

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Elektroniikka

Jukka Ruuska

ZigBee-langaton tiedonsiirtoympäristö

Insinööriyö 28.5.2009

Ohjaaja: yliopettaja Matti Fischer
Ohjaava opettaja: yliopettaja Matti Fischer

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jukka Ruuska ZigBee-langaton tiedonsiirtoympäristö 45 sivua 28.5.2009
Koulutusohjelma	elektroniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	yliopettaja Matti Fischer yliopettaja Matti Fischer
<p>Insinööriyön tavoitteena oli työstää Metropolia Ammattikorkeakoulun elektroniikan koulutusohjelman kursseille ja niiden laboratoriotunneille opetusmateriaalia opetuskäyttöön. Tarkoituksena oli kehittää sovellus langatonta tiedonsiirtoympäristöä hyväksikäyttäen. Tämän lisäksi sovelluksesta tuli kirjoittaa opiskelijan ohjeet, joiden avulla opiskelijat voisivat itsenäisesti käyttää järjestelmää.</p> <p>Lopputyössä oli tavoitteena tutustua IEEE 802.15.4- ja ZigBee-standardeihin. Työ painottui aluksi kirjallisuuden ja mahdollisten laitesovellusten etsimiseen. Koska standardit ovat varsin uusia, kirjallisuutta niin IEEE 802.15.4 -standardista kuin myös ZigBee-sovelluksista on vähän.</p> <p>Ensimmäisenä laitesovelluksista tutustuttiin Microchipin valmistama ZigBee-esityslevypakkaukseen. Laitesarjapakkaus sisälsi kaksi esityslevyä, joihin kumpaankin pystyy liittämään Zigbee-radiovastaanotin/lähetin-tytärlevyt, USB-piuhalla tietokoneeseen kytkettävän langattoman verkkoanalysointilevyn ja ohjelmiston tukemaan paketin kokonaisuutta. Esityslevyihin oli integroitu mikroprosessori ja lämpöanturi helpottamaan sovellusten esittämistä. Laitesovelluksesta luovuttiin, koska katsottiin, ettei se yksilöitynyt oppilaitoksen tarvitsemaan opetuskäyttöön. Sen tilalle valittiin XBee-lähetin/vastaanotin-moduuli, jonka tarjoamat sovellusratkaisut olivat lähempänä oppilaitoksen hakemaa opetuslinjaa.</p> <p>Tiedonsiirtoympäristö toteutettiin XBee-moduulien avulla siten, että yhdestä moduulista luotiin koordinaattorilaite ja kahdesta muusta moduulista päätelaitteet eli verkosta luotiin kolmen laitteen muodostama ns. tähtiverkko. Toimintaa ohjattiin X-CTU-tietokoneohjelman avulla niin AT-komennoilla kuin myös ohjelman oman graafisen käyttöliittymän avulla.</p> <p>A/D-muunnoksen toteuttaminen lopputyössä jäi esimerkkiasteelle, koska ensimmäisten käyttöönotettuiden moduulien laiteohjelmistot eivät tukeneet A/D-muunnosta eikä käytännön kokeilu siksi onnistunut.</p>	
Hakusanat	ZigBee, XBee, langaton tiedonsiirtoympäristö

Author	Jukka Ruuska
Title	ZigBee-wireless data communication environment
Number of Pages	45
Date	28 May 2009
Degree Programme	Electronics Engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Matti Fischer, Principal Lecturer Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to generate teaching material for the institute's courses and for the laboratory classes. The objective was to develop an application using a wireless data communication environment. In addition, a set of application instructions for students were to be written, which would allow students to use the system independently.</p> <p>The goal of the final year project was to become acquainted with the IEEE 802.15.4 and the ZigBee standards. The project initially focused on searching for literature and the potential device applications. Since the standards are relatively new, the amount of literature found concerning the IEEE 802.15.4 standard as well as the ZigBee applications was limited.</p> <p>The first device application that was looked into was Microchip's ZigBee development tool kit. The tool kit contained two demonstration boards each able to connect to the ZigBee radio receiver/transmitter board. The demonstration boards have a microprocessor and a heat sensor integrated in order to facilitate the presentation of applications. The device application was abandoned because it did not match with the institute's educational purposes. Instead a XBee-radio receiver/ transmitter-module was chosen, which provides application solutions that are closer to the institute's educational needs.</p> <p>The wireless data communication environment was implemented with the XBee modules and X-CTU computer software by configuring one of the modules to be a coordinator device, and the other two modules to be slave devices. The environment created by these three modules is called a star topology network. It was controlled with the X-CTU software's graphical user interface and its AT-commands.</p> <p>The implementation of an A/D-conversion remained at a theoretical level, since the firmwares of the first introduction modules did not support A/D-conversion and therefore the results of practical experiments were not successful.</p>	
Keywords	ZigBee, XBee, wireless data communication environment

Sisällys

Sisällys.....	4
1 Johdanto.....	6
2 ZigBee ja IEEE 802.15.4.....	7
2.1 IEEE 802.15.4.....	7
2.1.1 IEEE 802.15.4 -standardin kerrosten rakenne.....	7
2.1.2 Fyysinen radiokerros.....	8
2.1.3 Siirtoyhteyskerros.....	10
2.2 ZigBee.....	11
2.2.1 Verkon osat.....	11
2.2.2 Verkkomallit.....	11
2.2.3 Verkkoprotokollat.....	15
2.2.4 Tietoturva.....	15
3 XBee-lähetin-vastaanotinmoduuli.....	17
3.1 XBee-moduulin spesifikaatiot.....	17
3.2 XBee-moduulin toiminta ja käytettävyys.....	19
3.2.1 Ohjelmistopuskurointi.....	20
3.2.2 Moduulin osoittaminen ja komentorakenne.....	21
4 X-CTU-käyttöliittymä.....	23
4.1 X-CTU-käyttöliittymän toiminnot.....	23
4.1.1 Tietokoneasetukset (PC Settings).....	23
4.1.2 Etäisyystesti (Range Test).....	26
4.1.3 Terminaali-ohjelma.....	28
4.1.4 Modeemiasetukset (Modem Configuration).....	29
5 ZigBee-verkon toteuttaminen Xbee-moduuleilla.....	32
5.1 USB-kytkentäalusta.....	32
5.2 Verkon toteuttaminen.....	33
5.2.1 AT-komennot.....	33
5.2.1.1 Koordinaattorilaitteen asetukset AT-komennoilla.....	34

5.2.1.1 Päätelaitteen asetukset AT-komennoilla	36
5.2.2 Toteutus graafisella käyttöliittymällä	39
5.3 A/D-muunnoksen toteuttaminen	43
5.3.1 AT-komennot	43
6 Yhteenveto	44
7 Lähteet	45

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on työstää Metropolia Ammattikorkeakoulun elektroniikan koulutusohjelman kursseille ja niiden laboratoriotunneille opetusmateriaalia opetuskäyttöön. Tavoitteena on myös kehittää sovellus langatonta tiedonsiirtoympäristöä hyväksikäyttäen. Tämän lisäksi sovelluksesta tuli kirjoittaa opiskelijan ohjeet, joiden avulla opiskelijat voisivat itsenäisesti käyttää järjestelmää.

Vuonna 2003 valmistuneet IEEE 802.15.4- ja ZigBee-standardit tarjoavat protokollat vähän virtaa kuluttavalle langattomalle verkolle ja tämän päälle rakennetulle arkkitehtuurille. Siinä, missä IEEE 802.15.4 -standardi asettaa protokollat lyhyen kantaman langattomaan tiedonsiirtoon, niin ZigBee-standardi tarjoaa laitteisto- ja verkkotopologiasovellutukset.

2 ZigBee ja IEEE 802.15.4

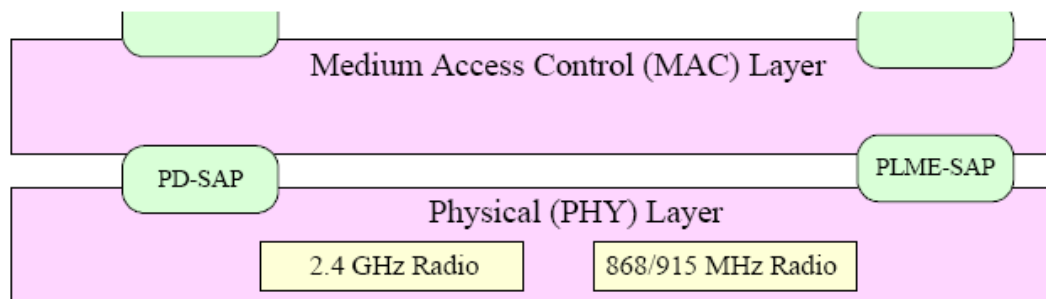
ZigBee on tunnetumpi nimi kansainvälisen tekniikan alan järjestön IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) IEEE 802.15.4 -standardille. Siinä missä IEEE 802.15.4 on standardi vähän virtaa kuluttavalle henkilökohtaiselle verkolle, niin ZigBee on arkkitehtuuri, joka on rakennettu sen päälle. IEEE 802.15.4 -standardia alettiin valmistella 1990-luvun lopulla, ja se standardoitiin toukokuussa 2003. ZigBee-standardin ympärille muodostui niin sanottu ZigBee-ryhmittymä, jonka perustajia olivat Honeywell, Invensys, Motorola, Mitsubishi, Phillips ja Samsung. ZigBee-standardi valmistui joulukuussa 2003, ja Motorola esitteli ensimmäisiä prototyyppejään kesäkuussa 2004. [1, s. 50; 2, s. 64]

2.1 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 -standardi on rakennettu tarjoamaan fyysisen radion ja siirtoyhteyden protokollat lyhyen kantaman langattomaan tiedonsiirtoon. Se on ratkaisumalli matalan siirtonopeuden omaavalle langattomalle henkilökohtaiselle verkolle LR-WPAN:lle (Low Rate Wireless Personal Area Network) . IEEE 802.15.4 -standardi on suunniteltu olemaan yksinkertainen vähän virtaa kuluttaville laitteille ja pienille langattomille verkoille. [3, s.109-110]

2.1.1 IEEE 802.15.4 -standardin kerrosten rakenne

IEEE 802.15.4 -standardin rakenne jakautuu fyysiseen radiokerrokseen (PHY, Physical) sekä siirtoyhteyskerrokseen (MAC, Medium Access Controll) kuvan 1 mukaisesti. Siirtoyhteyskerros on rakennettu fyysisen radiokerroksen päälle. Siinä, missä fyysinen radiokerros määrittää, kuinka siirtotietä käytetään tiedonsiirrossa, niin siirtoyhteyskerros määrittää, kuinka käytettävään siirtotiehen kytkeydytään. [4, s. 8]

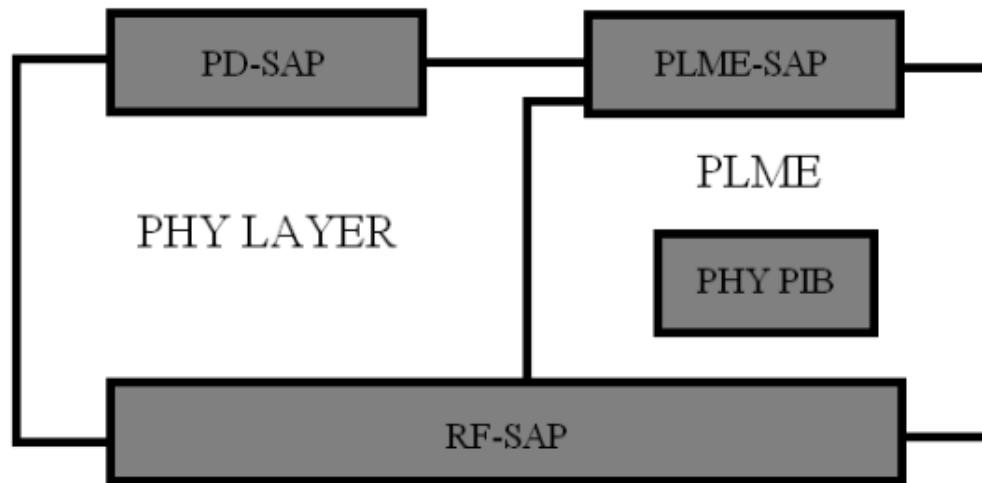


Kuva 1. IEEE 802.15.4 -standardin kerrokset: siirtoyhteyskerros ja fyysinen radiokerros, jotka ovat yhteydessä SAP-yhteysväylien kautta.

2.1.2 Fyysinen radiokerros

IEEE 802.15.4 -standardi määrittelee kaksi fyysistä radiokerrosta, jotka käyttävät kolmea taajuusalueita ja 27:ää kanavaa. Toinen kerroksista määrittelee 868/915 MHz:n taajuusalueet ja toinen 2,4 GHz:n taajuusalueen. 915 MHz:n taajuusalue on käytössä vain Yhdysvalloissa, jossa sillä on käytössä 10 kanavaa ja siirtonopeus on 40 kbps. Vastaava Euroopan taajuusalue on 868 MHz sillä eroavaisuudella, että käytössä on vain yksi kanava ja siirtonopeus on 20 kbps. 2,4 GHz:n taajuusalue on käytössä maailmanlaajuisesti. Se tarjoaa 16 kanavaa käyttöönsä, ja siirtonopeus on 250 kbps. [3, s. 112-113; 4, s. 9-10]

Fyysisen radiokerroksen tehtävänä on tarjota liitännät siirtoyhteyskerroksen ja fyysisten radiokanavien kesken. Tämä toteutuu kuvan 2 mukaisesti kolmen liitoskerroksen avulla, joita kutsutaan SAP-yhteysväyliksi (SAP, Service Access Point). Fyysisen radiokerroksen toimintaa ohjaa siirtoyhteyskerros. [4, s. 10-11]



Kuva 2. Fyysisen radiokerroksen rakenne: PLME-rajapinta, PIB-informaatiokanta, SAP-yhteysväylät siirtoyhteyskerrokseen sekä radiotaajuus-SAP.

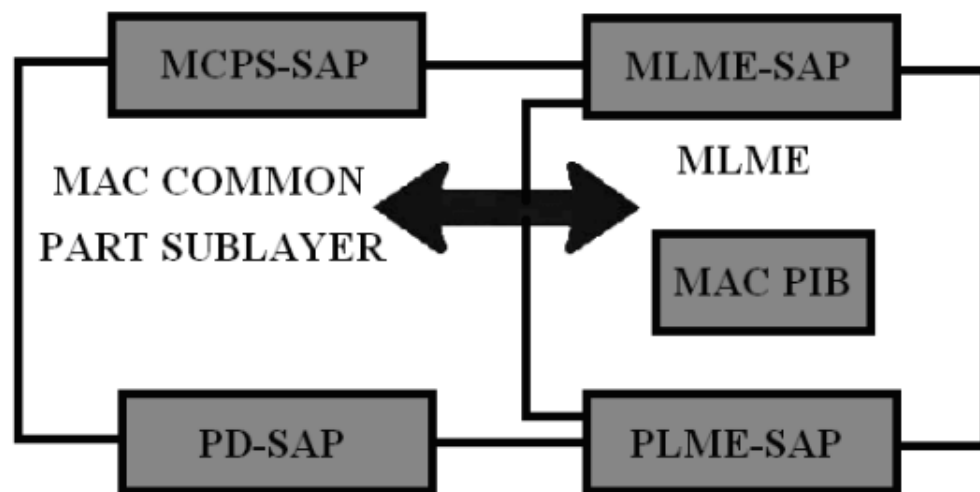
Radiotaajuus-SAP (Radio Frequency Service Access Point) on toteutettu radiotekniikkalaitteistolla ja -ohjelmistolla. PD-SAP (PHY Data Service Access Point) ja PLME-SAP (PHY Layer Management Entity – Service Access Point) on toteutettu pelkästään logiikkatasolla, ja ne tarjoavat tieto- ja hallintayhteydet fyysisen radiokerroksen ja siirtoyhteyskerroksen välillä.

PLME-rajapinta (Physical Layer Management Entity) tarjoaa fyysisen kerroksen käsittelyrajapinnan, joka sallii kerroksen hallintatoimintojen hyödyntämisen. PLME-SAP on yhteysväylä tämän toteutumiseen fyysisessä kerroksessa. PLME on myös vastuussa tietokannan ylläpidosta, jota kutsutaan informaatiokannaksi (PHY PIB).

PD-SAP välittää tärkeää informaatiota rinnakkaiselle ylemmälle tai alemmalle kerrokselle. Ylemmät kerrokset tavallisesti käyttävät tätä informaatiota, jonka alimmat kerrokset ovat lähettäneet palvelukseen seuraavia ylempiä kerroksia. [4, s. 10-11]

2.1.3 Siirtoyhteyskerros

Siirtoyhteyskerros (MAC, Medium Access Controll) määrää, mitä tapahtuu fyysisessä radiokerroksessa, ja se on loogisella tasolla samankaltainen fyysisen kerroksen kanssa. Siirtoyhteyskerros tarjoaa rajapinnan verkkokerroksen (NWK, Network Layer) ja fyysisen kerroksen välille. [4, s. 23-24]



Kuva 3. Siirtoyhteyskerroksen rakenne: MLME-rajapinta, PIB-informaatiokanta, SAP-yhteysväylät fyysiseen radiokerrokseen.

Kuten fyysisessä kerroksessa, myös siirtoyhteyskerroksessa kerrosten väliset liitännät toteutetaan SAP-yhteysväylillä kuvan 3 mukaisesti. Myös siirtoyhteyskerroksella on hallintakokonaisuus, jota kutsutaan MLME:ksi (MAC Layer Management Entity). MLME tarjoaa rajapinnan sille kerroshallinnan toiminnolle, joka sitä tarvitsee. MAC PIB on PHY PIBin kaltainen tietokanta. Siirtoyhteyskerroksen informaatio hyväksytään MCPS-SAPin kautta, ja MLME-SAPia käytetään tarjoamaan pääsy siirtoyhteyskerroksen hallintaan. [4, s. 23-24]

2.2 ZigBee

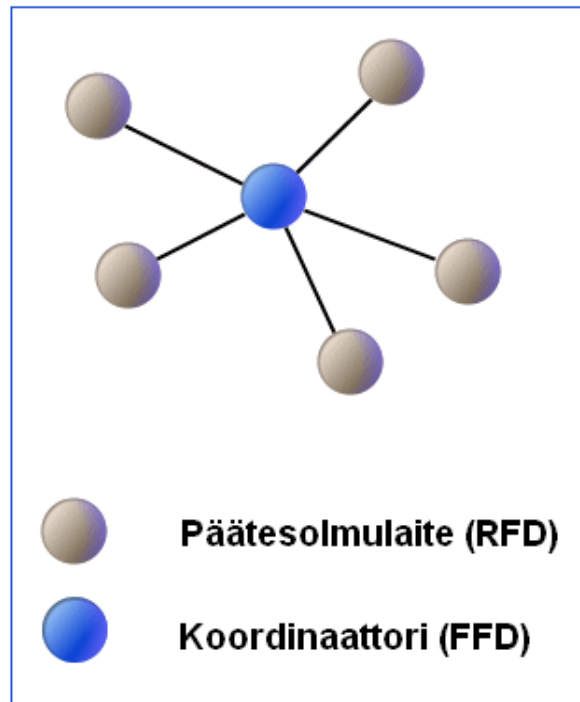
2.2.1 Verkon osat

IEEE 802.15.4 -standardin mukaiset kaksi laitetyyppiä ovat FFD-laite (FFD, Full-Function Device) ja RFD-laite (RFD, Reduced-Function Device). Normaalisti FFD-laite voi olla isäntälaitte ja PAN-koordinaattori (PAN, Personal Area Network), ja se tukee standardin kaikkia ominaisuuksia. RFD-laite on karsittu versio FFD-laitteesta ja käyttää vain tärkeimpiä standardin mahdollistamia ominaisuuksia. RFD-laite on orjalaite tai yksinkertainen verkon päätesolmukohta.

FFD-laite voi toimia kolmessa eri verkon tehtävässä. Se voi olla PAN-verkon koordinaattori, reititin tai normaali päätesolmukohta ja pystyy keskustelemaan kaikkien muiden verkon laitteiden kanssa. RFD-laite pystyy kommunikoimaan vain FFD-laitteiden kanssa. [4, s. 5-6]

2.2.2 Verkkomallit

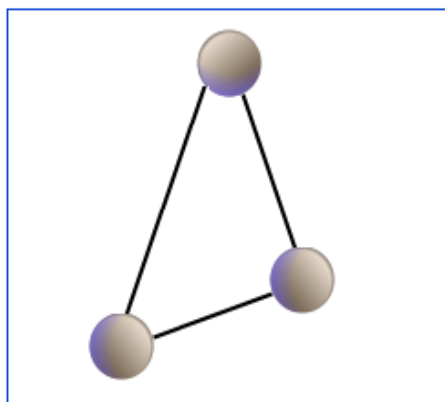
IEEE 802.15.4 -standardin mukaisia verkkotopologioita eli verkkomalleja ovat tähtiverkko ja muut vapaasti kytkettävät verkkomallit. Tähtiverkko koostuu kuvan 4 mukaisesti yhdestä FFD-laitteesta, joka voi olla joko koordinaattorilaite tai reititin, ja useista RFD-päätesolmulaitteista. FFD-laite pystyy kommunikoimaan kaikkien päätelaitteiden kanssa ja myöhemmin tähtiverkko pystytään liittämään sen kautta isompaan verkkokokonaisuuteen. Päätelaitteet pystyvät kommunikoimaan vain FFD-laitteen kanssa. [3, s. 109-110; 4, s. 6-7]



Kuva 4. Tähtiverkko: useita päätesolmulaitteita on yhdistetty yhteen koordinaattorilaitteeseen.

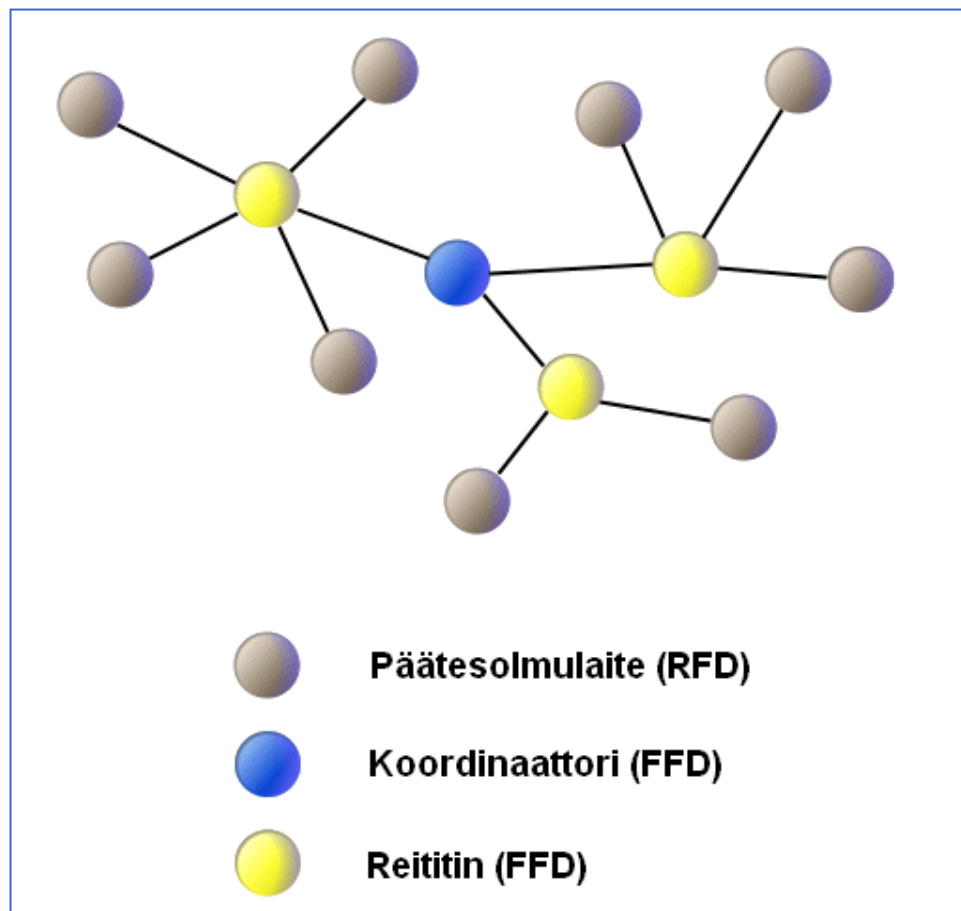
Vapaasti kytkettävät verkkomallit jakautuvat useisiin topologioihin. Yksinkertaisin niistä on ns. peer-to-peer-verkko (kuva 5) eli vertaisverkko. Vertaisverkossa kaikki laitteet pystyvät keskustelemaan keskenään yhteisen PAN-osoitteen alla.

[3, s. 109-110; 4, s. 6-7]



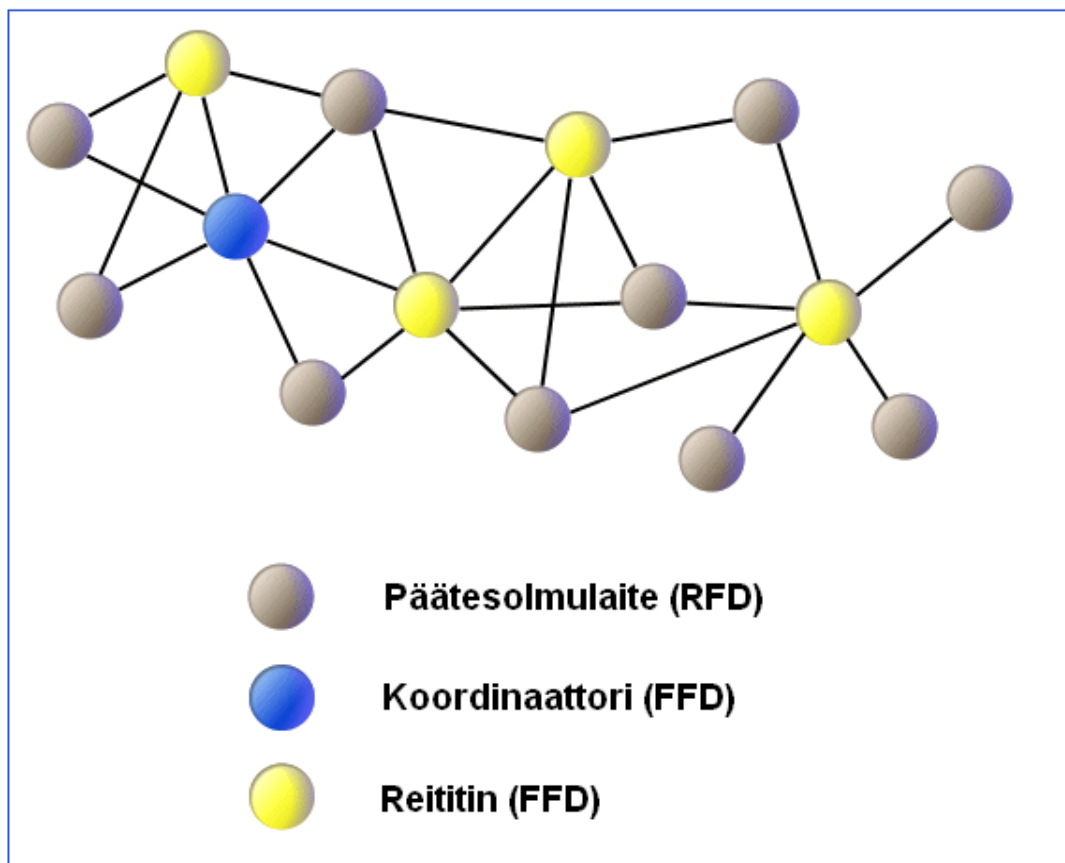
Kuva 5. Kolmen laitteen muodostama vertaisverkko.

Ryhmäverkkotopologia (Cluster Tree Topology) sisältää yhden koordinaattorilaitteen ja sen lisäksi yhden tai useamman reititinlaitteen sekä useita päätelaitteita. Kuvassa 6 esitetään ryhmäverkon arkkitehtuuri. Koska päätelaitteet voivat myös liittyä verkkoon reititinlaitteiden kautta, niin ryhmäverkossa pystyy olemaan useita eri solmukohtia. Tästä johtuen päätelaitteet ja koordinaattorilaitteet voivat olla kauempana toisistaan kuin mahdollinen kantoetäisyys sen sallisi. Samoin kuin tähtiverkossa päätelaitteet eivät pysty keskustelemaan keskenään, mutta niin koordinaattorilaitteet kuin myös reititinlaitteet pystyvät keskustelemaan keskenään, jos ne ovat radiokantaman päässä toisistaan. Ryhmäverkkoa voidaankin kuvailla verkoksi, jossa on monta tähtiverkkoa liitettynä yhden koordinaattorilaitteen ympärille. [3, s. 109-110; 4, s. 6-7; 5, s. 42]



Kuva 6. Ryhmäverkko: kolme reititinlaitetta päätelaitteineen on liitetty yhteen koordinaattorilaitteeseen.

Solmuverkkotopologia (Mesh Topology) koostuu samoista osista kuin ryhmäverkko, mutta on laajennettu versio siitä. Päätelaitteet eivät voi edelleenkään keskustella keskenään, mutta voivat olla yhteydessä useampaan reitittimeen kuin yhteen eroten näin ryhmäverkkomallista. Kuvan 7 mukaisesti reitittimet ja koordinaattori voivat kaikki olla suorassa yhteydessä keskenään radiokantaman sisällä. [3, s. 109-110; 4, s. 6-7; 5, s. 42]



Kuva 7. Solmuverkko: useiden päätesolmulaitteiden ja reititinlaitteiden muodostama solmuverkko yhdistettynä koordinaattorilaitteeseen.

2.2.3 Verkkoprotokollat

ZigBee-verkkoprotokollat jaetaan kahteen osaan, Beacon- ja nonBeacon-yhteyteen. NonBeacon-yhteydessä jokainen solmukohta, joka on verkossa, voi lähettää informaatiota, kun kanava on vapaana. Beacon-yhteyttä käytetään tunnistamaan PAN (PAN Personal Area Network) ja välitysverkon informaatio. Sen lisäksi sitä käytetään kuvaamaan raamin rakennetta sekä synkronisoimaan laitteet, jotka ovat yhteydessä verkkoon. Solmukohdat Beacon-yhteydessä taas voivat lähettää informaatiota vain edellä määritellyllä aikavälillä. Tämä tapahtuu siten, että koordinaattorilaite luo aikajaksoittain raamin, joka tunnistetaan Beacon-raamina. Koska lähetetty raami sisältää käytettävän aikajakson, niin jokaisen solmukohdan tulee synkronisoitua raamin kanssa samassa aika-alueessa. Jokainen solmukohta, joka on yhteydessä Beacon-raamiin tiettyä ajankohtana, pystyy lähettämään ja vastaanottamaan dataa. [3, s. 119; 4, s. 7]

2.2.4 Tietoturva

Tietoturva on ollut yksi ensisijaisista tavoitteista ZigBee-standardin rakentamisessa, ja se perustuu muutamaankin tietoturvasuunnitteluperiaatteeseen. Jokainen erillinen kerros, joka luo raamin, on vastuussa sen tietoturvasta. Toisin sanoen kaikkien kerrosten ei tarvitse turvata samaa raamia, mikä taas helpottaa kokonaistietoturvan kehittämistä. Sen lisäksi, riippumatta missä kerroksessa viesti on luotu, vain yksi avain vaihtuu lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Tämän takia viesti voi kulkea useiden muiden laitteiden läpi niin, ettei sitä tarvitse avata ja taas salata jokaisen solmulaitteen kohdalla.

ZigBee käyttää AES-standardia (Advanced Encryption Standard) symmetriseen salaukseen, koska se on muita vaihtoehtoja vahvempi ja nopeampi ja sen asentaminen laitteistoon on halpaa. Tämän lisäksi AES-laitteistototeutukset ovat nopeampia kuin ohjelmistototeutukset. Vaikka AES onkin symmetrinen salausalgoritmi, joka käyttää

samaa avainta kahden kesustelevan laitteiston kanssa, se on vain osa ZigBeen tietoturvaa.

ZigBee käyttää SKKE-salausta (Symmetric-Key Key Exchange) solmujen väliseen kommunikointiin, mikä perustuu AES-standardiin. Kuitenkin paras keino osoittaa avain solmujen välille olisi käyttää julkista avainalgoritmia, joka perustuu ECC-salaukseen (Elliptic Curve Cryptography). Tämä tarjoaa selkeän edun avainvaihtoon niin skaalauksen kuin eston puolesta. ECC-salauksen etuihin kuuluu myös, että se tarjoaa eniten turvallisuutta bittinä kohden verrattuna muihin julkisiin avainalgoritmeihin.

[6, s. 1-5]

3 XBee-lähetin-vastaanotinmoduuli

XBee on Maxstreamin kehittämä ZigBee-standardiin perustuva 2,4 GHz:n taajuudella toimiva lähetin-vastaanotinmoduuli. Se tarjoaa luotettavaa langatonta tiedonsiirtoa pienellä virrankulutuksella sekä kohtuullisilla kustannuksilla. Xbee-moduuleiden ympärille voidaan rakentaa verkkoympäristö, joka tukee ZigBee-protokollaa. Moduulit tarjoavat myös mahdollisuuden A/D-muunnokseen ilman mikrokontrollereita.

[2, s. 65; 4, s. 131; 7, s. 54]



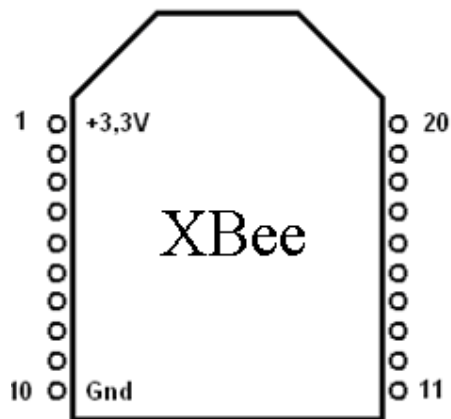
Kuva 8. XBee-moduuli.

3.1 XBee-moduulin spesifikaatiot

XBee-moduuli tarjoaa 1 mW:n lähetysteholla 30 m:n tiedonsiirtoetäisyyden sisätiloissa ja 100 m:n tiedonsiirtoetäisyyden, kun laitteistoiden väli on esteetön. Radiolinkin tiedonsiirtotaso on 250000 bittiä/sekunnissa. Moduuli toimii 2,8 - 3,4 V jännitteellä, ja sen lähetysvirta 3,3 V:n jännitteellä on 45 mA. [2, s. 67]

Taulukko 1. XBee-moduulin nastakaavio.

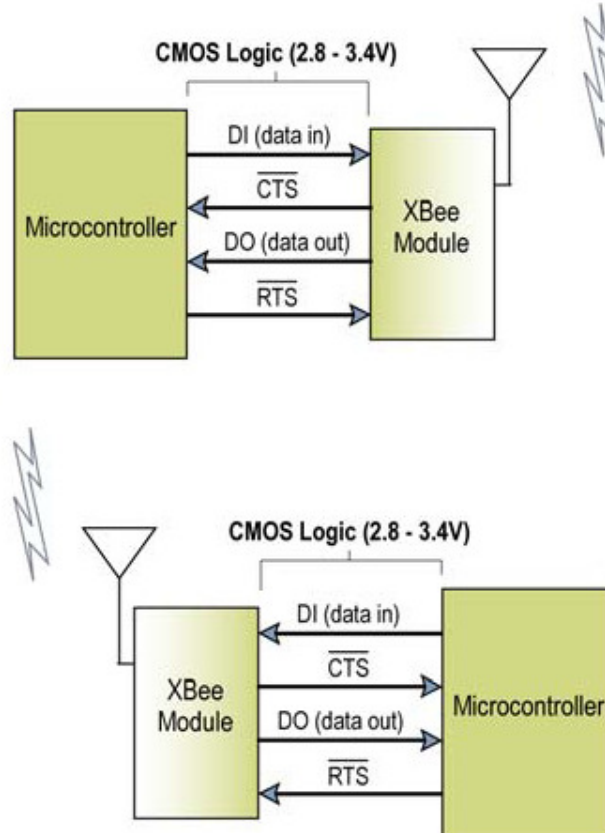
Nasta	Nimi	Suunta	Kuvaus
1	VCC	-	käyttöjännite
2	DOut	ulos	sarjaliitäntä ulos
3	DIn	sisään	sarjaliitäntä sisään
4	DO8	ulos	digitaalinen ulosmeno 8
5	Reset	sisään	moduulin resetointi
6	PWM0	ulos	PWM 0 -ulosmeno
7	PWM1	ulos	PWM 1 -ulosmeno
8	nc	-	Ei liitetty
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	sisään	Pin Sleep Control Line tai digitaalinen sisääntulo 8
10	GND	-	maanasta
11	AD4 / DIO4	ulos / sisään	analoginen sisääntulo tai digitaalinen I/O 4
12	CTS / DIO7	ulos / sisään	Clear-to-Send Flow tai digitaalinen I/O 7
13	ON / SLEEP	ulos	moduulin statuksen osoitin
14	VREF	sisään	referenssijännite A/D-sisääntuloille
15	Associate / AD5 / DIO5	ulos / sisään	liitettävyyden osoitin, analoginen sisääntulo 5 tai digitaalinen I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	ulos / sisään	Request-to-Send Flow, analoginen sisääntulo 6 tai digitaalinen I/O 6
17	AD3 / DIO3	ulos / sisään	analoginen sisääntulo tai digitaalinen I/O 3
18	AD2 / DIO2	ulos / sisään	analoginen sisääntulo tai digitaalinen I/O 2
19	AD1 / DIO1	ulos / sisään	analoginen sisääntulo tai digitaalinen I/O 1
20	AD0 / DIO0	ulos / sisään	analoginen sisääntulo tai digitaalinen I/O 0



Kuva 9. XBee-moduulin nastakaavio

3.2 XBee-moduulin toiminta ja käytettävyys

XBee-moduulit ovat ns. älykkäitä, mikä tarkoittaa sitä, että ne sisältävät kontrollilogiikan, jota käyttäjä voi ohjata yksinkertaisilla valmistajan tarjoamilla komennoilla. Komennot lähetetään moduulille samalla tapaan kuin data, ja moduulin oma ohjelmisto erottaa nämä kaksi toimintoa toisistaan. Nämä komennot lähetetään ASCII-merkkeinä. XBee-moduuleita voidaan kontrolloida joko mikropiireillä tai tietokoneella sarjaporttiin liitettynä. [3, s. 65]

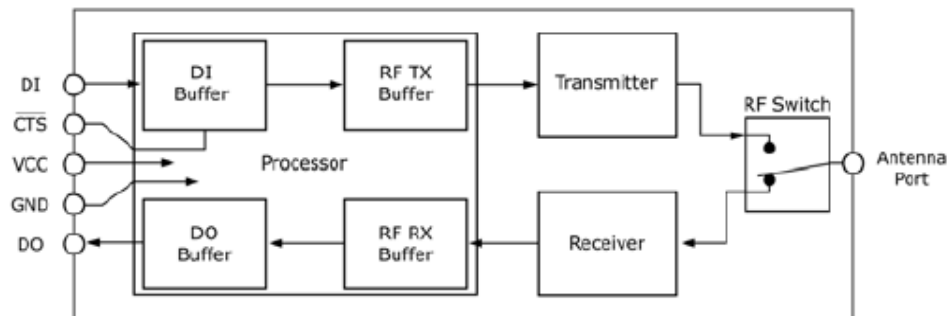


Kuva 10. Lähetysyhteys: Xbee-moduulien avulla toteutettu kahden mikrokontrollerin välinen langaton yhteys sekä moduulin ja mikrokontrollerin väliset yhteydet DI, DO, CTS ja RTS.

Kuvan 10 mukaisesti informaatio tuodaan XBee-moduulille sen DIN-nastan kautta. Tiedon pitää olla sarjamuotoinen ja sisältää aloitusbitti, kahdeksan databittiä ja lopetusbitti. Moduuli lähettää DOUT-nastassaan informaatiota isännälleen asynkronisena datavirtana. CTS-nasta ilmoittaa isäntälaitteelle, milloin lopettaa sarjamuotoisen tiedon lähettäminen moduulille. RTS-nastan kautta isäntälaitte voi ilmoittaa, milloin moduuli ei voi lähettää tietoa sarjaliitännän kautta. [4, s. 132 -133]

3.2.1 Ohjelmistopuskurointi

Langaton radiolinkki on aina half-duplex-tyyppinen, mikä tarkoittaa, että yhdellä antennilla voidaan lähettää ja vastaanottaa dataa, mutta ei samanaikaisesti. Kuitenkin XBee-moduuli voi lähettää ja vastaanottaa dataa samanaikaisesti pitkin sarjalinkkiä sarjapiiriin käyttäjän rajapinnassa. Tämän mahdollistaa kaksi ohjelmistopuskuria, mikä periaate näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Ohjelmistopuskurointi: Moduulille DI-nastan kautta tuleva tieto varastoituu lähetysoiskuriin, josta tieto lähetetään eteenpäin antennin kautta. Vastaavasti antennilla vastaanotettu tieto varastoituu vastaanottoiskuriin, josta se siirtyy isäntälaitteelle DO-nastan kautta. CTS-nasta ilmoittaa isäntälaitteelle, jos lähetysoiskuri on täyttymässä.

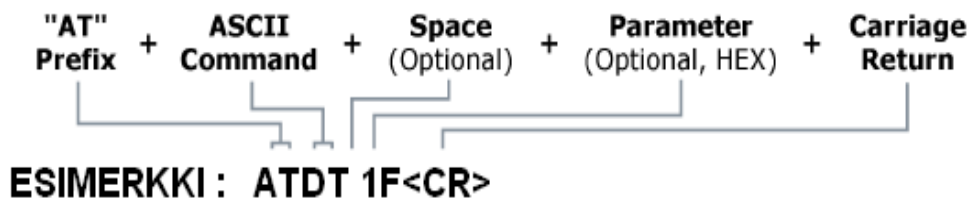
Moduuli sisältää vastaanotto- ja lähetyspuskuroinnin, joista molemmat pystyvät tarjoamaan väliaikaisen varastoinnin 100 tavulle. Data voi saapua niin RF-linkin kuin myös sarjaliitännän kautta samanaikaisesti. Kun antenni vastaanottaa dataa, samanaikaisesti lähetettävä data varastoituu lähetyspuskuriin, ja vastaanotettu data puskuroituu vastaanottopuskuriin. Heti, kun vastaanotto on päättynyt, moduuli vaihtaa antennin lähetysmuotoon ja tyhjentää lähetyspuskurin antennin kautta, ja sarjaliitettä tyhjentää vastaanottopuskurissa olevan datan liitännän kautta sovellukselle. Käsiteltävä data voi helposti ylikuormittaa lähetyspuskurin, minkä johdosta moduulit sisältävät hälytysjärjestelmän tämän ongelman käsittelemiseen. Kun lähetyspuskuri sisältää 83 tavua tai enemmän, moduulin CTS-nasta menee loogiseen ykköstilaan, jota voidaan käyttää kertomaan isäntälaitteelle, että se lopettaa tiedon tuomisen puskuriin. CTS-nasta palaa takaisin loogiseen nollaan, kun puskurin datamäärä on laskenut 66 tavuun.

RTS-nastan ollessa loogisessa ykköstilassa vastaanottopuskuri ei lähetä tietoa isäntälaitteelle DOUT-nastan kautta. Isäntälaitteen ei tulisi pitää RTS-nastaa loogisessa ykköstilassa liian kauan, jottei vastaanottopuskuri täytyisi. Moduulin vastaanottopuskurin ollessa täynnä vastaanotettu tieto voi tuhoutua, koska sille ei ole puskurissa tilaa. [2, s. 67-68; 4, s. 133-134]

3.2.2 Moduulin osoittaminen ja komentorakenne

Jokainen lähetetty radiodatapaketti sisältää lähdeosoitteen sekä kohdeosoitteen. XBee-moduulit noudattavat IEEE 802.15.4 -spesifikaatiota ja tukevat niin lyhyitä 16 bitin osoitteita kuin myös pidempää 64 bitin osoitteita. Moduuli käyttää ainutkertaista 64 bitin osoitettaan lähdeosoitteenaan. Lähettääkseen dataa moduulin tarvitsee määrittellä vain kohdeosoite, jonka tulee olla vastaanottavan moduulin lähdeosoite.

Ennen kuin XBee-moduuliin voi lähettää mitään komentoja, se pitää laittaa ensin ”odota komentoa” -tilaan. Tämä tapahtuu lähettämällä kolme plus-merkkiä (hex 2B) eli käytännössä +++. Tämän jälkeen moduulille voi lähettää ensimmäisen komennon. Kuvan 11 mukaisesti komennot alkavat aina kirjaimin AT, joka tulee englannin kielen sanasta attention eli huomio. Tätä seuraa itse komento ja komennon parametrit. Komentorivin päättää rivin alkuun palautus -merkki eli tunnetummin carriage return tai CR.



Kuva 11. Komentorakenne: AT-aloituskomento, jota seuraa toiminnan komento, sen parametrit sekä rivin alkuun palautus -merkki.

Suoritettuaan onnistuneesti käsketyt toiminnon moduuli lähettää takaisin viestin OK. Toisaalta, jos jostain syystä moduuli ei kyennyt suoriutumaan käskystä, se lähettää takaisin viestin ERROR. Muissa tapauksissa moduuli ei reagoi millään tavalla.

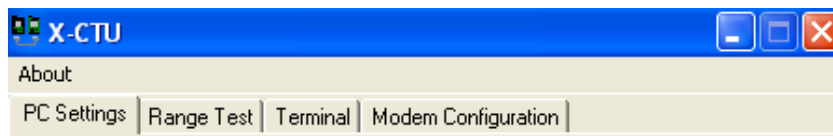
[2, s. 66-67; 4, s. 136; 7, s. 54-55]

4 X-CTU-käyttöliittymä

X-CTU-käyttöliittymä on Maxstreamin kehittämä vapaasti ladattavissa oleva ohjelma, joka tukee XBee-moduuleita sekä muita Maxstreamin tuotteita. Se on suunniteltu tarjoamaan helppo tapa vuorovaikuttaa Maxstreamin radiomoduuleiden kanssa yksinkertaisen graafisen käyttöliittymän avulla. [4, s. 136]

4.1 X-CTU-käyttöliittymän toiminnot

X-CTU pitää sisällään neljä ikkunavalikkoa: Tietokoneasetukset (PC Settings), Etäisyystesti-ikkunan (Range Test), Terminal-ohjelman (Terminal) sekä Modeemin asetukset -ikkunan (Modem Configuration).

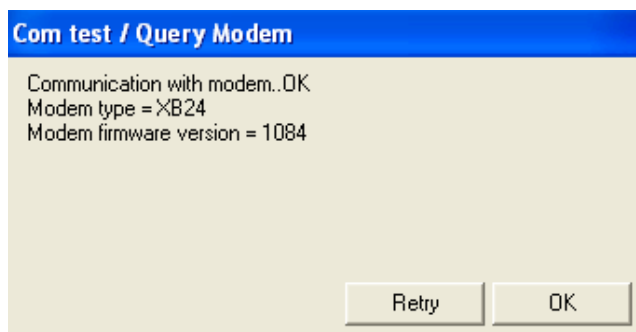


Kuva 13. X-CTU:n valintaikkunat.

4.1.1 Tietokoneasetukset (PC Settings)

Tietokoneasetukset-ikkuna antaa mahdollisuuden käyttäjän valita vaadittavan COM-portin käytön kohdassa ”Select Com Port” ja asettaa portin asetukset käytettävänä olevan moduulin radioasetuksiin. Ikkuna jakautuu kolmeen eri asetusalueeseen: COM-porttiasetuksiin, isäntäasetuksiin (Host) sekä käyttäjän COM-porttiasetuksiin.

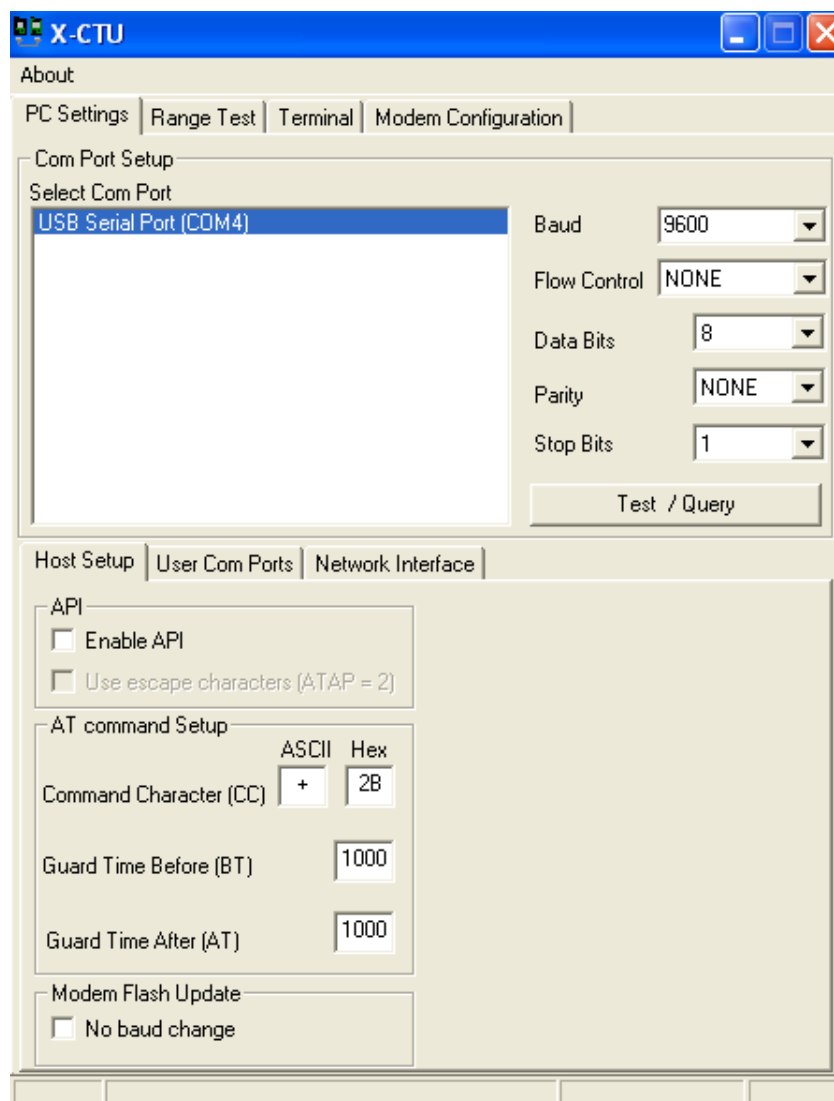
COM-porttiasetuksilla voidaan esimerkiksi säätää siirtonopeutta (Baudrate), databittien määrää ja lopetusbittiä. Siirtonopeus on vakiona 9600 baudia ja databittien määrä on 8, mitkä ovat myös Xbee-moduleiden vakioasetuksena. Test/Query-painikkeen avulla testataan COM-portin toimivuus ja tietokoneasetukset. Jos asetukset ovat oikeat, kuvan 14 mukainen kommentti-ikkuna tulee esille.



Kuva 14. Com test/Query Modem - ikkuna.

Isäntäasetukset sallivat käyttäjän päättää, kuinka X-CTU toimii moduulin laiteohjelmiston kanssa. Käyttäjä voi valita, käytetäänkö laiteohjelmiston kanssa kommunikoimiseen API- vai AT-komentoja. Sen lisäksi käyttäjä voi asettaa haluamansa komentomerkit sekä ajastuksen. Kuvan 15 mukaiset asetukset ovat vakiona, kun X-CTU-ohjelma avataan, ja ne ovat myös vakioina XBee-moduuleissa.

Käyttäjä COM-porttiasetukset (User Com Ports) sallivat käyttäjän lisätä tai poistaa käyttäjän omia COM-portteja. Kun ohjelma suljetaan, käyttäjän lisäämät portit katoavat.

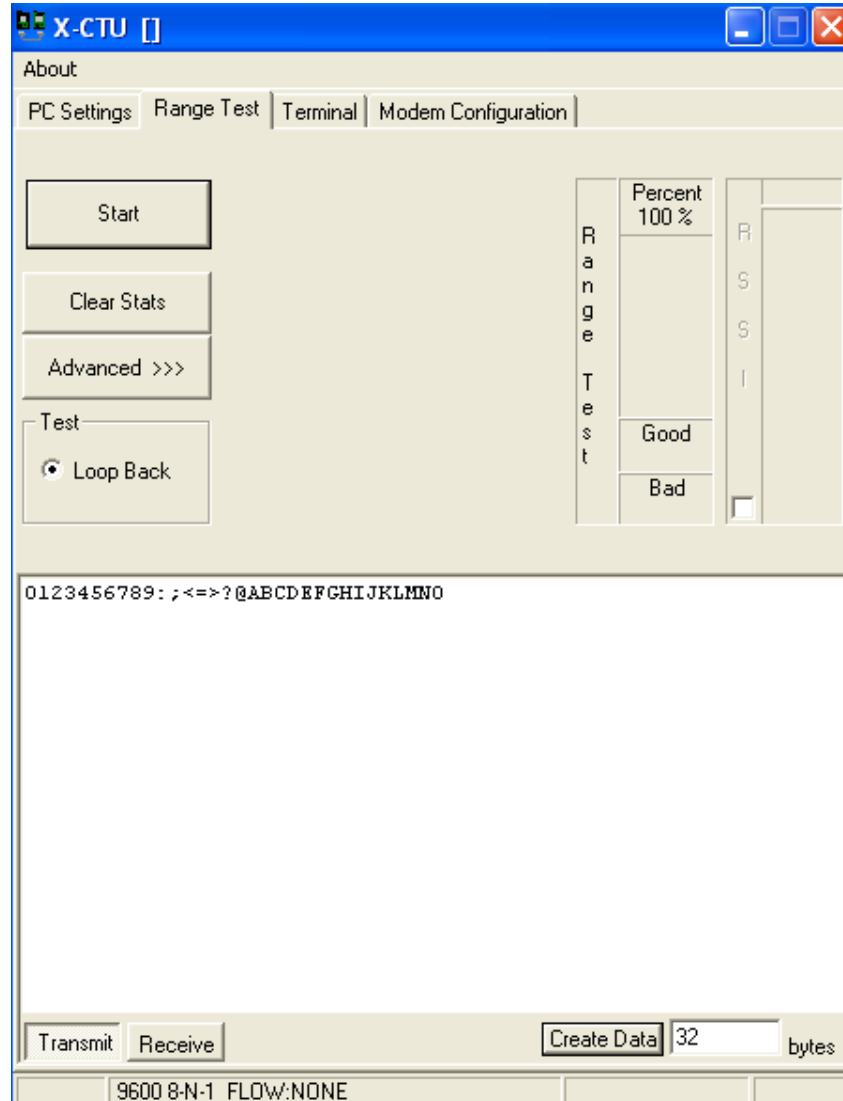


Kuva 15. Tietokoneasetukset-ikkuna.

4.1.2 Etäisyystesti (Range Test)

Etäisyystesti-ikkuna tarjoaa mahdollisuuden testata etäisyyden luonnetta radiolinkin välillä lähettämällä käyttäjän määrittämän data-paketin ja toteamalla, että vastaanotettu paketti on sama jonkin tietyn määritetyn ajan välillä.

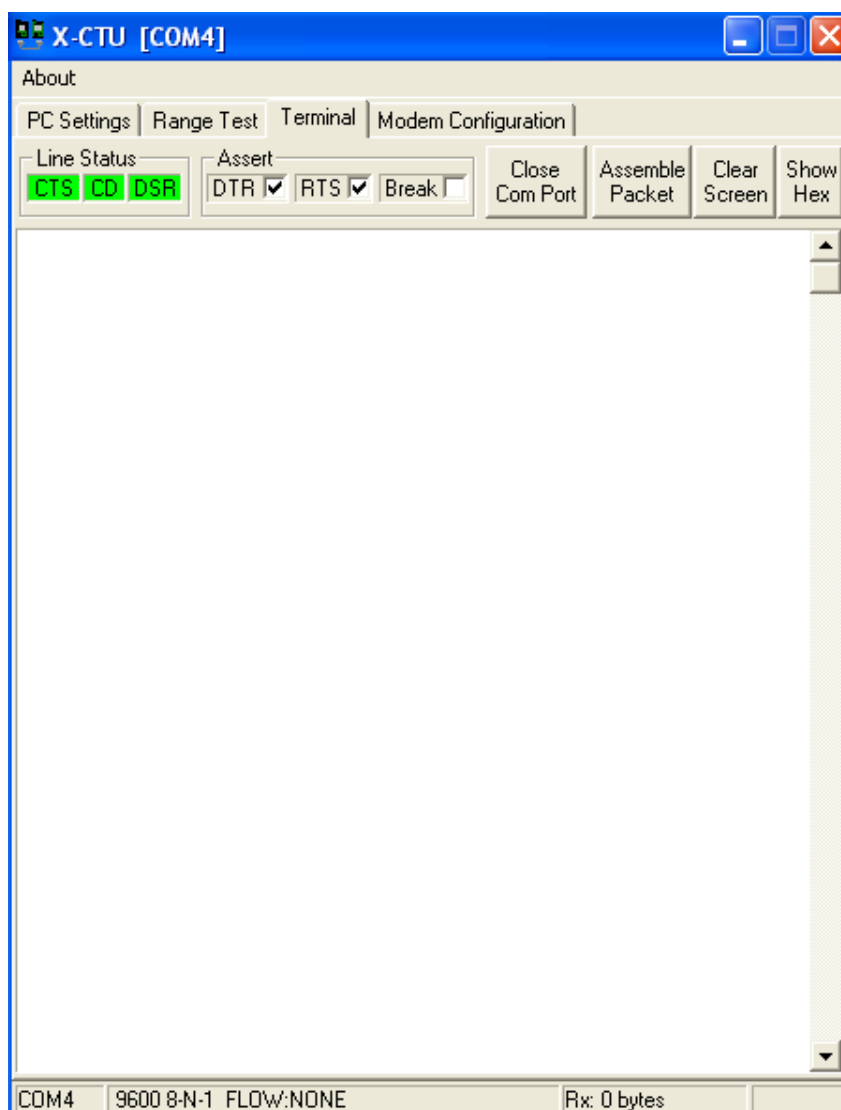
X-CTU:ssa datapaketin koko on vakiona 32 tavua. Datapaketin kokoa voidaan vaihtaa asettamalla koko tavuina ja painamalla Create Data -painiketta kuvan 16 mukaisesti. Myös lähetettävän paketin tekstiä voi vaihtaa korvaamalla teksti-ikkunassa olevan tekstin.



Kuva 16. Etäisyyssiikkuna.

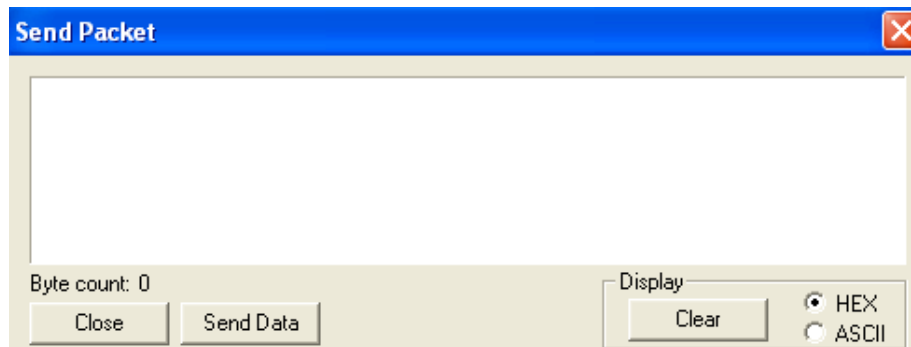
4.1.3 Terminaali-ohjelma

Terminaali-ohjelman avulla pääsee ohjamaan tietokoneen COM-portteja sekä ohjamaan radiomoduuleiden toimintaa AT-komentojen avulla. Terminaali-ikkunassa on kolme toimintoa, jotka ovat tietojenkäsittely, kyky lähettää ja vastaanottaa ennalta määrittäjä data-paketteja ja kyky lähettää ja vastaanottaa data-paketteja HEX- ja ASCII-muodoissa. Isoin osa kommunikaatiosta tapahtuu kuvan 15 terminaali-ikkunan teksti-ikkunassa. Teksti-ikkunaan kirjoitettu teksti näkyy sinisenä ja vastaanotettu teksti punaisena.



Kuva 17. Terminaali-ikkuna.

Assemble Packet -painikkeen avulla käyttäjä voi koota lähetettävän datapaketin joko HEX- tai ASCII-muodossa. Kuvan mukaisesti käyttäjä voi valita joko HEX- tai ASCII-valintalaatikon ja kirjoittaa halutun datapaketin teksti-ikkunaan ja lähettää sen.

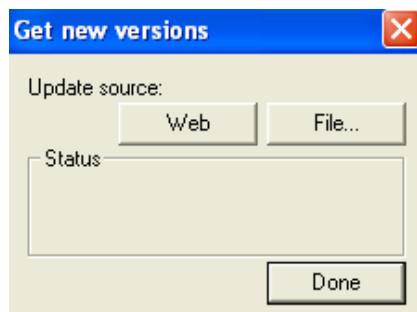


Kuva 18. Assemble packet -ikkuna.

4.1.4 Modeemiasetukset (Modem Configuration)

Modeemiasetuksissa käyttäjä voi ohjelmoida laiteohjelman asetuksia graafisen käyttöliittymän avulla ilman AT-komentoja. Tässä ikkunassa käyttäjä voi myös ladata uusia laiteohjelmistoversioita sekä muuttaa moduulin käyttämää laiteohjelmistoa.

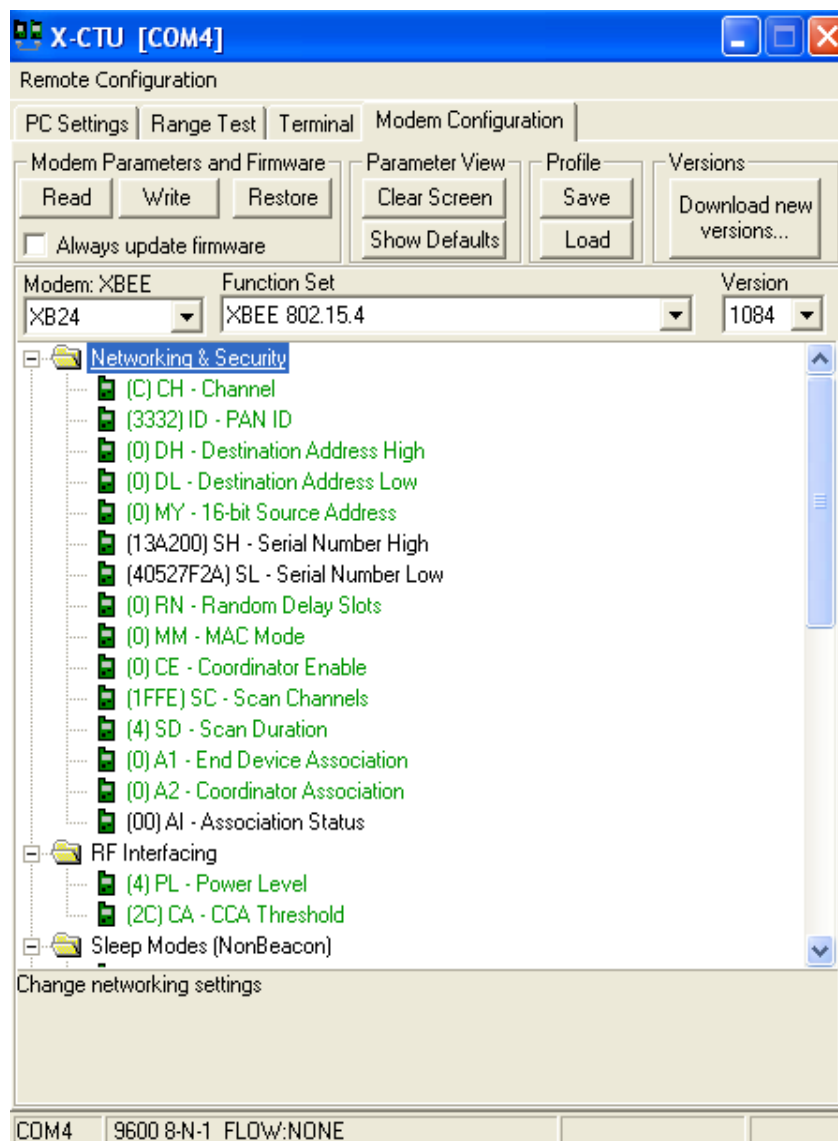
Uusien laiteohjelmistojen lataaminen tapahtuu Download new versions -painiketta painamalla. Kuvan 19 mukaisesti valitaan Web, painetaan OK ja viimeiseksi painetaan Done-painiketta, kun latautuminen on valmis.



Kuva 19. Laiteohjelmiston lataaminen

Read-painikkeella käyttäjä saa moduulin version tiedot esille. Tiedot näkyvät kolmena eri värinä ruudulla. Musta teksti tarkoittaa, että tietoa ei voi muuttaa, vihreä teksti tarkoittaa, että asetus on modeemin vakioasetus ja on muutettavissa, sekä sininen tarkoittaa käyttäjän omia jo muunnettuja asetuksia vakioasetuksista.

Asetusten muuttaminen tapahtuu napauttamalla käskyä ja asettamalla uusi arvo parametreihin. Jotta tietyn komennon ymmärtäminen olisi helpompaa, ruudun alalaitaan tulee kuvaus toiminnosta ja sen rajoituksista, kun komentoriviä painetaan. Kun kaikki uudet arvot on asetettu, ne voidaan tallentaa moduulin lyhytaikaiseen muistiin.



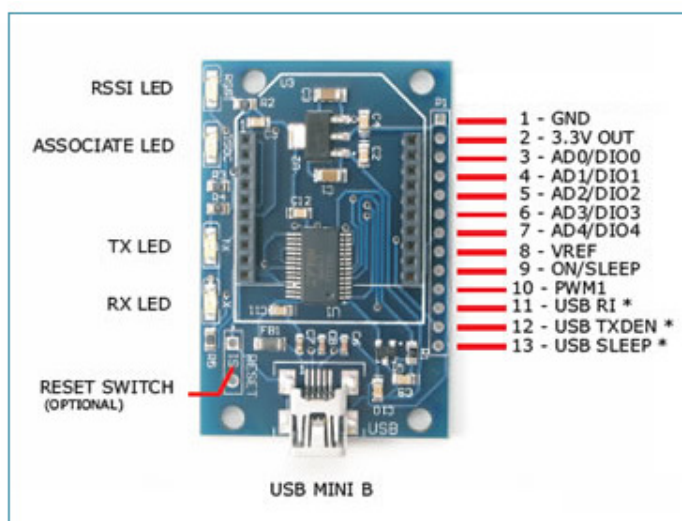
Kuva 20. Modeemiasetukset

5 ZigBee-verkon toteuttaminen Xbee-moduuleilla

Lopputyössä käytettiin MaxStreamin XBee-moduuleita, jotka liitettiin moduulille suunniteltuihin kytkentäalustoihin. Alustat yhdistettiin USB-liitännän avulla tietokoneeseen, jossa niitä ohjattiin X-CTU-ohjelmalla.

5.1 USB-kytkentäalusta

XBee-moduulit yhdistettiin kuvan 21 mukaisiin Droids-nimisen yrityksen valmistamiin USB-kytkentäalustoihin. Kytkentäalusta on suunniteltu antamaan helppo ja varma yhteys moduulin ja tietokoneen välillä. Se tarjoaa nopeasti käynnistyvän piirin ja jänniteregulaattorin, joka varmistaa XBee-moduulin luotettavuuden ja suorituskyvyn. RSSI- ja ASSOCIATION-ledien avulla pystytään seuraamaan moduulin toimintaa ja TX- ja RX-ledien avulla tiedon liikkumista. USB MINI B -liittimellä kytkentälevy voidaan yhdistää tietokoneeseen. Kytkentälevy tarjoaa myös liittimet moduulin tärkeimpiin nastoihin ja resetoitikytkimeen.



Kuva 21. USB-kytkentälevy: moduulin toimintaa ja sarjaportin tiedonsiirtoa seuraavat ledit, resetoitikytkin, USB-liitin ja moduulin nastojen liittimet.

5.2 Verkon toteuttaminen

Kun kaksi tai useampi saman PAN ID:n omaavaa XBee-moduulia on yhdistetty, ne ovat jo valmiiksi oletuksena ns. NonBeacon-vertaisverkossa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ne pystyvät kommunikoimaan sarjaportin kautta esim. minkä tahansa terminaaliohjelman avulla.

Zigbee-verkossa on yleensä yksi tai useampi ns. koordinaattorilaite ja useampia päätelaitteita. Koordinaattori pystyy keskustelemaan kaikkien päätelaiteiden kanssa, mutta päätelaitteet vain koordinaattorin kanssa. Lopputyötä varten luotiin kolmella XBee-moduulilla yksinkertainen ns. tähtiverkko, jossa yksi laitteista on koordinaattori ja kaksi ovat päätelaitteita. XBee-moduuleita voidaan X-CTU:n avulla käyttää ns. AT-komennoilla tai X-CTU:n graafisella käyttöliittymällä.

5.2.1 AT-komennot

AT-komentojen antamiseen XBee-moduuleille käytetään X-CTU:n terminaali-ikkunaa. Kirjoitetut komennot näkyvät terminaali-ikkunassa sinisellä ja vastaanotetut kommentit näkyvät punaisella. Ennen jokaista AT-komentoa moduulit vaativat herätekäskyn, joka on +++ (kolme plus-merkkiä). Kun moduuli on vastaanottanut herätekäskyn, se lähettää takaisin OK. AT-komennot koostuvat kolmesta osasta: attention-komennosta (AT), itse toimintokomennosta sekä toimintakomennon spesifikaatiosta, joka kirjoitetaan aina HEX-muodossa, esim. ATDLFFFF.

5.2.1.1 Koordinaattorilaitteen asetukset AT-komennoilla

Koordinaattorilaitteen asetukset AT-komennoilla näkyvät kuvassa 22 ja ovat seuraavat:

+++ , odotetaan moduulin OK-viestiä.

ATCE1, odotetaan moduulin OK-viestiä

CE-komennolla (Coordinator Enable) asetetaan moduuli joko koordinaattoriksi tai päätelaitteeksi. Komennon spesifikaatio ”1” asettaa moduulin koordinaattorilaitteeksi ja ”0” päätelaitteeksi.

+++ , odotetaan moduulin OK-viestiä.

ATA24, odotetaan moduulin OK-viestiä.

A2-komennolla (Coordinator Association) asetetaan koordinaattorilaitteen asetukset.

Heksaluku 4 on binäärimuodossa 100, eli kun bitti 2 on 1, niin se sallii muiden laitteiden liittyä samaan verkkoon koordinaattorilaitteen kanssa.

+++ , odotetaan moduulin OK-viestiä.

ATMYFFFF, odotetaan moduulin OK-viestiä.

MY-komennolla (16-bit source address) asetetaan moduulin lähdeosoitteeksi FFFF.



Kuva 22. Koordinaattorilaitteen muodostaminen AT-komennoilla.

5.2.1.1 Päätelaitteen asetukset AT-komennoilla

Päätelaitteen asetukset AT-komennoilla näkyvät kuvassa 23 ja ovat seuraavat:

+++, odotetaan moduulin OK-viestiä.

ATCE0, odotetaan moduulin OK-viestiä

CE-komennolla (Coordinator Enable) asetetaan moduuli joko koordinaattoriksi tai päätelaitteeksi. Komennon spesifikaatio ”1” asettaa moduulin koordinaattorilaitteeksi ja ”0” päätelaitteeksi.

+++, odota moduulin OK-viestiä.

ATA1C, odota moduulin OK-viestiä.

A1-komennolla (End Device Association) asetetaan päätelaitteen asetukset.

Hexaluku C on binäärilukuna 1100. Kun bitti 2 on 1, päätelaite yrittää ottaa yhteyden koordinaattorilaitteeseen, kunnes onnistuu.

+++, odotetaan moduulin OK-viestiä.

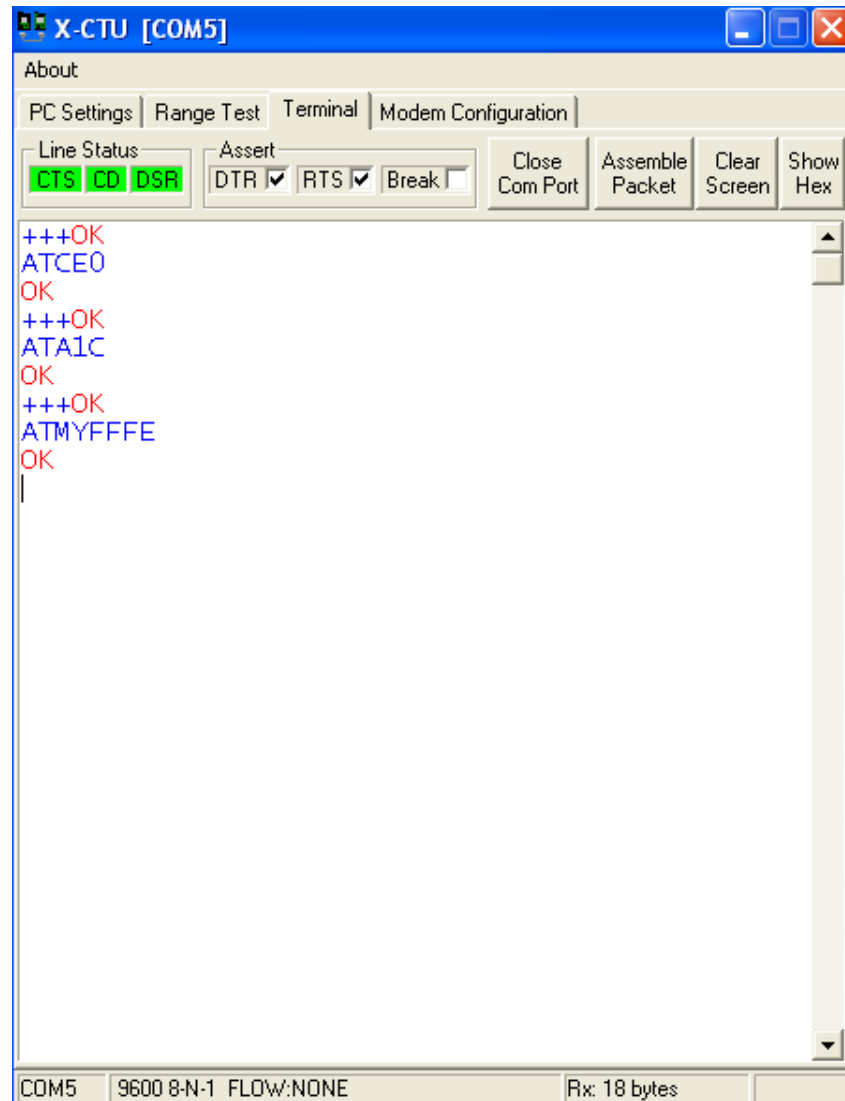
ATMYFFFE, odotetaan moduulin OK-viestiä.

MY-komennolla (16-bit source address) asetetaan moduulin lähdeosoitteeksi FFFE.

Toiselle päätelaitteelle voi antaa lähdeosoitteeksi (source address) FFFD

+++, odotetaan moduulin OK-viestiä.

ATMYFFFD, odotetaan moduulin OK-viestiä.



Kuva 23. Päätelaitteen muodostaminen AT-komennoilla.

Nyt päätelaitteet eivät voi keskustella keskenään, mutta voivat keskustella koordinaattorilaitteen kanssa. Jotta koordinaattorilaite pystyy keskustelemaan päätelaitteiden kanssa, niin sen pitää tietää, kumman kanssa se keskustelee. Tämä määritellään antamalla koordinaattorilaitteelle kohdeosoite (Destination Address).

Koordinaattorilaite +++, odotetaan moduulin OK-viestiä.

ATDLFFFE, odotetaan moduulin OK-viestiä.

DL-komennolla (Destination Address Low) asetetaan koordinaattorilaitteelle kohdeosoite FFFE, joka on päätelaitteen lähdeosoite.

Vaihtoehtoisesti, jos halutaan koordinaattorin keskustelevan toisen päätelaitteen kanssa, kirjoitetaan sen lähdeosoitteeksi FFFD.

5.2.2 Toteutus graafisella käyttöliittymällä

X-CTU-ohjelmaa käyttämällä XBee-moduulien ohjaaminen voidaan suorittaa myös ilman AT-komentoja. Modem Configuration -ikkunassa käyttäjällä on mahdollisuus suorittaa samat asiat kuin AT-komennot mahdollistavat käyttämällä X-CTU:n graafista käyttöliittymää.

Modem Configuration -ikkunassa Read-painiketta painamalla saadaan esille modeemin tiedot ja asetukset. Ikkunassa voidaan nähdä moduulin modeemityyppi, XBeen tyyppi ja firmwaren eli laiteohjelmiston versio. Vihreällä tekstillä olevia rivejä voidaan muokata, mustalla tekstillä olevia rivejä ei voi muuttaa, ja sinisellä olevat ovat käyttäjän jo muokkaamia rivejä.

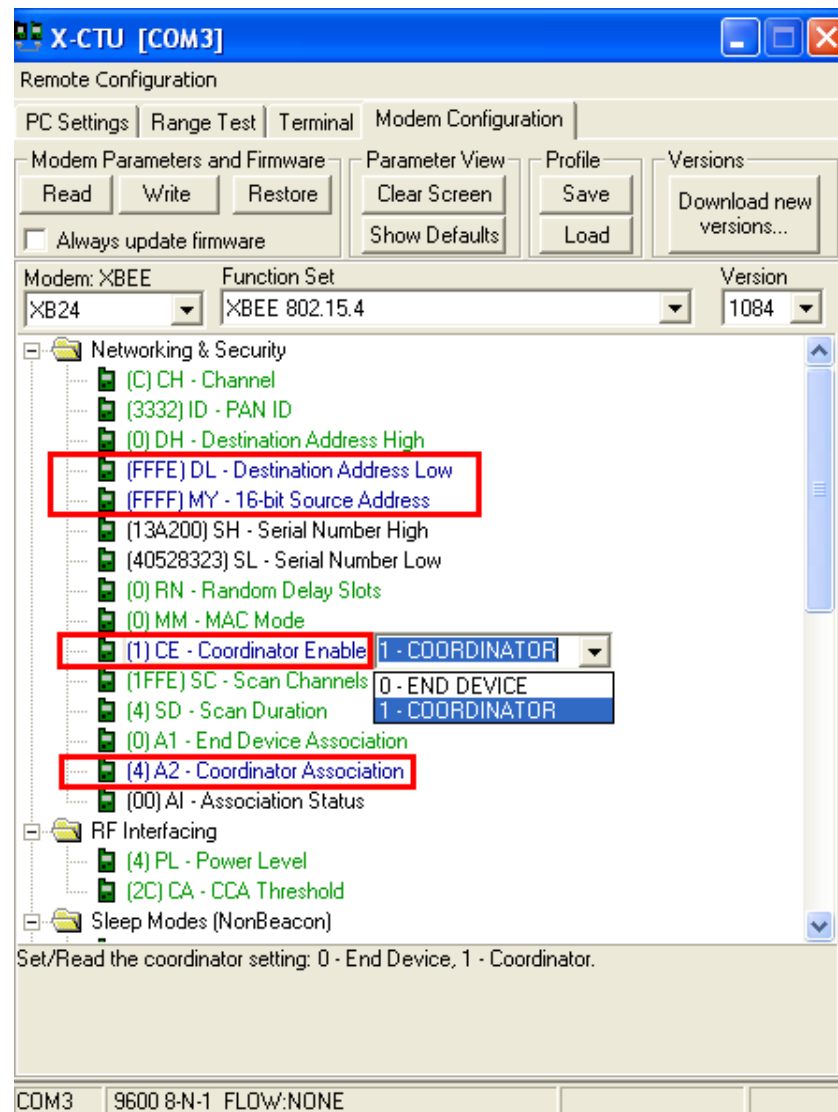
Moduulin asettaminen koordinaattorilaitteeksi tapahtuu samoin kuin AT-komennoilla.

Kuvan 24 punaisella merkityt kohdat asetetaan seuraavasti:

CE, Coordinator Enable asetetaan kohtaan 1 – Coordinator.

A2, Coordinator Association asetetaan kohtaan 4 – 100(B)

MY = 16-bit source address: kirjoitetaan FFFF



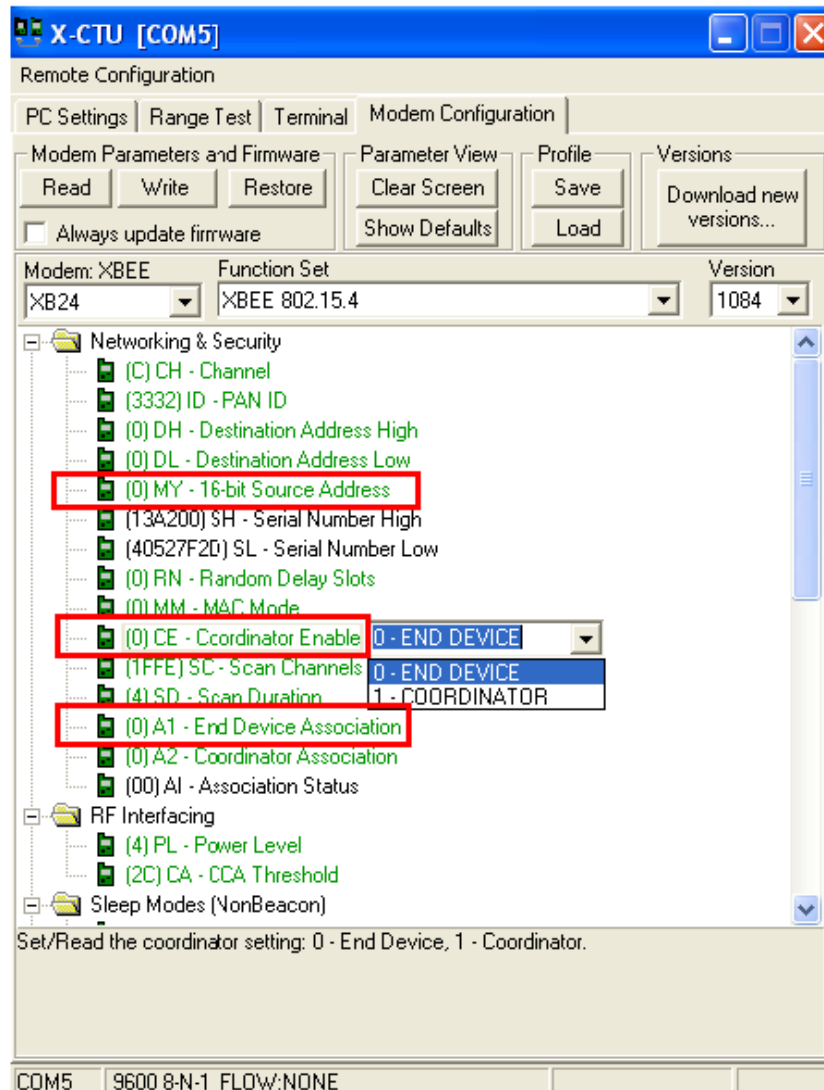
Kuva 24. Koordinaattorilaitteen muodostaminen graafisella käyttöliittymällä.

Moduulin asettaminen päätelaitteeksi tapahtuu samoin kuin AT-komennoilla. Kuvan 25 punaisella merkityt kohdat asetetaan seuraavasti:

CE, Coordinator Enable asetetaan kohtaan 0 – End device.

A1, End Device Association asetetaan kohtaan 12 – 1100(B).

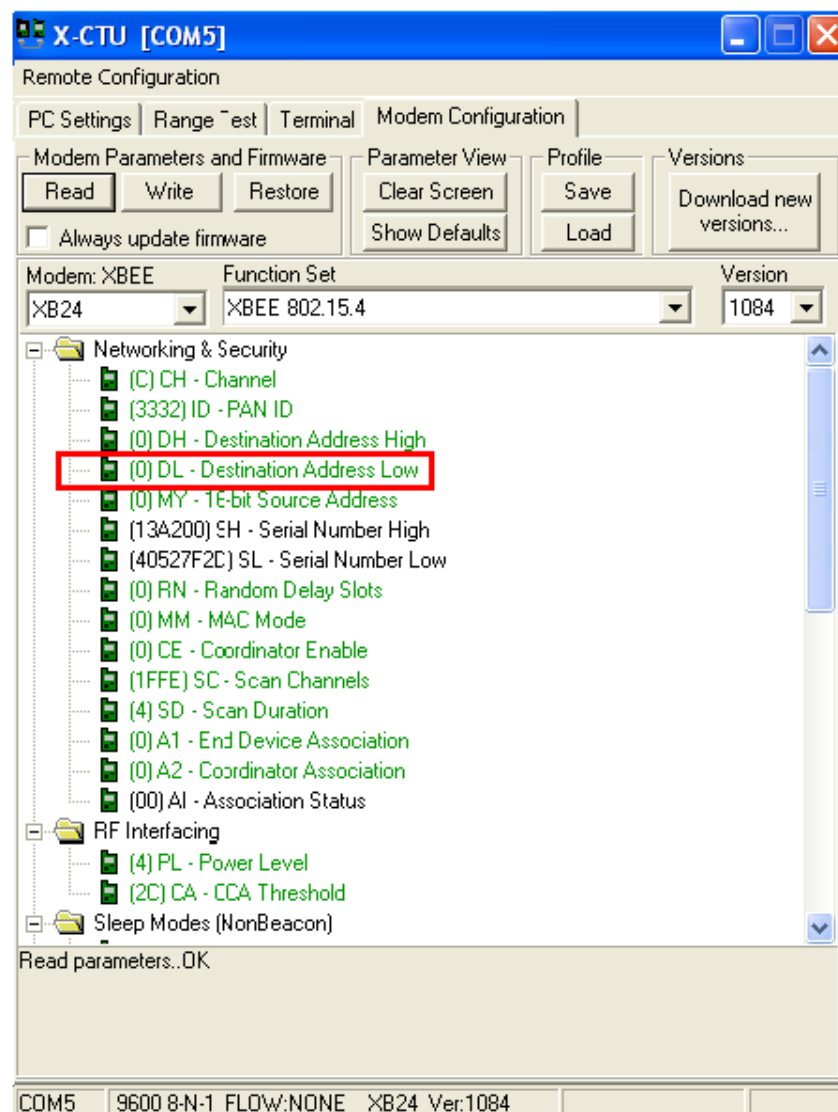
MY = 16-bit source address: kirjoitetaan FFFE (tai FFFD; toinen päätelaite).



Kuva 25. Päätelaitteen muodostaminen graafisella käyttöliittymällä.

Samoin kuin AT-komennoilla päätelaitteet eivät voi keskustella keskenään, voivat ne kuitenkin keskustella koordinaattorilaitteen kanssa. Jotta koordinaattorilaitte pystyy keskustelemaan päätelaitteiden kanssa, sen pitää tietää, kumman kanssa se keskustelee. Tämä määritellään antamalla koordinaattorilaitteelle kohdeosoite (Destination Address).

DL, Destination Address Low, kirjoitetaan FFFE (tai FFFD; toinen päätelaite).



Kuva 26. Kohdeosoitteen määrittäminen

5.3 A/D-muunnoksen toteuttaminen

XBee-moduulit tukevat A/D-muunnosta, joka voidaan toteuttaa AT-komennoilla tai X-CTU:n graafisella käyttöliittymällä. Koska kaikki moduuleiden laiteohjelmistot eivät tue A/D-muunnosta, on hyvä varmistaa, että moduuli omaa oikean laiteohjelmistoversion.

5.3.1 AT-komennot

Seuraavilla AT-komennoilla toteutetaan A/D-muunnos analogisesta signaalista. Näillä asetuksilla lähettävä moduuli ottaa näytteen D0- ja D1-nastoista joka 20. ms. Sen jälkeen moduuli puskuroi viisi näytettä, ennen kuin se lähettää ne vastaanottavalle moduulille. Tämän jälkeen vastaanottava moduuli vastaanottaa 32 tavun lähetyksen, josta 20 tavua on itse informaatiota ja 12 tavua viestin raameja. Tämä tapahtuu 100 ms välein.

Lähettävän moduulin AT-komennot:

ATDL1234	(Destination address low)
ATMY5678	(Source address)
ATD02	(Digital I/O)
ATD12	(Digital I/O)
ATIR14	(Sample rate)
ATIT5	(Samples before Tx)

Vastaanottavan moduulin AT-komennot

ATDL5678	(Destination address low)
ATMY1234	(Source address)
ATP02	(PWM0 Configuration)
ATP12	(PWM1 Configuration)
ATIU1	(I/O Output Enable, 1 = Enabled)
ATIA5678	(I/O Input Address)

6 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli työstää elektroniikan koulutusohjelman kursseille ja niiden laboratoriotunneille opetusmateriaalia opetuskäyttöön. Tavoitteena on myös kehittää sovellus langatonta tiedonsiirtoympäristöä hyväksikäyttäen. Tämän lisäksi sovelluksesta tulee kirjoittaa opiskelijan ohjeet, joiden avulla opiskelijat voisivat itsenäisesti käyttää järjestelmää.

insinööriyössä tutustutaan IEEE 802.15.4- ja ZigBee-standardeihin. Työ painottui aluksi kirjallisuuden ja mahdollisten laitesovellusten etsimiseen. Koska standardit ovat varsin uusia, kirjallisuus niin IEEE 802.15.4 -standardista kuin myös ZigBee-sovelluksista oli rajallinen.

Ensimmäisenä laitesovelluksista tutustuttiin Microchipin valmistama ZigBee-esityslevypakkaukseen. Laitesarjapakkaus sisälsi kaksi esityslevyä, joihin kumpaankin pystyi liittämään Zigbee-radiovastaanotin-lähetintyärlevyt, USB-piuhalla tietokoneeseen kytkettävän langattoman verkkoanalysointilevyn ja ohjelmiston tukemaan paketin kokonaisuutta. Esityslevyihin oli integroitu mikroprosessori ja lämpöanturi helpottamaan sovellusten esittämistä. Laitesovelluksesta luovuttiin, koska katsottiin, ettei se yksilöitynyt oppilaitoksen tarvitsemaan opetuskäyttöön. Sen tilalle valittiin XBee-lähetin-vastaanotinmoduuli, jonka tarjoamat sovellusratkaisut olivat lähempänä oppilaitoksen hakemaa opetuslinjaa.

Tiedonsiirtoympäristö toteutettiin XBee-moduulien avulla siten, että yhdestä moduulista luotiin koordinaattorilaite ja kahdesta muusta moduulista päätelaitteet eli verkosta luotiin kolmen laitteen muodostama ns. tähtiverkko. Toimintaa ohjattiin X-CTU-tietokoneohjelman avulla niin AT-komennoilla kuin myös ohjelman oman graafisen käyttöliittymän avulla. AT-komennot pystyy lähettämään moduulille millä tahansa terminaaliohjelmalla sarjaporttia pitkin tai tuomalla ne moduulille heksalukuina esim. mikrokontrollereiden avulla. A/D-muunnoksen toteuttaminen lopputyössä jäi esimerkkiasteelle, koska ensimmäisten käyttöönotetuiden moduulien laiteohjelmistot eivät tukeneet A/D-muunnosta eikä sen johdosta käytännön kokeilu onnistunut.

7 Lähteet

1. Hämäläinen, Pertti. Viimeisen metrin tekniikat. Tietokone, 10/2003, s. 49-50
2. André, Fabrice. ZigBee with Xbee. Elektor Electronic, 11/2006, s. 64-67
3. Labiod, Houda & Afifi, Hossam & De Santis, Costantino. Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee and WiMAX . Springer, 2007
4. Eady, Fred. Hands-On ZigBee. Elsevier, 2007
5. Hämäläinen, Pertti. Kilpailijoilla täsmällisempi purenta. Tietokone, 1/2005, s. 40-42
6. Blaser, Mitch. Industrial-strength security for ZigBee. Embedded Computing Design – Special feature, May/2005 s. 1-5
7. André, Fabrice. ZigBee Transceiver. Elektor Electronic, 3/2007, s. 54-57