

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tutkintotyö

Jani Puntola

ZIGBEE-STANDARDIN PROTOKOLLAPINO

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2009

Lehtori Ilkka Tervaoja
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikka, Tietoliikennetekniikka

Tekijä: Jani Puntola
Työn nimi: ZigBee-standardin protokollapino
Päivämäärä: 04.06.2009
Työn laajuus: 21 sivua
Avainsanat: IEEE 802.15.4, ZigBee, protokolla, standardi
Koulutusohjelma: Tietotekniikka
Suuntautuminen: Tietoliikennetekniikka
Työn ohjaaja: Lehtori Ilkka Tervaoja, Tampereen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Tämän tutkintotyön tarkoituksena oli tutkia ZigBee-standardin toimintaa ja ominaisuuksia. Työtä tutkiessa käytössä oli Jennicin kehitysalusta sekä Daintreen sensoriverkkoanalysointityökalu. Tarkemmin perehdytään ZigBee-standardin protokollapinon rakenteeseen.

Työssä selvitetään protokollapinon jokaisen kerroksen toiminnot ja sovellukset yksityiskohtaisesti kerros kerrokselta. Lisäksi kerrotaan hieman yleistä tietoa ZigBee-standardista sekä vertaillaan ZigBeeta muutamiin muihin markkinoilla oleviin samankaltaisiin tekniikoihin.

Author: Jani Puntola
Title: Protocol stack of ZigBee standard
Date: 04.06.2009
Number of pages: 21 pages
Keywords: IEEE 802.15.4, ZigBee, protocol, standard
Degree programme: Information technology
Specialisation: Telecommunications engineering
Thesis supervisor: Lecturer Ilkka Tervaoja, Tampere University of Applied sciences

ABSTRACT

Meaning of this thesis was to find out how ZigBee-standard works and what kind of features it have. In this research we used Jennic development kit and Daintree sensor network analyzer.

This thesis is oriented to protocol stack layers and its features and applications of each layer. Thesis includes also a little bit general information about ZigBee-standard and comparison between ZigBee and other wireless personal area network technologies.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen ammattikorkeakoulun tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehdon tutkintotyönä.

Haluan kiittää Tampereen ammattikorkeakoulua mahdollisuudesta käyttää koulun tiloja ja laitteita työtä tutkiessa. Kiitos myös projektissa mukana olleille Tapio Kallioniemelle ja Sakari Sirenille ja tutkintotyön ohjaajalle Ilkka Tervaojalle, sekä opettajille, jotka opastivat työn aikana ja auttoivat ongelmien selvittämisessä.

Tampereella 04.06.2009

Jani Puntola

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	1
2 IEEE 802.15.4	2
3 ZIGBEE-STANDARDI	2
3.1 Topologiat.....	3
3.1.1 Tähti.....	3
3.1.2 Puu.....	4
3.1.3 Mesh	5
3.2 Käyttökohteet	5
3.3 ZigBee ja muut tekniikat	7
3.3.1 Bluetooth	8
3.3.2 6LoWPAN.....	8
3.3.3 WirelessHART	9
3.3.4 Z-wave	9
3.3.5 Wibree	10
4 PROTOKOLLAPINO	10
4.1 Fyysinen kerros	12
4.2 MAC-kerros.....	13
4.3 Verkkokerros	14
4.4 Sovelluskerros	15
4.4.1 Application Support –alikerros.....	15
4.4.2 Application Framework.....	16
4.4.3 ZigBee Device Objects.....	17
4.4.4 ZDO Management taso.....	17
4.5 SSP-kerros	18
5 YHTEENVETO	21
LÄHTEET	

LYHENNELUETTELO

WPAN	Wireless Personal Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
PHY	Physical Layer eli fyysinen kerros
MAC	Medium Access Control tai Media Access Control eli siirtoyhteyskerros
ISM	Industrial Scientific Medical
BPSK	Binary Phase-Shift Keying eli binäärinen vaiheensiirtomodulointi
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying eli kvadratuurivaiheensiirtomodulointi
RF	Radio Frequency
NWK	Network Layer eli verkkokerros
SSP	Security Service Provider
APL	Application Layer eli sovelluskerros
SAP	Service Access Point on piste, jonka kautta protokollakerrokset tarjoavat/pyytävät palveluja viereisiltä kerroksilta.
PD-SAP	Physical Data SAP
PLME-SAP	Physical Layer Management Entity SAP
MLDE-SAP	MAC Layer Data Entity SAP
MLME-SAP	MAC Layer Management Entity SAP
APSDE-SAP	APS sublayer Data Entity SAP
APSME-SAP	APS sublayer Management Entity SAP
NLME-SAP	Network Layer Management Entity SAP
APS	Application Support Sublayer
SSP	Security Service Provider
AF	Application Framework, eli sovelluskehys
ACL	Access Control List
AES	Advanced Encryption Standard
6LoWPAN	IPv6 over low-power IEEE 802.15.4
HART	Highway Addressable Remote Transducer

Wibree

Ultra-Low-Power Bluetooth, ULP

IETF

Internet Engineering Task Force

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli tutkia IEEE 802.15.4- ja ZigBee -protokollien toimintaa, sekä ZigBeellä toteutetun sensoriverkon toimintaa. Projektiin osallistui minun lisäksi Tapio Kallioniemi ja Sakari Siren. Protokollapinoja ja siirtyvien datapakettien liikennettä seurasimme tilaamallamme Daintreen sensoriverkkoanalysaattorilla.

Projektissa tutkimme mahdollisia tosielämän tilanteita, joita voi tulla vastaan jo olemassa olevassa sensoriverkossa tai suunniteltaessa uutta sensoriverkkoa. Otimme huomioon mm. erilaiset häiriötilanteet sekä etäisyyden muuttumisen laitteiden välillä.

Tässä työssä perehdytään lähemmin protokolla pinoihin ja esitellään jokaisen kerroksen toimintaa.

2 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4-standardi määrittelee vähävirtaisen WPAN verkon ja mahdollistaa lyhyen kantaman langattoman tiedonsiirron. Se julkaistiin toukokuussa 2003. Standardi tukee 64 bittisiä IEEE-osoitteita, sekä myös 16 bittisiä lyhytosoitteita.

IEEE 802.15.4-standardi määrittelee ZigBee tekniikan käyttämän OSI-mallin fyysisen kerroksen eli PHY-kerroksen sekä siirtoyhteyskerroksen eli MAC-kerroksen. /1;/ /2/.

3 ZIGBEE-STANDARDI

ZigBee on maailmanlaajuinen avoin standardi. ZigBee-standardi sai alkunsa, kun Motorola halusi kehittää uudentyyppisen langattoman tekniikan. Monet muut yritykset kiinnostuivat myös tästä uudesta tekniikasta, joten siitä seurasi se, että heidän yhteistyönä syntyi ZigBee Alliance. Yhteistyön tuloksena ZigBee Alliance julkaisi marraskuussa 2004 ensimmäisen spesifikaation ZigBee-standardista.

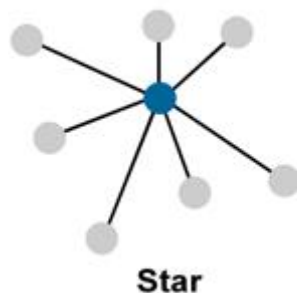
ZigBeeen etuina on mm. todella pieni tehonkulutus. Tästä on hyötyä esim. sensoriverkoissa, joissa saadaan pelkillä paristoilla sensorin toiminta-ajaksi jopa vuosia. IEEE 802.15.4-standardi määrittelee protokollapinossa fyysisen- ja MAC -kerroksen niin kuin aikaisemmin on jo mainittu, ZigBee määrittelee kaikki ylemmät kerrokset, joista kerrotaan lisää hieman myöhemmin. /3/

3.1 Topologiat

ZigBee-standardi määrittelee kolme erityyppistä verkkotopologiaa, jotka ovat tähti, puu ja mesh. Oleellista verkon toiminnan kannalta on kuitenkin se, että jokaisessa verkossa on oltava yksi ja vain yksi koordinaattori eli Co-ordinator ja vähintään yksi päätelaite eli End device. Puu- ja tähtitopologiassa tarvitaan lisäksi vähintään yksi reititin eli Router.

Koordinaattori valitsee käytettävän radiokanavan ja käynnistää verkon. Tämän jälkeen muut laitteet voivat liittyä verkkoon. Päätelaite toimii verkossa varsinaisena mittalaitteena, se lähettää mittaustietoa koordinaattorille tai muille päätelaitteille. Kaksi päätelaitetta ei voi olla liitettynä toisiinsa muutoin kuin reitittimen välityksellä. Reititin sananmukaisesti reitittää mittaustietoa päätelaitteiden ja koordinaattorin välillä.

3.1.1 Tähti

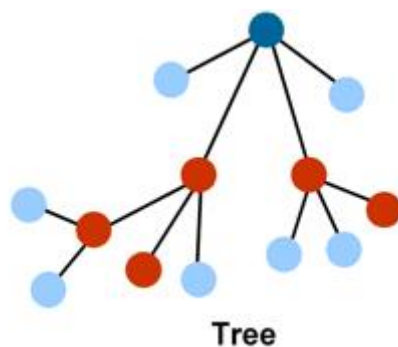


Kuva 1 Tähtitopologia /4/

Kuvassa 1 on esitetty tähtitopologian periaate. Sininen ympyrä kuvastaa koordinaattoria ja harmaat ympyrät päätelaitteita. Tähtitopologia on kolmesta topologioista kaikkein yksinkertaisin. Verkko tarvitsee toimiakseen ainoastaan koordinaattorin ja yhden tai useamman päätelaitteen.

Koordinaattori sijaitsee tähtiverkossa keskimmäisenä. Päätelaitteet liittyvät suoraan koordinaattoriin. Jokainen päätelaite voi keskustella suoraan ainoastaan koordinaattorin kanssa. Jos päätelaite haluaa lähettää viestin toiselle päätelaitteelle, niin se täytyy lähettää ensin koordinaattorille, joka välittää viestin vastaanottajalle.
/4/

3.1.2 Puu

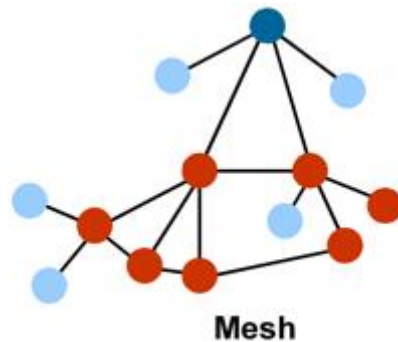


Kuva 2 Puutopologia /4/

Kuvassa 2 on esitetty puutopologian periaate. Puutopologia sisältää koordinaattorin, reitittimiä sekä päätelaitteita. Tummansininen ympyrä kuvastaa koordinaattoria, vaaleansiniset ympyrät päätelaitteita ja punaiset ympyrät reitittimiä.

Puutopologiassa koordinaattori on ylimpänä, johon muut laitteet liittyvät. Laitteet haaraantuvat koordinaattorista ”oksiksi” ja ”lehdiksi”. Viesti kulkee puutopologiassa alhaalta ylöspäin aina koordinaattorille asti ja tarvittaessa jatkaa kulkuaan toista ”oksa” pitkin alaspäin määränpään saakka. Päätelaitteet voivat liittyä ainoastaan reitittimeen tai koordinaattoriin. Päätelaite ei siis voi liittyä suoraan toiseen päätelaitteeseen, niin kuin aikaisemmin on jo mainittu. Esimerkiksi jos päätelaite haluaa lähettää viestin toiselle päätelaitteelle, joka on liittyneenä samaan reitittimeen, niin viesti nousee topologiassa ylöspäin yhteiselle reitittimelle, joka välittää viestin takaisin alaspäin kohde päätelaitteelle. /4/

3.1.3 Mesh



Kuva 3 Mesh-topologia /4/

Kuvassa 3 on esitetty mesh- eli sekatopologian periaate. Myös mesh-topologia sisältää koordinaattorin, reitittimiä sekä päätelaitteita. Tummansininen ympyrä kuvastaa koordinaattoria, vaaleansiniset ympyrät päätelaitteita ja punaiset ympyrät reitittimiä, samalla tavalla kuin puutopologiassa.

Mesh-topologia muistuttaa erittäin paljon puutopologiaa. Ainoana erona on se, että ”oksat” voivat olla liitettynä keskenään toisiinsa reitittimellä, joten viestin ei tarvitse kulkea yhtä pitkää matkaa lähteestä kohteeseen kuin puutopologiassa. Viestit kulkevat siis ”oksien” välillä ilman, että se lähetetään koordinaattorille saakka kunhan vain sopiva reitti löytyy. Tämä mahdollistaa sen, että viestien eteneminen on paljon nopeampaa ja jos verkko on jostain kohtaa poikki, niin viesti pääsee etenemään muuta kautta kohteeseen. /4/

3.2 Käyttökohteet

ZigBee tekniikkaa voidaan käyttää monenlaisissa käyttökohteissa. Suosittuja kohteita ovat mm. kotiautomaatio, rakennusautomaatio, teollisuusautomaatio ja terveydenhoito. ZigBee soveltuu mainiosti antureilla toimivaan verkkoon, jota hyödynnetäänkin useissa käyttökohteissa.

Kotona ZigBeetä voidaan käyttää esimerkiksi valojen ohjauksessa, jolloin erillistä kaapelointia kytkimen ja lampun välillä ei tarvita. Tämä säästää sekä rahaa, että vaivaa. Kaukosäätimet ja lelut voivat myös käyttää ZigBeetä, sekä monet muut kodin langattomat laitteet.

Rakennusautomaatiossa erinomainen käyttökohte on valvonta, sekä automaattinen valaistus. Sensoriverkkoon voidaan helposti lisätä uusia laitteita, joten esimerkiksi ZigBee tekniikkaa käyttäviä turvakameroita ja sensoreita voidaan helposti lisätä tarpeen vaatiessa.

Teollisuusautomaatiossa käyttökohteena voi olla vaikkapa prosessinseuranta ja -ohjaus, kappalemäärän seuranta ja kunnonvalvonta. ZigBee tekniikan lisääminen teollisuudessa vähentää työvoiman tarvetta ja näin ollen myös kustannuksia.

ZigBee tekniikkaa käytetään terveydenhoidossa mm. potilaan seurantaan ilman kaapeleita. Tekniikkaa voi turvallisesti käyttää kyseiseen sovellukseen, koska antureiden käyttämä virta on erittäin pieni. Tämän lisäksi myös terveydenhoidossa tekniikkaa voidaan käyttää kuten normaalissa rakennusautomaatiossa. ZigBee allianssi on määritellyt teknologian sovelluskohteet kuvan 4 mukaisesti. /9/



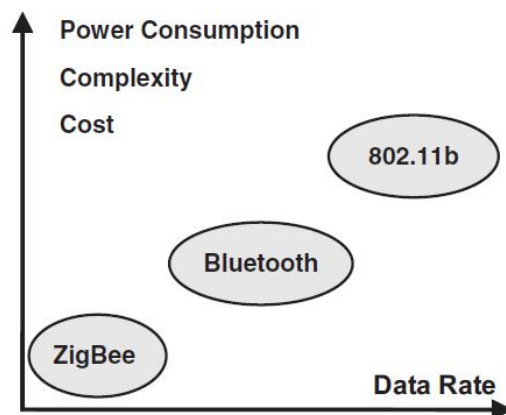
Kuva 4 ZigBee allianssin määrittelemät sovelluskohteet /9/

3.3 ZigBee ja muut tekniikat

Lyhyen kantaman langattomat verkkotekniikat on jaettu kahteen pääkategoriaan, langattomaan henkilökohtaisen verkkoon (WPAN) ja langattomaan paikalliseen verkkoon (WLAN). ZigBee ja Bluetooth kuuluvat siis WPAN kategoriaan ja IEEE 802.11b/g/n kuuluu WLAN kategoriaan.

Kuten kuvasta 5 nähdään, ZigBee on ehdottomasti halvin, yksinkertaisin ja vähiten tehoa kuluttava tekniikka. Toisaalta siirtonopeus on myös pienin, mutta niissä sovelluksissa missä ZigBee tekniikkaa käytetään, onkin yleensä tärkeintä että tehonkulutus on pieni, jotta saadaan mahdollisimman pitkä toiminta-aika paristoilla. ZigBee:llä toteutettu sensoriverkko voi sisältää tuhansia sensoreita, joten myös halpa hinta ja se että laitteita voidaan helposti lisätä tai poistaa verkosta on myös tärkeää.

ZigBee-standardin kaltaisia tekniikoita on monia muitakin, mitä kuvassa 5 ei ole esitetty. Tällä hetkellä käytössä tai suunnitteilla olevia tekniikoita ovat mm. 6LoWPAN, WirelessHART, Z-wave ja Ultra Low Power Bluetooth, joka tunnetaan myös nimellä ULP tai Wibree. /9/; /10/



Kuva 5 Standardien vertailu /10/

3.3.1 Bluetooth

ZigBeeen etuina Bluetooth-standardiin verrattuna on laitteiden välinen etäisyys, joka on helposti 100 metriä ja antennia vaihtamalla vielä paljon enemmänkin.

Bluetoothia käyttävien laitteiden välinen etäisyys on maksimissaan vain n. 10 metriä ja sitä ei voi mitenkään helposti kasvattaa.

Bluetooth verkossa laitteita voi olla maksimissaan 8, kun taas ZigBee verkossa niitä voi olla jopa 65000. Lisäksi ZigBeeen etuna on myös se, että käytössä on kolme eri taajuusaluetta ja kolme eri topologia vaihtoehtoa, joten asennuskohteeseen voidaan valita parhaiten sopiva vaihtoehto. Yhtä taajuusalueista voidaan käyttää vain USA:ssa ja yhtä vain Euroopassa, joten käytännössä käytössä on kuitenkin vain kaksi taajuusaluetta. Bluetooth toimii ainoastaan yhdellä taajuusalueella joka on 2,4GHz ja verkkotopologiana käytetään tähtimäistä verkkoa. Bluetoothin etuna ZigBeehen verrattuna on kuitenkin tiedonsiirtonopeus, joka on n. 1-3Mbps, kun taas ZigBee:llä se on maksimissaan 250Kbps, mutta kuten aikaisemmin mainittiin, suuri tiedonsiirtonopeus ei ole tärkeää niissä sovelluksissa missä ZigBee tekniikkaa käytetään. /9/; /10/

3.3.2 6LoWPAN

6LoWPAN eli IPv6 over low-power IEEE 802.15.4-standardi mahdollistaa IPv6 pakettien siirtämisen IEEE 802.15.4 verkossa. 6LoWPAN-standardin protokollapinon kaksi ensimmäistä kerrosta on IEEE 802.15.4 määrittelemiä aivan niin kuin ZigBee:ssäkin. MAC-kerroksen päällä on sovituserkerros, joka sovittaa IEEE 802.15.4 paketit IPv6 muotoon ja toisin päin. Seuraavat kerrokset ovat IPv6 verkkokerros, siirtokerros ja 6LoWPAN sovelluserkerros. Neljä ylintä kerrosta ovat IETF:n määrittelemiä.

6LoWPAN-standardi tukee myös mesh tyyppistä verkkoa ja se muistuttaa muutenkin paljon ZigBee-standardia. Standardi on kehitetty erityisesti sellaisille laitteille, joiden laskentakyky ja muisti ominaisuudet ovat rajoitettu. 6LoWPAN-standardin etuna on, että se toimii muiden langattomien sekä langallisten IP verkkojen kanssa yhdessä. /10/

3.3.3 WirelessHART

WirelessHART on tietoliikenneprotokolla, jota käytetään enimmäkseen prosessin ohjauksessa ja valvonnassa. HART käyttää isäntä/orja toimintaperiaatetta, jolloin orjalaite lähettää tietoa vain jos isäntälaitte sitä pyytää. WirelessHART käyttää 2,4GHz:n taajuutta, joten se toimii lisenssivapaalla ISM taajuusalueella aivan kuten ZigBeekin. Standardi tukee mesh tyyppistä verkkoa ja käyttää salauksessa samaa menetelmää kuin ZigBee. WirelessHART:in fyysinen kerros on yhteensopiva IEEE 802.15.4-standardin fyysisen kerroksen kanssa. Ylemmät kerrokset ovat HART:in määrittelemiä. WirelessHART verkon laitteiden lähetys teho on suurempi, kuin ZigBee verkon laitteiden. WirelessHART:in etuna ZigBeehen verrattuna on se, että se on yhteensopiva vanhempien HART verkkojen kanssa. /10/

3.3.4 Z-wave

Z-wave on langaton verkkoprotokolla, jonka on kehittänyt Z-wave allianssi. Protokolla toimii 900MHz taajuudella lisenssivapaalla ISM taajuusalueella. Z-wave määrittelee kaikki protokollakerrokset itse, eikä lainaa niitä IEEE 802.15.4-standardilta. Protokolla tukee 9,6Kbps ja 40Kbps tiedonsiirtonopeuksia. Z-wave tukee myös mesh tyyppisiä verkkoja. Erona ZigBeehen verrattuna on se, että Z-wave tukee ainoastaan 8-bittisiä osoitetta, jolloin laitteita voi olla verkossa enintään 232 kappaletta. ZigBee tukee 64-bittisiä ja 16-bittisiä osoitteita. /10/

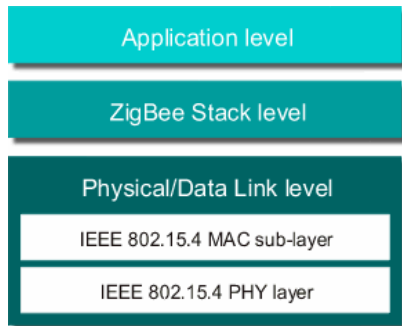
3.3.5 Wibree

Wibree on lyhyen kantaman langaton verkkostandardi, joka kehitettiin point-to-point tyyppiseen langattomaan tiedonsiirtoon. Wibree on yksinkertaistettu versio Bluetooth-standardista. Wibreen tarkoituksena on saada pidempi toiminta-aika paristoilla normaaliin Bluetooth-standardiin verrattuna. Wibree ei tue mesh verkkoa, joten sitä ei voida käyttää sen tyyppisissä sovelluksissa, jotka vaativat mesh verkon. Tästä syystä Wibree ei ole varteen otettava haastaja ZigBeelle. Wibree toimii 2,4GHz:n taajuudella ISM taajuusalueella. Standardi määrittelee 40 kanavaa, joiden kanavaväli on 2MHz. /10/

4 PROTOKOLLAPINO

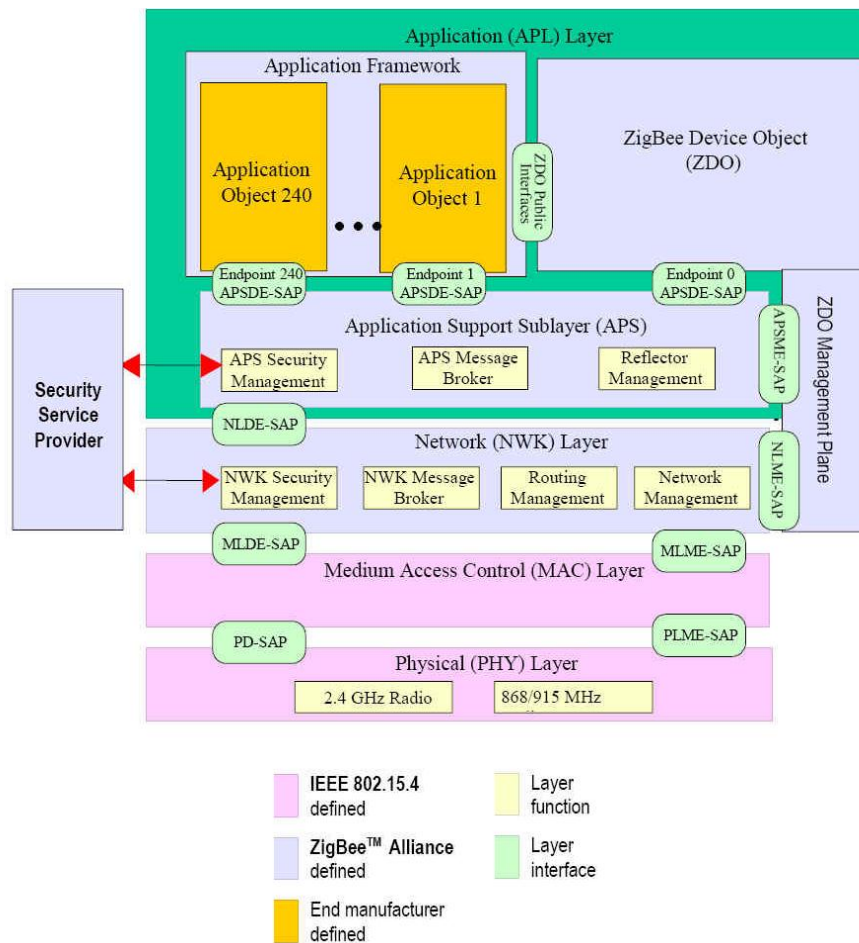
ZigBee pohjautuu IEEE 802.15.4-standardiin niin kuin aikaisemmin on mainittu. IEEE 802.15.4 määrittelee siis fyysisen- ja siirtoyhteyskerroksen eli protokollapinin alimmat kerrokset. Muut kerrokset ja toiminnot ovat ZigBee allianssin määrittelemiä. Tässä osiossa esitellään tarkemmin jokaisen kerroksen tehtävä ja toiminnot.

Perusarkkitehtuuri on kuvan 6 mukainen. Alimpana on OSI-mallin mukainen fyysinen- ja siirtoyhteyskerros, joka sisältää IEEE 802.15.4-standardin määrittelemän fyysisen kerroksen ja siirtoyhteys alikerroksen. Tämän kerroksen päällä on ZigBee allianssin määrittelemä ZigBee stack kerros eli ZigBee pino. Ylimpänä on sovellus kerros joka on myös osin ZigBee allianssin määrittelemä.



Kuva 6 Perusarkkitehtuuri /4/

Lähemmin tarkasteltuna ZigBee protokollapino näyttää kuvan 7 mukaiselta. Kuvassa kerrosten sisällä olevat vaaleat laatikot kuvaavat kerroksen suorittamia toimintoja. Kerrosten välissä olevat vihreät laatikot kuvaavat kerrosten välistä rajapintaa. Keltaisten laatikoiden toiminnot määrittelee tuotteen valmistaja.



Kuva 7 ZigBee protokollapino /5/

4.1 Fyysinen kerros

Fyysinen kerros (PHY Layer) on kerros, joka toimii rajapintana fyysiselle tiedonsiirrolle. Se vaihtaa databittejä ylempänä olevan MAC-kerroksen kanssa. Fyysinen kerros tarjoaa ylemmille kerroksille kahden eri SAP:in välityksellä pääsyn kahteen eri palveluun. PD-SAP:in välityksellä ylempi kerros pääsee käsiksi fyysisen kerroksen datapalveluun, kun taas PLME-SAP tarjoaa rajapinnat, joiden kautta kerroksen hallintapalveluita voidaan kutsua. Fyysinen kerros kytkee RF lähetinvastaanottimen päälle tai pois päältä tarpeen mukaan, sekä tekee kanava valinnan. Fyysinen kerros tarjoaa yksinkertaisesti tiedonsiirto palvelun.

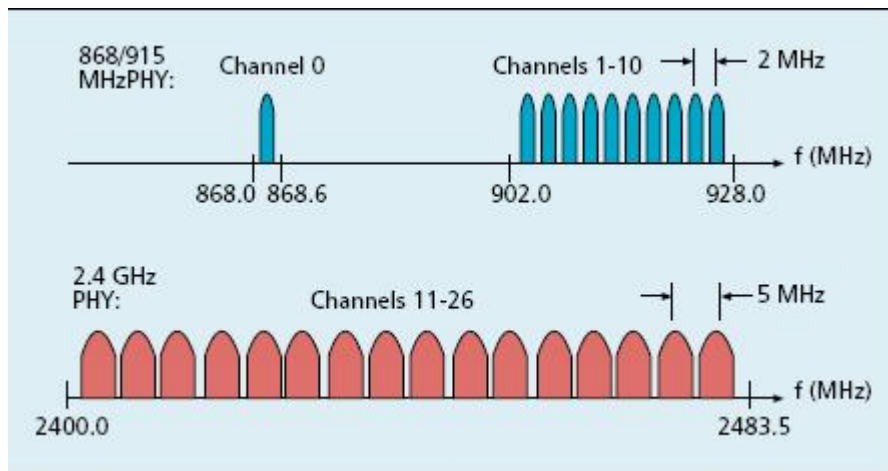
IEEE 802.15.4-standardi määrittelee fyysisellä kerroksella ZigBee-standardinkin käyttämät kolme radiotaajuutta. Käytössä olevat taajuudet ovat 868 MHz, 915 MHz ja 2,4 GHz. Taajuudet ovat lisenssivapaalla ISM taajuusalueella. Taulukossa 1 on esitetty taajuudet ja niiden ominaisuudet.

Taulukko 1 Radiotaajuudet /1/

Taajuus	868 MHz	915 MHz	2,4 GHz
Lisenssivapaa	vain USA:ssa	vain Euroopassa	maailmanlaajuisesti
Kanavat	1	10	16
Max. tiedonsiirtonopeus	20 kb/s	40 kb/s	250 kb/s
Taajuusalue	868,0 – 868,6 MHz	902 – 928 MHz	2 400 – 2483,5 MHz
Modulointimenetelmä	BPSK	BPSK	O-QPSK

Näistä kolmesta taajuudesta eniten käytetty on 2,4 GHz, koska tiedonsiirtonopeus on suurin ja se on maailmanlaajuisesti lisenssivapaa. Etuna pienempiin taajuuksiin verrattuna on myös se, kun kanavia on 16, joten pienellä alueella voidaan muodostaa useampi erillinen sensoriverkko jotka käyttävät samaa taajuutta mutta eri kanavaa. Näin ollen verkot eivät häiritse toisiaan. Toisaalta taas pienemmillä taajuuksilla on vähemmän käyttäjiä, joten päällekkäisiä verkkoja ei synny kovin helposti.

Kanavaväli on 915 MHz:n taajuudella 2 MHz ja kanavanumerot ovat välillä 1-10. 2,4 GHz:n taajuudella kanavaväli on 5 MHz ja kanavanumerot välillä 11-26. Kanavanumeroa nolla käytetään siis 868 MHz:n taajuudella. Meidän työssämme käytössä oli kehitysalusta joka toimi 2,4 GHz:n taajuudella ja jonka kanavanumeroa pystyi tarvittaessa vaihtamaan. Kanavarakenne on esitetty kuvassa 8. /4/; /6/; /8/



Kuva 8 Kanavarakenne /7/

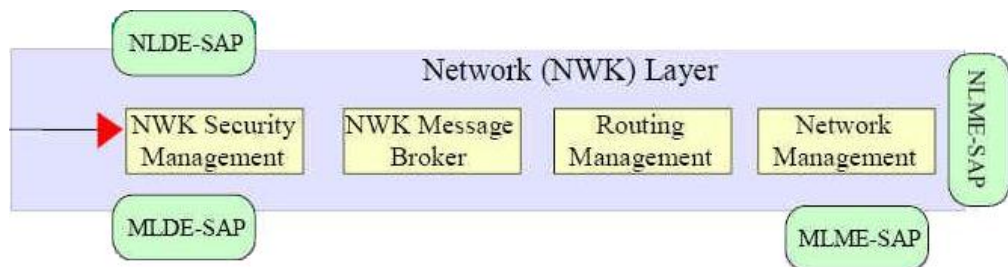
4.2 MAC-kerros

MAC- eli siirtoyhteyskerros on protokollapinossa seuraavana fyysisen kerroksen jälkeen. Sen tehtävänä on toimia rajapintana fyysisen kerroksen välillä. MAC-kerros mahdollistaa sen, että ylemmät kerrokset voivat käyttää MAC-kerroksen datapalveluja MLDE-SAP:in välityksellä samalla tavalla kuin fyysisellä kerroksellakin. Myös MAC-kerroksen hallintapalvelut ovat ylempien kerrosten käytettävissä MLME-SAP:in kautta. /8/

4.3 Verkkokerros

Verkkokerros (NWK Layer) määrittelee käytettävän topologian sekä käytössä olevat laitteet, eli päätelaitteet, reitittimet ja koordinaattorin yhdessä ZDO:n kanssa. Sen tehtävänä on käynnistää verkko onnistuneesti, eli tässä tapauksessa sen tekee ZigBee verkon koordinaattori.

Verkkokerros huolehtii myös monista muista tehtävistä. Se huolehtii siitä, että päätelaite ja reititin voivat sujuvasti liittyä verkkoon ja poistua verkosta. Tehtäviin kuuluu myös osoitteiden jakaminen, joka käytännössä tarkoittaa sitä, että koordinaattori jakaa verkkoon liittyville laitteille omat osoitteet. Verkkokerroksen NWK Message Broker toiminto reitittää kehykset niille tarkoitettuun päämäärään.



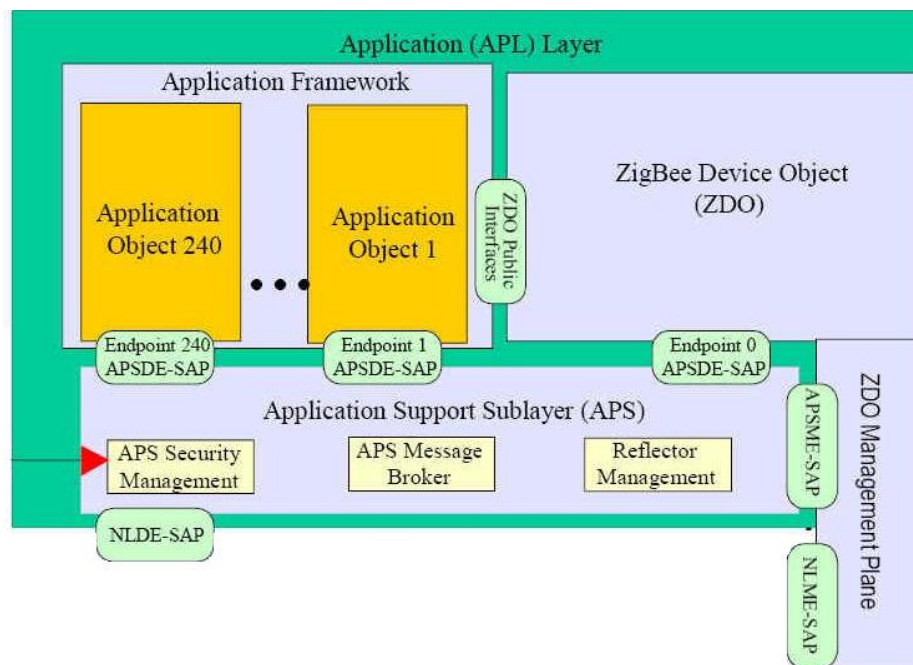
Kuva 9 Verkkokerros /5/

Verkkokerros pyytää salausta lähteville viesteille. Kuten kuvasta 5 ja 9 nähdään, että verkkokerroksen NWK Security Management toiminto pyytää salausta toiselta kerrokselta, joka tässä tapauksessa on SSP-kerros. Punainen nuoli kuvastaa sitä että pyyntö lähetetään ja SSP-kerros myöntää salauksen lähtevälle viestille.

Verkkokerros toteuttaa Mesh tyyppisissä verkoissa vaihtoehtoisen reitin etsimisen. Vaihtoehtoinen reitti tarvitaan silloin, jos suorin mahdollinen yhteys kahden viestejä keskenään välittävien laitteiden välillä on jostain syystä poikki. Verkkokerros hoitaa myös reititystietojen tallentamisen. Lyhyesti kerrottuna verkkokerros huolehtii verkon ylläpidosta. /4/; /7/

4.4 Sovelluskerros

Sovelluskerros eli Application Layer tai APL Layer on ylin ZigBee pinon kerros. Sovelluskerros sisältää ZigBee allianssin määrittelemiä osia (siniset laatikot), sekä myös tuotteen valmistajan määrittelemiä osia (keltaiset laatikot). Sovelluskerros sisältää sovelluksen tarvitseman ohjelmakoodin, laiteajurit ja kaikki muut pakolliset ominaisuudet mitä sovellus tarvitsee toimiakseen. Sovelluskerros on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 10. /9/



Kuva 10 Sovelluskerros /5/

4.4.1 Application Support –alikerros

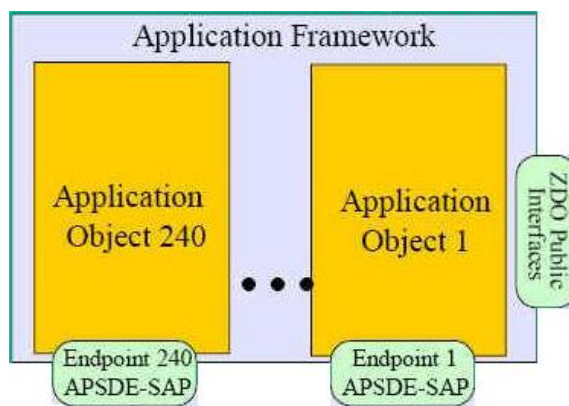
Application Support -alikerros eli APS-alikerros sijaitsee sovelluskerroksessa alimmaisena. APS-kerroksen tärkeimmät ominaisuudet on pystyä määrittämään muut laitteet, jotka ovat laitteen toimintasäteellä (Discovery), sekä ominaisuus jolla voidaan liittää kaksi laitetta yhteen ja välittää liikennettä näiden laitteiden välillä (Binding).

Tämän tyyppisen toiminnan mahdollistaa se, että liitettävien laitteiden on ylläpidettävä taulukoita, joissa niillä on tieto käytettävissä olevista yhteyksistä. Näitä taulukoita kutsutaan nimellä binding tables.

APS-alikerros tarjoaa data palveluja ZigBee laitepisteille (Endpoint, Application Object) ja ZDO:lle käyttäen rajapintana APSDE-SAP:ia. /4/; /8/; /10/

4.4.2 Application Framework

Application Framework (AF) eli sovelluskehys. Sovelluskehys tarjoaa valmiin rajapinnan standardoitujen sovellustason viestien luomiseen. Sovelluskehys sisältää tuotteen valmistajan määrittelemät laitepisteet, eli käytännössä laitteen ohjelmistot. Sovelluskehys helpottaa keskustelua sovellusten ja APS-alikerroksen välillä käyttäen APSDE-SAP:ia, kuten kuvasta 11 nähdään.



Kuva 11 Sovelluskehys /5/

Yhdellä päätelaitteella voi olla monta eri sovellusta, esimerkiksi lämpötilan mittaus ja kosteuden mittaus, näistä kumpikin on oma erillinen sovellus. Näitä päätelaitteen sisäisiä sovelluksia kutsutaan laitepisteiksi ja niitä voi olla yhdellä laitteella 240 kappaletta.

Jotta viestit saadaan reititettyä päätelaitteen oikeaan laitepisteeseen, niin päätelaitteen jokainen sovellus on tunnistettava yksilöllisesti, jonka jälkeen sille annetaan laitepisteosoite. Loppukäyttäjälle tarkoitettujen sovellusten laitepisteosoitteet ovat numeroitu välillä 1-240. Oikea sovellus tunnistetaan ZigBee verkossa päätelaitteen verkko-osoitteen perusteella ja laitepisteosoitteen perusteella.

Laitepiste 255 on yleislähetysten (broadcast) laitepisteosoite. Sama viesti voidaan lähettää päätelaitteen kaikille sovelluksille käyttämällä laitepistettä 255. Jokaisen päätelaitteen laitepiste 0 on varattu ZDO:lle (ZigBee Device Object). /4/; /9/

4.4.3 ZigBee Device Objects

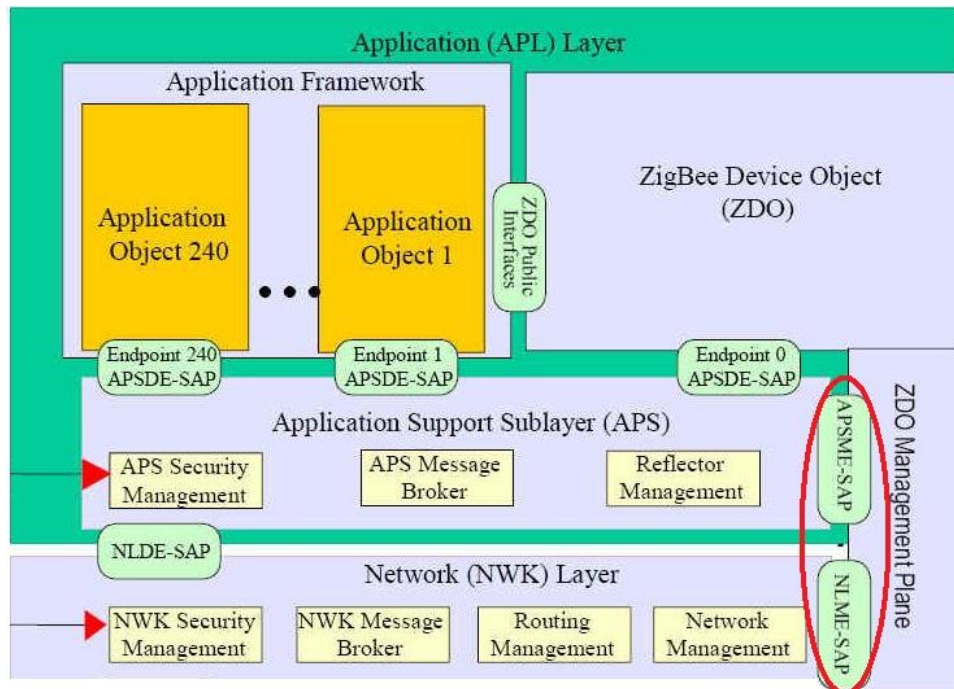
ZigBee Device Object eli ZDO ulottuu verkko- ja APS -kerroksille ja sallii sen kommunikoida näiden kahden kerroksen kanssa silloin, kun suoritetaan näiden kerroksien välisiä tehtäviä. ZDO vastaa näiden kerroksien alustamisesta, sekä myös SSP-kerroksen alustamisesta.

ZDO määrittelee myös laitteen roolin ZigBee-verkossa yhdessä verkkokerroksen kanssa, eli onko laite koordinaattori, reititin vai päätelaite, sekä vastaa kahden laitteen välisiin liittymispyyntöihin. ZDO ja verkkokerros keskustelevat ZDO Management tason välityksellä käyttäen rajapintana NLME-SAP:ia. ZDO:n tehtävänä on vastata turvallisen yhteyden muodostaminen laitteiden välille, käyttämällä jotain ZigBeen tarjoamaa salausmenetelmää. /4/; /10/; /8/

4.4.4 ZDO Management taso

ZDO Management taso toimii kokonaisuudessaan tietynlaisena rajapintana ZDO:n ja APS- ja verkkokerroksen välillä, kun suoritetaan näiden kerrosten välisiä sisäisiä tehtäviä.

APS-kerroksen kanssa keskustellessa rajapintana toimii APSME-SAP ja verkkokerroksella rajapintana toimii NLME-SAP. Rajapinnat on esitetty kuvassa 12 punaisella ympyröitynä. ZDO Management taso sisältyy ZDO-kerrokseen, joten näin ollen se ei ole oma erillinen kerros ZigBee protokollapinossa. /4/



Kuva 12 ZDO management taso /5/

4.5 SSP-kerros

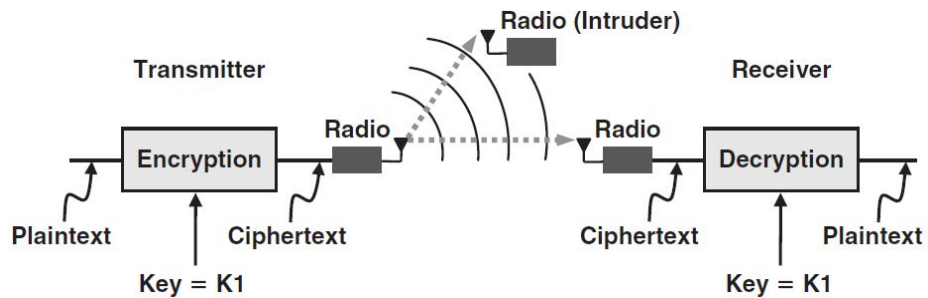
SSP-kerros eli Security Service Provider hallitsee ZigBee-standardin tietoturvaa, eli toisin sanoen salaa datavirran ja purkaa salauksen. ZigBee-standardi tarjoaa kolme tietoturvasoa, ei tietoturvaa, pääsyylistoihin (Access Control List, ACL) perustuva tietoturva ja 128-bittinen AES salausmenetelmä. Huonoin mahdollinen tilanne on tietenkin se, että tietoturvaa ei ole ollenkaan, koska silloin laitteilla ei ole käytössä minkäänlaisia turvallisuuspalveluja.

Pääsyylistoihin perustuvassa tietoturvatilassa laitteet pitävät listaa niistä laitteista, joiden kanssa ne ovat oikeutettuja kommunikoidaan. Siirtokerros välittää tiedon ylemmille kerroksille siitä, että onko vastaanotettu datakehys pääsyylistassa olevalta laitteelta. Tämän jälkeen kehys joko hyväksytään tai hylätään. Pääsyylistoihin perustuva tietoturva ei sisällä minkäänlaista salausta, joten ylemmät kerrokset varmentavat kehyksen lähettäneen laitteen oikean identiteetin.

Pääsyylistoihin perustuva tietoturva toteuttaa verkon minimiturvatason, joka käytännössä tarkoittaa sitä, että päästetäänkö laite verkkoon vai ei. Pääsyylistoja käytetään useimmiten erottamaan tiheästi sijoitettuja langattomia verkkoja toisistaan, kuin että sitä käytettäisiin suojausmenetelmänä.

AES-algoritmillä toteutettu salaus tarjoaa parhaan tietoturvan, jonka takia sitä käytetäänkin eniten datan salauksessa ZigBee verkoissa. Datan salauksessa käytetään tiettyä avainta, jonka tietävät vain lähettäjä ja vastaanottaja. Tällä tavalla voidaan estää mahdolliset tietomurrot.

Kuvassa 13 on esitetty AES-algoritmillä toteutetun salauksen toimintaperiaate. Plaintext kuvastaa salaamatonta dataa, joka salataan lähettimen päässä käyttämällä AES algoritmia sekä avainta K_1 . Tällöin vain oikea vastaanottaja tietää kuinka salaus puretaan. Salauksen jälkeen Ciphertext eli salattu data lähetetään eteenpäin radiokanavalle. Radiokanavalla mahdollinen hyökkääjä yrittää saada viestin käsiinsä, mutta koska se ei tiedä salauksen purkuun tarvittavaa avainta, niin viesti on turvassa. Vastaanottaja ottaa salatun datan radiokanavalta, jonka jälkeen salaus puretaan käyttämällä samaa avainta K_1 . Salauksen purkamisen jälkeen data on taas ymmärrettävässä muodossa ja sitä voidaan käyttää normaalisti.



Kuva 13 AES-algoritmillä toteutetun salauksen periaate /10/

ZigBee-verkoissa on käytössä 128-bittinen AES algoritmi. Algoritmi itsessään on julkista tietoa ja saatavilla kaikille, mutta avain jota datan siirrossa käytetään, pidetään salassa. Salauksessa käytettävä avain on binäärimuotoinen.

Salauksavain voidaan hankkia eri menetelmillä. Laitteen valmistaja voi sulauttaa avaimen laitteeseen itseensä. Avain voi myös olla vain yhdellä laitteella verkossa, joka antaa avaimen toiselle laitteelle, kun se liittyy samaan verkkoon. Bittien määrä määrittelee salauksen tason. Jos salaus on 8-bittinen, niin mahdollisia avaimia on $2^8 = 256$ kappaletta, tällöin mahdollisen hyökkääjän täytyy kokeilla maksimissaan 256 eri avainta selvittääkseen alkuperäisen viestin.

Kuten aikaisemmin mainittiin, ZigBee-standardissa käytössä on 128-bittinen avain, joten mahdollisia avaimia on 2^{128} , eli huomattavasti paljon enemmän kuin 8-bittisessä salauksessa. Näin ollen hyökkääjän on lähes mahdotonta selvittää oikea avain. /4/; /9/; /10/

5 YHTEENVETO

ZigBee on tällä hetkellä jo melko suosittu standardi ja käytössä monissa erilaisissa käyttökohteissa, mutta se kasvattaa suosiotaan edelleen. Useita kilpailijoitakin tälle standardille kuitenkin löytyy, mutta niiden ongelmana on valmistajakohtaisuus. ZigBee allianssiin kuuluu useita eri piirivalmistajia, tämä takaa sen että tekniikka ei ole sidoksissa johonkin tiettyyn valmistajaan.

Suurimman suosion ZigBee saavuttaa varmasti kotiautomaatiossa ja teollisuudessa. Kulutuselektronikkaan sitä ei todennäköisesti suuremmissa määrin sovelleta, koska tarjolla on muita siihen tarkoitukseen paremmin soveltuvia tekniikoita. Toisaalta ZigBee voi tulevaisuudessa ainakin osittain syrjäyttää Bluetoothin. Ongelmana on vielä se että Bluetoothin tiedonsiirtonopeus on kuitenkin melko paljon suurempi, mutta tekniikan kehittyessä saadaan ZigBeen tiedonsiirtonopeuttakin varmasti kasvatettua.

Tulevaisuudessa ZigBee-standardia tullaan varmasti parantamaan monin tavoin. Tällä hetkellä ongelmana ovat erilaisten verkkotopologioiden aiheuttamat viiveiden ja virrankulutusten vaihtelu, joten tähän ongelmaan perehdytään varmasti seuraavissa versioissa. Myös tietoturvaa kehitetään edelleen.

LÄHTEET

VERKKOSIVUT

1. Savonia ammattikorkeakoulu. [www-sivu]. [viitattu 27.04.2009] Saatavissa:
http://wirelessplatform.savonia-amk.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=53
2. Hassinen, Jari. ZigBee ja IEEE 802.15.4. [pdf]. [viitattu 28.04.2009]
Saatavissa: http://www.it.lut.fi/kurssit/04-05/010626000/seminaarit/zigbee_ja_ieee_802154_jari_hassinen_kalvot.pdf
3. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Zigbee. [pdf]. [viitattu 28.04.2009]
Saatavissa:
http://www.ee.lut.fi/courses/Sa2910400/esitykset_2006/esitys2006modattu.pdf
4. Jennic Ltd. [www-sivu]. [viitattu 29.04.2009] Saatavissa:
<http://www.jennic.com/elearning/zigbee/index.htm>
5. [www-sivu]. [viitattu 12.05.2009] Saatavissa:
<http://www.alektrona.com/images/zigbeearch.jpg>
6. Wikipedia [www-sivu]. [viitattu 12.05.2009] Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4-2006
7. Stevanovic, Dusan. ZigBee/IEEE 802.15.4 standard. [pdf].
[viitattu 12.05.2009] Saatavissa: <http://www.cse.yorku.ca/~dusan/Zigbee-Standard-Talk.pdf>

8. [pdf]. [viitattu 13.05.2009] Saatavissa:
http://ae.tut.fi/research/AIN/Publications/ZigBee_BT1.2_Silvola.pdf

9. ZigBee –teknologiakatsaus. [pdf]. [viitattu 18.05.2009] Saatavissa:
http://www.stoy.fi/docs/w7j-ZigBee_lopullinen.pdf

TEOKSET

10. Farahani Shahin, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Elsevier Science & Technology 2008, 308 sivua.