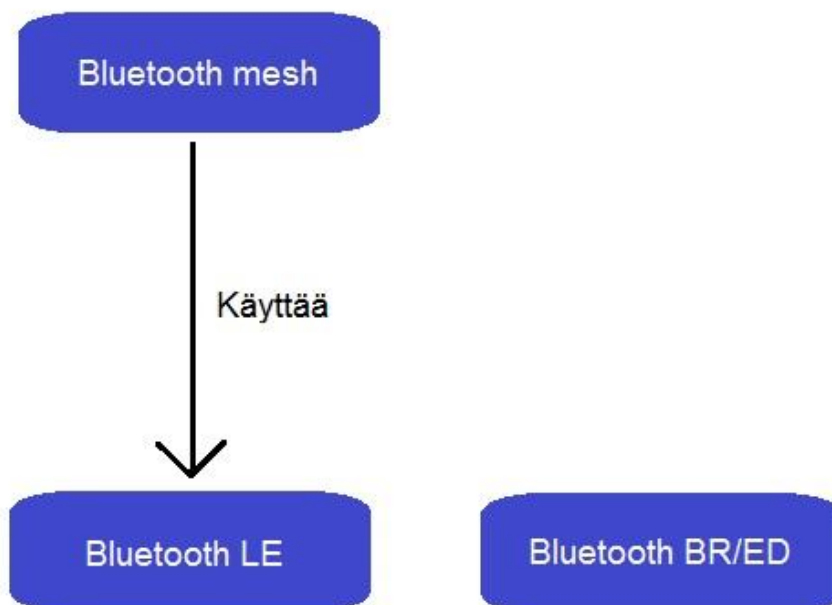
markkinoiden mukana on pysytty. Bluetooth mesh on kirjan uusin luku yhdestä merkittävimmästä teknologian kehityksessä. [30.]

Tyypillisesti Bluetoothilta tulee uusia päivityksiä vanhojen toimintojen parantamiseksi. Uutta teknologiaa julkaistaan myös. Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR) julkaistaessa sen suunniteltiin korvaamaan kokonaan vanhan teknologian. Siitä tuli nopeasti dominoiva tekniikka langattomien hiirien, näppäimistöjen ja kuulokkeiden markkinoilla. [30.]

Bluetooth Low Energy (LE) oli seuraava suuri julkaisu. Se on optimoitu käyttämään mahdollisimman vähän virtaa. Se on levinnyt laajasti ja on vaikeaa löytää kannettava tietokone tai tabletti, joka ei tukisi LE-tekniikkaa. [30.]

On tyypillistä, että sama laite tukee Bluetooth BR/EDR:tä, Bluetooth LE:tä ja Bluetoothia, mutta ne eivät turvaudu toisiinsa. Bluetooth LE ja Bluetooth BR/EDR toimivat hyvin yhtäaikaaisesti, mutta ne eivät pysty viestimään keskenään. Toisin sanoen Bluetooth LE ja Bluetooth BR/EDR -laitteet eivät pysty yhdistämään toisiinsa. [30.]

Vastakohtaisesti Bluetooth mesh käyttää Bluetooth LE:tä (BLE) ja on jopa riippuvainen siitä. BLE on langaton viestintäprotokolla, mitä Bluetooth mesh-verkko hyödyntää. [30.]



Kuva 8. Bluetooth mesh ja BLE.

3.2.2 Many-to-many

Yksinkertaisimmalla tasolla Bluetooth BR/EDR antaa yhden noodin yhdistää ja viestiä toisen noodin kanssa muodostaen 1:1-yhteyden. Piconet-topologia mahdollistaa laitteille monta 1:1-yhteyttä, mitä kutsutaan hubiksi. Bluetooth LE pystyy myös muodostamaan monta 1:1-yhteyttä ja lisäksi lähettämään tietoa useammalle noodille. Näin syntyy 1:m-topologia, missä m on monta noodia. Lähettävällä laitteella on koko radiospektri käytettävissä, kun signaalia vastaanottavat noodit eivät välitä dataa lähettävälle noodille. Näin vastaanottaville noodeille ei synny enimmäismäärää. Tilanteessa, jossa Bluetooth mesh -verkko välittää tietoa muiden noodien avulla epäsuoralle radioyhteyden omaavalla noodille kutsutaan m:m yhteydeksi. [30.]

Mesh-verkot mahdollistavat monen laitteen asennuksen ja viestinnän keskenään laajalla alueella. Laajoilla sensoriverkoilla voidaan valvoa esimerkiksi metsiä metsäpalojen nopean sammuttamisen edistämiseksi. Puiden ja kallioiden aiheuttamat fyysiset esteet suoralle langattomalle signaalille ovat ongelmallisia. Bluetooth mesh on ratkaissut ongelman suunnittelemalla verkkoon tiedonvälitys releitä (engl. relays). [31.]

3.2.3 Hukuttaminen

Bluetooth mesh -verkkoviestintä käyttää hallittua hukuttumaista (engl. managed flooding) viestien välittämiseen. Käytännössä tiedon kulun reitti ei koostu vain tietyistä laitteista vaan kaikki laitteet vastaanottavat viestin ja noodit, jotka toimivat releinä välittävät tiedon eteenpäin. [31.]

Kaikki paketit sisältävät Time To Live (TTL) -kentän. Sen tehtävänä on kontrolloida, välitetäänkö vastaanotettu viesti eteenpäin ylimääräisten hyppyjen vähentämiseksi. 0-arvolla viestiä ei välitetä eteenpäin. Jokainen kerta, kun viesti lähetetään naapureille TTL-arvolla 2 tai enemmän yhden välityksen jälkeen TTL-arvo vähenee. TTL-arvo 1 tarkoittaa sitä, että viesti välitetään eteenpäin vain kerran. [31.]

Sensoriverkoissa voidaan käyttää kunnan virtalähteitä, mutta on myös mahdollista käyttää pienillä pattereilla olevia sensoreita. Noodit voidaan määritellä vähävirtaisiksi noodeiksi. Vähävirtaiset noodit toimivat yhdessä noodien kanssa, jotka määritellään ystäviksi. Ystävillä on tarpeeksi virtaa ja voivat auttaa vähävirtaisia noodeja

varastoimalla viestejä ja lähettämällä niitä silloin, kun vähävirtainen noodi pyytää niitä. [31.]

Yleensä vähävirtaisen noodin pitää pystyä vastaanottamaan tietoa. Pystyäkseen vastaanottamaan tietoa pitää radioyhteys avata. Useimmissa tilanteissa se ei vastaanota mitään ja energiaa kulutetaan turhaan. Ystävän kanssa työskentelemällä vähävirtainen noodi voi laatia aikataulun radion käyttämiseksi ja vastaanottaa viestejä pienemmällä taajuudella. [31.]

3.3 RFID

3.3.1 Siru

RFID käyttää elektromagneettista kenttää tunnistamaan ja jäljittämään sen vastakappaleena olevaa sirua. Siru on vähän isompi kuin riisinjyvänen. Kokonsa takia sen voi kiinnittää helposti vaikka tarralla. Antenni- ja siru yhdistelmän nimitys on tägi. Käytännössä tieto tallennetaan sirulle, seuraavaksi yhteys luodaan tägin antenniin ja sen jälkeen RFID-lukijaan. Lukija muuttaa radiosignaalin tiedon digitaaliseen muotoon, että tietokone voi käsitellä sitä. [32.]

3.3.2 Virtalähteet

RFID-tunnistetta on kolmea eri tyyppiä. Passiiviset sirut eivät tarvitse omaa virtalähdettä, koska ne keräävät tarvittavan virran läheisiltä RFID-tiedonkeruu radioaaltoilta. Aktiivisilla siruilla taas on oma virtalähteensä ja voivat operoida satojen metrien päästä RFID-lukijasta. Puolipassiivinen sisältää myös virtalähteen, mutta siitä puuttuu lähetin. Tiedon lähettäminen lukijaan ei vaadi näköyhteyttä. Lukija ja tunniste viestivät joko korkealla tai matalalla radiotaajuudella. Suomessa taajuusalueita valvoo viestintävirasto.

3.3.3 Tietoturva ja häiriöt

Tietoturvan kannalta järjestelmässä pitää suojata neljä eri tapahtumaa tai laitetta. Tägin tieto, lukijan muisti, tägin ja lukijan välinen tiedonsiirto ja kohde, eli palvelin tai tietokone. Tägitä lukijalle radioaaltojen avulla siirrettävä tieto on myös vaarassa

hyväksikäytölle ja häirinnälle. Tietoa voidaan siepata ilmasta väärennetyllä lukijalla, lukijoille voidaan syöttää väärennettyä tai vahingollista tietoa tai tiedonsiirtoa voidaan häiritä esimerkiksi palvelunestohyökkäyksellä. Muita häiriöitä aiheuttavia tekijöitä ovat mm. vesi, metalli, folio, ilmankosteus, äärimmäiset lämpötilat, moottorit, langattomat laitteet kuten matkapuhelimet ja pda:t, langattomat tietokoneet ja verkot sekä langattomat puhelimet. [33.]

3.4 Near-field communication (NFC)

NFC toimii noin 4 senttimetrin etäisyydeltä [34]. Käytetään yleensä maksuvälineissä. Puhelimessa käytettynä tätä teknologiaa voidaan käyttää korvaamaan luottokortit. NFC:tä voidaan käyttää myös verkostoitumiseen jakamalla sosiaalisia kontakteja, kuvia ja videoita tai jopa tiedostoja [35]. NFC-teknologialla voidaan tehdä puhelimen avulla elektronisia henkilökortteja eli kulkulätkiä [35]. Yksi ominaisuus on käynnistää edistyneempi langaton vastakappale, kun sitä tarvitaan (engl. bootstrap) [35]. Internet-palveluiden kanssa voidaan jakaa ja käyttää tietoa, kun toisella laitteella on Internet. NFC käyttää sähkömagneettista induktiota siirtämään dataa. Molemmissa NFC-laitteissa on ympyrän muotoinen antenni.

3.4.1 Toimitilat

NFC-laitteilla on kolme eri toimitilaa. Ensimmäinen on nimeltään kortin emulointi, mikä mahdollistaa esim. kännykän käytön maksuvälineenä. Toinen on NFC -lukija/-kirjoittaja, millä voi lukea NFC-tägejä leimoista ja älyjulisteista. Kolmas on (engl. peer-to-peer) vertaisverkkotila, missä kaksi laitetta kommunikoivat. NFC-tägit ovat passiivisia tietovarastoja. Eli ne toimivat pattereilla tai akulla ja keräävät virtaa NFC-radioaaltoilta. Normaalissa käytössä ne ovat vain lukutilassa, mutta ne on mahdollista asettaa kirjoitustilaan.

3.4.2 Tietoturva

Tiedonsiirto tapahtuu alle 10 senttimetrissä, mutta se ei silti ole tietoturvallista. NFC-teknologia on haavoittuvainen mies välissä -hyökkäyksille ja salakuuntelulle. Ohjelmien välillä voidaan käyttää salausprotokollaa, esim. SSL-turvallisen kanavan luomiseen. Passiivisista laiteilla on vaikeampi salakuunnella, koska ne eivät tuota omaa

radiokenttää, mutta sekin on mahdollista metrin etäisyydeltä. NFC-tekniikkaa voidaan käyttää kulkulätkissä, mutta sekään ei ole aivan haavoittumaton. Huijaamiseen voidaan käyttää ”relay attack” -hyökkäystä.

3.4.3 Vertailu

Bluetoothiin verrattuna NFC käyttää pienempiä siirtonopeuksia ja sen takia vaatii vähemmän tehoa. Lisäksi siirtomatka on huomattavasti pienempi, mikä vaikuttaa energiakulutukseen. NFC toimii myös passiivisilla tägeillä. Bluetooth vaatii aktiivisen tägin, eli patterin tai akun virtalähteeksi. NFC-tägin hinta on viisikymmentä kertaa halvempi, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon. NFC yhdistää vastalaitteeseensa nopeammin kuin Bluetooth Low Energy, mutta siirtää tiedon hitaammin. NFC ei myöskään vaadi paritusta (engl. pairing) toisin kuin manuaalisesti paritettava Bluetooth. NFC yhdistää vastakappaleeseensa alle 0,1 sekunnissa. NFC:n maksimi tiedonsiirtonopeus on 424 kilobittiä sekunnissa hitaampi kuin Bluetoothin versio 2.1 (2.1 Mbit/s). Kaupunkiolosuhteissa NFC:n noin 10 senttimetrin kantomatkalla vähentää ei-toivottuja yhteyksiä.

Taulukko 2. Bluetoothin ja NFC:n vertailu

Tekniset tiedot	NFC	Bluetooth	Bluetooth Low Energy
Matka	< 20 cm	100 m (ykkös luokka)	50 m
Bittinopeus	424 kbit/s	2.1 Mbit/s	1 Mbit/s
Tehon kulutus (current consumption)	< 15mA (luku)	Vaihtelee riippuen luokasta	<15 mA (luku ja lähetys)
Kryptografia	RFID ei toimi	Saatavilla	Saatavilla
Taajuus	13.56 MHz	2.4 - 2.5 GHz	2.4 - 2.5 GHz
Yhdistäminen	< 0.1 s	< 6 s	< 0.006 s
Tägi vaatii virtaa	Ei	Kyllä	Kyllä
RFID yhteensopiva	ISO 18000-3	Aktiivinen	Aktiivinen
Standardi	ISO/IEC	Bluetooth SIG	Bluetooth SIG
Hintaluokka	0.10 US\$	5.00 US\$	5.00 US\$
Verkon standardi	ISO 13157 etc.	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.1

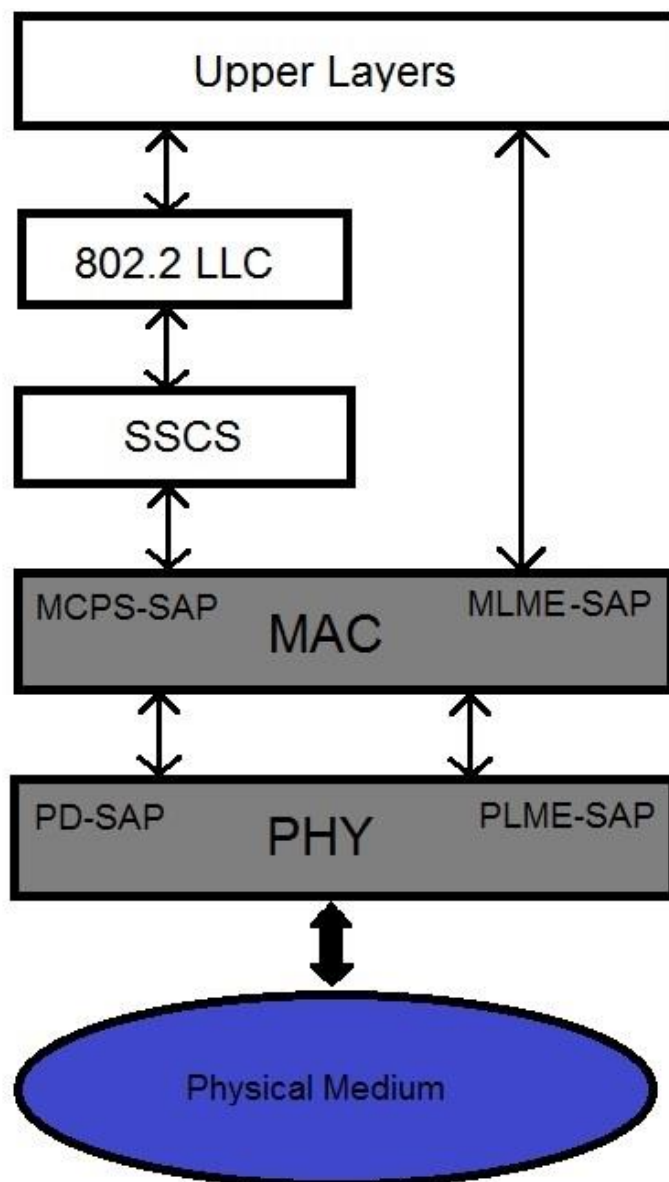
Verkon tyyppi	Point-to-point	WPAN	WPAN
---------------	----------------	------	------

3.5 ZigBee

ZigBee on IEEE 802.15.4 -standardin mukaan pienen kantaman vähävirtainen WPAN-verkko, mikä muodostetaan vähävirtaisilla digitaalisilla radioilla. ZigBee on suunniteltu yksinkertaisemmaksi ja halvemmaksi WPAN-verkoksi, kuten Bluetooth tai Wi-Fi. ZigBee soveltuu hyvin kodin valojen automatisointiin, liikennejärjestelmiin, sensoritiedon keräämiseen ja muihin lyhyen kantaman langattomiin tiedonsiirtoihin. [36.]

Pääominaisuudet ovat vähäinen tiedonsiirtonopeus, vähäinen virrankulutus ja halpuus. ZigBee käyttää lisenssitöntä radiotaajuutta ja on helppo asentaa. Verkot ovat joustavia ja helposti laajennettavia. Sensoriverkko koostuu ZigBee-verkon koordinaattorista, päätelaitteesta ja reitittimestä. Sensoreiden noodien tieto lähetetään verkon välityksellä koordinaattorille, mikä kerää tiedon ja tallentaa muistiin. Tieto prosessoidaan ja reititetään oikeaan noodiin.

ZigBee käyttää LR-WPAN-arkkitehtuuria noodeissa. Arkkitehtuuri on määritelty kerroksiksi. Jokainen kerros on osajoukko LR-WPAN-standardia ja tarjoaa palveluita ylemmille kerroksille ja saa palveluita alemmilta kerroksilta. Jokaisen noodin arkkitehtuuri koostuu fyysisestä kerroksesta ja MAC-kerroksesta (engl. MAC sublayer). SSCS on fyysisen ja MAC-kerroksen yläpuolella. SSCS on käyttöliittymä MAC- ja verkkokerroksen (engl. networking layer) sekä ohjelmistokerroksen (engl. application layer) välillä. Verkkokerroksessa konfiguroidaan verkkoa ja reititetään tietoa. Ohjelmiston kerroksessa voidaan määritellä laitteiston toimintaa. LR-WPAN-standardi määrittää pelkästään fyysisellä ja MAC-kerroksella. Muut tasot ovat määrittelemättömiä. [37.]



Kuva 9. Noodien arkkitehtuuri LR-WPAN-laitteessa [37; 38].

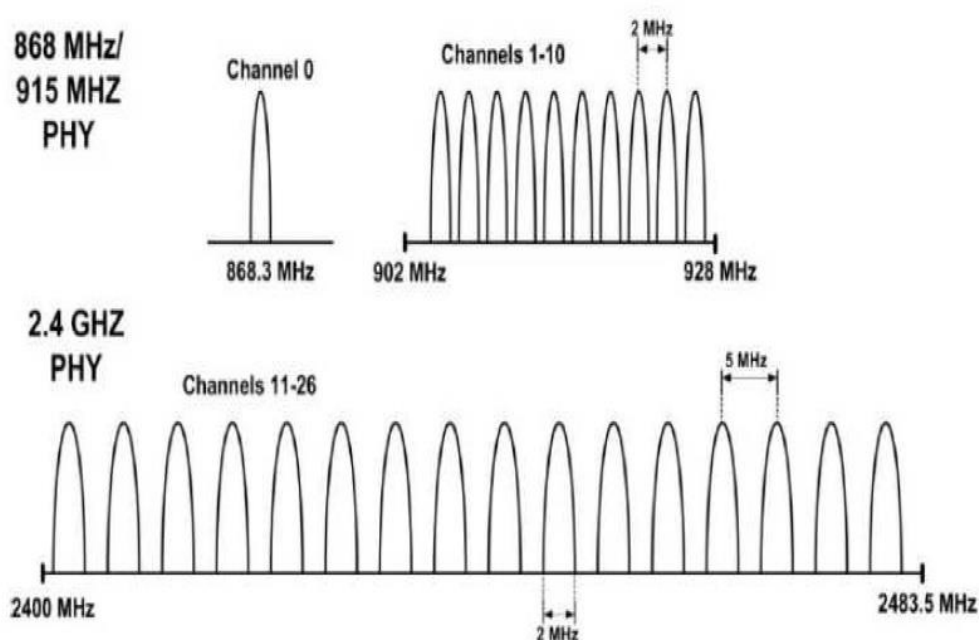
Fyysinen kerros (PHY) tarjoaa data- ja hallintapalvelua (engl. data service and management service), mikä on Physical Layer Management Entity (PLME) -käyttöliittymä. PHY-datapalvelu mahdollistaa Protocol Data Units (PPDU) -lähettämisen ja vastaanottamisen fyysisessä radiokanavassa.

IEEE 802.15.4 fyysinen taso on vastuussa seuraavista toiminnoista:

- lähetin-vastaanottimen aktivoinnista
- energian tunnistuksesta (ED)
- linkin laadusta (LQI)

- Clear Channel Assesment (CCA)
- kanavan valinnasta.

Protokolla mahdollistaa myös dynaamisen kanavan valinnan. Kanavan skannauksessa etsitään merkkiä (engl. beacon), vastaanottimen energiantunnistusta (engl. receiver energy detection), linkin laatua ja kanavan vaihtoa. Kaikki taajuudet perustuvat Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) -tekniikkaan. 2450 MHz:n taajuus käyttää Offset Quadrature Phase Shift Keing (OQPSK) -teknologiaa modulointiin. 868/915 MHz:n taajuus käyttää Binary Phase Shift Keying (BPSK) -teknologiaa.



Kuva 10. ZigBee-taajuudet ja -kanavat.

MAC-kerros tarjoaa data- ja hallintapalvelua, mikä on MAC sub layer Management Entity (MLME) Service Access Point (SAP) (MLME-SAP) -käyttöliittymä. MAC-datapalvelu mahdollistaa MAC Protocol Data Units (MPDU) -lähettämisen PHY-datan palveluun. MAC-kerroksen tehtäviä ovat seuraavat:

- merkin (engl. beacon) etsiminen
- kanavan hallinnointi (engl. channel access control) Carrier Sense Multiple Access ja Collision Avoidance (CSMA/CA) avulla

- siirtotien varausmenetelmän hallinta (engl. collision-free time slots management)
- tarkistus (engl. frame validation)
- lähetys (engl. acknowledged frame delivery)
- noodien hallinta (engl. node association and disassociation).

3.6 ANT

ANT määrittelee langattoman viestinnän protokollapinon (engl. protocol stack), mikä mahdollistaa laitteiston toiminnan 2,4 GHz:n ISM-taajuudella. Laitteet kommunikoivat keskenään luomalla standardin mukaiset säännöt yhteistoimintaan, tiedon representaatioon, signaalointiin, virheen tunnistamiseen ja autentikointiin. [31.] Konsepti on samanlainen kuin Bluetooth Low Energyssä, mutta se on tarkoitettu sensoreiden käyttöä varten.

3.6.1 Noodit

ANT-noodit pystyvät toimimaan isäntinä ja orjina langattomassa sensoriverkossa samanaikaisesti. Tämä tarkoittaa, että noodit voivat toimia vastaanottimena, lähettimenä tai lähetin-vastaanottimena reitittämään liikennettä muille noodeille. Lisäksi jokainen noodi pystyy määrittelemään, milloin välittää tietoa riippuen naapureiden liikenteen kuormasta. [39.]

3.6.2 Markkinat

PAN-verkkoja käytetään paljon urheilussa ja fitness-sensoreissa monitoroimaan käyttäjän suorituskykyä. Lähetin-vastaanottimia käytetään sykemittareissa, pyöräilyn matkamittareissa, kelloissa, kadenssimittareissa, etäisyys- ja ajastinmonitoreissa. ANT Wireless on yleistymässä terveyden alalla, kodin automatisoinnissa ja teollisissa ohjelmistoissa.

3.7 GPS

Tutkimuksissa [40;41] todettiin, että maaston siirtymisen esiintyvyys Alpeilla on tihentynyt, uhaten kriittisiä sosioekonomisia infrastruktuureja. Ikiroidan sulaminen voi saada aikaan maaston siirtymiä [42]. Tieto maastoon vaikuttavista prosesseista on tärkeää vaarallisten alueiden monitoroimisessa. Siksi ikiroidan kaltaisten prosessien vaikutuksista maastoon on tärkeä osa geologisia tutkimuksia.

Mallintamisen mahdollistamiseksi monimutkaisten pinnanmuotojen suhteista, maaston jäätymis- ja sulamisjaksoihin, tarvitaan myös tietoa mikroilmastosta. Perinteisesti geologiseen tiedon hankintaan käytetään esimerkiksi laserskannausta [43], tai miehittämätöntä ilmatilavalvontaa [44]. Sen lisäksi, että tällaiset tavat maksavat paljon, niitä voi käyttää vain rajatuilla alueilla ja vähän aikaa. Maastomuutosten tutkiminen on rajoitettua ilman kunnon ratkaisua.

NAVSTAR Global Navigation Satellite System (GNSS) tai Global Positioning System (GPS) sallittiin julkiseen käyttöön maanpäälliseen [45; 46; 47] ja ilmatilavalvontaan [48] vuonna 1980. Luontaisia virheitä luonnonilmiöistä voidaan välttää ostamalla kalliimpia ja tarkempia laitteita, kuten kaksoistaajuus L2 GPS -vastaanotin. Vastaanotin hyödyntää kahta erillään olevaa GPS -satelliittisignaalia.

Yleisimmin GPS on avaruuspohjainen radionavigointijärjestelmä. Sen omistaa Yhdysvallat ja sitä operoivat ilmavoimat. GPS on globaali navigointisatelliittijärjestelmä, mikä antaa geolokaation ja ajan GPS-vastaanottimille, millä on esteetön yhteys neljään tai useampaan GPS-satelliittiin. [49.]

GPS ei vaadi mitään käyttäjätietoja ja operoi itsenäisesti ilman puhelinverkkoa tai Internetiä, mutta näitä teknologioita voidaan käyttää hyödyksi käyttökelpoisuutta lisäämiseksi. Yhdysvallat loivat järjestelmän ja ylläpitävät sitä. GPS-järjestelmää voidaan käyttää ilmaiseksi GPS-vastaanottimella.

3.8 6LoWPAN

6LoWPAN on lyhenne nimityksestä IPV6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks. 6LoWPAN-konsepti on lähtenyt ideasta: "Internet protokollan voisi antaa

myös pienille laitteille” [50]. Lisäksi vähävirtaisten ja rajatun prosessointitehon omaavat laitteet voisivat hyödyntää IoT-ympäristöä [51]. Yksinkertaisesti 6LoWPAN mahdollistaa langattoman yhteyden vähävirtaisiin ja matalatehoisiin laitteisiin. 6LoWPAN-ympäristö koostuu yleensä fyysisen ympäristön yhteydestä oikean maailman laitteisiin, kuten sensoreihin. [52.]

6LowPAN-paketteja voidaan lähettää ja vastaanottaa IEEE 802.15.4 -verkoissa. IPv4 ja IPv6 ovat työvälaineitä tiedonsiirtoon lähiverkoissa (LAN), kaupunkiverkoissa (MAN) ja laajaverkoissa (WAN). IPv6 on osana älykästä sähköverkkoa (engl. smart grid), mikä muodostaa mikrosolmuverkkoja (engl. micro mesh network) älylaitteiden ja muiden laitteiden väleille käyttäen Ipv6-runkoverkkoa (engl. backbone). Jotkut näistä laitteista käyttävät IEEE 802.15.4 -radiota ja sen takia käyttävät ylätunnistuspakkausta (engl. header compression) ja fragmentointia niin kuin RFC6282:ssa on määritelty.

Alemman tason TCP/IP-protokollan IP:n kartoitus RFC 4944 tarjoaa usean toiminnon. L2- ja L3-verkkojen kartoitus IPv6-verkosta IEEE 802.15.4:een aiheuttaa useita suunnittelu haasteita. Haasteita on kuvattu seuraavissa alaluvuissa.

Paketin kokoon adaptoituminen kahdessa verkossa

IPv6 tarvitsee maksimisiirtoyksikön (engl. maximum transmission unit (MTU)) olevan yli 1280 oktettia. IEEE 802.15.4 –paketin normaali koko on 127 oktettia. Osoitteiden hallinta laitteille, mitkä kommunikoivat kahden erilaisen toimialueen välillä, on monimutkaista

Osoitteen resoluutio

IPv6-noodit on nimitetty 128 bitin IP-osoitteiksi hierarkkisessa tavassa, kuitenkin verkon prefiksi on satunnaisen pitkä. IEEE802.15.4 -laitteet voivat käyttää joko IEEE 64-bittistä pidennettyä osoitetta tai yhdistymisen jälkeen (engl. association event) 16-bittistä osoitetta, mitkä ovat uniikkeja likiverkossa (PAN). Fyysisesti vierekkäin oleville IEEE 802.15.4 -laitteille annetaan myös PAN-ID.

Eroavaiset laitteiden suunnittelut

IEEE 802.15.4 -laitteet on tarkoituksella rakennettu halvemmalla tavalla, että voidaan rakentaa isoja verkkoja monilla laitteilla. Laitteet käyttävät myös vähemmän virtaa, mikä mahdollistaa pattereiden käytön. Langalliset noodit IP-toimialueessa ovat rakennettu niin, että ne voivat käyttää verkkovirtaa.

Eroava parametrien optimointi

IPv6-noodit on varustettu saavuttamaan isoja nopeuksia tiedonsiirrossa. Algoritmien ja protokollien toteutus ylemmissä kerroksissa, kuten TCP kernelin TCP/IP:stä ovat optimoitu käsittelemään tyypillisiä verkon ongelmia, kuten ruuhkaa. IEEE 802.15.4 -laitteiden energian kulutuksen vähentäminen ja koodin pituuden optimointi ovat ensimmäisillä sijoilla kehityksen tärkeysjärjestyksessä.

OSI-mallin kerroksien yhteensopivuus ja pakettien muotoilu

IPv6- ja IEEE 802.15.4 -toimialueen yhteensopivuutta voidaan pitää OSI-mallinkerros ongelmana. Kerroksen toimivuuden ja uusien pakkausformaattien kehitys on tärkeä tutkimusala. RFC 4944 tarjoaa sovelletun kerroksen mahdollistamaan IPv6-tietosähkeiden lähettämisen IEEE 802.15.4 -verkkoihin.

3.9 LoRaWAN ja LoRa

LoRa ja LoRaWAN ovat kaksi eri asiaa. LoRa toimii fyysisessä OSI-mallin kerroksessa ja LoRaWAN ylemmällä kerroksella. LoRa-protokolla on suljettu ja yksityisomistuksessa. Sen takia siitä ei ole saatavilla virallisia dokumentteja. [53.] LoRan on kehittänyt Cycleo of Grenoble. Sen osti Semtech vuonna 2012 [54]. LoRa-tekniikan tuottaja Semtech toimittaa ja ylläpitää verkkoa 15 isossa Yhdysvaltojen kaupungissa yhteistyössä Comcastin kanssa. Comcast toimittaa IoT-verkkopalveluita LoRa-verkoilla.

LoRaWAN on LPWAN verkkotekniikka (Low Power Wide Area Network). LoRaWAN on avoin ja globaali standardi. Kommunikointi päätelaitteiden ja yhdyskäytävän kanssa on jaettu eri taajuisille kanaville. Se toimii taajuuksilla 169 MHz, 433 MHz, 868

(Eurooppa) ja 915 MHz (Amerikka). LoRaWAN-laitteita käytetään MAC-kerroksen protokollan yhteyksien hallintaan LPWAN-yhdyskäytävän ja noodien välillä. LoRaWAN määrittelee kommunikointiprotokollan ja järjestelmän arkkitehtuurin verkolle, kun taas fyysisen kerroksen LoRa luo pitkän matkan kommunikointiyhteyden. LoRaWAN hallinnoi yhteydenpitotaajuudet, tiedonsiirtonopeuden ja virran käytön. [55.] Verkon laitteet ovat asynkronisia ja välittävät tietoa, kun sitä on tarjolla. Noodin päätelaitteesta lähetettävä tieto otetaan vastaan monilla yhdyskäytävillä, jotka välittävät tiedon keskitettyyn verkkopalvelimeen [56]. Verkon palvelin suodattaa kopioituneita paketteja, suorittaa turvallisuus tarkistuksia ja ylläpitää verkkoa. Tieto siirretään sen jälkeen palvelimen sovellukselle. [57.]

LoRaWAN on tarkoitettu vähätehoiseen tiedonsiirtoon. Teknologiaa hyödyntävät IoT -ratkaisut ovat pitkäikäisiä ja edullisia. Anturit ovat yksinkertaisia asentaa eivätkä vaadi kaapelointia. Antureissa käytettävä akku tai paristo voi kestää jopa 10 vuotta. Verkko sopii erityisesti pienten datamäärien vastaanottamiseen ja lähettämiseen pitkillä matkoilla. Tärkeimpiä ominaisuuksia ovat edullisuus, liikuteltavuus, kaksisuuntainen tiedonsiirto, paikannuspalvelut ja helppo käyttöönotto. Verkko koostuu pääreitittimestä ja laitteista, sekä sovelluksista ja palvelimista.

LoRaWAN-verkkoarkkitehtuurissa käytetään yleensä star-of-stars-topologiaa, jossa yhdyskäytävänä toimii ns. läpinäkyvä silta. Silta toimii päätelaitteen, eli anturin ja palvelimen välillä. LoRa-anturit käyttävät langatonta single-hop-tiedonsiirtoa yhteen tai useampaan yhdyskäytävään, jotka liittyvät verkkopalvelimiin vakiomuotoisilla IP-liitännöillä. Päätelaitteet eivät ole internetissä, koska ne eivät käytä IP-protokollaa. [58.]

3.9.1 Päätelaitteet

A-luokan päätelaite on kaksisuuntaisesti kommunikoiva. Sen lähetyksiä seuraa kaksi lyhyttä vastaanottoikkunaa. Lähetyksen ajankohtaa voidaan muuttaa. Se perustuu ALOHA-protokollaan, jossa sensori lähettää paketin, kun sillä on tarve siihen. Laite kuluttaa vähän virtaa, koska sen kommunikointi palvelimen kanssa on mahdollisimman vähäinen. Palvelimelta odotetaan vastaanottoviestiä vain silloin, kun sille on itse lähetetty viesti.

B-luokan päätelaite on kaksisuuntaisesti kommunikoiva ja siinä on ajastetut vastaanottopaikat. Lisäyksenä A-luokan päätelaitteeseen, on laitteissa ylimääräinen

ajastettu vastaanottoikkuna. Päätelaitteelle lähetetään aikasynkronoitu Beacon-viesti, minkä jälkeen se avaa oman vastaanottoikkunan. Siitä palvelin tietää, milloin päätelaite on hereillä.

C-luokan päätelaite on kaksisuuntainen. Laitteesta löytyy maksimimäärä vastaanottopaikkoja. Laite vastaanottaa lähes jatkuvasti. Vastaanottoikkuna sulkeutuu vain silloin, kun päätelaite lähettää tietoa. [58.]

3.9.2 LoRaWAN-tiedonsiirto

Teknologialla on hyvä radiokuuluvuus pitkiltä etäisyyksiltä vähäisellä kulutuksella. LoRa perustuu hajaspektritekniikkaan. Teknologia parantaa häiriönsietoa. LoRaWAN-tiedonsiirto voi olla yksi- tai kaksisuuntaista. Tiedonsiirto on jaettu eri taajuuskanaville ja nopeuksille. Nopeuteen vaikuttaa anturin ja keskusverkkopalvelimen etäisyys ja datamäärä. Tiedonsiirtonopeus on 0,3-50 Kb/s. [58.]

3.10 Sigfox

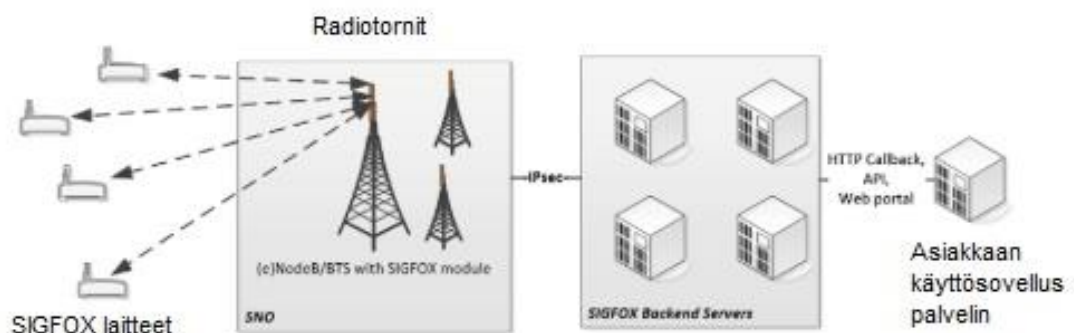
Sigfox perustettiin Ranskassa vuonna 2009. Työntekijöitä yrityksellä on yli 375 ja toimipaikkoja on Madridissa, San Franciscossa, Sidneyssä ja Pariisissa. Laitteita vuonna 2017 oli yli 45 maassa. Sigfox toimii yhteistyössä Texas Instruments, Silicon Labs ja ON Semiconductorin kanssa. Vuonna 2017 Sigfox-verkko ulottui 803 miljoonan ihmisen laitteisiin ja jatkoi kasvua noin 30 miljoonaa joka kuukausi. Laitteiden määrä verkossa nousi 65%:iin vuonna 2017, ja yritys arvioi laitteiden määrän nousevan kuuteen miljoonaan vuoden lopussa, mihin ei kuitenkaan päästy. Yrityksen liikevaihto nousi 56%:iin ja saavutti 50 miljoonan rajan. [37.]

Vuonna 2018 Sigfox aikoo laajentaa toimintaansa 60 maahan ja yli biljoonaan ihmiseen. Tavoite laitteiden määrän nostamiseen verkossa on edelleen 6 miljoonaa. Sigfox ilmoitti pystyttävänsä ensimmäistä laatuaan olevan hakkerointitalon, millä opetetaan opiskelijoita ympäri maailmaa esineiden Internetistä ja Sigfoxin edelläkävystä teknologiasta. Projekti lähtee käyntiin kesäleirillä San Fransiscossa, ja itse kurssi toteutetaan syyskuussa. Jokainen kurssi kestää kolme kuukautta ja kolmellakymmenellä opiskelijalla on mahdollisuus tehdä töitä kymmenessä eri

projektissa. Suunnitelmana on avata kaksi uutta hakkerointitaloa 2018 Euroopassa ja Aasiassa, sekä yli 50 lisää tulevana kolmena vuotena. [37.]

3.10.1 Arkkitehtuuri

Verkko koostuu lähettimistä, yhdyskäytävistä ja Sigfoxin back endistä. Sigfox verkon operaattorin nimi on SIGFOX Network Operator (SNO). Vastaanottavia yhdyskäytäviä operoivat SNO:t ovat tyypillisesti sijoitettu mobiilioperaattoreiden radiotorneihin. [50.] Yhdyskäytävät kommunikoivat Sigfox-pilvipalvelun back endin kanssa, mitä hallinnoi Sigfox yritys. Verkon toimivuus vaatii SNO-verkon kattavuuden, laitteen/sensorin ja jäsenmaksun.



Kuva 11. Verkon arkkitehtuuri

3.10.2 Teknologia

Sigfox vaatii vähän virtaa ja sen takia sitä kutsutaan nimityksellä LPWAN. Verkko perustuu one-hop tähtitopologiaan ja vaatii puhelin operaattorin lähettämään tietoliikennettä. [38.] Signaalia voidaan käyttää kattamaan myös laajoja maanlaisia alueita [17]. Sigfox käyttää teknologiaa, mikä mahdollistaa teollisen, tieteellisen ja lääketieteellisen kommunikoinnin ISM-taajuusalueella.

Taajuusalue Euroopassa on 868 MHz ja 902 MHz Yhdysvalloissa. Se käyttää Ultra-Narrow Band -signaalia (UNB), mikä pystyy lähettämään signaalia kiinteän materiaalin läpi. ISM-taajuusalueet tukevat kaksisuuntaista viestintää.

Protokollasta on olemassa kaksi versiota. Vuodesta 2014 lähtien alkuperäisessä versiossa uplink käyttää 48 kHz:n makrokanavaa (engl. macro channel) keskitettynä 868.2:n MHz:lle ja toinen versio käyttää 192 kHz:n makrokanavaa keskitettynä

868.13:n MHz:lle. Uplink-kanavan kaistanleveys on 100 Hz teoreettisesti 480 paikalla (engl. slots) 48 kHz:n makrokanavalla ja 1920 paikalla 192 kHz:n makrokanavalla. Kanavat 181-219 ovat varattuja eikä niitä voi käyttää 48 kHz:n makrokanavalla. [59.]

Sigfox ei käytä Listen Before Talk (LBT) eikä muutakaan mekanismia vähentämään samalla kanavalla muiden laitteiden häiriön vähentämiseksi. Toimintasuhderajoitteiden (engl. duty cycle limitation) takia Sigfox-kanavalla ei voi lähettää enempää kuin 1%:n kerrallaan 500 mW:n (27 dBm) ERP-teholla downlinkille ja 25 mW:n (14 dBm) ERP-teholla uplinkille.

Uplink-viestin lähetys voi kestää muutamia sekunteja riippuen toistoista eri kanavilla. Tyypillisesti kolme toistoa vaatii 6 sekuntia (3 x 1s lähetystä + 3 x 1s taukoa), eli maksimissaan 140 viestiä päivässä. Viestit voivat olla maksimissaan 12 tavua. Downlink-viestejä voidaan lähettää 4 ja ne voivat olla 8 tavun suuruisia. [38.]

Taulukko 3. Uplink luokat

	Class 0u	Class 1u	Class 2u	Class 3u
ERP [dBm]	14 > P > 12	12 > P > 7	7 > P > 0	P < 0

Yksi UNB pääpiirteistä on vähäinen kaistan varaus. Se auttaa vähentämään signaalin heikkenemistä ja kasvattaa signaalin lähetyksen matkaa. Sigfox teknologia pystyy vastaanottamaan -142 dBm signaaleita, mitkä ovat erittäin heikkoja. Toisaalta laajalla kattavuudella useampi laite toimii samalla MAC:llä ja protokolla saa isomman tärkeysasteen. Uplink-modulointitekniikan nimi on Differential Binary Phase-Shift Keying (DBPSK). Downlinkin modulointitekniikkaa kutsutaan Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK).

4 Yhteenveto

Työssä selvitettiin, miten sensoriverkko rakentuu ja mistä se koostuu. Sensoriverkoille on laajaa käyttöä teollisilla aloilla ja kysyntä kasvaa koko ajan. Sen takia oli tärkeää selvittää, miten verkko toimii kokonaisuudessaan.

Työssä käsiteltiin alkuun, mikä on sensori eli noodi. Yksi noodi on vain pisara meressä isoissa sensoriverkoissa ja sen takia seuraavaksi oli hyvä katsoa kokonaisuutta. Työssä esiteltiin noodien kokonaisuutta ja sitä, miten tieto etenee noodeilta eteenpäin ensiksi hallintanoodille ja sitten yhdyskäytävään. Seuraavaksi kokonaisuuden käsittämiseksi oli tärkeää käsitellä topologioita ja havainnollistaa niitä kuvilla.

Perusidean syntyessä voitiin puhua markkinoista, tulevaisuudesta ja lakiasioista. Sensoriverkkoihin on sijoitettu valtavasti rahaa ja sen takia olisi myös hyvä tehdä niillä voittoa. Sensoriverkkojen energiatehokkuus ja huoltokulujen alhainen hinta on tärkeitä, kun tehdään rahallista voittoa. Työssä käsiteltiin paljon virrankulutusta ja matemaattisilla kaavoilla annettiin syvällisempääkin puolta laitteiden ominaisuuksista ja vaatimuksista. Hyvä sensoriverkko on energiatehokas, joustava ja edullinen rakentaa.

Seuraavaksi käsiteltiin eri laitteiden valmistajia, eli Bluetooth, RFID, NFC, ZigBee, ANT, 6LoWPAN, GPS, LoRaWAN ja Sigfox. Muutama valmistaja jäi puuttumaan Työssä käytettiin taulukoita vertailemaan laitteiden eroja.

Tutkimuksen jatkamiseksi olisi hyvä laatia taulukko kaikista laitteista vertailun helpottamiseksi. Lisäksi teknistä tietoa voisi olla enemmän. Työssä ei käsitelty Suomesta saatavia laitteita tai operaattoreita enempää kuin Digitan tarjoamaa LoRa-tekniikkaa.

Alkuun tavoitteeni oli selvittää, miten tieto päätyy ihmiselle sensoreista ja mitä eri valmistajien laitteita voidaan hyödyntää prosessissa. Yksinkertaisesta aiheesta laajeni kuitenkin kattava työ, johon olen tyytyväinen. Uskon, että työstä on hyötyä muillekin.

Lähteet

- [1] Uimer, C. 2000. Wireless Sensor Network. Verkkoaineisto. Georgia Institute of Technology. <<https://www.ipwea.org/HigherLogic/system/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=e0619c58-f639-080a-86c2-055ae9c8af4d>>. Luettu 20.5.2018.
- [2] Brörning, Arne; Echterhoff, Johannes; Jirka, Simon; Simonis, Ingo; Everding, Thomas; Stasch, Christoph; Liang, Steve; Lemmens, Rob. 2011. New Generation Sensor Web Enablement. Verkkoaineisto. Mdpi. <www.mdpi.com/142-8220/11/3/2652/pdf>. Luettu 15.3.2018.
- [3] Configuring the management node. Verkkoaineisto. Pexip. <https://docs.pexip.com/admin/editing_management_node.htm>. Luettu 5.10.2018.
- [4] Kumaresan, Praghash. 2015. What is a sink node in WSN? Verkkoaineisto. Researchgate foorumi. <https://www.researchgate.net/post/What_is_a_sink_node_in_WSN>. Luettu 5.10.2018.
- [5] Star Topology. Verkkoaineisto. Techopedia. <<https://www.techopedia.com/definition/13335/star-topology>>. Luettu 5.10.2018.
- [6] Tree topology. 2007. Verkkoaineisto. Computer Hope. <<https://www.computerhope.com/jargon/t/treetopo.htm>>. Luettu 5.10.2018.
- [7] Mesh Networking. Verkkoaineisto. Technopedia. <<https://www.techopedia.com/definition/24398/mesh-networking>>. Luettu 5.10.2018.
- [8] Pister, Kristofer & Doherty, Lance. 2008. TSMP: Time synchronized mesh protocol. Verkkoaineisto. Proceedings of the IASTED International Symposium, Distributed Sensor Networks (DSN 2008), Florida. Sivut 391-398. <<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/2008/TSMP%20DSN08.pdf>>. Luettu 13.7.2018.
- [9] Kalita, Hemanta Kumar & Kar, Avijit. 2011. Key management in secure self organized wireless sensor network: a new approach. Verkkoaineisto. Proceedings of the International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET'11), India, s. 865-870. <https://www.researchgate.net/publication/220902228_Key_manag

ement_in_secure_self_organized_wireless_sensor_network_a_new_approach >. Luettu 14.7.2018

[10] Ashton, Kevin. 2009. That 'Internet of Things' Thing. Verkkoaineisto. RFID Journal, <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Luettu 1.2.2018.

[11] Kumar, Sriganda & Shepherd, David. 2001. Sensit: Sensor information technology for the warfighter. Verkkoaineisto. Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion. <<http://fusion.isif.org/proceedings/fusion01CD/fusion/searchengine/pdf/TuC11.pdf?>>. Luettu 17.3.2018

[12] Coy, P & Gross, N. 1999. 21 Ideas for the 21st Century. Business Week online, 1999, s. 78-167. <http://www.businessweek.com/1999/99_35/2121_content.htm>. Luettu 17.3.2018.

[13] Ni, Lionel; Liu, Yunhao; Zhu, Yanmin. 2008. China's national research project on wireless sensor networks. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'08), s. 19. <https://www.researchgate.net/publication/3436236_China's_National_Research_Project_on_Wireless_Sensor_Networks>. Luettu 17.3.2018.

[14] What is MEMS Technology. Verkkoaineisto. MEMS. <<https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>>. Luettu 5.10.2018.

[15] Ang, R.J.; Tan, Y.K.; Panda, S.K. 2007. Energy harvesting for autonomous wind sensor in remote area. Verkkoaineisto. 33rd Annual IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON'07), Taipei, Taiwan. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4460231>>. Luettu 20.5.2018.

[16] Tand, Lizzie & Guy Chris. 2009. Radio frequency energy harvesting in wireless sensor networks. Verkkoaineisto. International conference on communications and mobile computing, s. 644-648. <<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1582519>>. Luettu 20.5.2018.

[17] Bonfils, Boris Jan & Bonnet, Philippe. 2004. Adaptive and decentralized operator placement for in-network query processing. Verkkoaineisto. In Proceedings of the 2nd

international conference on Information processing in sensor networks. Springer-Verlag, s. 47–62. <<https://pdfs.semanticscholar.org/d36e/f2023d02faa09ea0310656634ff5156e13a3.pdf>>. Luettu 15.8.2018

[18] Ying, Lei; Liu Z; Towsley, Don; Xia, Cathy H. 2008. Distributed operator placement and data caching in large-scale sensor networks. In INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE, s. 977 –985. Luettu 16.8.2018.

[19] Chang, Chih-Chun; Nagel, David; Muftic, Sead. 2007. Assessment of Energy Consumption in Wireless Sensor Networks: A Case Study for Security Algorithms. Verkkoaineisto. In Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems, MASS, Pisa, Italy, s. 1–6. <https://www.researchgate.net/publication/224302351_Assessment_of_Energy_Consumption_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Case_Study_for_Security_Algorithms>. Luettu 16.8.2018.

[20] Shinghal, Kshitij; Noor, Arti; Srivastava, Neelam; Singh, Raghuvir. 2011. Power measurements of Wireless Sensor Network node. Article in International journal of computer sciences and engineering, s. 8–13. Luettu 1.10.2018

[21] Yeap, Gary K. Practical Low Power Digital VLSI Design. 1988. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Hollanti. Luettu 1.10.2018.

[22] Poppen, Frank. 2000. Low Power Design Guide. Verkkoaineisto. <http://pdk101.com/Design_related/Low_power_design_guide.pdf>. Luettu 5.10.2018.

[23] Hiltunen, Jouni; Ala-Louko, Mikko; Taumberger, Markus. 2012. Experimental performance evaluation of POBICOS middleware for wireless sensor networks. Verkkoaineisto. ISRN Communications and Networking.<<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/180369/>>. Luettu 17.8.2018.

[24] Dimitriou, Georgios; Kikiras, Panagiotis; Stamoulis, Georgios; Avaritsiotis, John. 2005. A Tool for Calculating Energy Consumption in Wireless Sensor Networks. Verkkoaineisto. Conference Paper in Lecture Notes in Computer Science. <https://www.researchgate.net/publication/221565507_A_Tool_for_Calculating_Energy_Consumption_in_Wireless_Sensor_Networks>. Luettu 20.10.2018.

[25] Lajara, Rafael; Pelegrí-Sebastiá, José; Solano, Juan J. Perez. 2010. Power consumption analysis of operating systems for wireless sensor networks. Verkkoaineisto. <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3247733/>>. Luettu 1.10.2018.

[26] Bluetooth: Facts, Discussion forum and Encyclopedia article. Verkkoaineisto. Absolute Astronomy. <<http://www.absoluteastronomy.com/topics/Bluetooth#encyclopedia>>. Luettu 18.7.2017.

[27] Bluetooth range. Verkkoaineisto. BluAir. <<http://www.blugair.pl/bluetooth-range>>. Luettu 5.10.2018.

[28] Nield, David. 2016. Bluetooth 5: everything you need to know. Verkkoaineisto. Techradar. <<https://www.techradar.com/news/networking/bluetooth-5-everything-you-need-to-know-1323060>>. Luettu 7.10.2018

[29] Kolderup, Ken. 2017. Introducing Bluetooth Mesh Networking. Verkkoaineisto. Bluetooth blog. <<https://blog.bluetooth.com/introducing-bluetooth-mesh-networking>>. Luettu 20.11.2018

[30] Woolley, Martin. 2017. An Intro to Bluetooth Mesh Part 1. Verkkoaineisto. Bluetooth blog. <<https://blog.bluetooth.com/an-intro-to-bluetooth-mesh-part1>>. Luettu 23.11.2018.

[31] Woolley, Martin. 2017. An intro to Bluetooth Mesh Part 2. Verkkoaineisto. Bluetooth blog. <<https://blog.bluetooth.com/an-intro-to-bluetooth-mesh-part2>>. Luettu 26.11.2018.

[32] Violino, Bob. What is RFID? Verkkoaineisto. RFID Journal. <<https://www.rfidjournal.com/articles/view?1339>>. Luettu 7.8.2018.

[33] Bhuptani, Manish & Moradpour, Shahram. 2005 RFID Field Guide, Deploying Radio Frequency Identification Systems. Sun Microsystems Press, A Prentice Hall Title. Sivu 49. Luettu 7.8.2018.

[34] Faulkner, Cameron. 2017. What is NFC? Everything you need to know. Verkkoaineisto. Techradar. <<https://www.techradar.com/news/what-is-nfc>>. Luettu 15.10.2017

- [35] Cassidy, Ruth. 2009. NFC Forum Announces Two New Specification to Foster Device Interoperability and Peer-to-Peer Device Communication. Verkkoaineisto. NFC Forum. <https://web.archive.org/web/20110927172100/http://www.nfc-forum.org/news/pr/view?item_key=088d874025e1049cd9c772ea508f4630ebf079b8>. Luettu 1.2.2017.
- [36] ZigBee Specification. 2012. Verkkoaineisto. Zigbee Alliance <<http://www.zigbee.org/wp-content/uploads/2014/11/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf>>. Luettu 15.8.2018.
- [37] Mouftah, Hussein T.; Ali, Khaled A. 2011. Wireless personal area networks architecture and protocols for multimedia applications. Ad hoc Networks, vol. 9, s. 675-686. Luettu 15.8.2018.
- [38] Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2003. Verkkoaineisto. New York. <<http://profsite.um.ac.ir/~hyaghmae/ACN/WSNMAC1.pdf>>. Luettu 15.8.2018.
- [39] Frenzel, Lou. 2012. What's The Difference Between Bluetooth Low Energy And ANT? Verkkoaineisto. Electronics Design. <<https://www.electronicdesign.com/mobile/what-s-difference-between-bluetooth-low-energy-and-ant>>. Luettu 11.9.2017.
- [40] Crozier, M. 2010 Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. Verkkoaineisto. Geomorphology. Sivut 260-267 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10001881>>. Luettu 20.7.2017.
- [41] Ravanel, L., Deline, P. 2010 Climate influence on rockfalls in high alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. The Holocene 21(2), sivut 357-365. Luettu 20.7.2017.
- [42] Hasler, A. 2011 Thermal conditions and kinematics of steep bedrock. PhD Thesis. Verkkoaineisto. Department of Geography, University of Zurich. <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/59731/1/2011_Hasler.pdf>. Luettu 20.7.2017.
- [43] Carter, William; Shrestha, Ramesh; Slatton, K. 2007. Geodetic laser scanning. Verkkoaineisto. Physics Today. <<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.2825>>

070>. Luettu 20.7.2017.

[44] Lucieer, Arko; Robinson, Sharon; Turner, Darren. 2010. Using and unmanned arial vehicle (UAV) for ulta high resolution mapping of Antartic moss beds. Verkkoaineisto. University of Wollongong. <<https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.fi/&httpsredir=1&article=1476&context=scipapers>>. Luettu 20.7.2017.

[45] Squarzoni, C; Delacourt, Christophe; Allemand, Pascal. 2005 Differential single-frequency GPS monitoring of the la valette landslide (French alps). Engineering Geology 79(3-4), sivu 215-229. Luettu 20.7.2017.

[46] Jurdak, Raja. 2010. Adaptive GPS duty cycling and radio ranging for energy-efficient localization. Verkkoaineisto. Proc. of the 8th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (Sensys), s.57-70 <<http://sensys.acm.org/2010/Papers/p57Jurdak.pdf>>. Luettu 21.7.2017.

[47] Werner-Allen, Geoff; Lorincz, Konrad; Jonhson, Jeff; Lees, Jonathan; Welsh, Matt. 2006. Fidelity and yield in volcano monitoring sensor network, sivu 381–396. <<https://www.mdw.la/papers/volcano-osdi06.pdf>>. Luettu 21.7.2017.

[48] D’Amico, Simone; Montenbruck, Oliver. 2010. Differential GPS: An enabling technology for formation flying satellites, s. 457-465. Verkkoaineisto. German Space Operations Center <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.529.8568&rep=rep1&type=pdf>>. Luettu 21.7.2017.

[49] What is a GPS? Library of Congress. Verkkoaineisto. <<https://www.loc.gov/rr/scitech/mysteries/global.html>>. Luettu 30.8.2017.

[50] Mulligan, Geoff. 2007. The 6LoWPAN architecture. Verkkoaineisto. Conference: Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Network Sensors. <https://www.researchgate.net/publication/220785778_The_6LowPAN_architecture>. Luettu 10.10.2017.

[51] Mulligan, Geoff. 2007. The 6LoWPAN architecture. Verkkoaineisto. Conference: Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Network Sensors. <<https://www>.

researchgate.net/publication/220785778_The_6LowPAN_architecture>. Luettu 10.10.2017.

[52] IPv6 over Low power WPAN (6lowpan). Verkkoaineisto. IETF. <<https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/documents/>>. Luettu 10.10.2017.

[53] Knight, Mathew; Seeber, Balint. 2016. Decoding LoRa: Realizing a Modern LPWAN with SDR. Verkkoaineisto. Bastille Networks, Kalifornia. <<https://pubs.gnuradio.org/index.php/grcon/article/download/8/7> >. Luettu 1.8.2018.

[54] Prajzler, Vit. 2015. LoRa, LoRaWAN and LORIIOT. Verkkoaineisto. Lorient <<https://www.loriot.io/lora-lorawan-loriot.html>>. Luettu 15.7.2018.

[55] LoRaWAN For Developers. Verkkoaineisto. LoRa Alliance. <<https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers> >. Luettu 1.8.2018.

[56] A Comprehensive Look At Low Power Wide Area Networks For 'Internet of Things' Engineers and Decision. 2016. Verkkoaineisto. <<http://cdn2.hubspot.net/hubfs/427771/LPWAN-Brochure-Interactive.pdf>>. Luettu 1.8.2018.

[57] What is the LoRaWAN Specification? Verkkoaineisto. LoRa Alliance. <<https://lora-alliance.org/about-lorawan>>. Luettu 1.8.2018.

[58] Mikä on LoRaWAN? Verkkoaineisto. Digita. <https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika_on_lorawan>. Luettu 15.7.2018.

[59] Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2003. Verkkoaineisto. New York. <<http://profsite.um.ac.ir/~hyaghmae/ACN/WSNMAC1.pdf> >. Luettu 15.8.2018.