

Antti Sintonen

# ZigBee - langaton verkkostandardi

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Tietotekniikka  
Opinnäytetyö  
25.5.2012

Tekijä(t) Otsikko	Antti Sintonen ZigBee – langaton verkkostandardi
Sivumäärä Aika	31 sivua 25.5.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tietoliikennetekniikka
Ohjaaja(t)	yliopettaja Antti Koivumäki
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena on antaa perustiedot langattomasta ZigBee-verkkotekniikasta. Työssä perehdytään ZigBeen hyviin puoliin sekä kerrotaan, miten se eroaa muista langattomista verkkotekniikoista. Työ tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle.</p> <p>Teoriaosuudessa käydään läpi ZigBee-tekniikan ominaisuuksia sekä käyttökohteita.</p> <p>Käytännön osuudessa tarkastellaan, miten kahdella XBee-radiolla saa point-to-point-verkon rakennettua ja mitä kaikkea siihen tarvitaan. Lisäksi käydään tarvittavat ZigBee-radion asetukset läpi.</p> <p>Työssä toteutettiin onnistuneesti XBee-radioilla yksinkertaisin verkko, missä kaksi radiota kommunikoi toistensa kanssa.</p>	
Avainsanat	ZigBee, langaton verkko, XBee

Author(s) Title	Antti Sintonen ZigBee – wireless network standard
Number of Pages Date	31 pages 25 May 2012
Degree	Bachelor's degree
Degree Programme	Information technology
Specialisation option	Telecommunications
Instructor(s)	Antti Koivumäki, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis is to give basic knowledge of wireless network standard called ZigBee. The thesis goes through the good sides of ZigBee and how it differs from other wireless network technologies. This thesis was made for Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>ZigBee features and applications of ZigBee standard are introduced in the theoretical part.</p> <p>The practical part covers what is needed to build simple point-to-point ZigBee network. Additionally XBee settings are covered.</p> <p>In this project a ZigBee network was successfully carried out between two XBee radios.</p>	
Keywords	ZigBee, wireless network, XBee

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	ZigBee	2
2.1	ZigBee-allianssi	2
2.2	Käyttötarkoitukset	2
2.3	Erot verrattuna muihin langattomiin teknologioihin	3
2.4	Luotettavuus	4
2.5	Kustannustehokkuus	6
2.6	Pieni virrankulutus	6
2.7	Turvallisuus	7
2.8	Taajuusalueet	8
2.9	Osoitteet	9
3	Verkon osat ja topologiat	10
3.1	Verkon osat	10
3.1.1	Koordinaattori	11
3.1.2	Reititin	11
3.1.3	Päätelaite	11
3.2	Verkkotopologiat	11
3.2.1	Pari	12
3.2.2	Tähti	12
3.2.3	Mesh	13
3.2.4	Puu	13
4	Arkkitehtuuri	14
4.1	Physical (PHY) Layer	14
4.2	Medium Access Control (MAC) Layer	15
4.3	Network (NWK) Layer	15
4.4	Application Support (APS) Sublayer	15
4.5	Application Framework	16
4.6	Security Service Provider	16
4.7	ZigBee Device Object (ZDO)	17
5	XBee-radiot ja antennit	17

5.1	XBee-radiot	17
5.2	Antennit	18
5.2.1	Lanka- tai piiska-antenni	18
5.2.2	Siruantenni	19
5.2.3	PCB-antenni	19
5.2.4	U.FL -ja RPSMA -liittimet	20
6	ZigBee-verkon toteutus	21
6.1	X-CTU	21
6.2	Terminaali-ohjelma	24
6.3	XBee-radion konfiguroiminen	26
7	Yhteenveto	30
	Lähteet	31

## 1 Johdanto

Langaton verkko, mitä moni pitää uutena keksintönä, on kuitenkin jo yli vuosisadan vanha keksintö. Tosin vasta viime vuosikymmeninä langattomista verkoista on tullut arkipäivää – niiden kanssa ollaan tekemisissä niin töissä kuin myös arkena kotiloissa.

ZigBee, jota tämä insinööriyö käsittelee, on kuitenkin suhteellisen tuore langattomien verkkojen standardi, joka ensimmäisen kerran standardoitiin vuonna 2004. Syynä tähän oli, että aikaisemmin ei ollut olemassa yksinkertaista ja edullista tekniikkaa, joka mahdollistaisi lyhyen kantaman tietoliikenneverkon.

ZigBee, joka perustuu IEEE 802.15.4 -standardiin on tarkoitettu kevyisiin langattomiin verkkoihin, joissa tiedonsiirtonopeudet ja tiedonsiirtoajat ovat pieniä. ZigBee, jota pääasiassa käytetään anturiverkoissa, pystyy välittämään käyttäjälle monenlaista tietoa riippuen käyttötarkoituksesta. Ensisijaisesti ZigBee-tekniikkaa käytetään verkoissa, jotka monitoroivat kaikkia erilaisia asioita kuten lämpötilaa, kosteutta, ilmanpainetta, verenpainetta tai ihmisen kuntoa. Lisäksi ZigBeetä voidaan käyttää muun muassa valojen ohjaamiseen. Tämän takia erinomaisia käyttökohteita ovat niin sairaalat, ajoneuvot kuin turvatoimia tarvitsevat rakennuksetkin.

Työssä perehdytään aluksi ZigBeen ominaisuuksiin ja millä tavoilla se erottuu edukseen muista langattomista teknologioista. Lopuksi työssä toteutetaan verkko kahden XBee-radion välille.

Työn tarkoituksena on antaa hyvä pohja siitä, minkälainen standardi ZigBee on ja mihin se on tarkoitettu käytettäväksi. Tavoitteena on myös rakentaa toimiva ZigBee-verkko.

Työ on tehty Metropolia Ammattikorkeakoululle.

## 2 ZigBee

ZigBee sai alkunsa vuonna 1998, kun monet radiotekniikan insinöörit olivat sitä mieltä, että WiFi ja Bluetooth eivät tulisi riittämään kaikkiin tarpeisiin vaan tarvittaisiin tekniikka, joka mahdollistaisi ad hoc -tietoliikenneverkot eli langattomat laitteet liikennöisivät keskenään ilman tukiaseman apua. IEEE 802.15.4 -standardi, johon ZigBee perustuu standardoitiin ensimmäisen kerran toukokuussa 2003 ja ZigBee-standardi heti perään vuonna 2004. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) on kansainvälinen tekniikan alan järjestö, jonka yhtenä tehtävänä on standardien määrittely. [10, 11.]

ZigBee eroaa muista langattomista verkkoteknologioista sillä, että se tähtää pieneen tiedonsiirtonopeuteen korkean tiedonsiirtonopeuden sijasta. ZigBeestä löytyy kuitenkin monia muita hyviä ominaisuuksia, kuten pieni virrankulutus, luotettavuus, kustannustehokkuus, turvallisuus ja avoin maailmanlaajuinen standardi. [9, 13.]

### 2.1 ZigBee-allianssi

ZigBee-allianssi esiteltiin ensimmäisen kerran kahdeksan yhtiön voimin vuonna 1997, mutta perustaminen tapahtui vasta vuonna 2002. Allianssin tavoitteena oli luoda luotettavia, kustannustehokkaita, vähävirtaisia ja langattomaan monitorointiin sekä ohjaamisen perustuvia laitteita, jotka perustuisivat avoimeen maailmanlaajuiseen standardiin. Allianssin tehtävä on myös pitää standardi yhtenäisenä, jotta eri valmistajien toimittamat ZigBee-laitteet pystyvät toimimaan toistensa kanssa.

Alkujaan kahdeksasta yhtiöstä muodostuneessa ZigBee-allianssissa on nykyään yli 200 organisaatiota jäsenenä, ja määrä kasvaa koko ajan. Liittyminen ZigBee-allianssiin ei ole kuitenkaan ilmaista, vaan siitä joutuu maksamaan vähintään 3500 dollaria vuodessa. Tällöin on kuitenkin lupa viimeisimpään ZigBee-spesifikaatioon, sekä lupa ZigBee-standardin käyttämiseen kaupallisessa tarkoituksessa. [6, s. 14-15; 8.]

### 2.2 Käyttötarkoitukset

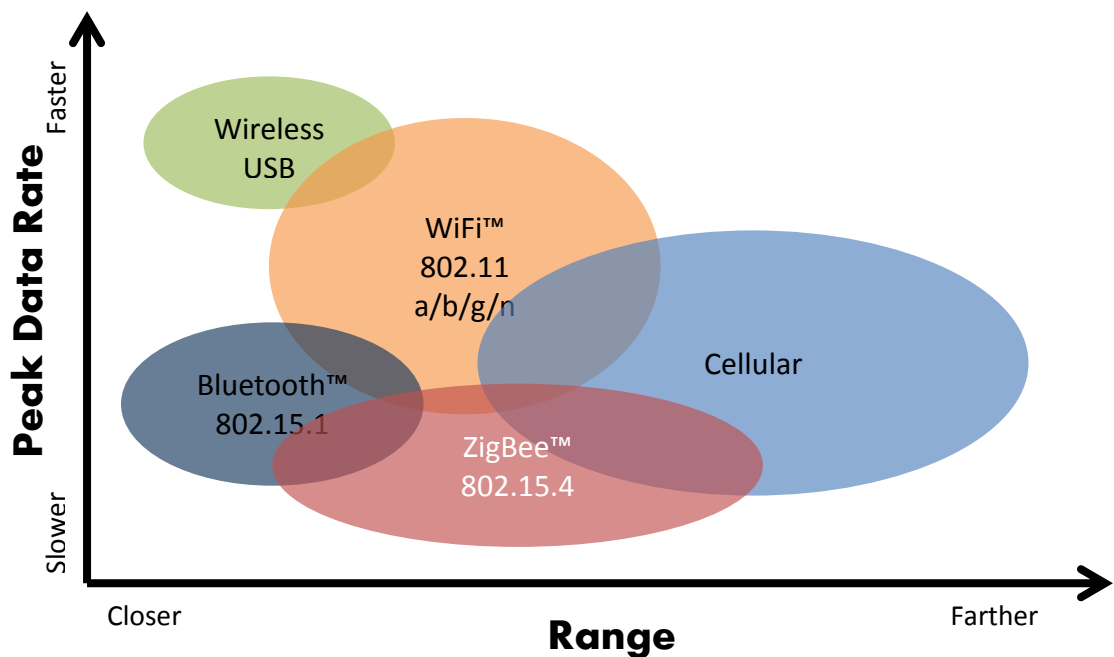
Langaton ZigBee-verkko koostuu solmuista (eng. Node), jotka kommunikoivat toistensa kanssa ilmarajapinnan yli. Solmut ovat laitteita, joissa on IEEE 802.15.4 -standardin radio. Solmut voivat ohjata tai monitoroida monia eri asioita.

Pienen virrankulutuksen ansiosta ZigBee-verkon laitteet eivät tarvitse mitään erillisiä virtajohtoja, vaan ne pystyvät operoimaan jopa vuosia pelkän pariston avulla. Ideaalisia käyttökohteita ovat paikat, joihin pätevät seuraavat rajoitukset:

- Niissä on oltava alhaiset siirtonopeudet (alle 256 kb/s).
- Solmut ovat usein lepotilassa, eli ne eivät vastaanota/lähetä dataa.
- Paikat, joihin kaapelien vetäminen voi olla erittäin vaikeata tai kallista.
- Paikat, joissa solmuja tarvitsee lisätä, poistaa tai muokata, kun palvelu on päällä. [7.]

### 2.3 Erot verrattuna muihin langattomiin teknologioihin

Kuten kuva 1 näyttää, niin ZigBee-standardi täyttää tyhjän alueen, mitä mikään muu standardi ei täytä. Vaikka ZigBeeen tiedonsiirtonopeus ei päihitäkään kaikkia standardeja, niin se tarjoaa laajan toimintasäteen. Tämän lisäksi tekniikka, jolla ZigBee on toteutettu, tarjoaa paljon hyviä ominaisuuksia.





Kuva 1. Yleisimmät langattomat tekniikat [4].

Taulukossa 1 vertaillaan langatonta lähiverkkoa (WLAN), Bluetoothia ja ZigBeetä. Taulukko antaa käsityksen siitä, että ZigBee-standardissa on panostettu vähävirtaisuuteen, solmujen määrään, pieneen viiveeseen, kantamaan sekä turvallisuuteen.

Taulukko 1. WLAN:n, Bluetoothin ja ZigBeen erot [4].

Ominaisuudet	IEEE 802.11b (WLAN)	IEEE 802.15.1 (Bluetooth)	IEEE 802.15.4 (ZigBee)
Pariston käyttöikä	Tunteja	Päiviä	Vuosia
Kompleksisuus	Erittäin kompleksinen	Kompleksinen	Yksinkertainen
Solmuja/Isäntiä	32	7	64000
Viive	Enintään 3 s	Enintään 10 s	Enintään 30 ms
Kantama	100 m-1000 m	10m	70m-300m (ETSI), 1600m (FCC)
Laajennettavuus	Roaming mahdollisuus	Ei	Kyllä
RF tiedonsiirtonopeus	11 Mbps	1 Mbps	250 kbps
Turvallisuus	SSID	64-bittinen tai 128-bittinen	128-bittinen AES ja sovelluskerroksessa käyttäjän määriteltävissä

## 2.4 Luotettavuus

Langaton viestintä yhdistetään helposti siihen, että se ei ole täysin varmaa. Ei ole mitenkään poissuljettua, että metrossa, hississä tai kellarissa puhuttaessa puhelu ei katkeaisi. Puhelun katkeaminen voi johtua siitä, että vesi, metalli tai paksu betoniseinä eivät päästä radioaaltoja lävitseen. Myös puhelimen antennin malli ja sääolosuhteet vaikuttavat paljon radioaaltojen vastaanottoon. ZigBee-standardia kehitellessä ZigBee-

allianssi halusi välttää näitä ongelmia, joita puhelimen tai muiden langattomien laitteiden kanssa saattaisi tapahtua. Niinpä ZigBee takaa luotettavuuden seuraavilla tavoilla:

- IEEE 802.15.4 O-QPSK:n ja DSSS:n kanssa
- CSMA-CA
- 16-bittinen CRC
- kuittaus jokaisella hypyllä
- luotettavan reitin löytäminen
- kuittaus datan vastaanotosta.

Parhaan luotettavuuden ZigBee saa lyhyen kantaman langattomasta IEEE 802.15.4 -standardista. Kyseinen standardi on erittäin moderni, ja IEEE on kehittänytkin tätä yli neljäkymmenen vuoden ajan. Lisäksi O-QPSK (eng. Offset-Quadrature Phase-Shift Keying) ja DSSS (eng. Direct Sequence Spread Spectrum) tarjoavat loistavan suorituskyvyn matalan signaali-kohinasuhteen ympäristöissä. O-QPSK on modulointimenetelmä, joka määrittelee, kuinka tieto lähetetään. DSSS eli suorasekventointi pilkkoo lähetettävän datan pieniin osiin, jotka sitten lähetetään koko taajuusalueella.

CSMA-CA (eng. Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) mahdollistaa, että ZigBee pystyy kuuntelemaan kanavaa ennen informaation lähettämistä. Tällöin ei tapahdu tilanteita, joissa radiot keskustelisivat päällekkäin ja informaatio vioittuisi.

CRC (eng. Cyclic Redundancy Check) on tiivistealgoritmi, ja se perustuu FCS-algoritmiin (eng. Frame Checksum). ZigBee käyttää 16-bittistä CRC:tä, minkä tarkoituksena on databittien virheentarkistus.

Välillä tapahtuu tilanteita, jolloin informaatio ei pääse perille. Mikäli näin tapahtuu neljännellä yrittämällä, ZigBee informoi lähettäjää tästä, jotta asialle voitaisiin tehdä jotain.

Mesh-topologiasta eli verkosta, jossa on useita solmuja, löytyy myös useita reittejä lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Tämä on erittäin tärkeätä tapauksissa, jolloin joku solmuista on epäkunnossa eikä viestiä voida reitittää tämän kautta. ZigBee tukee tekniikkaa, joka etsii parhaimman reitin lähettäjältä vastaanottajalle, jolloin informaatio

saadaan toimitettua perille. Lisää luotettavuutta antaa se, että mikäli jokin solmu on viallinen, se alkaa tutkia ongelmaa ja korjata itseensä.

Automaattinen kuittaus datan vastaanotosta on erittäin tärkeä ominaisuus, jotta käyttäjän käyttämät ohjelmat tietävät, onko tietty paketti päässyt perille vai ei. [5, s. 4-6.]

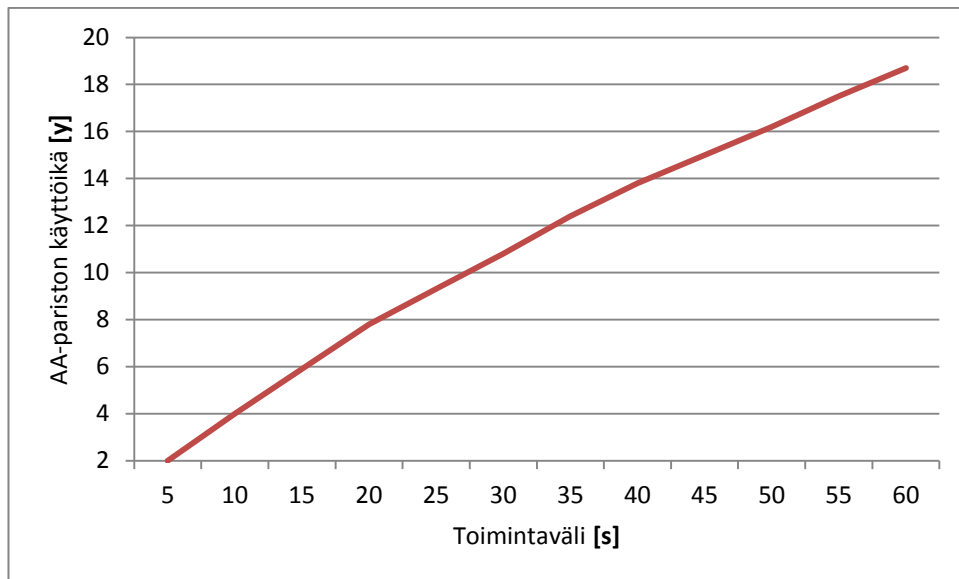
## 2.5 Kustannustehokkuus

Muihin langattomiin teknologioihin verrattaessa ZigBee on erittäin edullinen. Yksinkertaisimmillaan toimivan ZigBee-verkon saa kahdella XBee-moduulilla ja kahdella XBee-yksiköllä. 17 dollarilla eli noin 13 eurolla saa moduulin, joka pitää sisällensä joko piiska-antennin tai vaihtoehtoisesti siruantennin. Moduulin lisäksi tarvitaan vielä yksikkö, joka kytketään kiinni moduuliin. Yksikköjä on monenlaisia eri tarpeisiin, mutta yksinkertaisimman yksikön, missä on joko mini USB-portti tai USB-portti, saa 25 dollarilla, joka on noin 20 euroa.

ZigBeen edullisuus ei kuitenkaan johdu pelkästään matalista pii-kustannuksista, vaan myös siitä, että ZigBeen ydin on toteutettu patenttivapaasti, joten se ei loukkaa mitään patenteja. Lisäksi ZigBeehen tarvittavan kehitysympäristön saa ostettua edullisesti, tai se saattaa myös tulla ZigBee-moduulien mukana.

## 2.6 Pieni virrankulutus

Yksi ZigBee-allianssin vaatimuksista ZigBeelle-laitteille on pieni virrankulutus. Tästä syystä ZigBee-laitteet pystyvätkin toimimaan kahdella AA-paristolla vuosia. Verrattuna Bluetooth-laitteisiin ero on huomattava. Bluetooth-yhteyttä päällä pidettäessä puhelimen akku tyhjenee paljon nopeammin. Ero Bluetoothin ja ZigBeen välillä on siinä, että ZigBeessä käytettävät mikrokontrollerit ja radiot ovat vähävirtaisia. Tämän lisäksi ZigBee-laitteet osaavat mennä lepotilaan, kun mitään tiedonsiirtoa ei tapahdu.



Kuva 2. Alkaalipariston käyttöikä riippuen toimintavälistä [5, s. 10].

Kuva 2 havainnollistaa, kuinka AA-pariston käyttöikä kasvaa, mitä harvemmin solmu kommunikoi. Huomioitavaa kuvassa on kuitenkin se, että yhden AA-pariston käyttöikä on noin viisi vuotta. Tämän takia kannattavaa onkin kytkeä rinnan useampi AA-paristo, jolloin käyttöikä kasvaa, mutta jännite pysyy vakiona. Teoriassa yksi solmu, joka kommunikoi kerran 13 sekunnissa, saavuttaa pariston käyttöiän.

## 2.7 Turvallisuus

Verkon turvaamiseen ZigBee käyttää standardoimisviraston NIST:n (National Institute of Standards and Technology) vuonna 2001 julkaisemaa AES-lohkosalausmenetelmää (Advanced Encryption Standard). AES-128 käytetään salaamaan ja purkamaan paketteja, jolloin kukaan ulkopuolinen, joka kaappaa paketteja, ei pysty kääntämään niitä selkokielelle. Ulkopuolisen on myös mahdotonta tuottaa haitallisia paketteja solmujen käsiteltäviksi. Tämä perustuu autentikoimiseen eli tunnistukseen, sekä siihen, että ulkopuolisella ei ole avainta kyseiseen istuntoon. ZigBeessä AES-128 tarjoaa salauksen ja autentikoitumisen.

Keskeisimmät syyt, miksi ZigBee käyttää AES-salausta, ovat seuraavat:

- standardi on kansainvälisesti tunnustettu sekä luotettava
- AES on patentt vapaa eli mikään patentti ei sido sitä

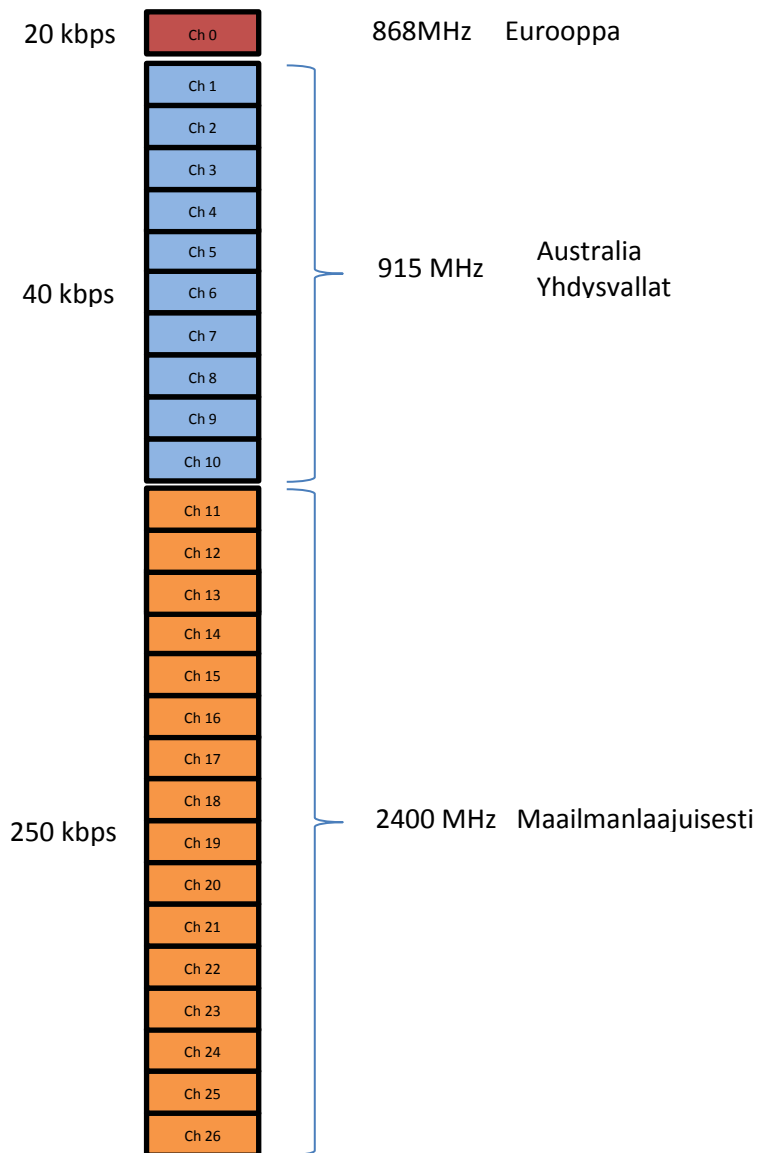
- AES on toteutettavissa 8-bittisellä prosessorilla. [6, s. 11.]

## 2.8 Taajuusalueet

ZigBee suunniteltiin toimimaan lisenssivapaalla taajuusalueella. Nämä taajuusalueet kuitenkin vaihtelevat maittain, ja niinpä IEEE 802.15.4 määrittelee 3 eri taajuusalueita, joten joka maassa pitäisi olla vähintään yksi lisenssivapaa taajuusalue, jota voi käyttää. Taajuusalueet keskittyvät taajuuksille 868 MHz, 915 MHz ja 2400 MHz. Nämä taajuudet operoivat ISM-taajuusalueella (Industrial, Scientific and Medical). ISM-taajuusalue on maailmanlaajuinen radiotaajuuskaista teolliseen, tieteelliseen ja lääketieteelliseen käyttöön, jonka käyttö ei vaadi erillistä lupaa.

Taajuusalue on jaettu kanaviin, joita on yhteensä 27. Jokaisella taajuusalueella on erilaiset tiedonsiirtonopeudet: Euroopassa 20 kb/s, Australiassa sekä Yhdysvalloissa 40 kb/s ja maailmanlaajuisesti 250 kb/s [6, 12].

Taajuusalueiden 868 MHz ja 915 MHz etuina ovat käyttäjien, häiriöiden, heijastusten sekä absorption vähäisyys. Huolimatta näistä eduista taajuusalue 2400 MHz on kuitenkin paljon suositumpi, sillä se on lisenssivapaa maailmanlaajuisesti, ja tarjoaa korkean tiedonsiirtonopeuden. Korkea tiedonsiirtonopeus mahdollistaa ZigBee-laitteistojen vähäisemmän virrankulutuksen, sillä tieto liikkuu nopeammin, jolloin ZigBee-radiot pääsevät nopeammin lepotilaan. Lisäksi 16 kanavaa mahdollistaa, että samalla alueella voi olla useampia ZigBee-verkkoja eivätkä ne häiritse toisiansa. [6.]



Kuva 3. ZigBeeen taajuusalueet [7].

## 2.9 Osoitteet

Ihmisiltä löytyy monia osoitteita, joista heidät voidaan tavoittaa. Löytyy kotiosoite, sähköpostiosoite, puhelinnumero sekä muita. Jokainen näistä palvelee eri tarkoitusta. Sama pätee myös ZigBee-radioon. Siltä löytyy myös eri osoitteita eri tarkoituksiin. Jokaisella ZigBee-radiolla on oma 64-bittinen uniikki osoite, mitä ei löydy milteen toiselta.

Lisäksi löytyy 16-bittinen osoite, joka määrätään dynaamisesti jokaiselle radiolle koordinaattorin toimesta, kun verkkoa perustetaan. Tämä osoite ei kuitenkaan ole yksikäsitteinen maailmanlaajuisesti vaan pelkästään verkkokohtaisesti.

Näiden lisäksi jokaiselle ZigBee-radiolle voidaan antaa nimeksi lyhyt nimi muistamisen helpottamiseksi.

Koska jokaiselle solmulle on olemassa osoite, löytyy osoite myös jokaiselle ZigBee-verkolle. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi Suomessa Rantakatu on olemassa useammalla paikkakunnalla. Jotta voitaisiin tietää, mitä Rantakatua tarkoitetaan, tarvitaan sen kaupungin tai kylän nimi, missä kyseinen katu sijaitsee. Jokainen ZigBee siis luo oman "kaupungin". Erona meidän kaupunkeihin on kuitenkin, että ZigBee-kaupungin nimet ilmaistaan 16-bittisenä heksadesimaalina, ei siis tekstinä niin kuin meillä. Liki-verkko-osoite (eng. PAN, Personal Area Network), joka siis on 16-bittinen, tarjoaa 65 536 osoitetta verkkonimille. Jokaisessa verkossa laitteille tarjotaan toiset 65 536 osoitetta. Tällä tavalla osoitteita on siis yhteensä yli neljä miljardia, eli enemmän kuin niitä tulee ikinä tarvitsemaan. [3, s. 28-29.]

Taulukko 2. XBee-radion osoitteet [3, s. 29].

Tyyppi	Esimerkki	Uniikki
64-bittinen	0013A200403E0750	Kyllä, aina ja kaikkialla
16-bittinen	23F7	Kyllä, mutta vain verkon sisällä
Solmun tunniste	Pekan radio	Ei voida luvata

### 3 Verkon osat ja topologiat

#### 3.1 Verkon osat

Jotta ZigBee-laitteilla saadaan toimiva verkko aikaiseksi, tarvitaan siihen vähintään kaksi laitetta. Tämän lisäksi jokaisessa ZigBee-verkossa on oltava yksi koordinaattori. Zig-

Bee-verkko käsittää kolme eri laitetyyppiä, joita ovat koordinaattori, reititin ja päätelaitte.

### 3.1.1 Koordinaattori

Toimiva verkko tarvitsee aina yhden ja vain yhden koordinaattorin. Koordinaattorin tehtäviin kuuluu verkon muodostaminen, osoitteiden jakaminen ja muiden toiminnallisuuksien, kuten tuvallisisuuden ja verkon hoitaminen, mitkä määrittelevät verkon. [3, s. 26.]

### 3.1.2 Reititin

Reititin pitää sisällään kaikki ZigBee-verkon toiminnallisuudet. Se pystyy liittymään olemassa olevaan verkkoon, lähettämään ja vastaanottamaan informaatiota. Näiden lisäksi reititin pystyy myös reitittämään informaatiota, eli toimimaan viestinviejänä kahden päätelaitteen välillä, mitkä ovat liian kaukana toisistaan hoitaakseen viestin kuljetamisen itse. Tyypillisesti reitittimet ovat kiinni sähköverkossa, sillä niiden pitää olla päällä koko ajan. Toisin kuin koordinaattoreita, reitittimiä voi olla verkossa useita. [3, s. 26.]

### 3.1.3 Päätelaite

Päätelaite on pohjimmiltaan riisuttu reititin, mistä on kaikki ylimääräinen otettu pois. Tämän takia päätelaitteet voivatkin ainoastaan liittyä verkkoon sekä lähettää ja vastaanottaa informaatiota. Koska päätelaitteet eivät toimi viestinviejinä kuten reitittimet, niin ne kuluttavat vähemmän energiaa, ja voivat välillä mennä vastaamattomaan tilaan eli lepotilaan. Päätelaitteet eivät osaa toimia yksinään, vaan ne tarvitsevat aina isäntälaitteen eli koordinaattorin tai reitittimen. Isäntälaitteen tehtävänä on auttaa päätelaitetta liittymään verkkoon sekä varastoida viestejä, kun päätelaite on lepotilassa. [3, s. 27.]

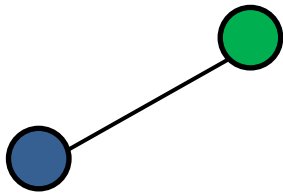
## 3.2 Verkkotopologiat



Kuten jalkapallossa pelaajat, niin ZigBee-verkossa solmut ovat järjestäytyneinä erilaisiin "kokoonpanoihin" eli verkkotopologeihin. Topologiat määrittelevät sen, millä tavalla päätelaitteet ovat loogisesti yhdistyneinä toisiinsa, eli mitä reittiä pitkin viesti kulkee perille. Seuraavaksi on esitetty neljä ZigBee-verkkotopologiaa.

### 3.2.1 Pari

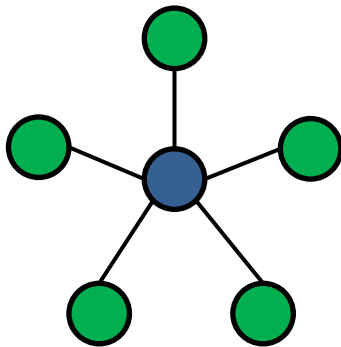
Yksinkertaisimman verkon muodostaa kaksi solmua eli radiota. Pari eli point-to-point-verkossa ensimmäisen näistä solmuista on pakko olla koordinaattori, jotta verkko voidaan ylipäättänsä muodostaa. Toinen voidaan konfiguroida joko reitittimeksi tai päätelaitteeksi.



Kuva 4. Pari-topologia

### 3.2.2 Tähti

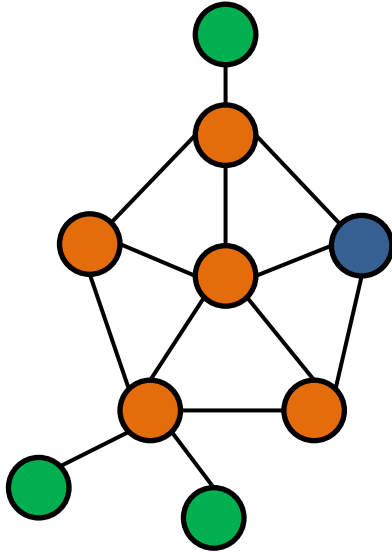
Tähti-verkon rakenne on myös todella yksinkertainen. Koordinaattoriradio on tähti-topologian keskellä ja on päätelaitteiden ympäröimä. Järjestelmän jokainen viesti kulkee koordinaattoriradion läpi, mikä sitten reitittää viestin oikeaan paikkaan. Päätelaitteet eivät suoraan kommunikoi toistensa kanssa.



Kuva 5. Tähti-topologia

### 3.2.3 Mesh

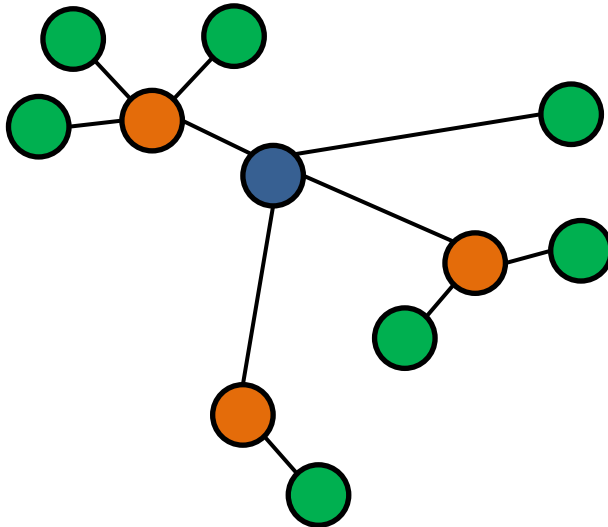
Mesh-topologia työllistää koordinaattorin lisäksi myös reitittimen. Nämä radiot voivat välittää viestit muita reitittimiä pitkin muille päätelaitteille. Koordinaattori, joka oikeastaan on vain reitittimestä erilainen muoto, hallinnoi verkkoa. Erilaiset päätelaitteet voivat olla joko yhdistyneinä mihin tahansa reitittimeen tai koordinaattoriin. Päätelaitteet voivat tuottaa ja vastaanottaa informaatiota, mutta ne tarvitsevat vanhempiensa, eli koordinaattorin tai reitittimien apua välittääkseen viestin. [3, s. 28.]



Kuva 6. Mesh-topologia

### 3.2.4 Puu

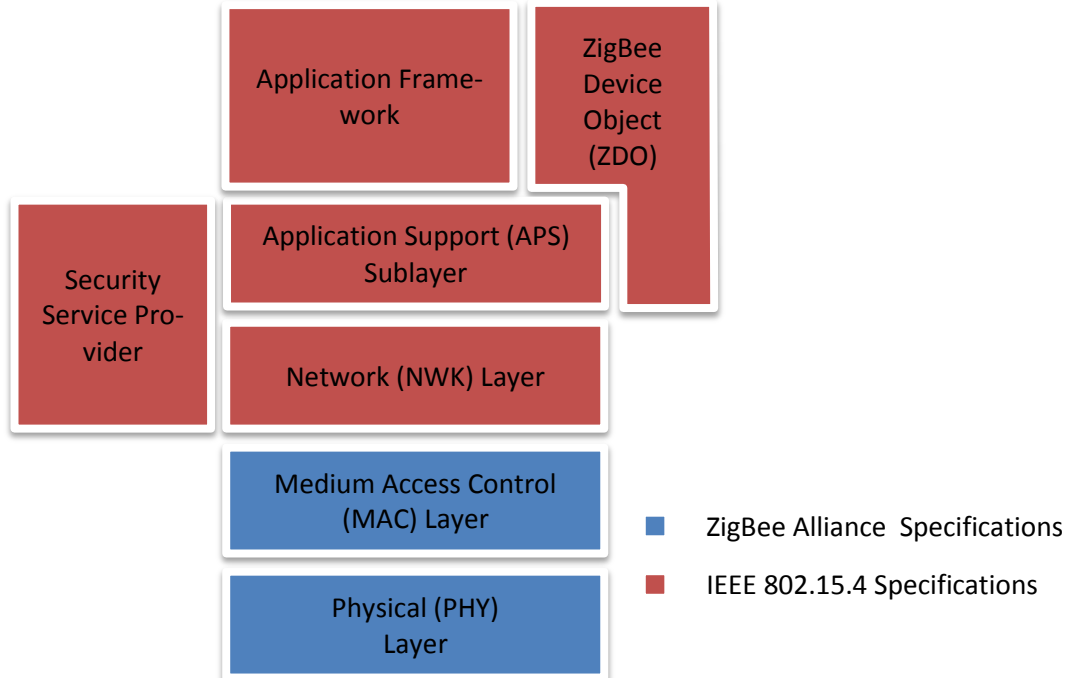
Tässä topologiassa reitittimet muodostavat verkolle selkärangan, ja päätelaitteet ovat ryhmittyneinä reitittimien ympärille.



Kuva 7. Puu-topologia

## 4 Arkkitehtuuri

Kaikissa moderneissa verkkoprotokollissa eri komponentit ja toiminnallisuudet on jaettu kerroksiin (eng. Layer). Kuten TCP/IP:llä myös ZigBeellä on oma viitemallinsa. Viitemallissa eli protokollapinossa jokainen kerros tarjoaa palveluja ylemmälle kerrokselle.



Kuva 8. Protokollapino [3, s. 42].

### 4.1 Physical (PHY) Layer

Jokaisella verkolla on fyysinen kerros (Physical Layer), mistä signaalit lähetetään. Fyysisen kerroksen tehtävänä on määrittää, kuinka siirtotietä käytetään tiedonsiirrossa eli muutetaan tavuista koostuvat paketit radioaalloiksi ja toisinpäin. Toisin sanoen tämä kerros toimii rajapintana fyysiselle tiedonsiirrolle. Fyysinen kerros tarjoaa ylemmille kerroksille datapalvelun sekä rajapinnat, joiden avulla kerroksen hallintapalveluita voidaan kutsua. Lisäksi fyysisen kerroksen tehtäviin kuuluu RF:n eli radiotaajuusvastaanottimen päälle- ja poislaittaminen tarpeen mukaan sekä kanavavalinnan tekeminen. [6, s. 43.]

#### 4.2 Medium Access Control (MAC) Layer

Siirtoyhteyskerros eli Medium Access Control Layer kuuluu myös IEEE 802.15.4 -specifikaatioon fyysisen kerroksen lisäksi. MAC-kerros on vastuussa osoitteista. Lisäksi sen tehtäviin kuuluu päätellä ulosmenevän datan vastaanottaja sekä sisään tulevan datan lähettäjä. [7.]

#### 4.3 Network (NWK) Layer

Kuten nimi kertoo, niin verkkokerros on vastuussa monesta asiasta, mitkä liittyvät verkkoon. Se vastaa käytettävästä topologiasta ja päätelaitteiden, reitittimien ja koordinaattorien käytöstä yhdessä ZDO:n kanssa. Tehtäviin kuuluu myös verkon päälle paneminen sekä huolehtiminen, että päätelaitteet ja reitittimet voivat liittyä ja poistua verkosta saumattomasti. Myös osoitteiden jakaminen päätelaitteille ja reitittimille hoidetaan verkkokerroksella koordinaattorin toimesta, dataa lähetettäessä Mesh-verkossa, jossa on useampi reitti lähettäjältä vastaanottajalle. Verkkokerroksen tehtävänä on valita vaihtoehtoinen reitti, mikäli parhaassa mahdollisessa reitissä on ilmennyt vikaa. Kaikkien reititystietojen tallentamisesta huolehtii verkkokerros. [6, s. 43.]

#### 4.4 Application Support (APS) Sublayer

APS-alikerros, joka sijaitsee verkkokerroksen yläpuolella ymmärtää ohjelmia. Sen tärkeimpiin tehtäviin kuuluu

- suodattaa pois paketit, mitkä ovat menossa ei-rekisteröidyille päätelaitteille
- pakettien kuittaus
- paikallisen sidos-tilukon ylläpitäminen (eng. Binding table)
- paikallisen ryhmät-tilukon ylläpitäminen
- paikallisen osoitekartan ylläpitäminen.

APS:lla on tehtävänä suodattaa kaikki paketit pois, jotka on osoitettu sellaisille päätelaitteille, joita ei löydy solmuista. Myös paketit, jotka esiintyvät kahteen kertaa, suodattetaan pois.

APS:n tehtäviin kuuluu kuittausten tekeminen, kun paketti on päässyt lähettäjältä vastaanottajalle, mikäli lähettäjä tätä vaatii. Aina kuittaamalla jokaisen paketin jälkeen, mikäli paketti on tullut perille tai ei, saadaan taattua onnistunut tiedonsiirto.

APS myös ylläpitää erilaisia sovellustason taulukoita. Sidoksella tarkoitetaan, että yhdistetään kaksi tai useampi päätelaite solmujen avulla. Paikalliset ryhmät ovat satunnainen sovellus-kokoelma, joka sijaitsee solmuissa. Osoitekartassa on ZigBee-laitteiden 64-bittinen MAC-osoite sekä 16-bittinen likiverkko-osoite (eng. Personal area network). [5, s. 193.]

#### 4.5 Application Framework

Sovelluskehys tarjoaa kehyksen sen mukaan, mikä ohjelma pitää ajaa. Sovellustasossa määritellään solmuissa olevat ohjelmat. Yhdelle sensorille, joka mittaa lämpötilaa, kosteutta ja ilmanpainetta saattaa olla useampi sovellus näitä varten. [7.]

#### 4.6 Security Service Provider

Security Service provider hallitsee ZigBeeen tietoturvaan kuten 128-bittistä AES salausmenetelmää. Sen palveluja käyttää ZigBee device object, Application support sublayer ja verkkokerros. [3, s. 44.]

#### 4.7 ZigBee Device Object (ZDO)

ZDO:n vastuualueeseen kuuluu paikallinen sekä ilmaitse tapahtuva verkonhallinta. Se tarjoaa palveluja muiden solmujen ja palvelujen löytämiseen verkosta. Se vastaa suoraan solmujen tilasta. [3, s. 236.]

## 5 XBee-radiot ja antennit

### 5.1 XBee-radiot

XBee-radiot ovat ZigBee yhteensopivia radioita, joiden valmistajana toimii Digi International. XBee-radiot jaetaan karkeasti kahteen eri kategoriaan: Series 1:een ja Series 2:een. Series 1-kategorian radiot ovat enimmäkseen harrastetoimintaan, eivätkä ne tue kokonaan ZigBee-protokollaa toisin kuin Series 2 -luokka. Kategorioiden Series 1 ja Series 2 erot on tarkemmin selvitetty taulukossa 3. Kooltansa radiot ovat kuitenkin samankokoisia. [2.]

Taulukko 3. Series 1 ja Series 2-luokan radioiden erot. [3, s. 3.]

	Series 1	Series 2
<b>Tyypillinen kaupunki/sisätila kantama</b>	30 metriä	40 metriä
<b>Kantama kun näköyhteys</b>	100 metriä	120 metriä
<b>Lähetys/vastaanotto virta</b>	45/50 mA	40/40 mA
<b>Laiteohjelma</b>	802.15.4 point-to-point (pari)	ZB ZigBee Mesh
<b>Digitaaliset sisäänmeno/ulostulo nastat</b>	8	11
<b>Analogiset sisäänmeno nastat</b>	7	4
<b>Analogiset ulostulo nastat</b>	2	Ei yhtään
<b>Point-to-point (pari) ja Tähti topologiat</b>	Kyllä	Kyllä
<b>Mesh ja Puu topologiat</b>	Ei	Kyllä
<b>Yksi laiteohjelma kaikille</b>	Kyllä	Ei

Vaatii koordinaattorin	Ei	Kyllä
Point-to-point (pari) kokoonpano	Yksinkertainen	Määriteltävissä
Standardeihin perustuva verkkotyöskentely	Kyllä	Kyllä
Standardeihin perustuvat sovellukset	Ei	Kyllä
Piirisarjan valmistaja	Freescale	Ember



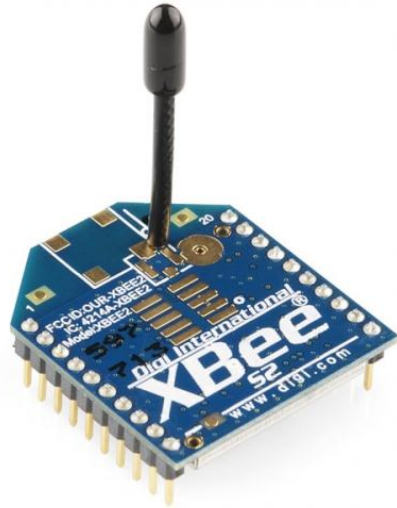
Kuva 9. Vasemmalla Series 1- ja oikealla Series 2 -luokan antenni.

## 5.2 Antennit

Koska Xbee-radiot lähettävät ja vastaanottavat informaatiota, tarvitsevat ne sen takia myös antennin. Antenneja on monenlaisia, ja kussakin on hyviä sekä huonoja puolia. Alla on esitelty neljä käytetyintä.

### 5.2.1 Lanka- tai piiska-antenni

Lanka- tai piiska-antenni tarjoaa kaikkein yksinkertaisimman tavan signaalin lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Suuntaamattomana antennina se säteilee joka suuntaan, ja näin sen maksimi kantama on lähes sama kaikkialle, kunhan antenni on suorassa ja kohtisuorassa moduulia vasten.



Kuva 10. Piiska-antenni

### 5.2.2 Siruantenni

Siruantenni (eng. Chip antenna) on nimensä mukaan vain pieni, litteä ja keraaminen siru, joka on kiinni Xbee-moduulissa (kuvassa 11 turkoosina). Hyvinä puolina siruantennissa on, että se on erittäin pieni ja jämäkkä. Niinpä siruantennilla varustetun Xbeen saa laitettua ahtaisiin tiloihin ja paikkoihin, missä lanka- tai piiska-antenni saattaisi hajota. Siruantennissa säteilykuviio on kuitenkin kardiodidin, eli sydämen muotoinen. Eli se ei säteile tasaisesti joka suuntaan, niin kuin piiska-antenni. [3, s. 4.]



Kuva 11. Siruantenni.

### 5.2.3 PCB-antenni

PCB eli Piirilevyantenni (eng. Printed circuit board) on kiinni Xbee-moduulissa.



Se tarjoaa samoja etuja kuin siruantenni, mutta on siruantennia edullisempi vaihtoehto.



Kuva 12. PCB-antenni.

#### 5.2.4 U.FL -ja RPSMA -liittimet

Kaikkien edellä olevien antennien lisäksi XBee tarjoaa myös piirejä, joissa on liitin ulkoisia antennejä varten. Erityistarkoituksiin käytettävillä antennilla, joissa on tietty säteilykuvio, kuten suuren vahvistuksen omaavilla antennilla, voidaan signaali lähettää voimakkaampana tiettyyn suuntaan, jolloin signaalin kantama pitenee.

U.FL on näistä kahdesta liitintyyppistä pienin. U.FL on miniatyyrinen koaksiaalinen RF-liitin, joka on tarkoitettu korkeille signaaleille aina 6 GHz:iin asti. U.FL-liitin on loistava vaihtoehto silloin, kun XBee-radio on esimerkiksi paksun metallikotelon ympäröimä, jolloin normaalin piiska-antennin signaali heikkenee niin paljon, että se ei pysty kommunikoimaan muiden XBee-radioiden kanssa. Tässä tilanteessa U.FL-liittimeen voidaan yhdistää antenni ja vetää se pienin reiän kautta kotelon ulkopuolelle.

RPSMA-liitin on kokonsa puolesta paljon suurempi kuin U.FL-liitin. Näillä liittimillä on kuitenkin sama toimintaperiaate, mutta yleensä U.FL-liittimeen antennia ei kiinnitetä suoraan, vaan antennin ja XBee-moduulin välissä on johto. RPSMA-liitin taas mahdollistaa kokonsa puolesta sen, että siihen voidaan kiinnittää antenni suoraan. [3, s. 4.]



Kuva 13. Vasemmalla U.FL-liitin ja oikealla RPSMA-liitin.

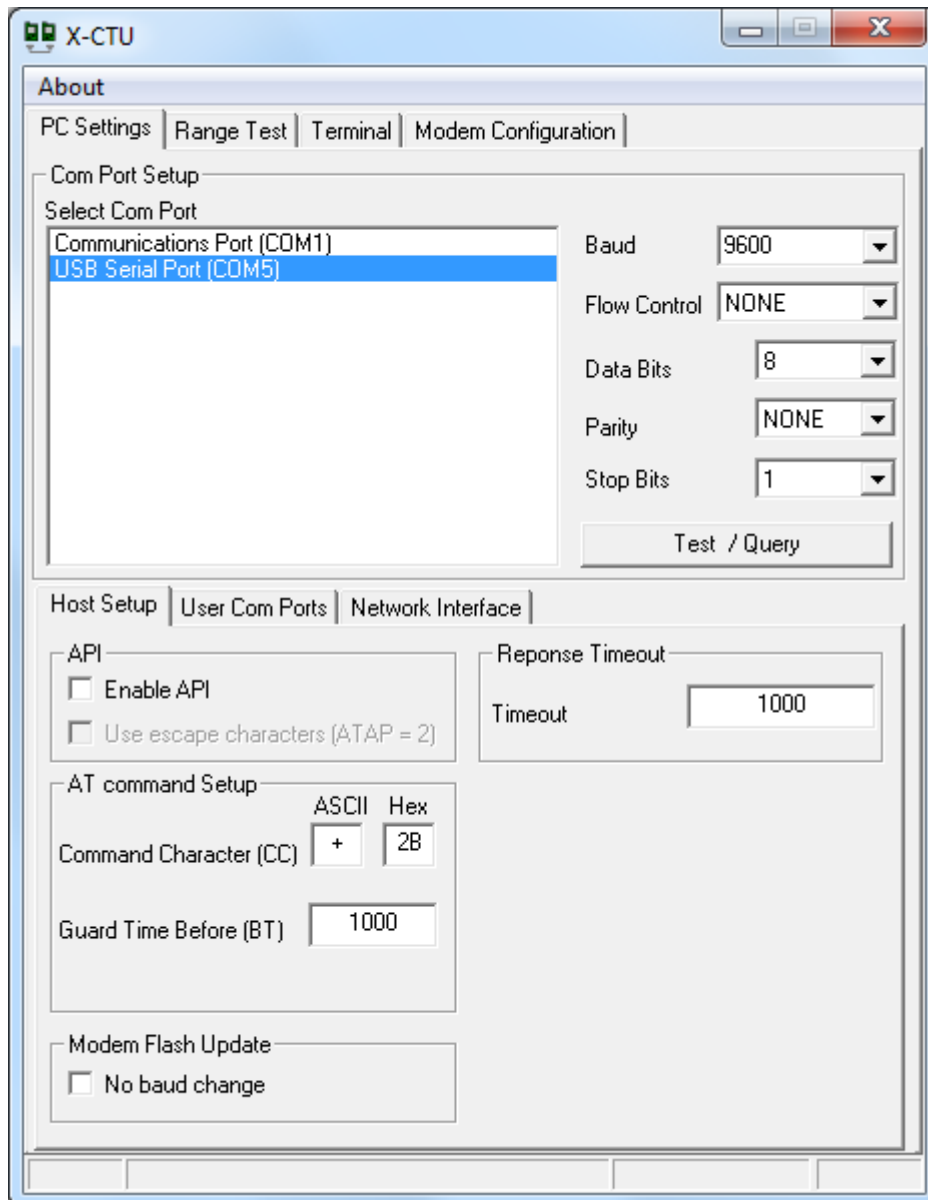
## 6 ZigBee-verkon toteutus

ZigBee-verkon rakentaminen tehtiin käyttämällä Robert Faludin kirjaa Building Wireless Sensor Networks. Tämä kirja antaa erittäin hyvät ohjeet aloittelijoille siitä, kuinka ZigBee-verkon saa rakennettua.

### 6.1 X-CTU

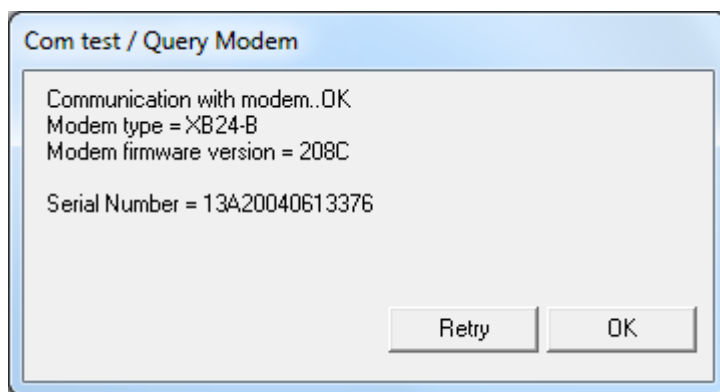
X-CTU on Digi Internationalin kehittämä ohjelma ZigBee-laitteita varten. Ohjelma on pääasiassa kehitetty laiteohjelmia (eng. Firmware) varten, mutta se tarjoaa myös paljon muuta. Toimiakseen XBee-radion kanssa X-CTU vaatii kuitenkin ajurit. Ensimmäinen on USB-ajuri ja toinen on virtuaalista COM-porttia varten, mikä saa USB-portin näyttämään fyysiseltä sarjaportilta. Digi Internationalin sivuilla sanotaan, että Windows 7:n pitäisi asentaa ajurit automaattisesti, kun yhdistää Xbeen USB-kaapelilla, mutta ainakin tässä työssä ajurien erillinen asennus vaadittiin. [1.]

Ajurien asennus lisää Com-portti listaan vaihtoehdon USB Serial Port (COM5), joka on kuvassa valittuna. Mitään asetuksia ei PC Settings -välilehdelle tarvitse tehdä, sillä kaikki on jo valmiiksi määriteltyinä.



Kuva 14. X-CTU:n ikkuna, mistä valitaan oikea COM-portti.

XBee-radion toimivuuden saa varmistettua painamalla Test / Query-painiketta. Radion toimiessa esiin tulee seuraava ikkuna, mistä käy ilmi modeemin tyyppi sekä sen laite-ohjelma ja sarjanumero (kuva 15).

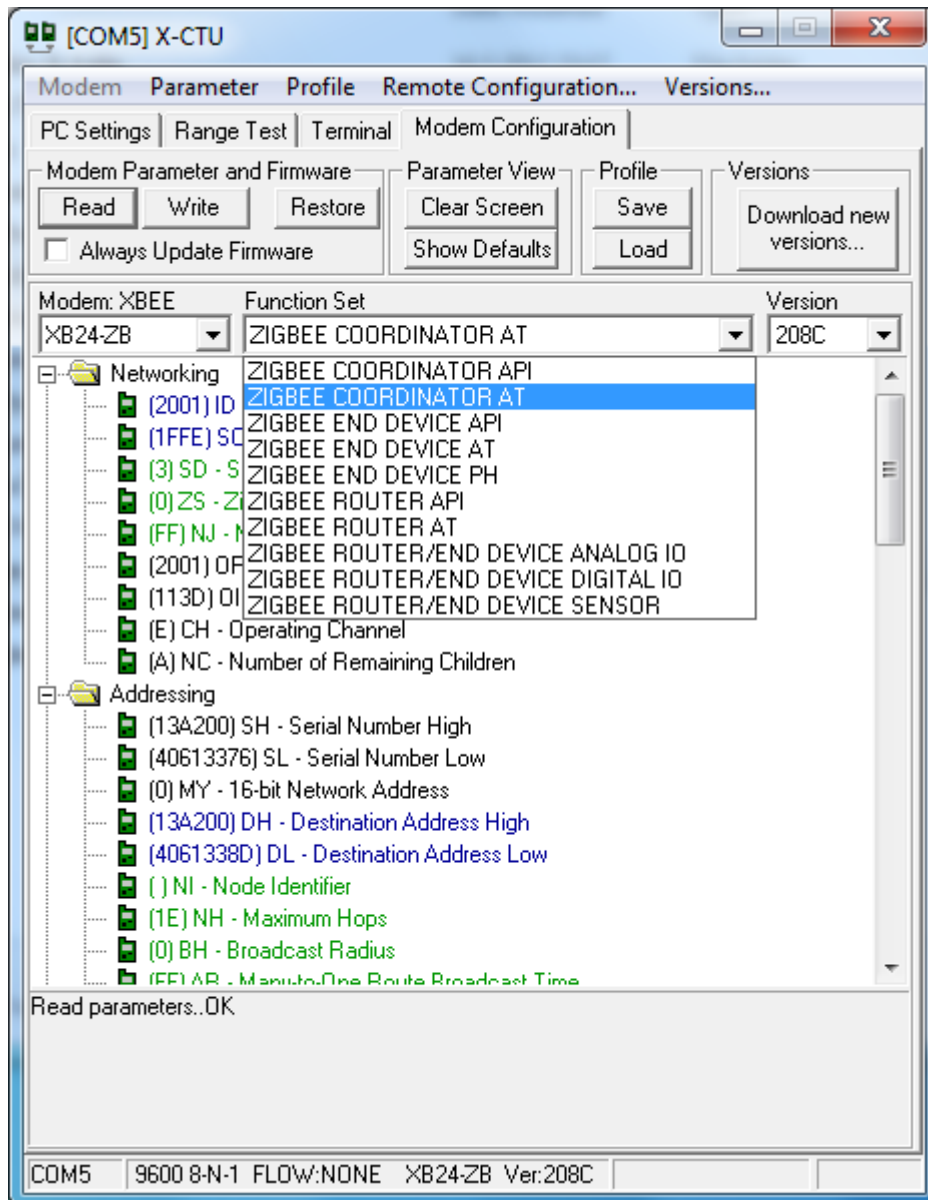


Kuva 15. Ikkuna, joka aukeaa, kun Test / Query on onnistunut.

Modem-configuration-välilehdessä (kuva 16) saa tietokoneeseen kytketyn ZigBee-radion tiedot painamalla Read-painiketta. Painikkeiden alapuolelle vasemman puoleiseen tiputusvalikkoon tulee modeemi tyypiksi XB24-ZB, joka kertoo, että käytössä oleva laite on XBee ZB-moduuli. Modeemityyppejä löytyy erilaisia eri moduuleihin. XBee ZB-moduulissa hyvää on se, että se voidaan päivittää modeemityyppeihin XB24-B tai XB24-SE.

Keskimmäisen pudotusvalikon Function Set avulla määritellään XBee-radion käyttäytymistä. Kyseisessä työssä käytettiin kahta radiota, joiden välille muodostettiin verkko. Käytettäessä vain kahta XBee-radiota, niin näistä toisen on pakko olla koordinaattori. Toinen voi olla joko reititin tai päätelaite. Työssä päädyttiin siihen, että tämä toinen on reititin. Function Set -tiputusvalikosta saa myös valittua käytetäänkö koordinaattorille ja reitittimelle AT-moodia vai API-moodia. AT-moodissa, eli niin sanotussa läpinäkyvässä tilassa (eng. Transparent mode) kaikki ilmaitse vastaanotettu data, minkä moduuli vastaanottaa, lähetetään suoraan eteenpäin mikropiirin kautta. [5.]

Version-tiputusvalikosta saadaan valittua uusin laiteohjelma riippuen siitä, minkä valitsee Function Set -valikosta. Mikäli ei ole varma, onko uusin versio kyseiseen laitteeseen, kannattaa painaa Download new versions -painiketta, jolloin X-CTU lataa uusimmat versiot verkosta ja lisää ne Version-pudotusvalikkoon.



Kuva 16. Ikkuna, jossa voidaan määrittellä XBee-radion käyttäytymistä.

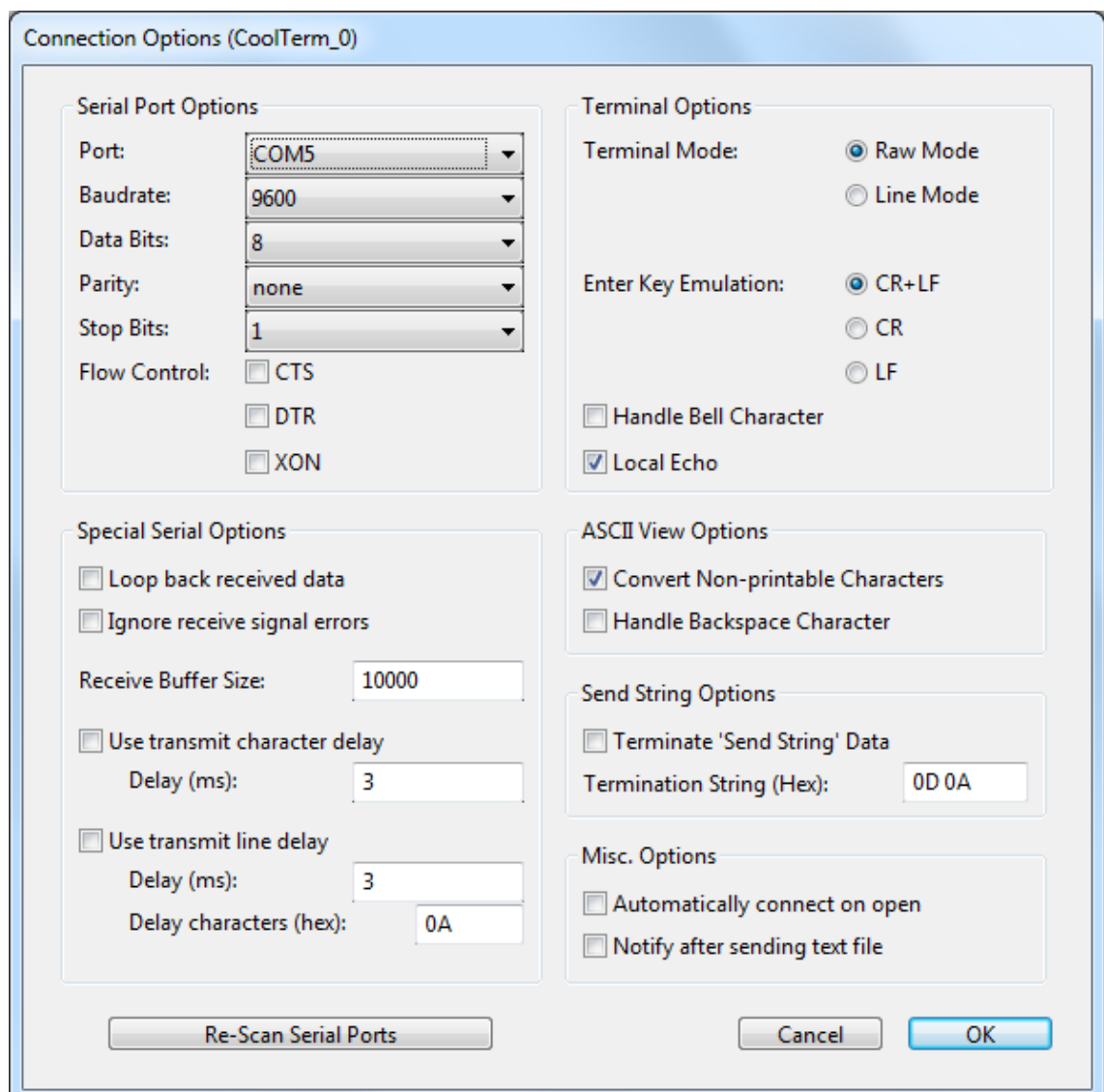
Kun nämä asetukset on käyty läpi ja halutut muutokset on tehty, voi asetukset tallentaa ZigBee-radioon Write-painikkeella. Tällöin seuraavan kerran, kun käynnistää ZigBee-radion, se muistaa kaikki tehdyt muutokset.

## 6.2 Terminaali-ohjelma

Jokaisessa XBee-radiossa on pieni mikrokontrolleri, joka ajaa laiteohjelmaa. Laiteohjelmaan tehdyt muutokset vaikuttavat siihen, kuinka XBee-radio käyttäytyy. Muutoksia voidaan tehdä laiteohjelmaan X-CTU:n avulla, mikäli radio on AT-moodissa. Aina kui-

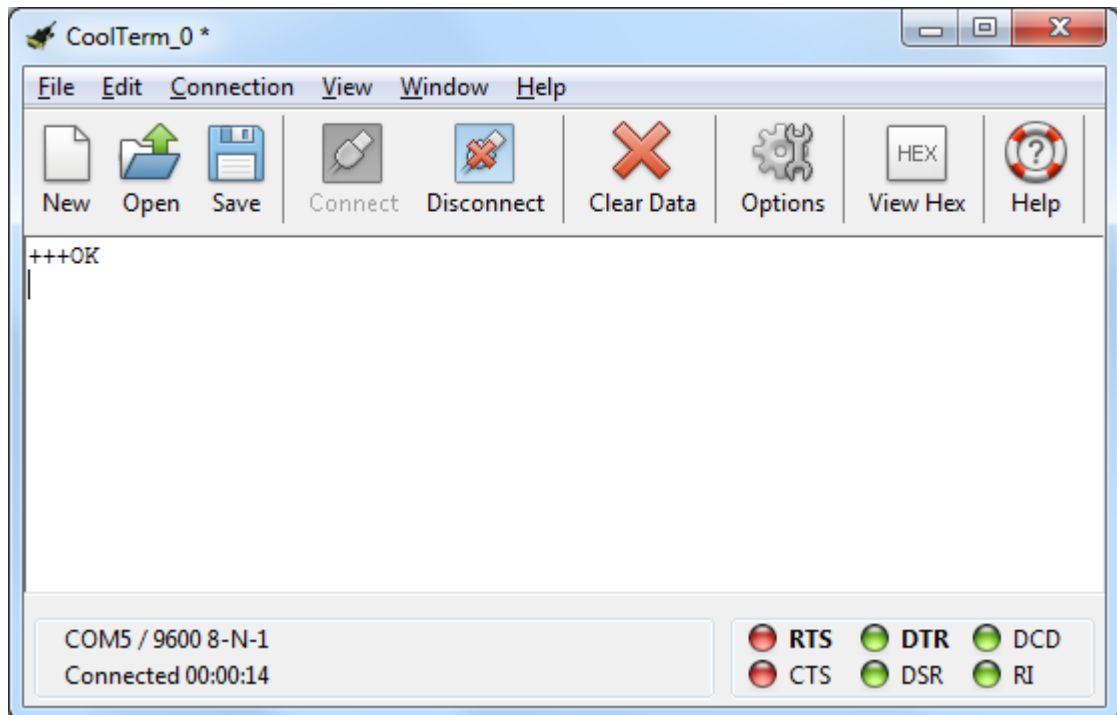
tenkaan ei ole mahdollista tehdä muutoksia XBeehen X-CTU:n graafisen käyttöliittymän avulla. Tällöin muutokset voidaan tehdä sarjaterminaali-ohjelmalla (eng. Serial Terminal Program), joka on tarkoitettu pääteyhteyksiin sarjaportin yli. Terminaali-ohjelmia löytyy paljon, ja ne eivät poikkea merkittävästi toisistaan. Terminaali-ohjelmia, joilla laiteohjelman muokkaaminen onnistuu varmasti, ovat CoolTerm, HyperTerminal, Tera Term ja Zterm.

CoolTermin asetuksista pitää valita oikea portti, sekä Enter Key Emulation: CR+LF. Lisäksi on hyvä laittaa täppä kohtaan Local Echo, jolloin saa kaiun siitä, mitä on kirjoittanut.



Kuva 17. CoolTermin asetusten määrittäminen.

Varmistuksen XBee-radion toimivuudelle saa kirjoittamalla kolme +-merkkiä peräkkäin terminaali-ikkunassa ja odottamalla hetken. Mikäli vastaukseksi tulee OK, niin kaikki toimii.



Kuva 18. Yhteyden testaus XBee-radioon. Samalla komennolla mennään perustilasta komentotilaan.

### 6.3 XBee-radion konfiguroiminen

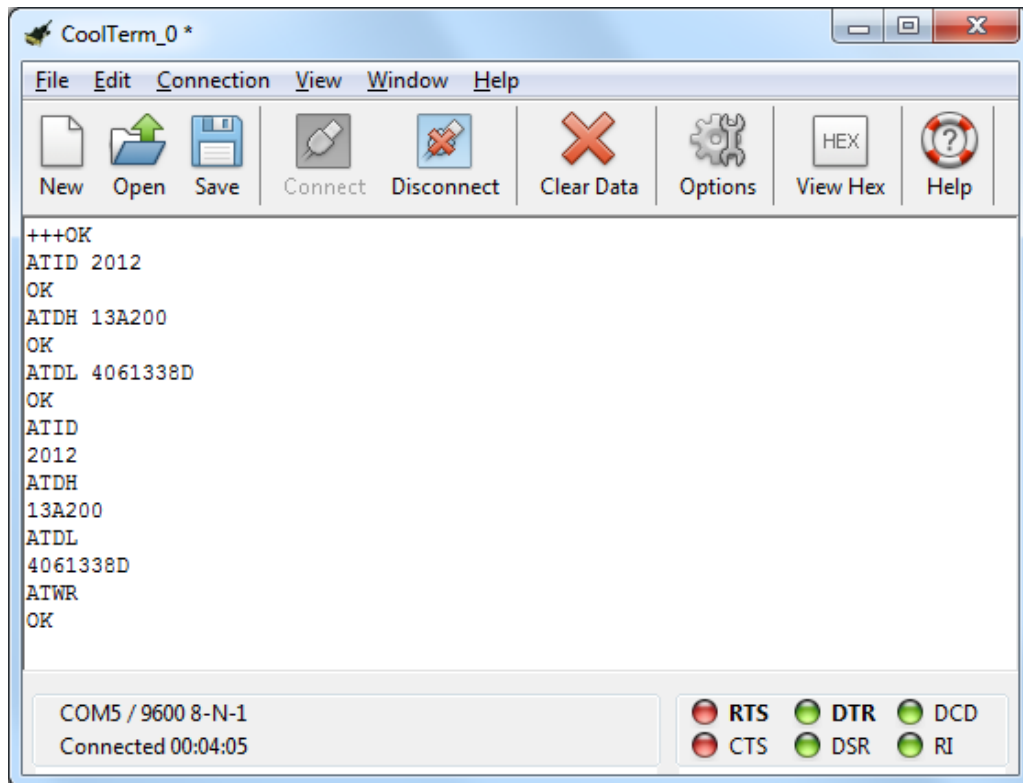
AT-moodissa oleva XBee-radio voi olla kahdessa eri tilassa: joko se on läpinäkyvässä tilassa tai komentotilassa (eng. Command mode). Läpinäkyvä tila on perustila, jossa radio lähettää informaatiota heti, kun se on vastaanottanutkin. Informaatio myös lähetetään samasta portista, kuin mihin se on tullutkin. Tätä tilaa käytetäänkin, kun halutaan, että tieto kulkee radion kautta toiselle.

Komentotilaa käytetään, kun keskustellaan radion kanssa. Tässä tapauksessa kyseinen radio ei lähetä informaatiota suoraan eteenpäin kuten perustilassa, vaan radiolta voidaan tiedustella sen asetuksista, ja radiota voidaan konfiguroida. Komentotilaan päästää kirjoittamalla +++. Seuraavat komennot toimivat komentotilassa:

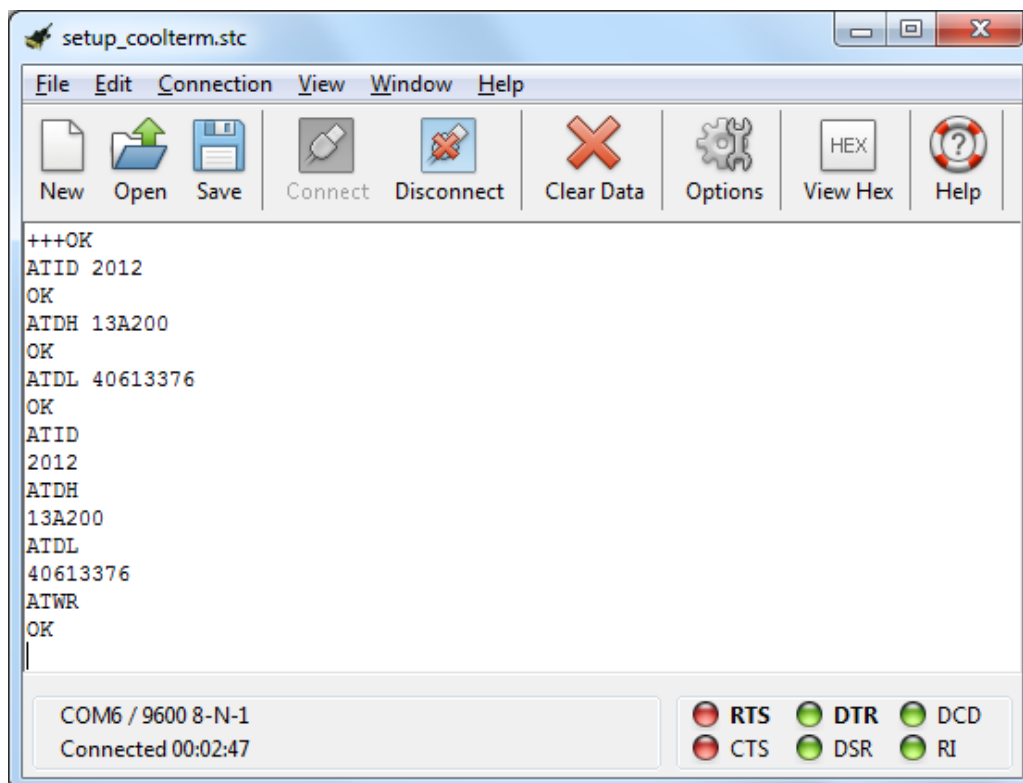
- AT-komento varmistaa, että radio on paikalla, mikäli se on, niin vastaus on OK. Mikäli mitään vastausta ei tule se tarkoittaa, että radio ei ole komentotilassa. Yleinen syy tähän on, että mitään komentoa ei ole annettu viimeiseen 10 sekuntiin, jolloin radio on siirtynyt takaisin perustilaan.
- ATID-komennolla saadaan näkyviin likiverkko-osoite (PAN ID), joka kyseisellä radiolla on. ATID-komennolla voidaan myös määrittellä likiverkko-osoite, heksadesimaalein väliltä 0000-FFFF, esimerkiksi ATID 2012.
- ATSH/ATSL-komennot kertovat XBee-radion yksikäsitteisen 64-bittisen osoitteen, mitä ei löydy miltään toiselta radiolta. Osoite on jaettu high ja low osaan, sillä rekisteri ei ole tarpeeksi iso, jotta osoitteen voisi näyttää yhdellä komennolla. Tätä osoitetta ei voi muuttaa.
- ATDH/ATDL-komennot määrittelet sen radion, jonka kanssa keskustellaan. Arvot ovat muutettavissa.
- ATCN-komento palauttaa radion komentotilasta takaisin perustilaan. Toinen vaihtoehto on olla komentotilassa tekemättä mitään 10 sekuntiin, mikä ajaa saman asian.
- ATWR-komento tallentaa kaikki tehdyt muutokset, joten seuraavalla kerralla radiota käynnistettäessä kaikki muutokset myös löytyvät.
- ATMY-komento näyttää 16-bittisen osoitteen, minkä koordinaattori on määrittänyt. [3, s. 48.]

Jotta kaksi XBee-radiota voi keskustella toistensa kanssa, niiden pitää olla samassa verkossa, eli likiverkko-osoite pitää olla sama. Lisäksi myös molemmilla pitää olla selvillä toisen 64-bittinen osoite, minkä saa selville ATSH/ATSL-komennoilla tai XBee-moduulista, mihin osoite on painettu. Kun nämä osoitteet on selvillä, voidaan reititin ja koordinaattori konfiguroida seuraavien kuvien mukaisesti.





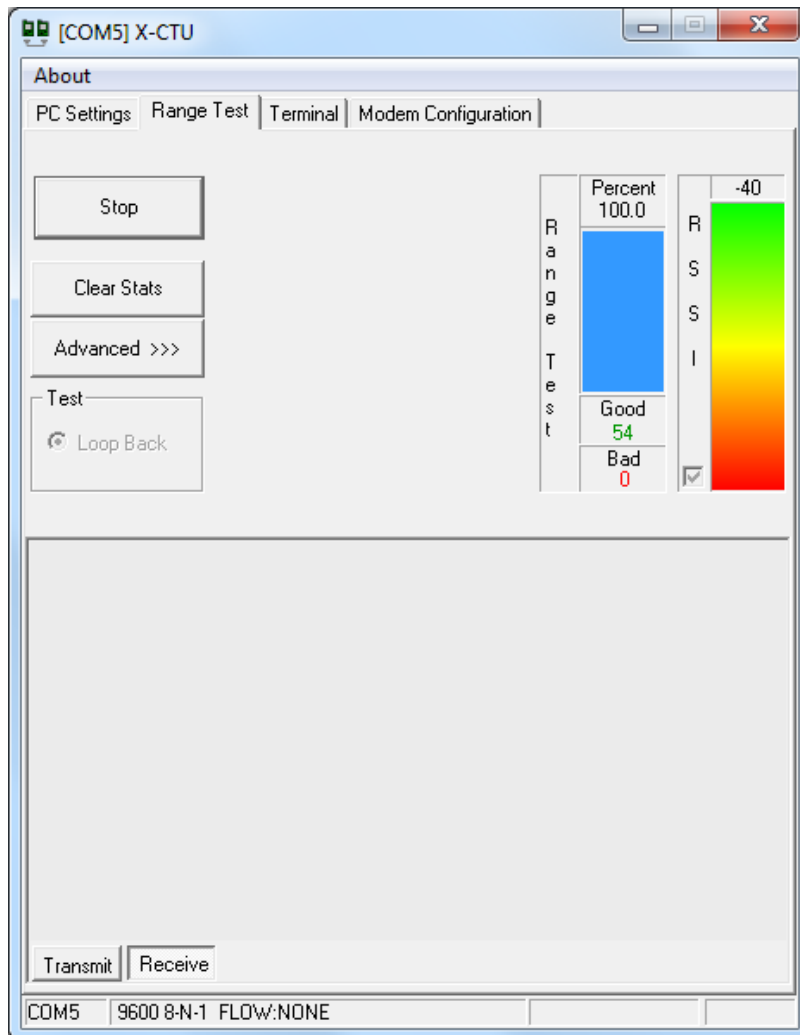
Kuva 19. Koordinaattorin asetusten määrittäminen.



Kuva 20. Reitittimen asetusten määrittäminen.

Nyt reititin ja koordinaattori on liitetty samaan verkkoon, ja ne tunnistavat toisensa. Yhteyden toimivuuden pystyy helpoiten kokeilemaan kirjoittamalla mitä tahansa terminaali-ikkunaan, kun kummatkin ovat perustilassa. Heti ensimmäinen näppäinpainallus pitäisi myös näkyä vastapuolen terminaali-ikkunassa.

X-CTU tarjoaa loistavan työkalun nimeltä Range Test, jolla pystyy lähettämään dataa XBee-radiolta toiselle, mikä vastaanotettuaan lähettää datan alkuperäiselle lähettäjälle. Tällä voidaan varmistaa, että yhteys toimii radioiden välillä. RSSI (eng. Received signal strength indicator) kuvastaa saapuvan signaalin vahvuutta, joka tässä tapauksessa on -40 dBm.



Kuva 21. Range Test.

## 7 Yhteenveto

Tässä työssä annettiin hyvät perustiedot ZigBee-standardista, joka vielä on suhteellisen tuntematon. ZigBee kuitenkin kasvattaa tunnettavuuttaan koko ajan standardina ja siitä tullaan varmasti näkemään monia eri sovelluksia tulevaisuudessa.

Työssä toteutettiin ZigBee-verkko käyttämällä kahta XBee-radiota. Verkon rakentaminen onnistui yllättävänkin helposti ja kommunikointi toimi hyvin radioiden välillä. Nämä kaksi radiota antoivat esimakua siitä, minkäläinen ZigBee-verkko on ja millä tavalla XBee-radioiden asetuksia voi muokata.

Tutkimusta olisi voitu jatkaa ostamalla edistyksellisen piirin sekä sensoreita. Olemassa on paljon kehittyneitä mikrokontrollerijärjestelmiä kuten Arduino. Arduino-piiri pystyy havainnoimaan ympäristöä siihen kiinnitettyjen erilaisten sensorien avulla. Lisäksi Arduino pystyy ohjaamaan valoja, moottoreita sekä muita yhteensopivia sähkölaitteita.

## Lähteet

- 1 Digi. How do I install the USB drivers for a USB Interface Board in a Windows Vista or Windows 7 environment? Verkkodokumentti.  
<<http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=3214>>.
- 2 Digi. The Major Differences in the XBee Series 1 vs. the XBee Series 2. Verkkodokumentti. <<http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2213>>. Luettu 20.3.2012.
- 3 Faludi, Robert. 2011. Building Wireless Sensor Networks. O'Reilly Media, Inc.
- 4 Farnell. ZigBee. Verkkodokumentti.  
<[uk.farnell.com/images/en/ede/comm/.../23.Zigbee.ppt](http://uk.farnell.com/images/en/ede/comm/.../23.Zigbee.ppt)>. Luettu 13.3.2012.
- 5 Foster, John. 2011. XBee Cookbook Issue 1.4 for Series 1 (Freescale) with 802.15.4 Firmware. Verkkodokumentti.  
<<http://www.jsjf.demon.co.uk/xbee/xbee.pdf>>.
- 6 Gislason, Drew. 2008. ZigBee Wireless Networking. Newnes.
- 7 Jennic. ZigBee –elearning. Verkkodokumentti.  
<<http://www.jennic.com/elearning/zigbee/index.htm>>. Luettu 20.4.2012.
- 8 Savonia Ammattikorkeakoulu. ZigBee. Verkkodokumentti.  
<[http://wirelessplatform.savonia.fi/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=5&id=21&Itemid=41](http://wirelessplatform.savonia.fi/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=5&id=21&Itemid=41)>. Luettu 20.4.2012.
- 9 ZigBee Alliance. ZigBee Technology. Verkkodokumentti.  
<<http://zigbee.org/About/AboutTechnology/ZigBeeTechnology.aspx>>. Luettu 27.2.2012.
- 10 Wikipedia. IEEE. Verkkodokumentti. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/IEEE>>. Päivitetty 20.2.2012. Luettu 27.2.2012.
- 11 Wikipedia. IEEE 802.15.4. Verkkodokumentti.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15.4](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4)>. Päivitetty 30.3.2012. Luettu 1.4.2012.
- 12 Wikipedia. ISM band. Verkkodokumentti.  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/ISM\\_band](http://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band)>. Päivitetty 11.3.2012. Luettu 13.3.2012.
- 13 Wikipedia. ZigBee. Verkkodokumentti. <<http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>>. Päivitetty 20.4.2012. Luettu 25.4.2012.