

Sami Takkinen
LYHYEN KANTAMAN SENSORIVERKOT

Opinnäytetyö
KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2010

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Ylivieska	Aika Huhtikuu 2010	Tekijä Sami Takkinen
Koulutusohjelma Tietotekniikan koulutusohjelma		
Työn nimi Lyhyen kantaman sensoriverkot		
Työn ohjaaja Joni Jämsä		Sivumäärä 38
Työelämäohjaaja Mika Pahkasalo		
<p>Opinnäytetyö tehtiin CENTRIAN Tutkimus & Kehitys-yksikölle. Työ suoritettiin tutkimuslähtöisesti. Sen tavoitteena oli koostaa tietoa sensoriverkoista. Niistä tutkittiin käyttökohteita ja yleisimpiä ominaisuuksia. Työssä tutkittiin myös IEEE 802.15.4-standardia ja sen keskeisimpiä ominaisuuksia, kuten protokollapinon kerroksia ja tiedonsiirron ominaisuuksia. Lisäksi työssä käsiteltiin standardiin perustuvia ja perustumattomia sensoriverkkojen toteutuksia eri valmistajilta.</p> <p>Lyhyen kantaman sensoriverkkoja voidaan käyttää monissa käyttökohteissa, jotka perinteisesti tarvitsevat kiinteän verkon infrastruktuuria, kuten teollisuuden prosessien ohjaus ja valvominen. Langattomuuden vuoksi sensoriverkot tarjoavat joustavan tavan toteuttaa erilaisia verkkoratkaisuja. Tarjolla on lukuisia eri toteutuksia. Osa niistä perustuu IEEE 802.15.4-standardiin. Muissa toteutuksissa valmistajat ovat kehittäneet itse tietoliikenneprotokollia.</p>		
Asiasanat IEEE 802.15.4, langaton, LR-WPAN, lyhyen kantaman sensoriverkko, POS, Zigbee		

ABSTRACT

CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES Ylivieska	Date April 2010	Author Sami Takkinen
Degree programme Information technology		
Name of thesis Low-rate sensor networks		
Instructor Joni Jämsä	Pages 38	
Supervisor Mika Pahkasalo		
<p>This thesis was commissioned by CENTRIA R&D. The thesis was carried out as a research-based study. The purpose of the thesis was to gather information about the low-rate sensor networks. The focus was on their applications and common properties. In addition, IEEE 802.15.4 standard and its key features like protocol stack layers and communication were studied. The thesis also focused on implementations based on the standard and non-standard based implementations of different manufacturers.</p> <p>Low-rate sensor networks can be used in many applications that traditionally require a fixed network infrastructure. For example they can be used to control and monitor industrial processes. Due to wirelessness, sensor networks provide a flexible way to implement different network solutions. There are many different implementations available. Some of them are based on the 802.15.4 standard and in other implementations manufacturers have developed their own network protocols.</p>		

Key words IEEE 802.15.4, low-rate sensor network, LR-WPAN, POS, wireless, WSN, Zigbee

LYHENTEET

ACL	Access Control List
AES	Advanced Encryption Standard
ASK	Amplitude-Shift Keying
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention Free Period
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying
DS	Direct Sequence
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
FFD	Full Function Device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Frequency-Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
GTS	Guaranteed Time Slot
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
ISA	International Society of Automation
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
LLC	Logical Link Control
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Private Area Network
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Medium Access Control
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MIC	Message Integrity Code
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMhd	Nickel-Metal Hybride

OSI	Open System Interconnection
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
PDU	Protocol Data Unit
POS	Personal Operating Space
PSSS	Parallel Sequence Spread Spectrum
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RKE	Remote Keyless Entry
SSCS	Service Specific Converge Sublayer
TDMA	Time Division Multiple Access
TSMP	Time Synchronized Mesh Protocol
UWB	Ultra Wide Band
WFD	Wireless Field Device

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
LYHENTEET
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 SENSORIVERKOT	2
2.1 Käyttökohteet	2
2.1.1 Teollisuuden ohjaus ja valvonta	3
2.1.2 Kotiautomaatio ja kuluttajaelektronikka	3
2.1.3 Turvallisuus ja sotilaskäyttö	4
2.1.4 Kuljetus- ja tuotantoketjun hallinta	4
2.1.5 Maatalous	5
2.1.6 Terveysthuolto	5
2.1.7 Pelastustoimi	6
2.2 Laitteen rakenne	6
2.3 Virrankulutus	7
2.4 Energianlähteet	8
3 STANDARDI IEEE 802.15.4	9
3.1 OSI-mallin arkkitehtuuri	9
3.2 Verkon osat	10
3.3 Verkontopologiat	11
3.4 Virrankulutus	12
3.5 PHY-kerros	12
3.5.1 ED –Energy Detection	13
3.5.2 LQI –Link Quality Indicator	13
3.5.3 CCA –Clear Channel Assessment	13
3.5.4 Tiedonsiirto	14
3.5.5 Lähetysteho ja herkkyys	16
3.6 MAC-alikerros	16
3.6.1 Kehysrakenteet	17
3.6.2 Superkehys	17
3.6.3 CSMA-CA	18
3.6.4 Tietoturva	19
4 IEEE 802.15.4-STANDARDIIN POHJAUTUVAT TOTEUTUKSET	20
4.1 Zigbee	20
4.2 WirelessHART	21
4.3 ISA100.11a	22
4.4 MiWi ja MiWi P2P	23
5 MUUT LYHYEN KANTAMAN SENSORIVERKKOJEN TOTEUTUKSET	25
5.1 Smart Dust	25
5.2 ANT	26
5.3 EnOcean	27

5.4 Z-Wave	28
5.5 DASH7	29
5.6 Bluetooth Low Energy	30
5.7 INSTEON	30
5.8 ONE-NET	31
6 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	33

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan lyhyen kantaman sensoriverkkoja. Työhön sisältyy niiden eri käyttökohteiden, tyypillisten ominaisuuksien ja IEEE 802.15.4 -standardin keskeisimpien ominaisuuksien tarkastelua. Standardin ominaisuuksien tarkasteluun kuuluvat sen määrittämät laitteiden-, protokollapinon- ja tiedonsiirron ominaisuudet. Lisäksi työssä on esitelty muutamia kyseiseen standardiin pohjautuvia toteutuksia ja myös sellaisia toteutuksia, jotka eivät perustu siihen. Toteutuksista on esitelty niiden tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia ja käyttökohteita.

Tämän työn tavoitteena oli tuottaa työn tilaajalle, CENTRIA Tutkimus & Kehitysyksikölle, kattava tietopaketti sensoriverkoista. Opinnäytetyön perusteella tilaaja saa näkemyksen aiheeseen ja tietoa eri sovelluksista.

2 SENSORIVERKOT

Langattomat sensoriverkot ovat yleistyneet langattoman tiedonsiirtotekniikan kehityessä. Sitä on myös edesauttanut entistä pienempien elektronisten komponenttien tulo markkinoille ja niiden hintojen alentuminen. Sensoriverkkoja käytetään lyhyen kantaman tiedonsiirtoon. Sensoriverkot mahdollistavat monipuolisten verkko- ja ratkaisujen toteuttamisen paikoissa, joissa ei ole perinteistä verkkoinfrastruktuuria.

Sensoriverkkoja varten on kehitetty useita kilpailevia tiedonsiirtostandardeja. Yksi niistä on IEEE:n kehittämä 802.15.4-standardi. Standardiin perustuvia toteutuksia on tarjolla niin yksittäisiltä laitevalmistajilta kuin laitevalmistajista koostuvilta yhteenliittymiltä. Lisäksi on olemassa useita erilaisia kilpailevia standardeja, jotka on luotu palvelemaan rajatusti jotain tiettyä tehtävää tai kilpailemaan jonkin IEEE 802.15.4-standardiin perustuvan toteutuksen kanssa.

Sensoriverkot koostuvat muutamista tai jopa tuhansista laajalle alalle levitetyistä laitteista, jotka viestivät keskenään. Laitteiden ominaispiirteitä ovat edullisuus, pieni koko ja rajallinen käytettävissä oleva energia. Niitä voidaan käyttää ohjaamaan erilaisia laitteita ja valvomaan fyysisiä ilmiöitä. Pääasialliset käyttökohteet löytyvät teollisuuden prosessien ohjaus- ja valvontasovelluksista.

Verkoille ominaista on niiden ad hoc-tyyppiset piirteet, eli ne ovat itseorganisoituvia ja myös itsekorjautuvia. Ne ovat erittäin kestäviä vaativissakin olosuhteissa. Häiriönsieto ja tiedonsiirron luotettavuus ovat olleet kehitystyön lähtökohtina. Samalla erilaisten standardien kehittäminen on edes auttanut sensoriverkkojen yleistymissä myös muualla kuin teollisuudessa.

2.1 Käyttökohteet

Langattomuus mahdollistaa sensoriverkkojen luomisen sinne, missä se ei ole ollut aikaisemmin mahdollista. Niiden avulla voidaan helpottaa monien eri tyyppisten

tehtävien suorittamista. Lisäksi niiden hyödyntäminen voi vähentää kustannuksia monilla eri aloilla. Sensoriverkkojen käyttökohteita löytyy kodeista, teollisuudesta, ympäristöstä ja infrastruktuurista. Tehtävät voivat liittyä ohjaamiseen, valvomiseen tai paikannukseen.

2.1.1 Teollisuuden ohjaus- ja valvonta

Teollisissa ympäristöissä tiedonsiirron tarve on suhteellisen pieni, mutta verkolta vaaditaan erittäin korkeaa luotettavuutta. Sensoriverkot tarjoavat riittävän nopeuden antureille tyypillisen tilatiedon siirtoon. Tiedonsiirron luotettavuus varmistuu ominaisuuksiltaan itsekorjautuvan ja –organisoituvan monihyppyverkon avulla. Jos jokin verkon laite vikaantuu, tieto voidaan reitittää eri laitteita pitkin. (Callaway 2004, 1-2.)

Sensoriverkot mahdollistavat useita eri käyttötapoja teollisissa ympäristöissä perinteisen anturikäytön lisäksi. Valojen ohjaus, kuten sammutus ja himmennys, voidaan toteuttaa langattomasti. Ilmastointilaitteiden säätö ja valvonta voidaan toteuttaa tilojen ja tarpeiden mukaan. Langattomuus mahdollistaa myös liikkuvien laitteiden valvonnan. Lisäksi niillä voidaan ehkäistä vakavien onnettomuuksien tapahtumisen, kuten esimerkiksi myrkyllisten kaasujen havaitseminen ajoissa voi säästää ihmishenkiä. (Callaway 2004, 2-3.)

2.1.2 Kotiautomaatio ja kuluttajaelektroniikka

Sensoriverkoille koti tarjoaa monia eri käyttömahdollisuuksia. Langattomilla huonekohtaisilla termostaateilla voidaan säätää huoneiden lämpötiloja ja ilmastointilaitetta. Yleiskaukosäätimellä voidaan esimerkiksi ohjata kuluttajaelektroniikkalaitteita, valaistusta ja ulko-ovien lukitusta. Kaksisuuntaisen tiedonsiirron ansiosta kaukosäätimiin voidaan saada lisäominaisuuksia, kuten ilmaisemaan komentojen kuitausviestit. Asunnon lukkoja voidaan ohjata myös autoista tutulla avaimettomalla RKE-järjestelmällä, jossa yhtä nappia painamalla kytkeytyisi lukot, liiketunnistimet ja murtohälytintä päälle tai pois. (Callaway 2004, 4-6; Farahani 2008, 29.)

Sensoriverkon toteutuksia voidaan hyödyntää PC:n langattomissa näppäimistöissä ja hiirissä. Näissä laitteissa matala virrankulutus on oleellinen osa käyttömukavuutta, paristojen vaihtokertojen tapahtuessa mahdollisimman harvoin. Muita käyttökohteita löytyy monipuolisesti pelikonsolien ohjaimista ja lasten leluista, kuten radio-ohjattavista autoista. (Callaway 2004, 5.)

2.1.3 Turvallisuus ja sotilaskäyttö

Murtohälytínjärjestelmä koostuu useista antureista, joita ovat liiketunnistimet, magneettikytkimet, kulunvalvontajärjestelmät ja turvakamerat. Valvontajärjestelmät voidaan toteuttaa langattomasti sensoriverkkoja hyödyntämällä. Käyttöympäristöjä ovat kodit, lentokentät, tehtaat ja voimalaitokset. (Callaway 2004, 6; Zhao & Guibas 2004, 300.)

Sensoriverkkojen ominaispiirteet tarjoavat monia mahdollisuuksia sotilaskäytössä. Laitteiden pieni koko helpottaa niiden naamiointia ympäristöön. Verkkojen itsekorjautuvuus takaa tiedon kulkemisen vikatilanteissa. Hajaspektri koodaus ja satunnaisesti tapahtuva purskeinen tiedonsiirto tekee laitteiden havaitsemisen erittäin vaikeaksi. Sensoriverkkoja voidaan käyttää varusteiden ja ammusten seuraamiseen, vihollisen vakoiluun ja omien joukkojen paikantamiseen ja biologisten-, kemiallisten ja ydinaseiden havaitsemiseen. (Callaway 2004, 7; Raghavendra, Sivalingam & Znati 2004, 25.)

2.1.4 Kuljetus- ja tuotantoketjun hallinta

Tuotanto- ja kuljetusketjun hallinta on yksi tärkeimmistä sensoriverkkojen käyttökohteista. Sensoriverkko voidaan toteuttaa myös yhdessä laajalti käytetyn RFID-tekniikan kanssa. Langattomuuden ansiosta erilaiset toteutukset mahdollistuvat paikoissa, joissa ei ole käytettävissä kiinteää verkkoinfrastruktuuria tai sellaisen rakentaminen ei ole mahdollista. Tällaisia paikkoja ovat satamat ja suuret varastohallit. (Zhao ym. 2004, 295; Callaway 2004, 8.)

Suurien varastojen sisätiloissa tavaroiden paikantaminen voidaan toteuttaa langattomasti. Paikantamisen ansiosta tuotteita ei pääse katoamaan vaan ne saadaan tehokkaasti toimitettua eteenpäin jatkokäsittelyä varten. Junien ja laivojen lastauksessa kontit voidaan sijoittaa laitureille ja kuormauspaikoille siten, että ne ovat tarpeen vaatiessa helposti löydettävissä ja saatavissa. Tavaroiden kuljetuksen seuranta voidaan järjestää, kuten olemassa olevissa lähetysten seurantajärjestelmissäkin. (Zhao ym. 2004, 295; Callaway 2004, 7-8.)

Elintarvikkeilla kylmäketjun katkeamattomuus kuljetuksen aikana on tärkeää. Pilaantuneet tuotteet aiheuttavat tappioita kauppiaille ja tuottajille ja ovat uhka terveydelle. Valvomalla tuotteiden lämpötilaa sensoriverkkojen avulla, tuotantoketjun eri vaiheissa, voitaisiin saada tietoa mahdollisesta kylmäketjun katkeamisesta. (Römer 2004, 7.)

Tuotannonohjausjärjestelmissä voidaan tarkastella reaaliaikaisesti varastotietoja ja tuotannon kuormitustasoa eri toimipisteiden välillä ja tätä kautta tehostaa yrityksen toimintaa. Lisäksi toimitusajat saadaan tarkemmin määriteltä ja parannettua tuotavuutta. (Callaway 2004, 8.)

2.1.5 Maatalous

Maataloudessa sensoriverkkoa voidaan hyödyntää usealla eri tavalla. Sademittarilla voidaan tarkistaa, tarvitaanko keinotekoista kastelua. Erilaiset kemialliset ja biologiset anturit kertovat ilmaston sen hetkisestä tilasta ja maaperän tarpeista, joita voivat olla lannoitus ja tuholaismyrkytys. Lisäksi eläinsuojien ilmastointilaitteiden ja valaistuksen ohjaus voidaan toteuttaa sensoriverkoilla, kuten myös eläinten tunnistus ja paikannus. (Callaway 2004, 9.)

2.1.6 Terveysthuolto

Terveysthuoltoalalla sensoriverkkojen hyödyntäminen lisää potilasturvallisuutta monella eri tavalla. Lisäksi sillä voidaan helpottaa sairaaloiden potilasosastojen

kuormitusta. Sensoriverkkoja hyväksi käytävillä laitteilla voidaan suorittaa ruumiinlämmön-, sykkeen-, verenpaineen- ja verensokerinmittausta. Terveystilan seuranta voidaan suorittaa myös kotihoidossa, josta saatuja tuloksia terveydenhuollon ammattilaiset voivat etäyhteyden avulla seurata. (Farahani 2008, 31; Callaway 2004, 10.)

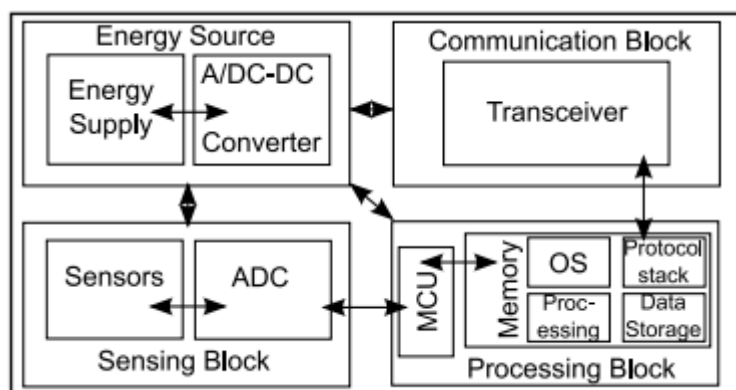
2.1.7 Pelastustoimi

Pelastustoimen työn nopeuttamiseksi uhreja voidaan paikantaa esimerkiksi lumivyöryonnettomuudessa. Myös maanjäristyksen tuhotessa rakennuksia voidaan ihmisiä paikantaa raunioista tähän käyttöön sopivilla laitteilla. Mahdollisesti ne voivat antaa tietoa fyysisestä kunnosta, jolloin apua eniten tarvitsevat saavat sitä ensimmäisenä. (Callaway 2004, 10-11.)

2.2 Laitteen rakenne

Sensoriverkon laite koostuu neljästä lohkoista: energialähteestä, anturiosasta, tietoliikenneosasta ja prosessointiosasta. Kuvioista yksi nähdään tyypillisen sensoriverkon laitteen lohkoakaavio. Energianlähteenä voi olla paristo tai jokin louhimalla energiaa tuottava laite. Anturiosa sisältää anturin, joka aistii mitattavaa suuretta ja muuntaa sen mikrokontrollerin ymmärtämään muotoon. (Haapola 2010, 24.)

Prosessointiosaan kuuluvat mikrokontrolleri ja muisti, joka koostuu käyttöjärjestelmästä, protokollapinosta, suorittimesta ja pysyvästä muistista. Tietoliikenneosa sisältää langattoman lähetin-vastaanotinyksikön. Sen ominaisuudet määrittävät tiedonsiirtonopeuden ja toiminta-alueen. (Haapola 2010, 24.)



KUVIO 1. Sensoriverkon laitteen lohkokaavio (Haapola 2010, 24.)

2.3 Virrankulutus

Sensoriverkkojen ominaispiirteisiin kuuluva vähäinen virrankulutus on yksi sen tärkeimmistä ominaisuuksista, koska se vaikuttaa laitteiden käyttöikään. Virrankulutukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska laitteet ovat pääasiassa paristokäyttöisiä. Koska pariston vaihto voi olla epäkäytännöllistä tai mahdotonta, laitteelta vaaditaan vähintään usean kuukauden tai jopa vuosien käyttöikää. (Anastasi, Conti, Di Francesco & Passarella 2008, 1.)

Laitteen virrankulutukseen vaikuttaa kolme eri asiaa: tiedonsiirto, prosessointi ja mittaaminen. Eniten energiaa kuluu tiedonsiirtoon. Tiedon prosessointiin kuluu energiaa huomattavasti vähemmän verrattuna tiedonsiirtoon. Mittaamiseen kuluva energia riippuu anturin tyypistä, mutta yleensä se on erittäin vähäistä verrattuna siitä saadun tiedon prosessointiin ja -siirtoon. (Anastasi ym. 2008, 2.)

Virrankulutukseen voidaan vaikuttaa viestintään käytetyllä protokollalla ja virranhallintamenetelmillä. Energiatehokkaat tiedonsiirtoprotokollat vähentävät tiedonsiirron aikana kuluvaa energiaa. Virranhallintamenetelmillä voidaan väliaikaisesti kytkeä laitteen eri osia pois päältä, kun niitä ei tarvita. Tätä menetelmää kutsutaan käyttöjaksotukseksi (duty cycling). Käyttöjaksotus tarkoittaa sitä, minkä ajan laite on päällä suhteessa sammutettuna oloon. Lisäksi virrankulutukseen voidaan vaikuttaa rajoittamalla siirrettävän tiedon määrää. (Anastasi ym. 2008, 2, 8.)

2.4 Energialähteet

Laitteissa käytettävät paristot voivat olla tyypiltään alkali, litium, NiCd tai NiMHd. Ne voivat olla kertakäyttöisiä tai uudelleen ladattavia. Paristojen lataamiseen ja ylläpitoon voidaan käyttää erilaisia loughintamenetelmiä, kuten valokennoja. Energiaa voidaan varastoida myös kondensaattoreihin. Tähän käytetään superkondensaattoreita, joilla on tavallisiin kondensaattoreihin nähden suurempi varauskapasiteetti. (Roundy, Steingart, Fréchette, Wright & Rabaey 2004, 3, 6.)

Yleisimmät lähteet energian loughimiseksi ovat ympäristön radiotaajuinen (RF) säteily ja valosäteily. RF-säteilyä voidaan hyödyntää jos käyttöympäristössä on voimakkaita radiolähettämiä, joiden lähettämistä signaaleista saadaan loughittua energiaa. Aurinkokennoilla saadaan valosäteily muunnettua sähköenergiaksi sisätiloissakin. (Roundy ym. 2004, 10.)

Muita loughintamenetelmiä ovat pietsosähköinen ilmiö ja termopari. Pietsosähköisessä ilmiössä tietyillä materiaaleilla on ominaisuutena varautua sähköisesti, kun niihin kohdistetaan rasitusta. Ilmiötä voidaan hyödyntää monella eri tavalla. Energiaa voidaan tuottaa erilaisista iskuista, värinöistä tai jousiviritteisillä ratkaisuilla, jotka vaativat käyttäjän painallusta varautuakseen. Termopari perustuu Seebeck:n ilmiöön, jossa kahden metallisen kappaleen lämpötilaerosta syntyvästä jänniteerosta voidaan tuottaa energiaa. (Roundy ym. 2004, 11, 13-14; Costas & Aliwell 2008, 26, 28.)

Pietsosähköisen menetelmän lisäksi värähtelyllä voidaan tuottaa energiaa sähkömagneettisesti ja -staattisesti. Sähkömagneettinen ilmiö voi tuottaa energiaa liikuvan kelan ja kiinteän magneetin avulla. Elektrostaattisessa menetelmässä muuntajaa liikutetaan sähkökentässä, josta saadaan tuotettua energiaa. (Roundy ym. 2004, 15-18; Costas ym. 2008, 26.)

3 STANDARDI IEEE 802.15.4

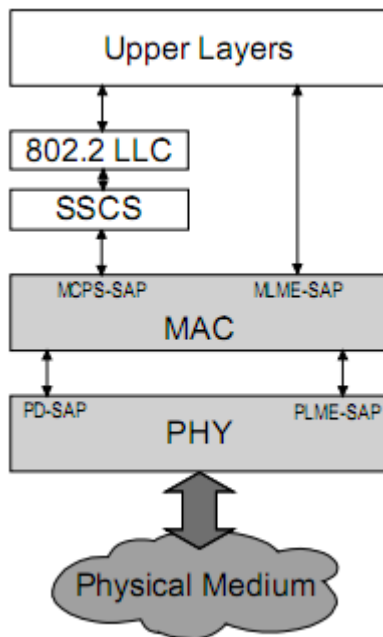
Standardi on kehitetty lyhyen kantaman langattomalle tiedonsiirrolle. Sen tavoitteena on taata riittävä tiedonsiirtonopeus, vähäinen virrankulutus, tiedonsiirron yksinkertaisuus ja matalat kustannukset. IEEE 802.15.4-standardi julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 2003 ja vuonna 2006 julkaistiin päivitetty versio 2006. (IEEE 802.15.4 2006.)

Standardissa määritetään seitsenkerroksisen OSI-mallin fyysisen kerroksen (PHY) ja siirtoyhteysalikerroksen (MAC) ominaisuudet. Ylempien kerroksien ominaisuudet on jätetty kolmansien osapuolten määriteltäviksi. (IEEE 802.15.4 2006, 15-17.)

Standardiin on tullut lisäyksiä vuonna 2006 julkaistun version jälkeen. Niissä määritellään vaihtoehtoisia toteutuksia fyysiselle kerrokselle ja maakohtaisia lisäyksiä eri taajuusalueille. PHY-kerrokselle esitetään kaksi vaihtoehtoista toteutusta, ultra-laajakaistainen tiedonsiirto (UWB) ja chirp-hajaspektritekniikka (CSS). Vaihtoehtoiset taajuusmääritykset koskevat Kiinaa ja Japania. (IEEE 802.15.4a 2007; 802.15.4c 2009; 802.15.4d 2009.)

3.1 OSI-mallin arkkitehtuuri

IEEE 802.15.4-standardin rakenne perustuu 7-kerroksiseen OSI-malliin. Standardiin sisältyy PHY-kerroksen ja MAC-alikerroksen määritykset. Kuvioista kaksi nähdään standardin määrittämät alimmat osat OSI-mallista. PHY-kerros välittää liikennettä siirtotien ja MAC-kerroksen välillä. MAC-alikerros on osa siirtoyhteyskerrosta, joka koostuu IEEE 802.2-standardissa määritetystä LLC- ja SSCS-alikerroksesta. SSCS-alikerros luo yhteyden MAC-alikerroksen ja LLC-alikerroksen välille. Ylempiin kerroksiin kuuluvat verkko- ja sovelluskerrokset. (IEEE 802.15.4 2006, 15-17.)



KUVIO 2. Standardin määrittämät OSI-mallin osat (IEEE 802.15.4 2006, 16.)

3.2 Verkon osat

Standardiin pohjautuva järjestelmä koostuu kolmesta komponentista, jotka ovat laite, POS-alue ja WPAN. Kahden tai useamman laitteen toimiessa ja kommunikoidessa samalla POS-alueella ja fyysisellä kanavalla ne muodostavat WPAN-verkon. (IEEE 802.15.4 2006, 13.)

Standardi määrittelee kaksi erilaista laitetyyppiä: FFD ja RFD. FFD-laite voi toimia verkossa kolmessa eri tilassa. Näitä ovat PAN-koordinaattori, koordinaattori ja päätelaite. PAN-koordinaattori on verkon pääohjainlaite, joka luo verkon ja käsittelee ja reitittää tietoa. RFD on erittäin yksinkertainen päätelaite. Se voi lähettää anturitietoa tai vastaanottaa ohjaustietoa. FFD-laitteet voivat olla yhteydessä RFD- ja FFD-laitteisiin yhtäaikaisesti. RFD-laite voi olla yhteydessä vain FFD-laitteeseen ja vain yhteen kerrallaan. (IEEE 802.15.4 2006, 13.)

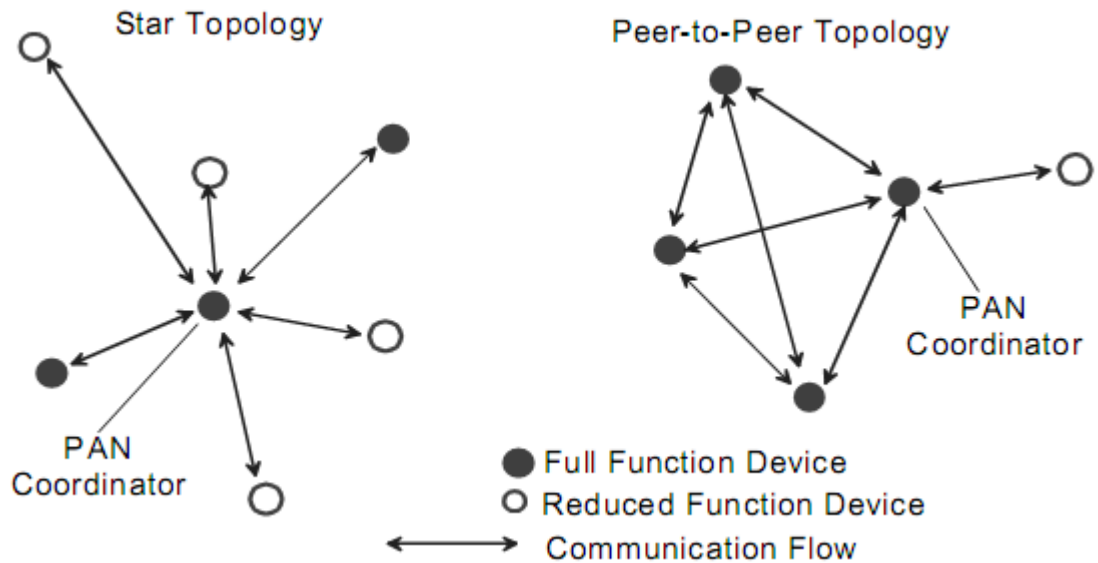
3.3 Verkkotopologiat

Käyttökohteesta riippuen LR-WPAN verkosta voi muodostua tähti- tai peer-to-peer-topologia, jotka ovat nähtävillä kuviosta kolme. Verkon muodostaminen kuuluu ylempien kerroksien tehtäviin, eikä siihen varsinaisesti oteta kantaa tässä standardissa. Standardi kuitenkin sisältää kuvaukset verkkojen muodostamisesta. (IEEE 802.15.4 2006, 14.)

Tähtitopologiassa verkon laitteet voivat kommunikoida vain PAN-koordinaattorin kanssa. Verkkoa muodostettaessa PAN-koordinaattori valitsee yksilöllisen verkon tunnisteiden, jonka jälkeen FFD- ja RFD laitteet voivat liittyä siihen. Tunniste mahdollistaa useiden tähtiverkkojen itsenäisen toiminnan samalla verkon peittoalueella. Tähtitopologian käyttökohteita löytyy kodinautomaatiosta ja -elektroniikasta. (IEEE 802.15.4 2006, 14-15.)

Peer-to-peer-topologia poikkeaa tähtitopologiasta siten, että mikä tahansa laite voi kommunikoida minkä tahansa laitteen kanssa. Rajoituksena kommunikoinnille on laitteiden toimintaetäisyys ja tyyppi. Topologia mahdollistaa rakenteeltaan monimutkaisien verkkojen muodostamisen, mikä taas mahdollistaa verkkojen käytön vaativimmissakin teollisissa käyttöympäristöissä. Peer-to-Peer-verkot voivat olla ad hoc-tyyppisiä, itsestäänkorjautuvia ja -organisoituvia. Topologia sallii tiedon reitittämisen monihyppelyn avulla laitteelta laitteelle. (IEEE 802.15.4 2006, 14.)

Peer-to-Peer-verkossa voi olla useita FFD-laitteita, mutta vain yksi niistä voi toimia PAN-koordinaattorina verkkoa muodostettaessa. Valinta voi tapahtua nopeimman tai tehokkaimman laitteen perusteella. Koska laitteet voi kommunikoida keskenään, verkosta voi muodostua cluster- tai mesh-tyyppinen. (IEEE 802.15.4 2006, 15.)



KUVIO 3. Esimerkit tähti- ja peer-to-peer-topologioista (IEEE 802.15.4 2006, 14.)

3.4 Virrankulutus

Standardiin pohjautuvat laitteet ovat pääasiassa paristokäyttöisiä, vaikka joissakin tapauksissa laite voi olla kytkettynä verkkovirtaan. Tästä syystä standardi on kehitetty virrankulutuksen minimoimisen näkökulmasta. Käytännön toteutuksiin liittyvät virranhallinnalliset ominaisuudet ovat kuitenkin kiinni valmistajista, eikä standardi ota niihin kantaa. (IEEE 802.15.4 2006, 24.)

Virransäästämiseksi paristokäyttöisissä laitteissa käytetään käyttöjaksotusta, eli laitteet ovat suurimman osan ajasta unitilassa. Tietyin väliajoin laite herää kuuntelemaan, onko sille tulossa viestejä. Tästä johtuen on mahdollista valita, onko tärkeämpää pieni virrankulutus vai viipeet viestien siirroissa. Standardiin perustuvien laitteiden käyttöjakson pituuden arvioidaan olevan alle 1%. (IEEE 802.15.4 2006, 24.)

3.5 Fyysinen kerros

PHY-kerros vastaa useasta eri tehtävästä. Niihin kuuluvat vastaanottimen aktivointi ja deaktivointi, energiatason havaitseminen (ED) käytössä olevalla kanavalla ja

saapuvan lähetyksen laadun tarkkailu (LQI). Lisäksi sen tehtäviin kuuluvat siirtotien tilan kuuntelu (CCA) kanavanvarausmenetelmää (CSMA-CA) varten sekä kanavan taajuuden valinta ja tiedonsiirto. (IEEE 802.15.4 2006, 27.)

3.5.1 ED – Energy Detection

Laitteen aloittaessa tiedonsiirron se menee ensiksi vastaanottotilaan havaitakseen ja mitatakseen energiatason halutulla taajuuskanavalla. ED on tarkoitettu käytettäväksi osana verkkokerroksen kanavanvalintamenetelmää. Sillä ei tunnisteta tai yritetä dekodata havaittua signaalia. (Farahani 2008, 36.)

MAC-alikerros tekee pyynnön energiatason mittaamiseen PHY-kerrokselle, johon mittaustulos palautetaan. Pienin mitattavissa oleva energiataso tulisi vastata tehoa, joka on <10 dB suurempi kuin vastaanottimen herkkyyden taso. Mittausalue on oltava vähintään 40dB ja mittaustarkkuus ± 6 dB tai parempi. (Farahani 2008, 37; IEEE 802.15.4 2006, 65.)

3.5.2 LQI – Link Quality Indicator

LQI eli saapuvan lähetyksen tarkkailuominaisuus mittaa signaalin tehotasoa ja signaali-kohinasuhteen jokaisesta vastaanotetusta paketista. Mittaus voidaan suorittaa energiatason havainnoinnilla ja signaali-kohinasuhteen arvioimisella tai niiden yhdistelmällä. Yhdistettynä mittaus ilmaisee, johtuuko korruptoitunut paketti liian matalasta tai korkeasta tehotasosta. Se, kuinka mittauksesta saatua tietoa käytetään hyväksi, kuuluu verkko- tai sovelluskerroksen tehtäväksi. (IEEE 802.15.4 2006, 65, 263)

3.5.3 CCA – Clear Channel Assessment

Tiedonsiirtoa valmisteltaessa siirtotien tilaa kuunnellaan CCA-menetelmällä, ennen kuin laite varaa kanavan. Tällä varmistetaan se, että mikään muu verkon laite

ei käytä kanavaa, kun tietoa aiotaan siirtää. Kanavan kuuntelu voidaan suorittaa yhdellä kolmesta eri menetelmästä:

- CCA tila 1: Teho yli raja-arvon. CCA ilmoittaa siirtotien olevan käytössä, jos ED:lle annettu raja-arvo ylittyy.
- CCA tila 2: Pelkkä kantoaalto. CCA ilmoittaa siirtotien olevan käytössä vain jos se havaitsee signaalin, joka on yhteensopiva tämän standardin kanssa ja modulaatio ja hajaspektritekniikka ovat samat. Signaali energiatasolla ei ole merkitystä.
- CCA tila 3: Kantoaallon ja tehon raja-arvon yhdistelmä. Tämä menetelmä suorittaa loogisen AND- tai OR-operaation edellisten tilojen kuuntelumenetelmistä. AND-operaatiossa siirtotien ilmoitetaan olevan käytössä jos kanavalta havaittu signaali ylittää tehon raja-arvon ja on yhteensopiva standardin kanssa. OR-operaatiossa kanavalla oleva signaali ylittää raja-arvon tai on yhteensopiva standardin kanssa. (Farahani 2008, 37-38; IEEE 802.15.4 2006, 66.)

3.5.4 Tiedonsiirto

Taulukosta yksi nähdään tiedonsiirtoon liittyviä ominaisuuksia. Tiedonsiirtoa varten on määritetty kolme taajuusaluetta, jotka ovat 868 MHz, 915 MHz ja 2,4 GHz. Maailmanlaajuisesti käytössä on 2,4 GHz:n ISM-taajuus. Tällä taajuudella käytetään tiedonsiirtoon suorasekvensointi hajaspektritekniikkaa (DSSS) ja käytössä on 16 kanavaa. Alin taajuus 868 MHz on käytössä Euroopassa ja ylempi 915 MHz Pohjois-Amerikassa. Standardissa IEEE 802.15.4-2006 on alemmille taajuuksille määritetty valinnaisia ominaisuuksia, kuten rinnakkaissekvensointi (PSSS) ja amplitudimodulaatio (ASK). Valinnaisilla tiedonsiirtomenetelmillä on tiedonsiirron nopeus saatu nostettua samalle tasolle kuin 2,4 GHz:n taajuudella. (IEEE 802.15.4 2006, 28, 30)

TAULUKKO 1. Standardin IEEE 802.15.4-2006 taajuusalueet ja niiden ominaisuudet (IEEE 802.15.4 2006, 27-30.)

Taajuus [MHz]	Taajuusalue [MHz]	Kanavamäärä	Siirtonopeus kb/s	Hajaspektritekniikka	Modulaatio
868/915	868-868,6 902-928	1 10	20 40	DSSS	BPSK
868/915 (valinnainen)	868-868,6 902-928	1 10	250	DSSS	O-QPSK
868/915 (valinnainen)	868-868,6 902-928	1 10	100 250	PSSS	ASK
2450	2400-2483,5	16	250	DSSS	O-QPSK

Standardin lisäyksiin liittyvien CSS:n ja UWB:n ominaisuudet ovat nähtävillä taulukosta kaksi. CSS-tekniikan taajuusalue on 2,4 GHz. Modulaationa siinä käytetään DQPSK:ta. Tiedonsiirtonopeus on saatu nostettua 1 Mb/s. (IEEE 802.15.4 2007.)

UWB:lle on määritetty kolme eri taajuusaluetta, joista yksi sijoittuu alle gigahertsin alueelle ja kaksi muuta kaistaa kattavat 3,2-10,2 GHz:n välisen alueen. Tiedonsiirtonopeudeksi määritellään 850 kb/s. Valinnainen 110 kb/s:n nopeus on tarkoitettu pidemmille siirtomatkoille. Lyhyitä siirtoetäisyyksiä varten voidaan käyttää 6,8 Mb/s:n ja 27 Mb/s:n nopeuksia. Tietoa lähetetään suorasekvensoimalla ja moduloidaan BPSK-menetelmällä. (IEEE 802.15.4 2007.)

TAULUKKO 2. Standardin IEEE 802.15.4-2007 taajuusalueet ja niiden ominaisuudet (IEEE 802.15.4 2007.)

Taajuus [MHz]	Taajuusalue [MHz]	Kanavamäärä	Siirtonopeus kb/s	Hajaspektritekniikka	Modulaatio
2450	2400-2483,6	14	1000 (valinnainen: 250)	CSS	DQPSK
UWB (alle GHz)	250-750	1	850 (valinnaisia: 110, 6810, 27240)	DS-UWB	BPSK
UWB (alempi)	3244-4742	4			BPSK
UWB (ylempi)	5944-10234	11			BPSK

3.5.5 Lähetysteho ja herkkyys

Standardi IEEE 802.15.4-2006 määrittää laitteen minimilähetystekoksi -3 dBm, joka vastaa 0,5 mW:n tehotasoa. Tätä pienemmällä teholla ei uskota saatavan merkittävää hyötyä virransäästön suhteen. Standardissa oletetaan laitteiden lähetystehojen sijoittuvan käytännössä välille -3 dBm ja +10 dBm, 0 dBm ollessa yleisin. Laitteen herkkyystasoksi on määritetty vähintään -85 dBm. (IEEE 802.15.4 2006, 51, 263; Minicircuits 2008.)

Standardin lisäyksessä IEEE 802.15.4-2007, CSS-tekniikkaa käyttäville laitteille minimilähetystekoksi on määritetty -3 dBm. Laitteiden vähimmäisherkkyytasoksi on määritetty -85 dBm 1 Mb/s:n nopeudella ja vähintään -91 dBm 250 kb/s:n nopeudella. Standardi ei määritä UWB-laitteille minimilähetystehoa, mutta olettaa sen olevan enintään -14 dBm. (IEEE 802.15.4 2007, 61, 91, 142.)

Maakohtaiset säännöt määräävät maksimilähetystekot tietyillä taajuusalueilla. Suomessa 2,4 GHz:n taajuusalueella sallittu maksimilähetysteho on 100 mW ja 868 MHz taajuusalueella 25 mW. UWB:lle määritetty spektrin maksimi tehotiheys on -41,3 dBm/MHz. (Viestintävirasto 2009.)

3.6 MAC-alikerros

MAC-alikerros sijaitsee siirtoyhteyserroksessa PHY-kerroksen yläpuolella ja vastaa kaikesta liikenteestä, mikä kulkee sinne. Sen tehtäviin kuuluvat beacon-kehityksen luominen, jos laite on PAN-koordinaattori tai synkronoituminen beacon-kehitykseen. Se tukee tietoturvaominaisuuksia ja PAN-verkon muodostamista ja purkamista. Lisäksi se ohjaa kanavanvarausmenetelmää (CSMA-CA) ja luo luotettavan yhteyden kahden laitteen MAC-kerroksien välille. Siirtoyhteyserroksessa myös määritetään ja ylläpidetään taattua aikajakojärjestelmää (GTS). (IEEE 802.15.4 2006, 67.)

3.6.1 Kehysrakenteet

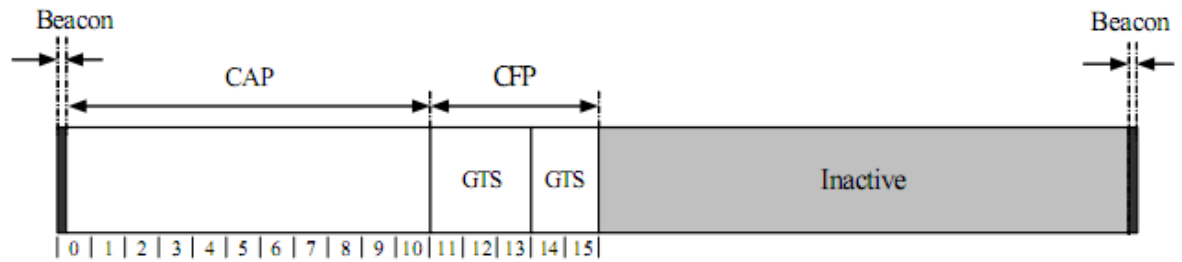
Kehysrakenteet on pyritty suunnittelemaan riittävän yksinkertaiseksi, mutta silti häiriön kestäväksi tiedonsiirrossa. Standardi määrittää neljä kehysrakennetta. Ensimmäinen on beacon-kehys, jolla ilmaistaan verkon laitteille aikooko koordinaattori siirtää tietoa tietylle laitteelle. Sillä myös synkronoidaan tiedonsiirto verkon laitteelta koordinaattorille, tunnistetaan verkko ja ilmaistaan superkehysten rakenne. Seuraava on datakehys, jota käytetään kaikenlaisessa tiedonsiirrossa. Kolmas on kuittauskehys, millä voidaan varmistaa onnistunut tiedonsiirto. Viimeinen on MAC-komentokehys, joka käsittelee verkonmuodostamiseen liittyviä käskyjä. (IEEE 802.15.4 2006, 17-21.)

3.6.2 Superkehys

Superkehys on valinnainen ominaisuus, joka määritetään PAN-koordinaattorissa. Sillä voidaan synkronoida tiedonsiirto tapahtuvaksi haluttuna aikana. Se ei ole verrattavissa muihin kehysrakenteisiin. Kuviosta neljä nähdään kehyksen rakenne, joka koostuu 16 aikavälistä ja kahdesta beacon-kehyksestä, joiden välisenä aikana tiedonsiirto tapahtuu. Beacon-kehys lähetetään jokaisen superkehysten ensimmäisessä aikavälissä. (IEEE 802.15.4 2006, 17-18.)

Aikavälit sisältyvät aktiiviseen jaksoon, jonka aikana laitteet voivat siirtää tietoa. Tiedonsiirtoa haluavat laitteet kilpailevat siirtotiestä kilpailujakson (CAP) aikana CSMA-CA:ta käyttäen. Kehys voi valinnaisesti sisältää myös ei-aktiivisen jakson, jonka aikana laitteet voivat siirtyä vähäisemmän virrankulutuksen tilaan. (IEEE 802.15.4 2006, 18.)

Aikakriittisen tiedonsiirron turvaamiseksi voidaan käyttää taattuja aikavälejä. Tällöin laitteen ei tarvitse kilpailla muiden kanssa tiedonsiirrosta. Laitte voi tarvittaessa pyytää taattua aikaväliä PAN-koordinaattorilta, joka määrittää ja myöntää sen. Superkehyksessä voi olla enintään seitsemän taattua aikaväliä. Ne sijoittuvat kehyksessä aina aktiivisen jakson loppuosaan. Niistä muodostuvaa osuutta kutsutaan kilpailusta vapaaksi jaksoksi (CPF). (IEEE 802.15.4 2006, 18, 193.)



KUVIO 4. Superkehysten rakenne, joka sisältää taatun aikaväli ominaisuuden. (IEEE 802.15.4 2006, 168.)

3.6.3 CSMA-CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSMA-CA on kanavanvarausmenetelmä. Kanava voidaan varata kahdella eri tavalla, joka riippuu siitä onko verkossa käytössä beacon-kehys vai ei. Jos beacon-kehystä ei ole käytössä, kyseessä on nonbeacon-enabled-verkko. Tällöin verkossa käytetään aikajaoitonta kanavanvarausta. Laitteen halutessa lähettää tietoa se kuuntelee, onko kanava käytössä. Tämän jälkeen se odottaa satunnaisen ajan ja tarkistaa uudelleen, onko kanava varattu. Kanavan ollessa vapaa se lähettää tietoa. Kanavan ollessa varattu, laite odottaa uuden satunnaisen ajan ennen uudestaan yritystä. (IEEE 802.15.4 2006, 23.)

Beacon-kehysten omaavissa beacon-enabled-verkoissa käytetään aikajakoista kanavanvarausmenetelmää. Laite voi lähettää tietoa superkehyksessä määritetyllä kilpailujakson aikaväleillä. Se paikallistaa seuraavan alkavan aikavälin reunan ja alkaa odottaa satunnaisen määrän aikavälejä. Odotuksen päätyttyä se tarkistaa onko kanava vapaa. Kanavan ollessa käytössä se odottaa uudelleen satunnaisen määrän aikavälejä ennen kuin yrittää käyttää kanavaa uudelleen. Jos kanava on vapaa, laite aloittaa tiedonsiirron seuraavan aikavälin reunalla. Kuittaus ja beacon-kehukset lähetetään ilman kanavanvarausta. (IEEE 802.15.4 2006, 23.)

3.6.4 Tietoturva

Tietoturvaan liittyvät ongelmat ovat samoja kuin muissa langattomissa verkoissa. Sensoriverkot ovat samalla lailla haavoittuvia salakuuntelulle ja viestien muokka-

ukselle. Laitteiden rakenteen yksinkertaisuus ja ad hoc-verkkojen ominaispiirteet hankaloittavat monimutkaisien salausalgoritmien käyttöä. Standardissa määritelty salausmenetelmä perustuu symmetriseen salausalgoritmiin, joka on 128-bittinen AES. (IEEE 802.15.4 2006, 24.)

Standardi määrittää kolme erilaista suojaustapaa, jotka ovat tiedon luotettavuuden, eheyden ja tuoreuden varmistus. Luotettavuuden ja eheyden varmistamiseksi on olemassa erillisiä ja yhdistettyjä menetelmiä. Suojaukset koskevat beacon-, data- ja komentokehyksiä. Salausavaimien luomisen ja vaihtamisen menetelmiä ei määritetä standardissa, vaan ne jäävät kolmansien osapuolten toteutettavaksi ylempilä protokollan tasoilla. (Hämäläinen 2005, 484; Sastry & Wagner 2004, 1-2.)

Järjestelmältä vaaditut tietoturvaominaisuudet määritetään sovelluskerroksessa, jotka MAC-alikerros toteuttaa. Sovellukselle voidaan valita käytettävät turvallisuuspalvelut tietoturvaavaliokimasta. Käytännössä palveluita on kolme eri tyyppistä. Ensimmäinen niistä on ENC, joka salaa tiedon luotettavasti. Toinen on MIC, joka turvaa tiedon eheyden. Kolmas on ENC-MIC, joka on yhdistelmä edellä mainituista menetelmistä. MIC ja ENC-MIC-palveluista on olemassa eritasoisia suojauksia: 32-, 64 ja 128-bittinen. Tiedon tuoreuden tarkistusta voidaan valinnaisesti käyttää ENC ja ENC-MIC palveluilla. (IEEE 802.15.4 2006, 211; Sastry ym. 2004, 2-5.)

Standardin IEEE 802.15.4-2003-versioon kuului edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi pääsyylista (ACL). Päivitetyssä versiossa se on poistettu osana tietoturvaavaliokimien ominaisuuksien parannuksia. Pääsyylistalla voidaan estää ulkopuolisten laitteiden liittyminen verkkoon ja havaita niiden lähettämät paketit. (IEEE 802.15.4 2006, iii; Sastry ym. 2004, 2.)

4 IEEE 802.15.4-STANDARDIIN POHJAUTUVAT TOTEUTUKSET

Tässä kappaleessa käsitellyt toteutukset noudattavat standardin IEEE 802.15.4 PHY-kerroksen ja MAC-alikerroksen määrittämiä. Näiden määrittämiä päälle eri valmistajat ovat kehittäneet omia tietoliikenneprotokollia. Osa toteutuksista noudattaa pelkästään IEEE 802.15.4-2003-standardissa annettuja määrittämiä ja osa taas perustuu vuoden 2006-versioon standardista.

4.1 ZigBee

ZigBee-standardi on ZigBee-allianssin kehittämä edullinen, matalan virrankulutuksen ja kaksisuuntaisen tiedonsiirron omaava langaton tietoliikenneprotokolla. Sen käyttökohteita löytyy kodinautomaatiosta ja -elektroniikasta, rakennus- ja teollisuusautomaatiosta, terveydenhoidosta, leluista ja peleistä. (Zigbee Alliance 2008, 1.)

Zigbee perustuu IEEE 802.15.4-2003-standardissa määritettyihin PHY-kerrokseen ja MAC-alikerrokseen. Käytettävät taajuudet ovat 868/915 MHz ja 2,4 GHz. Se ei tue vuoden 2006 standardissa annettuja vaihtoehtoisia tiedonsiirto-ominaisuuksia. Lisäksi Zigbee-standardissa määritetään verkkokerros ja sovelluskerroksen kehysrakenne. Sovelluskerros sisältää erilaisia hallinta- ja kommunikointilohkoja. Kerrokseen kuuluu myös sovelluskehys, joka sisältää sovellusprofiilit. (Zigbee Alliance 2008, 1-2.)

Sovellusprofiilit ovat yhteisiä sopimuksia viesteistä, viestien tyypeistä ja niiden käsittelystä. Ne mahdollistavat laitteiden välisen yhteensopivuuden sovellustasolla. Profiilien avulla sovellukset viestivät ja käsittelevät tietoa. Profiili voi esimerkiksi sisältää käskyjä valaisimien ohjaamiseen. (Zigbee Alliance 2008, 18, 76.)

Protokolla tukee tähti-, puu- ja mesh-topologioita. Verkossa voi toimia kolme erilaista laitetyyppiä. Ensimmäinen on koordinaattori, joka vastaa IEEE 802.15.4-standardissa määritettyä FFD-laitetta. Toinen on päätelaite, joka viestii suoraan

koordinaattorin kanssa. Kolmas on reititin, jota voidaan käyttää tiedon välittämiseen puu- ja mesh-topologioissa. (Zigbee Alliance 2008, 3.)

Zigbee on kehittänyt myös toisen standardin, joka on tarkoitettu kuluttajaelektronikkalaitteiden langatonta viestintää varten. RF4CE-standardi määrittää kauko-ohjattavan (RC)-verkon verkkokerroksen ja sovelluskerroksen profiilit. Taajuusalueena käytetään 2,4 GHz:n aluetta, jossa on käytössä vain kolme kanavaa. (Zigbee Alliance 2009, 4.)

Kauko-ohjattava henkilökohtainen verkko (RC PAN) sisältää kaksi erilaista laitetyyppiä: ohjain- ja kohdelaitteen. Kohdelaitte on täysin toiminnallinen laite, joka voi luoda verkon ja toimia PAN-koordinaattorina. Ohjain- ja kohdelaitteet voivat liittyä PAN-koordinaattorin luomaan verkkoon. Verkon topologian muoto on tähti. Useasta yksittäisestä RC PAN-verkosta voi muodostua RC -verkko, jossa laitteet voivat viestiä RC PAN-verkkojen välillä. (Zigbee Alliance 2009, 4.)

4.2 WirelessHART

WirelessHART on osa HART-protokollaa. HART-protokolla on tarkoitettu teollisuuden prosessiautomaatiojärjestelmiin. Sitä voidaan käyttää laitteiden ja prosessien valvomiseen sekä ohjaukseen. WirelessHART-protokolla on taaksepäin yhteensopiva vanhempien HART-laitteiden kanssa, eivätkä vanhemmat laitteet tarvitse ohjelmistopäivityksiä hyödyntääkseen uuden tekniikan langattomuutta. (HART Communication Foundation 2007, 1, 5.)

Se toimii IEEE 802.15.4-2006-standardissa määritettyjen PHY-kerroksen ominaisuuksien mukaan. Viestintä tapahtuu 2400-2483,5 GHz:n taajuuskaistalla. Modulaationa käytetään O-QPSK menetelmää ja suorasekvensointia. (HART Communication Foundation 2007, 3.)

WirelessHART-protokollan MAC-alikerros on yhteensopiva IEEE 802.15.4-2006-standardin kehysrakenteen (PDU) kanssa. Muuten kerroksen toiminta poikkeaa standardista siten, että siinä käytetään Dust Networksin kehittämää aikasykronoi-

tua mesh-protokollaa (TSMP). Kanavointina käytetään aikajakokanavointimenetelmää (TDMA) CSMA-CA:n sijasta. Se takaa erittäin luotettavan tiedonsiirron, koska laitteet synkronoituvat keskenään. Synkronoinnin avulla ne tietävät koska tietoa lähetetään. Se myös mahdollistaa laitteiden yhtä aikaisen uni-tilaan menon ja heräämisen. (Wagner 2010, 4.)

TSMP-protokollan tiedonsiirrossa jokaisen paketin vastaanotto kuitataan aina lähettäjälle. Jos kuittausviesti ei saavu lähettäjälle, se voi lähettää paketin uudelleen eri reittiä. Lisäksi protokollan ominaisuuksiin kuuluu taajuuskanavahyppely (FHSS), joka yhdessä suorasekvenssoinnin kanssa tekee tiedonsiirrosta häiriöitä sietävän. WirelessHART-verkko voi saavuttaa normaaleissa olosuhteissa suuremman tiedonsiirron luotettavuuden tason kuin 6-sigma (99,9999998%). (Wagner 2010, 4; HART Communication Foundation 2007, 3.)

Langattomat kenttälaitteet (WFD) vastaavat IEEE 802.15.4-standardissa määritellyä FFD-laitetta, eli ne voivat lähettää, vastaanottaa ja reitittää tietoa. Tämän vuoksi verkon topologia on täysin mesh-tyyppinen. WFD-laitteet voivat kommunikoida kiinteään verkon isäntälaitteiden kanssa erillisen reitittimen välityksellä. Järjestelmään kuuluu myös langattoman verkon hallintalaite, jolla verkkoa konfiguroidaan, synkronoidaan laitteet keskenään, hallitaan reititystauluja ja valvotaan verkontilaa. Lisäksi protokolla tukee adaptereita, joilla perinteiset HART-kenttäväylälaitteet voidaan yhdistää langattomaan verkkoon ja kämmentietokoneita, jotka voivat kytkeytyä suoraan WFD-laitteeseen. (HART Communication Foundation 2007, 2.)

4.3 ISA100.11a

ISA100.11a-standardi on International Society of Automation-järjestön (ISA) kehittämä langattoman kenttäväyläverkon toteutus. Se on osa laajempaa langattomien teollisuusympäristöjen standardien sarjaa, joita ISA kehittää. Sitä voidaan käyttää tyypillisiin prosessiteollisuuden tarpeisiin. Tekniikan suurin etu kilpailijoihin nähden on siinä, että se on yhteensopiva useiden prosessi- ja automaatioteollisuudessa

käytettyjen protokollien kanssa, kuten HART, Modbus, Foundation Fieldbus, Profibus. (Alatalo 2009 20; McNeil 2009 8.)

PHY-kerroksen ja MAC-alikerroksen toiminta perustuvat IEEE 802.15.4-2006-standardiin. Taajuusalueena käytetään 2,4 GHz:n ISM-aluetta. MAC-alikerros on samankaltainen kuin WirelessHART-protokollassa, eli se perustuu TSMP-protokollaan. Poikkeuksena siihen on lisätty kilpailuperusteinen kanavanvarausmenetelmä (CAP). Halutessa sillä mahdollistuu suurempi tiedonsiirtonopeus. Se kuitenkin tekee tiedonsiirron alttiimmaksi häiriölle, mikä voi olla hyväksyttävissä vähemmän vaativissa olosuhteissa. (Wagner 2010, 5)

Verkko- ja siirtokerrokset perustuvat 6LoWPAN-standardiin. 6LoWPAN eli IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network-standardi määrittää sovituserroksen, joka sijoittuu siirtoyhteyskerroksen ja verkkokerroksen väliin. Se mahdollistaa IPv6-pakettien tiedonsiirron IEEE 802.15.4-standardin kehyksissä. Tämä tekee tiedonsiirron yhteensopivaksi IP-verkkojen kanssa, mikä mahdollistaa monipuolisempien verkkoratkaisujen toteuttamisen. (Shelby & Bormann 2009, 167; IETF 2007, 2-3.)

Protokolla tukee jopa 30 000 laitetta yhdessä verkossa. Tuettuna on FFD-laitteiden lisäksi RFD-laitteet. RFD-laite ei pysty reitittämään tietoa, mutta tarjoaa edullisemman vaihtoehdon redundanttisuuden kustannuksella. Verkko voi olla topologiaaltaan mesh- tai tähti-tyyppinen. (Shelby 2009, 167, 169; Wagner 2010, 5.)

4.4 MiWi ja MiWi P2P

MiWi on Microchip Technology inc. yrityksen kehittämä protokolla. Se on edullinen ja helppokäyttöinen lyhyen kantaman sensoriverkon toteutus. Sen tavoitteena on olla helpommin toteutettavissa kilpailijoihinsa nähden. Protokolla on tarkoitettu pienempiin verkkoratkaisuihin, joissa on vain muutama laitteiden välinen hyppy. (Microchip 2007, 1.)

Protokolla perustuu IEEE 802.15.4-2003-standardin ominaisuuksiin. Tiedonsiirtoon käytetään 2,4 GHz:n ISM-taajuutta. Se tukee myös standardissa määritettyjä FFD- ja RFD-laitteita sekä mesh-, puu-, ja tähtitopologioita. Poikkeuksellisesti tämänhetkinen versio protokollasta ei tue beacon-kehyksen käyttöä, eli tiedonsiirto perustuu kilpailuun. (Microchip 2007, 1-4.)

Verkossa voi olla korkeintaan 1024 laitetta. Koordinaattoreita voi olla enintään kahdeksan ja yhteen koordinaattoriin voi olla yhteydessä 127 solmua. Paketit voivat siirtyä maksimissaan neljä hyppyä tai korkeintaan kaksi, jos lähettäjänä on koordinaattori. (Microchip 2007, 1.)

Microchip on kehittänyt myös yksinkertaisemman version MiWi-protokollasta. MiWi P2P-protokollassa on muutettu MAC-alikerroksen ominaisuuksia. Kahden laitteen välinen kättely, yhteydenkatkaisu ja kanavanvaihto on tehty yksinkertaisemmaksi. Se tukee tähtitopologian lisäksi peer-to-peer-topologiaa, mutta ei sisällä reititysominaisuutta. Tuetut laitetypit ovat samat kuin IEEE 802.15.4-standardissa. Protokolla ei tue taattua aikavälijärjestelmää eikä beacon-kehyksen käyttöä. Käytännössä luotettavaksi tiedonsiirtonopeudeksi mainitaan 250 kb/s sijasta 30-40 kb/s. (Microchip 2008, 1-2.)

5 MUUT LYHYEN KANTAMAN SENSORIVERKKOJEN TOTEUTUKSET

Kaikki sensoriverkkojen toteutukset eivät perustu IEEE 802.15.4-standardiin vaan laitevalmistajat ja yhteenliittymät ovat kehittäneet kokonaan uusia tietoliikenneprotokollia. Syitä tähän ovat IEEE 802.15.4-standardin määrittämät kehysrakenteet, jotka ovat liian monimutkaisia käytettäväksi yksinkertaisemmissa sovelluksissa ja se, että laitteiden virrankulutusta ei välttämättä saada tarpeeksi matalaksi.

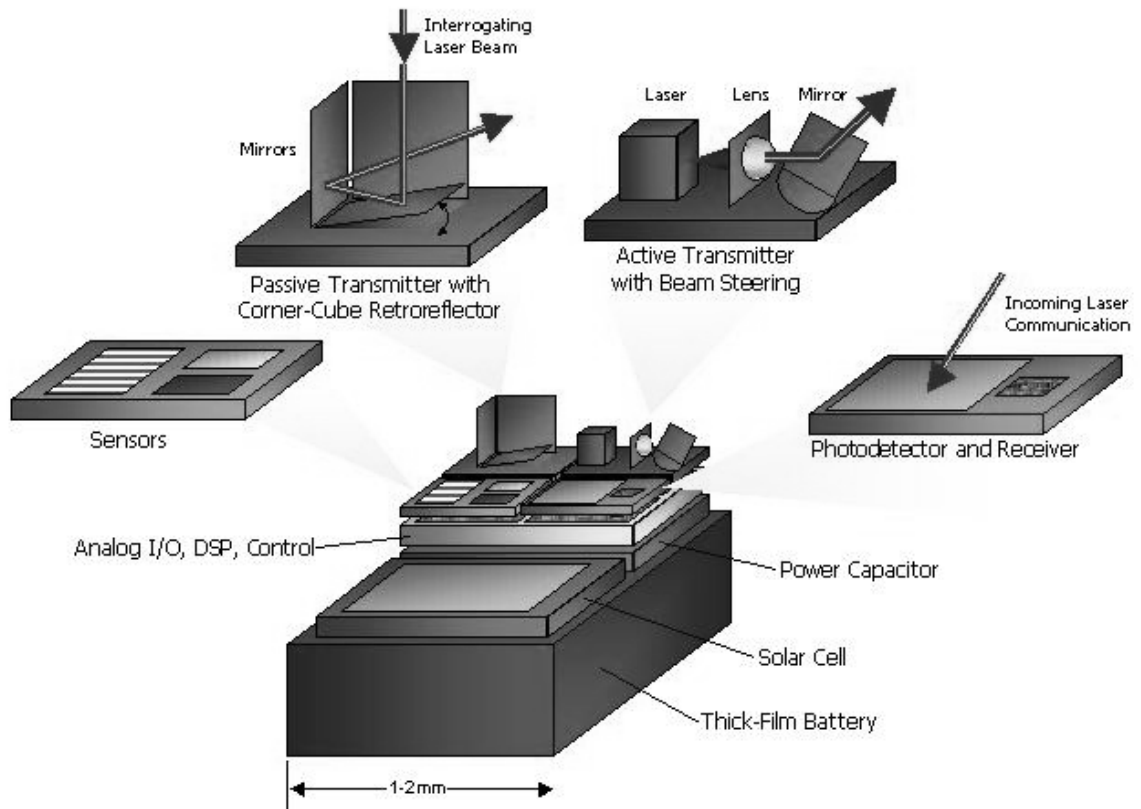
Tässä kappaleessa käsitellyillä standardeilla on useita erilaisia käyttökohteita, joita löytyy esimerkiksi prosessiteollisuudesta, rakennusautomaatiosta ja sotilaskäytöstä. Osa standardeista soveltuu käytettäväksi useammassa eri käyttökohteessa, kun taas toisissa se on rajattu tiukasti yhteen.

5.1 Smart Dust

Smart Dust on langattomien sensoriverkkojen konsepti, jonka pääasiallisena käyttökohteena ovat eri sotilassovellukset. Se on kehitetty Kalifornian yliopistossa, Berkeleyssä. Projektin rahoitti Yhdysvaltain asevoimien puolustusorganisaatio (DARPA). Konseptin tavoitteena oli luoda täysin itsenäinen anturi- ja viestintäalusta, joka koostuisi tuhansista kuutiomillimetrin kokoluokkaa olevista laitteista (mote), jotka voitaisiin levittää laaja-alaisesti taistelukentälle. Tämä mahdollistaisi vihollispuolen liikkeiden seuraamisen heidän tietämättään. (Kahn, Katz & Pister 1999, 271; Yang & Yacoub 2006, 1)

Projektissa luotiin yhteistyössä Intelin kanssa avoin laite- ja ohjelmistoalusta. Laittearkkitehtuurissa yhdistyvät anturi, lyhyen kantaman langaton viestintä ja tiedon prosessointi. Laite perustuu mikro-elektro-mekaaniseen-tekнологiaan (MEMS). Kaikki osat ovat integroitu yhteen, erittäin pienikokoiseen pakettiin, kuten kuviosta viisi on nähtävissä. Laitteiden viestintä tapahtuu optisesti tai radiotaajuisesti ja ne kykenevät itseorganisoitumaan verkoksi. (Kahn ym. 1999, 271; Yang ym. 2006, 1.)

Käytännössä ei ole vielä kyetty luomaan suunnitellun kokoisia laitteita. Kuitenkin fyysiseltä kooltaan suhteellisen pieniä kaupallisia sovelluksia on tarjolla. Niiden käyttökohteet löytyvät yleisimmistä ympäristön valvomiseen liittyvistä tehtävistä. (Yang ym. 2006, 2.)



KUVIO 5. Smart Dust laitteen rakennekuva (Kahn ym. 1999, 272.)

5.2 ANT

ANT on 2,4 GHz:n alueella toimiva lyhyen kantaman sensoriverkkoprotokolla. Se on suunniteltu helpokäyttöiseksi, tehokkaaksi ja erittäin vähän virtaa kuluttavaksi. Tiedonsiirto voi olla determinististä tai ad hoc-tyyppistä. Protokolla määrittää OSI-mallin PHY-, MAC-, verkko- ja kuljetuskerroksen ominaisuudet. Ylemmät kerrokset ovat käyttäjien määriteltävissä. (ANT 2009, 4.)

ANT-protokollan maksimitiedonsiirtonopeus on 1 Mb/s. Yleis-, purske- ja kuittausviestien siirtonopeus on 20 kb/s. Laitteiden maksimimäärä verkossa voi olla jopa

65 536. Tuetut topologiat ovat mesh, peer-to-peer, puu ja tähti. Käyttökohteita ovat esimerkiksi hyvinvointi-, paikannus- ja teollisuussovellukset. (ANT Q&A 2008.)

ANT voi käyttää mitä tahansa 125 taajuudesta, jotka sijoittuvat 2400-2524 MHz:n väliselle kaistalle. TDMA-tekniikan ansiosta yhdellä taajuudella voi esiintyä useita viestintäkanavia. Maakohtaiset säädökset on kuitenkin otettava huomioon järjestelmää käyttöön otettaessa. (ANT 2009, 12.)

Laitteiden välisessä viestinnässä toinen laite on isäntä ja toinen orja. Isäntälaitteen päätehtävä on tiedon lähetys ja orjalaitteen päätehtävänä on toimia sen vastaanotajana. Ne käyttävät keskinäiseen viestintään omaa kanavaa. Laite voi myös toimia kummassakin roolissa yhtä aikaa, jolloin se käyttää eri kanavaa viestiessään jonkin toisen laitteen kanssa. Riippumatta laitteen tyyppistä, viestintä voi olla kaksisuuntaista. Lisäksi on mahdollista jakaa yksi kanava useiden laitteiden käytettäväksi. (ANT 2009, 7, 34.)

ANT tukee julkisia tai yksityisiä verkkoja. Lisäksi voidaan luoda tiettyjä sääntöjä noudattava, hallittu verkko. Sitä varten on luotu ANT+. Se mahdollistaa eri tyyppisten laitteiden yhteensopivuuden keskenään, valmistajasta riippumatta. Yhteensopivuus perustuu laiteprofiileihin. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi ajotietokoneet, rannetietokoneet ja sykemittarit. (ANT 2009, 14.)

5.3 EnOcean

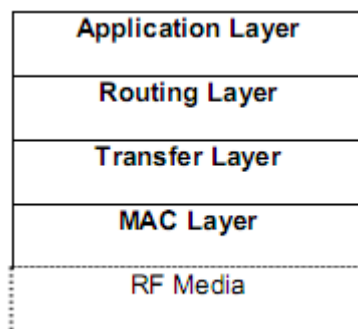
EnOcean on tarkoitettu rakennusautomaatioon. Käyttökohteita ovat valaisun, murtohälyttimien ja ilmastointilaitteiden ohjaus. EnOcean-laitteet eivät vaadi paristoja ja ovat tältä osin huoltovapaita. Tekniikka perustuu erittäin pieneen virrankulutukseen, joka saadaan louhittua ympäristöstä. Energiaa saadaan louhittua monella eri tavalla esimerkiksi valokatkaisimen painalluksesta tai oven kahvan kääntämisestä. (Center for Short Range Wireless Technologies 2009, 1-2.)

Taajuusalueina käytetään 315 MHz ja 868,3 MHz:n taajuuskaistoja. Modulaationa on ASK. Tiedonsiirronnopeus on 125 kb/s ja toimintaetäisyys 30-300 m. Laitteiden

väläinen viestintä on kaksisuuntaista. Tiedon vastaanoton onnistuessa siitä lähetetään kiittäus. (Center for Short Range Wireless Technologies 2009, 3-4.)

5.4 Z-Wave

Z-Wave on kehitetty kotiautomaation sovelluksia varten. Standardi takaa yhteensopivuuden eri valmistajien laitteiden välillä. Sen protokollan pinorakenne poikkeaa hiukan tyypillisestä OSI-mallista. Se koostuu neljästä kerroksesta, jotka näkyvät kuviosta kuusi. Alimpana oleva MAC-kerros ohjaa RF-mediakerrosta. Kuljetuskerros ohjaa ja käsittelee kehysten eheyden tarkistusta, kiittäuksia ja uudelleenlähettyksiä. Reitityskerros hallitsee kehysten reititystä verkossa ja sovellusrajapinnassa. Sovelluskerros käsittelee lähetettyjen ja saapuvien kehysten hyötykuormaa. (Sigma Designs 2010, 1; Zensys A/S 2007, 3.)



KUVIO 6. Z-Wave protokollan määrittämät kerrokset (Sigma Designs 2007, 3.)

Z-Wave verkko käyttää 868 MHz:n ISM-taajuuskaistaa Euroopassa. Maksiminopeus neljännen sukupolven laitteilla on 100 kb/s. Modulaatio menetelmänä on FSK. Verkon topologia on mesh-tyyppinen, ja siinä voi olla enintään 232 laitetta. (Sigma Designs 2010, 1; Z-Waveworld 2008.)

Protokolla määrittää kaksi laitetyyppiä, jotka ovat ohjaus- ja orjalaitteet. Ohjauslaitteilla suoritetaan ja lähetetään käskyjä muille laitteille. Orjalaitteet suorittavat niille saapuvia käskyjä. Orjalaitteet voivat myös välittää liikennettä niille laitteille, jotka eivät ole ohjauslaitteen toimintaetäisyyden ulottuvilla. (Zensys A/S 2007, 3.)

Ohjainlaite sisältää reititystaulun, jonka avulla se voi viestiä jokaisen verkon laitteen kanssa. Ohjainlaitetyyppejä ovat kannettava-, kiinteä-, asennus- ja siltaohjain. Ohjainlaitteen toiminnallisuus riippuu siitä, milloin se liittyy verkkoon. Jos ohjaimella luodaan uusi verkko, siitä tulee pääohjain. Vain pääohjainlaitteella voidaan lisätä tai poistaa verkkoon kuuluvia laitteita. Jos verkkoon liittyy ohjain, jossa jo on pääohjain, siitä tulee toissijainen ohjain. Sillä ei pystytä poistamaan tai lisäämään laitteita verkkoon. (Zensys A/S 2007, 4.)

Orjalaitteet ovat yleensä kytkettyjä verkkovirtaan, koska niiden pitää kuunnella ja olla jatkuvasti valmiina suorittamaan niille saapuvia käskyjä. Normaali orjalaite pystyy reitittämään tietoa pyydettyäessä. Orjalaitteesta on myös olemassa kolme kehittyneempää versiota. Reitittävä orjalaite voi reitittää viestejä muille laitteille ja tallettaa staattisia reittejä muistiinsa. Toinen on parannettu orjalaite, joka on samankaltainen kuin reitittävä, mutta siinä on EEPROM muisti, johon se voi tallettaa tietoa. Kolmas laite on samankaltainen kuin reitittävä orjalaite, mutta se pystyy lähettämään viestejä verkkoon tulvimalla. Tällaista laitetta käytetään esimerkiksi savunilmaisimena. (Zensys A/S 2007, 5-6.)

5.5 DASH7

DASH7 perustuu ISO 18000-7-standardiin. Standardi määrittää ilmarajapinnan 433 MHz:n taajuudella toimiville aktiivisille RFID-laitteille. Etätunnistamisen lisäksi tekniikka mahdollistaa antureiden hyödyntämisen RFID-järjestelmissä. RFID-järjestelmää voidaan tarkastella OSI-mallin tapaan. Pino koostuu neljästä kerroksesta, PHY-, MAC-, sovellus-lukija- ja sovelluskerroksesta. Standardia noudattavia järjestelmiä on hyödynnetty kuljetusketjun seurannassa ja sotilaskäytössä. (Norair 2009; Hawrylak, Ogirala & Mickle 2009, 3.)

Sen toiminta perustuu "BLAST"-konseptiin. Termi muodostuu sanoista:

- Bursty: Tiedonsiirto on purskeista ja satunnaista eikä se tue aikaan sidottua sisältöä, kuten audio tai video.

- Light-data: Siirrettävien pakettien koko on rajattu 256 tavuun. Useiden peräkkäisten pakettien siirtoa pyritään välttämään.
- ASynchronous: Tiedonsiirto toimii komento-vastaus periaatteella, joka ei vaadi ajoittaista laitteiden välistä kättelyä tai synkronointia.
- Transitive: Järjestelmän laitteet ovat luonnostaan liikkuvia. (Norair 2009, 6.)

DASH7 käyttää taajuusalueena 433,04-434,79 MHz:n välistä kaistaa. Signaalia moduloidaan FSK- tai GFSK-menetelmillä. Käytännön tiedonsiirtonopeus on 27,8 kb/s ja maksiminopeudeksi arvioidaan 100 kb/s. Tiedonsiirtoon on käytössä viisi kanavaa. Toimintaetäisyys voi olla jopa 2 km. (Norair 2009, 8.)

Standardin suurin etu muihin sensoriverkkototeutuksiin nähden on matala UHF-taajuusalue. Sen tarjoama toimintaetäisyys on moninkertainen mikroaaltoalueella toimiviin tekniikoihin verrattuna. Toisaalta matala taajuus asettaa erityisiä vaatimuksia antennin fyysiselle koolle. Lisäksi tiedonsiirron kapasiteettia rajoittaa kapea kaistaleveys. (Norair 2009 10-12.)

5.6 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy tekniikka julkistettiin vuonna 2007. Se on tunnettu aiemmin nimillä Bluetooth Ultra Low Power ja Wibree. Wibree on alun perin Nokian kehittämä langaton tiedonsiirtotekniikka. Bluetooth Low Energy:llä on erittäin pieni virrankulutus ja sen protokollan rakenne on yksinkertainen. Se on yhteensopiva uudempien Bluetooth-versioiden kanssa. Tekniikan käyttökohteet löytyvät erilaisista ohjauslaitteista, kotiautomaatiosta ja rannetietokoneista. (Bluetooth SIG 2009a, 1; Omre 2009, 3.)

Standardissa määritetään taajuusalueeksi 2400-2483,5 MHz, jossa on käytössä 40 kanavaa. Maksimi tiedonsiirtonopeus on 1 Mb/s. Modulaationa käytetään GFSK-menetelmää. Topologiana on tähti, jossa yksi isäntälaitte ja enintään seitsemän orjalaitetta. (Bluetooth SIG 2007; Bluetooth SIG 2009b.)

5.7 INSTEON

INSTEON on kodinautomaatioon tarkoitettu langattoman tiedonsiirron tekniikka. Käyttökohteita löytyy valokatkaisimista, termostaateista ja liiketunnistimista. Standardi on yhteensopiva sähköverkossa siirrettävän X10-protokollan kanssa, joka varmistaa kokonaisvaltaisen kodinautomaatiojärjestelmän toteutuksen. INSTEON-järjestelmä voidaan yhdistää eri tyyppisiin verkkoihin, kuten ethernet käyttämällä siltaavaa laitetta. (SmartLabs Technology 2005.)

Laitteet toimivat peer-to-peer-periaatteella mesh-topologiassa. Verkossa ei ole rajoitetusti toimivia laitteita vaan kaikki laitteet voivat lähettää, vastaanottaa ja välittää tietoa. Käytössä ei ole myöskään reititystaulua. Laitteiden määrää verkossa rajoittaa kunkin laitteen muisti. (SmartLabs Technology 2005, 6, 12.)

INSTEON-verkko käyttää 904 MHz:n taajuutta. Tiedonsiirtonopeus on 38,4 kb/s ja toimintaetäisyys on 50 m näköyhteydessä. Signaalia moduloidaan FSK-menetelmällä. (SmartLabs Technology 2006.)

5.8 ONE-NET

ONE-NET-protokolla on suunniteltu mahdollisemman pienen virrankulutuksen saavuttamiseksi. Käyttökohteita ovat kodinautomaation eri osa-alueet. Se perustuu tähtitopologiaan. Se sisältää myös mahdollisuuden asiakaslaitteiden väliseen suoraan peer-to-peer- ja monihyppyviestintään. Verkossa on isäntälaitte, joka vastaa laitteiden liittymisestä verkkoon, salauksesta, reitittimenä toimimisesta ja peer-to-peer-viestinnän luomisesta. (Threshold Corporation 2009.)

ONE-NET-verkon taajuusalue on 865,8-867,2 MHz:n välinen kaista. Tiedonsiirtonopeus on 38,4 kb/s, mutta tarjolla on valinnaisia nopeuksia 230,4 kb/s:n asti. Modulaatiomenetelmänä käytetään FSK:ta. (Threshold Corporation 2009, 75-78.)

6 YHTEENVETO

Lyhyen kantaman sensoriverkot ovat mielenkiintoinen tekniikka, jolla saadaan monia eri toteutuksia tehtyä siellä, missä ei ole aikaisemmin ollut siihen mahdollisuutta. Sensoriverkoilla voidaan myös korvata kiinteän verkon varaan tehtyjä toteutuksia. Verkon ad hoc-tyyppisyys ja langaton matalan virrankulutuksen anturitekniikka tarjoavat monipuoliset lähtökohdat eri ratkaisuille.

Sensoriverkkojen yleistyminen on tuonut markkinoille useita erilaisia toteutuksia. IEEE:n luoma standardi 802.15.4 pyrkii luomaan yhtenäisyyttä ja tarjoamaan kehittäjille lähtökohdat luoda omia sensoriverkon toteutuksia määrittämällä vain osan viestintään tarvittavasta protokollapinosta. Tunnetuin sensoriverkkojen toteutus on Zigbee. Sen lisäksi on olemassa muita yhteenliittymiä ja yksittäisiä laitevalmistajia, jotka ovat luoneet oman kyseiseen standardiin pohjautuvan toteutuksen.

Kaikille valmistajille standardi ei ole sopinut, vaan ne ovat kehittäneet omia vaihtoehtoisia protokollia. Valmistajilla on ollut tavoitteena luoda vieläkin yksinkertaisempi ja tehokkaampi sensoriverkon toteutus. Useassa toteutuksessa käyttökohteet on rajattu hyvin tiukasti yhteen käyttökohteeseen, kuten rakennusautomaation. Toiset taas pyrkivät tarjoamaan tuotteita monipuolisemmin useisiin eri käyttökohteisiin.

Markkinoilla on siis runsaasti valinnanvaraa eri toteutusten suhteen. Työssä ei ole esitelty kaikkia vaihtoehtoja. Osittain tämä johtuu siitä, että yksittäiset laitevalmistajat eivät tarjoa julkisesti tietoja itse kehittämistään protokollista. Toinen syy oli työn rajaaminen hallittavissa olevaksi kokonaisuudeksi.

LÄHTEET

Painetut:

Callaway, E. H. Jr. 2004. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. Boca Raton: Auerbach Publications.

Farahani, S. 2008. Zigbee wireless networks and transceivers. Oxford: Elsevier Ltd.

Haapola, J. 2010. Evaluating Medium Access Control Protocols For Wireless Sensor Networks. Tampere: Juveness Print.

Hämäläinen P. & Hännikäinen M. & Hämäläinen T. D. 2005. Efficient Hardware Implementation of Security Processing for IEEE 802.15.4 Wireless Networks. IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2005 (MWSCAS 2005).

IEEE 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2006. New York: IEEE Computer Society.

IEEE 802.15.4a. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2007. New York: IEEE Computer Society.

IEEE 802.15.4c. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2009. New York: IEEE Computer Society.

IEEE 802.15.4d. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2009. New York: IEEE Computer Society.

Kahn, J. M. & Katz, R. H. & Pister, K. S. J. 1999. Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust". Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, 1999 (Mobicom'99).

Raghavendra, C. S. & Sivalingam, K. M. & Znati, T. F. 2004. Wireless sensor networks. New York: Springer Science+Business Media, Inc.

Roundy, S. & Steingart, D. & Fréchet, L. & Wright, P. K. & Rabaey, J. 2004. Power Sources for Wireless Sensor Networks. 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks, 2004 (EWSN 2004).

Römer, M. 2004. The Design Space of Wireless Sensor Networks. IEEE Wireless Communications, vol 11, no. 6.

Sastry, N. & Wagner, D. 2004. Security Considerations for IEEE 802.15.4 Networks. Proceedings of the 3rd ACM workshop on Wireless security, 2004.

Shelby, Z. & Bormann, C. 2009. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Yang, G-Z. & Yacoub, M. 2006 Body sensor networks. London: Springer-Verlag.

Zhao, F. & Guibas, L. J. 2004. Wireless sensor networks: an information processing approach. San Francisco: Elsevier Inc.

Sähköiset julkaisut:

Alatalo, J. 2009. Aikasynkronointi langattomissa anturiverkoissa. Jyväskylän yliopiston tietotekniikan laitos, tietotekniikan pro gradu-tutkielma. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-200911104402>. Luettu 22.3.2010.

Anastasi, G. & Conti, M. & Di Francesco, M. & Passarella, A. 2008. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://info.iet.unipi.it/~anastasi/papers/adhoc08.pdf>. Luettu 25.3.2010.

ANT. 2009. ANT Message Protocol and Usage. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/1204662412_ant%20message%20protocol%20and%20usage.pdf. Luettu 16.3.2010.

ANT. 2008. ANT Q&A's. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/ant_qandas.pdf. Luettu 16.3.2010.

Bluetooth SIG. 2007. Ultra Low Power (ULP) Bluetooth Technology. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://www.ndc.fi/images/pdf%20tiedostot/Bluetooth%20Ultra%20Low%20Power%20\(ULP\).pdf](http://www.ndc.fi/images/pdf%20tiedostot/Bluetooth%20Ultra%20Low%20Power%20(ULP).pdf). Luettu 18.3.2010.

Bluetooth SIG. 2009a. Bluetooth low energy technology faq. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.bluetooth.com/SiteCollectionDocuments/Low_Energy_FAQ_External_General_Public.pdf. Luettu 18.3.2010.

Bluetooth SIG. 2009b. Bluetooth specification version 4.0. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.bluetooth.com/English/Technology/Building/Pages/Specification.aspx>. Luettu 18.3.2010.

Hart Communication Foundation. 2007. WirelessHART Technical Data Sheet, Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.cds.caltech.edu/~shiling/wirelesshart_datasheet.pdf. Luettu 21.2.2010.

Hawrylak, P. J. & Ogirala, A. & Mickle, M. H. 2009. ISO 18000-7 Conformance Testing. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.dash7.org/Conformance_Testing_White_Paper.pdf. Luettu 17.3.2010.

Hui, J. & Culler, D. & Chakrabarti, S. 2009. 6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.archrock.com/technology/resources/IPSO-WP-3-6LoWPAN.pdf>. Luettu 10.3.2010.

IETF. 2007. RFC 4919, IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4919.txt>. Luettu 21.2.2010.

Kompis, C. & Aliwell, S. 2008. Energy Harvesting Technologies to Enable Remote and Wireless Sensing. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://server.quid5.net/~koumpis/pubs/pdf/energyharvesting08.pdf>. Luettu 20.3.2010.

McNeil, P. 2009. Industrial Wireless Mesh Network Architectures. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.l-com.com/multimedia/whitepapers/wp_Wireless-Industrial-Mesh-Networks.pdf. Luettu 22.2.2010.

Microchip. 2007. AN1066: MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack. Www-dokumentti. Saatavissa: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/MiWi%20Application%20Note_AN1066.pdf. Luettu 21.2.2010.

Microchip. 2008. AN1204: MiWi™ P2P Wireless Protocol. Saatavissa: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN1204%20-%20MiWi%20P2P%20App%20Note.pdf>. Luettu 22.2.2010.

Minicircuits. 2008. dBm-Volts-Watts conversion table. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.minicircuits.com/pages/pdfs/DBM-VOLT%20CONV%20TABLE.pdf>. Luettu 1.3.2010.

Norair, J. P. 2009. Introduction to DASH7 Technologies. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.dash7.org/DASH7%20WP%20ed1.pdf>. Luettu 17.3.2010.

Omre, A. H. 2009. Will Bluetooth low energy wireless technology finally push IR into retirement? Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.bluetooth.com/SiteCollectionDocuments/WillBluetoothlowenergywirelesstechnologyfinallypushIRintoretirement_long.pdf. Luettu 18.3.2010.

Sigma Designs. 2010. ZM4102: Z-Wave Integrated Wireless Module for Home Control. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.sigmadesigns.com/uploads/documents/ZM4102_br.pdf. Luettu 17.3.2010.

Smarthome Technology. 2005. INSTEON The Details. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.insteon.net/pdf/insteondetails.pdf>. Luettu 18.3.2010.

SmartLabs Technology. 2006. INSTEON Compared. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.smartlabsinc.com/files/INSTEONCompared20060102a.pdf>. Luettu 18.3.2010.

Threshold Corporation. 2009. ONE-NET Specification 1.5.0. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.one-net.info/spec/ONE-NET_Specification_v1.5.0.pdf. Luettu 19.3.2010.

Viestintävirasto. 2009. Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistaajuuksista ja käytöstä. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ficora.fi/attachments/suomiry/5l1x1FIlk/Viestintavirasto15Z2009M.pdf>. Luettu 30.3.2010.

Wagner, R. S. 2010. Standards-Based Wireless Sensor Networking Protocols for Spaceflight Applications. Www-dokumentti. Saatavissa: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100001311_2010000452.pdf. Luettu 21.3.2010.

Wirelesstech.dk -Center for Short Range Wireless Technologies. 2009. EnOcean-Dolphin Platform. Www-dokumentti. Saatavissa:
http://www.madebydelta.com/imported/images/DELTA_Web/documents/TC/Wireless/Articles/EnOcean_Dolphin_Platform.pdf. Luettu 23.3.2010.

Zensys A/S. 2007. Z-Wave Protocol Overview. Www-dokumentti. Saatavissa:
<http://www.zen-sys.com/modules/iaCM-DocMan/?docId=13&mode=CUR>. Luettu 16.3.2010.

Zigbee Alliance. 2008. Zigbee Specifications Document 053474r17. Www-dokumentti. Saatavissa:
<http://www.zigbee.org/ZigBeeSpecificationDownloadRequest/tabid/311/Default.aspx>. Luettu 21.3.2010.

Zigbee Alliance. 2009. Zigbee RF4CE Specification Version 1.00. Www-dokumentti. Saatavissa:
<http://www.zigbee.org/ZigBeeRF4CESpeciification/tabid/464/Default.aspx>. Luettu 21.3.2010.

Z-Waveworld. 2008. Frequently asked questions. Www-dokumentti. Saatavissa:
<http://www.zwaveworld.com/faq.php>. Luettu 17.3.2010.