

# ZIGBEE-PAIKANNUS

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Tietokone-elektroniikka  
Opinnäytetyö  
Kevät 2010  
Ilkka Kortelainen



Lahden ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma

KORTELAINEN, ILKKA: ZigBee-paikannus

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö, 28 sivua, 14 liitesivua

Kevät 2010

TIIVISTELMÄ

---

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ZigBee-paikannusta sekä suunnitellaan ja toteutetaan alueellinen paikannusjärjestelmä. Paikannusjärjestelmän vertailupisteet voivat sijaita rakennuksen yleiskäyttöisessä anturiverkossa, esimerkiksi valokatkaisijoissa, pistorasioissa, LED-valaisimissa, palohälyttimissä, lukoissa, valvontakameroissa ja termostaateissa.

Työssä on tarkoituksena antaa kattava kuvaus anturiverkoista ja erilaisista paikannusjärjestelmistä. Toteutetun paikannusjärjestelmän anturiverkkoa varten suunniteltiin edullinen ja yleiskäyttöinen ZigBee-moduuli.

Verkkotekniikkana anturiverkossa käytetään ZigBee- ja 6LoWPAN-toteutuksia. Lopulta paikannus toteutetaan vain 6LoWPAN-verkossa IPv6 ryhmälähetyksien avulla, mutta paikannustekniikka on samantyyppinen kuin ZigBee-paikannuksessa käytettävä.

Paikannusjärjestelmä saadaan toimimaan onnistuneesti, ja sen avulla voidaan paikannustarkkuus ja ominaisuudet määrittää edelleenkehittävän anturiverkkosovelluksen tarpeisiin.

Avainsanat: IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, paikannus, anturiverkot

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in Information Technology

KORTELAJNEN, ILKKA:

ZigBee Positioning

Bachelor's Thesis in Computer Electronics

28 pages, 14 appendixes

Spring 2010

ABSTRACT

---

This thesis deals with ZigBee positioning. The positioning is achieved by static reference nodes which can be integrated in sensors or actuators of a wireless sensor network.

A local positioning system was developed for testing. First, wireless sensor networks and different positioning systems were examined. Then an applicable ZigBee module was developed for the test system.

ZigBee and 6LoWPAN were used as network protocols in the test system. Positioning was only tested in 6LoWPAN network with multicast over IPv6, but the technology is similar to that of ZigBee positioning.

The test system functions properly and the positioning properties can be successfully determined for the needs of future applications.

Key words: IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, positioning, wireless sensor network

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 IEEE 802.15.4	1
2.1 ZigBee	2
2.2 6LoWPAN	2
3 ANTURIVERKOT	2
4 PAIKANNUS	3
4.1 Sisätilapaikannustekniikat	5
4.2 IEEE 802.15.4- ja ZigBee -paikannus	9
4.3 Käyttökohteet	10
5 TESTIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS	11
5.1 Lähtökohta	11
5.2 Pääkomponentit	12
5.2.1 CC243x	12
5.2.2 Antenni	13
5.2.3 Virtalähde	13
5.3 Suunnitteluprosessi	14
5.3.1 Komponenttien ja piirilevyjen hankinta	14
5.3.2 Käytetyt tekniikat	14
5.3.3 Käytetyt ohjelmistot	15
5.4 Kokoonpano	15
5.5 Toteutetut laitteet	16
5.5.1 ZigBee-moduulin prototyyppi	17
5.5.2 ZigBee-moduuli	17
5.5.3 Ohjelmointilaite V1.0	18
5.5.4 Ohjelmointilaite V2.0	18
5.5.5 Ohjelmointilaite V3.0	19
5.5.6 USB-UART-Sovitin	19
5.5.7 AVR-Ohjelmointilaite	19
5.6 Työn kulku	20
5.7 Ohjelmistojen suunnittelu ja toteutus	20

6 TESTAUKSET JA MITTAUKSET	22
7 ARVIOINTI	24
8 YHTEENVETO	25
LÄHTEET	26
LIITTEET	28

## 1 JOHDANTO

Työn tavoitteena oli tutkia ja toteuttaa ZigBee-paikannuksen testijärjestelmä sekä tutkia erilaisia paikannustekniikoita ja toteutusvaihtoehtoja. GPS-paikannus ei toimi hyvin sisätiloissa ja tarvitsee myös erillisen radion paikkatiedon lähettämiseksi ulkopuolisiin älykkäisiin järjestelmiin.

ZigBee-paikannus on ollut tiiviin tutkimuksen alla jo useita vuosia. Yksinkertaisille ja halvoille paikannusmenetelmille voisi olla kysyntää monissa erilaisissa käyttökohteissa. ZigBee-laitteiden kantama ei ole kovin pitkä, ja kolmiopaikannukseen tarvitaan vähintään kolme vertailupistettä, eli paikannukseen tarvitaan useita laitteita eli anturiverkko. Työssä tutkittiin anturiverkkoja ja niiden mahdollisia käyttökohteita, koska anturiverkkojen lisääntyminen luo mahdollisuuksia paikannukselle.

Tässä työssä keskityttiin signaalinvahvuuden avulla suoritettavaan paikannukseen, sen helpon ja halvan toteutettavuuden vuoksi. Myös muita paikannustekniikoita tutkittiin, mutta ei löydetty yksinkertaisesti toteutettavaa järjestelmää.

Työn käytännön osassa rakennettiin paikannuksen testausjärjestelmä. Kaikki järjestelmän osat kehitettiin itse, koska harrasteluprojektiin ei ollut käytettävissä satojen eurojen määrärahoja.

## 2 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 on matalatehoinen hitaan tiedonsiirtonopeuden radiolaitte-standardi. Kantaman yläraja on yleensä alle kilometrin, sisätiloissa jopa kymmeniä metrejä. (Wikipedia 2010.)

IEEE 802.15.4-standardi määrittelee fyysisen radiorajapinnan, välitettävien pakettien ominaisuudet sekä osoite-avaruuden. Erityisen tärkeää paikannuksen kannalta

on standardin vaatima yhteyden laadunilmaisoin eli LQI-arvo jokaiselle vastaanotetulle paketille. Standardin mukaan LQI-arvo tulisi määrittää joko keskimääräisenä kanavaan vastaanotettuna tehona tai signaalikohina-suhteena, ja sen tulisi olla skaalattu välille 0-255. Vastaanottotehon ilmaisoin eli RSSI pohjautuu yleensä näihin standardissa esiteltyihin määreisiin. (IEEE 2006, 65.)

## 2.1 ZigBee

ZigBee on IEEE 802.15.4-standardia käyttävä korkeamman tason verkkomäärittäminen. ZigBee tuo IEEE 802.15.4-standardin päälle verkko-, turvallisuus- ja sovellusmäärittäykset. Tavoitteena on, että eri valmistajien ZigBee-laitteet ovat lähtökohtaisesti yhteensopivia. ZigBee sisältää erilaisia profiileja erilaisille käyttökohteille sekä yleisimmille laitteille. (ZigBee Alliance 2009.)

ZigBee topologia on melko laaja ja monimutkainen, mutta toisaalta se soveltuu lähes kaikkiin käyttötarkoituksiin. ZigBee Alliance kehittää määrittäyksiä aktiivisesti, ja kehitys on ollut hyvin nopeaa viime vuosina.

## 2.2 6LoWPAN

6LoWPAN mahdollistaa IPv6-pakettien välittämisen IEEE 802.15.4 standardin päällä (Wikipedia 2010). 6LoWPAN voi toimia ilman ZigBee toteutusta ja myös samaan aikaan samassa laitteessa. 6LoWPAN pakkaa IPv6-pakettien otsikot, joten viestitys sekä myös laiteohjelma ovat huomattavasti ZigBeen määrittäyksiä kevyempiä.

## 3 ANTURIVERKOT

Viime vuosina langattomien tekniikoiden nopea kehitys ja lisääntynyt tarve ovat luoneet langattomien anturiverkkojen käsitteen. Langaton anturiverkko koostuu suuresta määrästä älykkäitä radiolaitteita eli solmukohtia, jotka yleensä mittaavat tai ohjaavat jotain. Solmukohtat luovat skaalautuvan tiedonsiirtoympäristön, jossa



laitteet voivat lähettää viestejä haastavissakin oloissa älykkään reitityksen avulla. Solmulaite koostuu vähintään virtalähteestä, prosessorista, muistista ja radiosta. (Halder 2008; Dominguez-Duran 2010, 1.)

Riippuen laitteen vaatimuksista ja verkon topologiasta yksittäiset laitteet voivat olla toteutettu monilla eri tekniikoilla ja ne voivat suorittaa monia erilaisia tehtäviä, esimerkiksi reititystä, mittausta ja ohjausta. Laitteen roolin yleensä määrittää liitettävät anturit, tehon kulutus ja hinta. (Rantala 2007.)

Useissa anturiverkoissa solmukohtien laiteohjelmat pystytään ohjelmoimaan langattomasti. Langattomista anturiverkoista on tullut perusosa älykkään ympäristön konseptille, jossa hajautetut ja yksinkertaiset laitteet mahdollistavat digitaalisen ja reaali maailman yhdistämisen paikallisesti sekä maailmanlaajuisesti. (Dominguez-Duran 2010, 1.)

Anturiverkkotekniikat ovat viime vuosina kehittyneet nopeasti, mutta vielä perusongelmana on laitteiden virransaanti, joskin viime aikoina erilaiset energian keräystekniikat ovat kehittyneet nopeasti. Nykyisin anturiverkkoja käytetään jo puolustustekniikassa, terveydenhuollossa, ympäristön mittaamisessa, kotiautomaatioissa ja varashälyttimissä. Jatkuvasti halventuvien laitteiden massatuotannon odotetaan tuovan laitteet yleisemmiksi ja monille uusille alueille.

Anturiverkon yksi tärkeimmistä saavutettavista ominaisuuksista on paikan määrittäminen. Anturiverkon avulla toteutettava paikannus on jo tullut yhdeksi tärkeimmäksi sisätilapaikannuksen alueeksi. (Halder 2008, 1.)

#### 4 PAIKANNUS

Yleensä paikannustekniikat perustuvat tiedetyistä vertailupisteistä tulevien signaalien vertailuun. Kolmen vertailupisteen avulla paikka voidaan määrittää kolmiomittauksen avulla. Radiolaitteiden paikannustekniikat eivät yleensä tarvitse ylimääräistä tekniikkaa vaan ne voidaan toteuttaa laitteen ominaisuuksien ja tarpeiden mukaan. (Dominguez-Duran 2010, 1.)

Radiopaikannustekniikat voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan:

#### AOA (Angle Of Arrival)

Tämä tekniikka perustuu antennin suuntauksesta aiheutuvaan vaiheen tai amplitudin muutokseen. Tarkkuuteen vaikuttavat antennin suuntakuvio, signaalin heijastukset sekä signaalin kaikuminen. Päätelaitte tarvitsee suuntaavan antennin sekä näköyhteyden vertailupisteisiin. Tarkkuus voi olla 2-4 metriä. (Dominguez-Duran 2010, 2.)

#### TOA (Time Of Arrival)

Tämä tekniikka perustuu sähkömagneettisen signaalin etenemiseen valonnopeudella. Signaalin lentoajan mittaamiseen tarvitaan erittäin suuritarkkuuksisia kelloja. Suurimpana vaikeutena tässä tekniikassa ovat sisätiloissa NLOS ja signaalin heijastukset, jotka voivat haitata merkittävästi tekniikan käytettävyyttä. Paikannuksen tarkkuus on yleensä alle metri tai jopa senttimetrejä. (Dominguez-Duran 2010, 2.)

#### RSSI (Received Signal Strength Indicator)

Vastaanotetun signaalin voimakkuuteen perustuva tekniikka on yleisin paikannustekniikka langattomissa anturiverkoissa. RSSI-arvo on standardin määrittämä ominaisuus useissa radiolaitteissa, kuten ZigBee-laitteissa. Tekniikan suurin haittapuoli on RSSI-arvon epävakaus ja muutokset ajan myötä. Dynaamisia kalibrointi-tekniikoita on myös kehitetty useita. (Dominguez-Duran 2010, 3; Lei Wu 2010, 4.)

Signaalinvahvuuteen perustuva paikannus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: Signaalin vahvuus voidaan kartoittaa alueella ja tallentaa tietokantaan, josta päätelaitteen paikka voidaan laskea tietokoneella, jolla on yhteys tietokantaan tai paikallinen kopio tietokannasta. Tämä on melko tarkka ja yksinkertainen menetelmä, mutta se tarvitsee aikaa vievän kartoitusvaiheen, ja kartoitus täytyy tehdä uudelleen.

leen ympäristön muuttuessa. Keskustietokoneella tietokantaa voidaan jatkuvasti päivittää, ja on mahdollista käyttää monimutkaisempia algoritmeja esimerkiksi neuroverkko-algoritmeja dynaamiseen kartoitukseen. Toinen paikannusmenetelmä on laskea laitteen paikka signaalin voimakkuuden vaimenemiskaavojen avulla. Tämä voidaan laskea suoraan päätelaitteessa, kun verkon vertailupisteiden paikkatiedot toimitetaan sille. Käytännössä laitteessa pitäisi olla vektorimatematiikkaan soveltuva suoritin tai integroitu paikannuslaskentapiiri, mutta 8-bittiselläkin prosessorilla voidaan suoriutua tehtävästä, kun käytetään sopivia menetelmiä. (Chen 2009, 2.)

Signaalinvahvuuteen perustuvan paikannuksen tarkkuus on yleensä muutamia metrejä. Tarkkuuteen vaikuttavat antennin vahvistuksen suuntakuviot ja laitteiden välillä olevat esteet, joita voidaan kompensoida algoritmeilla ja lisäämällä vertailupisteitä.

#### 4.1 Sisätilapaikannustekniikat

Yleisin vaihtoehto ulkotilapaikannuksessa on GPS-tekniikka, joka toimii käyttämällä 24 satelliitin lähettämiä aikasignaaleja. Missä päin maailmaa tahansa neljän satelliitin ja niiden korjaustietojen avulla saadaan paikannuksen tarkkuudeksi jopa yksi metri. GPS ei ole sopiva sisätilapaikannukseen, koska rakenteet häiritsevät signaalia liikaa, eikä se sovellu moniin anturiverkkoihin suuren tehonkulutuksensa vuoksi. (Dominguez-Duran 2010, 1.)

Nykyisin sisätilapaikannukseen käytetään yleisimmin RFID-, Bluetooth-, ZigBee-, infrapuna-, ultraääni- ja WiFi -tekniikoita. Tällä hetkellä mikään tekniikka ei täysin sovellu kaikkiin tarpeisiin. Yleinen käsitys on että sisätilapaikannukseen riittää huonekohtainen tarkkuus. Teoreettinen tarkkuus on usein paljon tätä tarkempi, mutta satunnaiset muutokset voivat aiheuttaa suuriakin virheitä, jotka aiheuttavat jopa paikannuksen väärään huoneeseen. (Halder 2008, 2.)

## RFID

RFID tarjoaa lyhyen kantomatkan, ja se on rajoitettu pistemäisille alueille. RFID-tekniikkaa voidaan käyttää paikannukseen merkkamalla joitain paikkoja RFID-tunnisteilla tai tunnistamalla kiinteillä RFID-vastaanottimilla paikannettavia tunnisteita. (Cheng Y. 2009, 1.)

## Bluetooth

Bluetooth tekniikassa on rajoituksena verkon huono skaalautuminen ja suuri tehonkulutus. (Cheng Y. 2009, 1.)

## UWB (Ultra Wide Band)

UWB-tekniikalla on hyvä läpäisykyky lyhyillä matkoilla, mutta lyhyt kantomatka. UWB-tekniikalla saavutettava 3-ulotteinen paikannustarkkuus on jopa kymmeniä senttimetrejä. (Hooijdonk 2010.)

## Laser

Kiinteät tukiasemat lähettävät ympäriinsä lasersignaalia, joista paikannettava laite laskee saapumisajat ja saapumiskulman. Tällä tekniikalla saavutetaan alle millimetrin tarkkuus isoissakin halleissa. (Hooijdonk 2010.)

## Ultraääni

Ultraäänipaikannus perustuu äänen saapumisajan eroihin referenssipisteistä. Tekniikan suurin ongelma on ympäristön lämmön ja kosteuden muutoksien aiheuttama virhe, ja myös kellojen epätarkkuudesta johtuva synkronoinnin virhe voi aiheuttaa suurta epätarkkuutta. Tarkkuudeksi voidaan saada jopa muutamia senttimetrejä. (Dominguez-Duran 2010, 2.)

## WiFi

WiFi-tekniikka mahdollistaa paikannuksen laajalle alueelle, mutta tarvitsee monimutkaisemmat ohjelmistot sekä kalliimman elektroniikan. WiFi-paikannusta voidaan käyttää lähettimien kuuluvuusalueella sisä- ja ulkotiloissa. Paikannuksen laskeminen edellyttää tehokkaampaa tietokonelaitetta, jossa on kartta paikannusalueen signaalinvoimakkuuksista. Kartta voi sijaita päätelaitteessa tai verkossa. Paikannettava laite havaitsee signaalin voimakkuuksia kaikilta alueella olevilta WiFi-lähettimiltä. Signaalien voimakkuuksia verrataan tallennettuun karttaan, josta lasketaan sijainti. Paikannus ei välttämättä tarvitse käyttöoikeutta verkkoon, koska kuuntelemalla radioliikennettä voidaan saada tarvittavat signaalinvoimakkuudet. (Suomen Radionavigointiselvitys 2002, 24.)

Ekahau on WiFi-paikannuksen yksi johtavista kehittäjistä. Ekahaun Internet-sivuilta löytyy mielenkiintoinen vertailu ZigBee- ja WiFi-paikannuksen eroista, mikä kuitenkin näyttää jokseenkin virheelliseltä.

*No RF Interference*

*Zigbee is tested to cause interference with 802.11 networks*

*RF interference causes lost packets, increased power consumption and latency. (Ekahau 2010.)*

ZigBee-laitteiden ei pitäisi aiheuttaa häiriötä WiFi-laitteille, koska ZigBee on matalatehoisempi, ja tiedonsiirtomäärät ovat minimaalisia WiFi-verkkoihin verrattuna. IEEE 802 ryhmä valvoo kaikkien 802-standardien yhteensopivuutta. Jo 802.15.4-standardin suunnittelussa on varmistettu sen luotettava yhteistoimivuus Bluetoothin (802.15.1) ja Wi-Fi:n (802.11) kanssa. Yhteensopivuus on myös todennettu useissa reaali maailman sovelluksissa. (ZigBee alliance 2007, 2)

*IT Friendly*

*Zigbee is another RF network to build, maintain, and troubleshoot. (Ekahau 2010.)*

ZigBee-verkon pystyttäminen sekä virtalähteiden vaihto ja muu huoltaminen voivat olla työläisiä. Toisaalta konfigurointi-prosessi on helpompi, ja päätelaitteet voidaan uudelleenohjelmoida langattomasti, ja myös energiankeräys tekniikoiden nopea kehitys voi tehdä virtalähteen vaihdon tarpeettomaksi.

### *Highly Scalable*

*Zigbee is designed for personal area networks, not enterprise.*

*802.11 Wi-Fi has been used in the largest enterprises for years. (Ekahau 2010.)*

ZigBeen mesh -tyyppinen topologia soveltuu hyvin hankaliinkin käyttökohteisiin, ja se skaalautuu jo suunnittelulähtökohtaisesti jopa kymmenien kilometrien alueelle ja kymmenille tuhansille laitteille, joten skaalautuminen ja vikasietoisuus ovat jopa parempia kuin Wi-Fi-järjestelmissä.

### *Two-Way Communication*

*Zigbee RTLS tags do not support two-way communication*

*The lack of two-way communication means Zigbee tags can't do text messaging or over-the-air tag management. (Ekahau 2010.)*

ZigBeen suunnittelulähtökohta on älykäs anturiverkko, jossa jokainen verkon piste voi kommunikoida toistensa kanssa. Paikannusprofiili on usein vain yksi laitteeseen ohjelmoidusta toiminnoista.

ZigBee-verkossa paikannus voi vielä toimia, vaikka suurin osa kaikesta tietotekniikasta rikkoontuisi, koska paikkatiedot voivat olla hajautettuina järjestelmän kiinteisiin vertailupisteisiin jotka voivat olla paristokäyttöisiä. WiFi-järjestelmässä voi jo yhden laitteen rikkoutuminen heikentää koko paikannusverkkoa.

Ekahaun vertailu on ilmeisesti vain oman tuotteen mainontaa, ja luonnollisesti yritysmainonnassa harhaanjohtaminen on enemmän sallittua kuin kuluttajamainonnassa. Löytyy myös oikeita syitä, miksi WiFi on parempi paikannustekniikka, mutta niitä ei lähdetty syvällisemmin tutkimaan.

## GSM

GSM-paikannustekniikoita on kehitetty lukuisia. Monessa valtiossa täytyy operaattoreiden jo lakisääteisesti pystyä paikantamaan kaikki matkapuhelimet. Myös päätelaitepohjaisia ratkaisuja on useita. Jo 2000-luvun alkupuolella älypuhelimille oli useita sovelluksia, joilla pystyi kartoittamaan tukiasemien kenttien vahvuuksia, mutta Nokian surullisen huonon ohjelmisto-osaamisen johdosta koko innovaatioympäristö oli nopeasti tuhottu. Nykyisin päätelaiteratkaisut perustuvat yleensä vain avustettuun GPS-tekniikkaan. Yleensä GSM-paikannuksen tarkkuus on satojen metrien luokkaa, mutta rakennuksiin voidaan rakentaa GSM-sensoriverkko, joka mittaa matkapuhelimista tulevien signaalien aikaeroja, ja näin voidaan saavuttaa riittävä tarkkuus sisätilapaikannukseen. (Hooijdonk 2010.)

## TV

TV-asemien signaalit kuuluvat hyvin sisätiloihin, ja asemien paikat ovat tarkasti tiedossa. Tarkkuus ei läheskään riitä sisätilapaikannukseen, mutta voidaan ehkä määrittää talon sijainti. (Hooijdonk 2010.)

### 4.2 IEEE 802.15.4- ja ZigBee -paikannus

Erilaisia ZigBee/802.15.4 -paikannusjärjestelmiä on kehitetty kymmeniä, joista suurin osa perustuu RSSI-menetelmiin. RSSI-menetelmän suuresta epätarkkuudesta johtuen tarvitaan usein monimutkaista vektorilaskentaa paikan määrittämiseen. Muutamit järjestelmät käyttävät signaalin lentoaikaa matkan määrittämiseen, ja esimerkiksi Jennicin JN5148-mikrokontrollerissa on integroituna signaalin lentoajan mittauspiiri. (Jennic 2010, 1.) RSSI-menetelmää käyttävien järjestelmien virhe on yleensä alle viisi metriä, ja käytettäessä kehittyneempiä tekniikoita päästään jopa alle metrin virheeseen. Lentoaikaa käytettäessä päästään helposti alle metrin tarkkuuteen.

### 4.3 Käyttökohteet

Anturiverkkojen käyttökohteita:

- maanjärityksien valvonta
- ilmanlaadun valvonta
- melun valvonta
- kylmälaitteiden valvonta
- tehdasautomaatio
- suuritehoisten laitteiden värinän, lämpötilan ja äänen valvonta
- rakennusautomaatio
- kaukosäätimet ja ohjaimet
- PC:n hiiri/näppäimistö
- kasvien monitorointi
- varaston inventaarion seuraaminen
- lääkkeiden käytön seuraaminen
- potilaiden monitorointi
- kulunvalvonta
- liikkeentunnistus
- ovien lukitus
- valaistuksen ohjaus
- laitteiden ohjaus
- pistorasioiden ohjaaminen
- sähkön katkaisu vikatilanteessa tai palon aikana
- energiankulutuksen seuraaminen

Anturiverkkopaikannuksen käyttökohteet

GPS-paikannus on luonut lukuisia paikannussovellutuksia, ja näin voi myös käydä sensoriverkkopaikannukselle tulevaisuudessa. ZigBee-paikannuksen yleistymisen voisi tuoda merkittävää kasvua ZigBee-tekniikan markkinoille, tai sensoriverkkojen yleistymisen voi kasvattaa ZigBee-paikannuksen yleisyyttä.



Taulukossa 1 on mietitty muutamia paikannuksen käyttökohteita sekä niiden tarkkuus- ja reaaliaikavaatimuksia.

TAULUKKO 1: Paikannuksen käyttökohteita

Käyttökohde	Tarkkuus	Paikannusväli
robootti navigointi sisätiloissa	0,5 m	1 s
robootti-lauman paikannus	1 m	1 s
ihmisten paikannus	20 m	20 s
eläinten paikannus	10 m	10 s
sähköinen aita eläimille	2 m	0,5 s
potilaiden paikannus	5 m	30 s
instrumenttien paikannus	10 m	60 s
oppilaiden paikannus	10 m	20 s
golf pallon/pelaajien paikannus	30 m	20 s
henkilöstömiinojen paikannus	2 m	200 s
asiakkaiden paikannus	5 m	2 s
työkalujen paikannus	10 m	60 s

## 5 TESTIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

### 5.1 Lähtökohta

Työn tavoitteena oli edullisen ja yleiskäyttöisen ZigBee-anturiverkon rakentaminen, jossa yritettäisiin toteuttaa jonkinlainen paikannuksen testausjärjestelmä.

Edullisuus ajateltiin pääasiassa saavutettavan tilaamalla kalliimmat komponentit näytteinä. Muita vaatimuksia olivat, että laite olisi mahdollista rakentaa käytettävissä olevilla välineillä ja kaikki komponentit ovat tilattavissa Suomeen.

Alustavasti suunniteltiin CC243x-piirien soveltuvuutta työhön, minkä jälkeen tilattiin noin 10 näytepiiriä. Piirien saapumisen jälkeen voitiin aloittaa moduulin suunnittelu.

Paikannuksen matemaattiselle mallille mietittiin useita eri toteutusvaihtoehtoja. Mahdollisuutena oli toteuttaa jokin oikea paikannuksen matemaattinen malli, mutta ei löytynyt mitään yksinkertaista ja tyydyttävää toteutusta, jonka tutkimiseen olisi kannattanut panostaa aikaa.

Yksinkertainen vaihtoehto olisi ollut kartoittaa kiinteiden solmukohtien lähetysoimakkuudesta kartta ja muuttaa se bittikartaksi, jossa jokainen väri edustaa yhtä kiinteää referenssiradion kentän vahvuutta. Kartta voitaisiin sitten muokata kuvankäsittelyalgoritmeilla sulavan näköiseksi kuitenkin säilyttäen kentän esteelliset alueet. Tällaisesta bittikartasta olisi helppo etsiä paikannettava kohde, ilman vaikeaa matematiikkaa. Kehittyneempi vaihtoehto olisi ollut toteuttaa jonkinlainen neuroverkko tai oppiva järjestelmä.

Lopulta myöhemmin ajateltiin toteuttaa jonkinlainen sopeutuva nollakonfiguraatio järjestelmä, jossa tietokoneohjelman laajennettavuudella voitaisiin tarkkuutta, konfiguraatiota tai muita ominaisuuksia myöhemmin lisätä. Tällä tavoin voitaisiin RSSI-pohjaista paikannustekniikkaa helpoiten testata ilman aikaa vievää konfiguraatioprosessia.

## 5.2 Pääkomponentit

### 5.2.1 CC243x

Tässä työssä valittiin käytettäväksi Texas Instrumentsin CC243x-piirejä, koska CC2431-piirissä on integroitu paikannusalgoritmi, ja niitä saatiin ilmaisina näytteinä. CC243x on noin viiden euron hintainen ZigBee-piiri, jossa on integroitu 8-bittinen 8051-mikroprosessoriydin. CC2431 on muuten identtinen kuin CC2430, piille on vain lisätty paikannusalgoritmi. Tällaisen paikannusalgoritmin toteuttaminen ohjelmistolla 8-bittisellä prosessorilla on vaativaa.

### 5.2.2 Antenni

Aluksi oli suunnitelmana käyttää keraamista siruantennia, mutta oikeanlaisen antennin saatavuus ei näyttänyt hyvältä, eivätkä myöskään kytkentäesimerkit olleet tarpeeksi selkeitä erilaisille antennille, joten päädyttiin toteuttamaan mikroliuska-antenni. Mikroliuska-antennin ominaisuudet voivat olla jopa huomattavasti paremmat kuin siruantennin. Erilaisia antennivaihtoehtoja on lukuisia. Antenni ja baluuni toteutettiin mahdollisimman tarkkaan mallien pohjalta.

### 5.2.3 Virtalähde

ZigBee-piirin virrankulutus datasisivujen mukaan on alle 30 mA, kun radio on aktiivisena, 10 mA muulloin ja lepotilassa alle 0,001 mA. Käyttöjännite on välillä 2,0 - 3,6 voltia. (Texas Instruments 2009.)

Edellisiin määrityksiin voisi kaksi sarjankytkettyä 1,5 voltin alkaliparistoa olla sopivin vaihtoehto edullisen hintansa sekä pitkän eliniän vuoksi. Useissa litium- ja nikkeli-akkutyypeissä on haittana suuri itsepurkautuminen tai korkea hinta. Litium mangaaniparistossa eli kolikkoparistossa on tavallisesti 3 voltin jännite ja 220 mAh kapasiteetti, mutta datasisivun mukaan kuormitettavuus on vain alle 1 mA (Sony 2010). Kuitenkin kolikkoparistolla on melko suuri kapasiteetti, pitkä elinikä ja halpa hinta. Käytännön kokemuksesta myös tiedettiin, että ne soveltuvat hyvin suurempiinkin kuormitusvirtoihin.

Moduulien virtalähteeksi valittiin 20 mm halkaisijaltaan oleva CR2032-tyyppinen litium paristo. Ajateltiin myös pienen hakkuriregulaattorin lisäämistä moduuliin, mutta ei löydetty sopivaa yksikomponenttista 2.0 voltin regulaattoria. Testauksessa käytettiin vanhoja suurikapasiteettisia litium ION-akkuja. Vanhoja litiumpohjaisia akkuja ladatessa aiheutuu suuri palo- ja räjähdysvaara, joten palohälytyn asennettiin latauspaikan lähistölle.

## 5.3 Suunnitteluprosessi

### 5.3.1 Komponenttien ja piirilevyjen hankinta

Piirilevyt suunniteltiin tilattavaksi joltain nopealta toimittajalta, mutta ei löydetty hyvää toimittajaa, joka olisi valmistanut itsepaneloidun levyn edullisesti, joten jouduttiin tilaamaan paneloimattomana halvalla Kiinasta.

Komponenttien toimittajana suunniteltiin käytettävän Yhdysvaltalaista Mouser electronics -toimittajaa. Mouserin etuina olivat suuri valikoima, ilmainen postitus, edulliset hinnat sekä tulliselvitys ja ALV sisältyivät tilaukseen, joten ei ollut vaara että paketti jäisi tulliin. Juotospasta tilattiin kiinalaiselta toimittajalta.

### 5.3.2 Käytetyt tekniikat

Ohjelmointilaitteissa sekä UART-laitteessa käytettiin autoroutea eli automaattista signaalinreititysmenetelmää, minkä jälkeen käyttöjännitteen sekä kellosignaalien vedot varmistettiin manuaalisesti. Autorouter-ohjelmalla käytettiin Java-pohjaista FreeROUTE-ohjelmaa, joka osoittautua erinomaiseksi, ja oli hyvin integroitu piirilevysuunnitteluohjelman prosessiin.

ZigBee-moduulit reititettiin manuaalisesti alusta asti, vaativamman signaali-ympäristön ja ahtaamman tilan takia. Maatason läpivientejä tehtiin mahdollisimman tiheästi yhtenäisen maatason saavuttamiseksi.

Kiinnitystekniikaksi kaikkien laitteiden välille suunniteltiin yleiskäyttöinen piirilevyltä-piirilevylle mallinen yhteys. Välikappaleena siinä voitaisiin käyttää piikki-rimaa tai piirilevylitiin-komponenttia. Sekä naaras että uros-liitäntä olivat piirilevyn kuparilla identtisiä, ja ainoastaan toiseen täytyi pinnien looginen järjestys kytkeä peilikuvana.

Eri laitteissa pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon samoja komponentteja, jotta työ helpottuisi kokoonpano vaiheessa. Lopuksi kaikki piirilevyt paneloitiin

yhdeksi isommaksi piirilevyksi, koska tilaamalla kaikki eri piirilevyinä hinta olisi ollut moninkertainen.

### 5.3.3 Käytetyt ohjelmistot

Aluksi laiteohjelmointiin käytettiin IAR-ohjelmointiympäristöä, koska ZStack eli Texas Instrumentsin ZigBee-ohjelmapino vaati sen käyttämistä. IAR-ohjelmointiympäristö oli käytettävyydeltään kohtalainen, ja suurimpana haittapuolena voisi olla integroidun ZStack-dokumentaation puute. Tiedostojärjestelmään hajautettujen PDF-dokumenttien ja huonojen oletusasetuksien takia kääntäminen osoittautui erittäin hankalaksi. IAR-testilisenssi kuitenkin päättyi 30 päivän jälkeen, eikä harasteluprojektiin ollut varaa laittaa tuhansia euroja, joten siirryttiin käyttämään mstack-ohjelmapinoa ja Eclipse-ohjelmointiympäristöä.

Eclipse on erinomainen ohjelmistokehityksen muutamasta merkittävästä käytettävyyden virheestä huolimatta. Ohjelmana Eclipse oli hieman hidas ja raskas, mahdollisesti käytetystä Java-ohjelmointikielestä johtuen (Schaefer 2008).

Piirilevysuunnitteluun käytettiin KiCAD-ohjelmistoa. KiCAD on avoimenlähdekoodin ohjelma, mitä käytettiin hyväksi ohjelmoimalla piirilevyantennin suunnittelua helpottava ominaisuus.

PC-ohjelmointiin käytettiin QT-kehityspaketin mukana tullutta kehitysympäristöä. Tämä oli ylivoimaisesti paras käytetyistä ympäristöistä, vaikka ei ollut lainkaan aiempaa kokemusta QT-ohjelmoinnista.

## 5.4 Kokoonpano

Kokoonpanossa käytettiin kahta eri juotostekniikkaa. Ensimmäiset 3 piirilevyä valmistettiin perinteisesti kolvilla käyttäen erilaisia tekniikoita. Radiopiiri-komponentissa johtimet olivat piirin alapuolella joten juottamisen helpottamiseksi suun-

nittelu vaiheessa tehtiin iso läpivienti piirin keskelle. Piiri juotettiin lämmittämällä suurta määrää tinaa läpiviennin kautta ja painamalla mikrosiru tarkasti paikalleen.

Loput laitteet valmistettiin juotospastan avulla sulatusjuotto-menetelmää käyttäen. Ensin piirilevyistä pestiin epäpuhtaudet kuumalla vedellä ja kuivatettiin muutama tunti sähköuunissa. Myös osaa komponenteista paistettiin uunissa useita tunteja kosteuden haihuttamiseksi. Uunin termostaatti oli säädetty yli sataan asteeseen. Jäähdyneiden piirilevyjen jokaiselle padille levitettiin juotospastaa injektioneulan ja tulitikun avulla. Tämän jälkeen komponentit asetettiin paikoilleen, ja piirilevyt asetettiin sähkölieden levyille. Levyn ja piirilevyjen välissä käytettiin alumiinilevyä tasoittamaan lämpötilaa ja suojaamaan rasvalta ja muilta epäpuhtauksilta. Levyä kuumennettiin eri säätövoimakkuuksilla aistinvaraisen arvioinnin mukaan, kunnes juotospasta oli selvästi sulanut. Lopuksi piirilevyistä harjattiin ylimääräinen tina pois, ja virheet korjattiin kolvilla. Tällaiseen ReFlow-menetelmään on olemassa tarkat standardit, joita noudattamalla voidaan varmistua, ettei mikään komponentti vioitu prosessissa. Prototyypin valmistuksessa ei prosessilla ole suurempaa merkitystä, koska pienissä erissä vioittuminen on epätodennäköistä. Lisäksi tinapastan levitys on toteutettu liian epämääräisesti, kun se on tehty ilman stensiiliä, joten kuumempi prosessilämpötila on jopa suotavaa.

Arvioitiin että sulatusjuotto-menetelmä on jonkin verran nopeampi, kun valmistetaan useampia levyjä kerralla, vaikkakin lähes jokaisesta levystä täytyi tinasillat ja huonosti kiinnittyneet komponentit korjata jälkeensä. Kokoonpanossa käytettiin vain lyijyllisiä juotostuotteita niiden paremman soveltuvuuden vuoksi.

## 5.5 Toteutetut laitteet

Työssä suunniteltiin kaksi ZigBee-moduulia, ohjelmointilaitteet ja sarjaliikennesovitin. Liitteistä 1-13 löytyvät laitteiden kytkentäkaaviot ja piirikaaviot. Taulukko komponenteista ja niiden hinnoista löytyy liitteestä 14.

### 5.5.1 ZigBee-moduulin prototyyppi

Laitteen suunnitteluun otettiin mallia useista Texas Instrumentsin mallitoteutuksista. Täysin sopivaa mallia ei löytynyt, joten etenkin baluuni ja maatasen täyttökuparoinnin alue baluunin lähistöllä jäi arveluttamaan. Laitteessa käytettiin 0603-kokoisia komponentteja mallitoteutuksien 0402-kokoisien sijasta. Komponenttien koolla voi olla suurikin vaikutus etenkin baluunissa. Suotokondensaattorit valittiin kompromissina, koska haluttiin pitää komponenttimäärä pienenä. Piirilevyn koko täytyi olla ehdottomasti alle yksi neliötuuma, muuten piirilevyn hinta olisi ollut kaksinkertainen. Pinta-alan rajoitus aiheutti huomattavia hankaluuksia signaalivetoihin, joten kaksi ohjelmointiliitännän vetoa jouduttiin jättämään vedettäväksi hyppyjohdolla. Kaikki käytetyt komponentit olivat melko tarkasti yhtä matalia, näin korkeusprofiilista saatiin tasainen. Useista mahdollisista virheistä johtuen ei oltu täysin vakuuttuneita laitteen toiminnasta, niin piirilevyjä tilattiin vain kolme kappaletta. Yhden rakennetun prototyyppilaitteen komponenttien ja piirilevyn hinnaksi tuli yhteensä noin 4 €.

### 5.5.2 ZigBee-moduuli

ZigBee-moduulin prototyyppiversioinnin toiminnan todentamisen pohjalta suunniteltiin parempi versio moduulista. Tiedettiin että prototyyppiversio pystyy toimimaan, mutta puolet laitteista oli toimimattomia, joten päätettiin tarkastaa kaikki mahdolliset suunnitteluvirheet.

Suuria vikoja ei löydetty, mutta tehtiin monia pieniä korjauksia:

- Käytettiin pienempiä 0402-kokoisia komponentteja.
- Ohjelmointiliitännää yksinkertaistettiin.
- Lisättiin 2 lediä ja niille yhteinen etuvastus.
- Mittasuhteita muutettiin kaikkien vetojen mahduttamiseksi.
- Läpivientejä lisättiin maatasoon huomattavasti.
- Suotokondensaattorien määrää ja eri arvoja lisättiin.
- Baluuni tehtiin kokonaan uudestaan.
- Antenniin tehtiin ohut lakkamaskaus.

Moduuliin oli tarkoitus lisätä optio kiihtyvyyden ja kompassin anturille, mutta pikaisella etsinnällä ei löydetty SPI-väylässä toimivaa kiihtyvyyssanturia, jossa olisi ollut myös kompassi. Heikon virtalähteen takia superkondensaattorin ja pienen hakkuriregulaattorin lisäämistä harkittiin. Superkondensaattori voitaisiin tarvittaessa liittää pariston liittimiin. Hakkuriregulaattoria ei löydetty sopivaa, ja se voisi heikentää pariston elinikää passiivisissa sovelluksissa.

Yhden tällaisen moduulin komponenttien ja piirilevyn hinnaksi tuli yhteensä noin 3€. Radiopiiri saatiin näytteenä, ja sen hinta olisi yksittäiskappaleina ollut noin 7€. Valmistettaessa 1000 kappaleen erä näitä moduuleita hinnaksi laskettiin n. 8€/kpl.

### 5.5.3 Ohjelmointilaite V1.0

Prototyypilaitteen ohjelmointiin suunniteltiin käytettäväksi Texas Instrumentsin CC2430DB-kehityslaitteen tyyppistä tapaa. CC2430DB on USB-liitäntäinen kehitysmoduuli, joka toimii kaikkien TI:n ohjelmistojen kanssa. CC2430DB käyttää Silicon Labsin USB-mikrokontrolleria ohjelmointisovittimena. Kontrollerin käynnistyslataaja sekä laiteohjelma löytyivät TI:n ohjelmointi työkalun mukana, joten nopeasti keksittiin, että pelkällä samanlaisella kontrollerilla voitaisiin CC2430-piiri ohjelmoida. Vastaavasta kontrollerista löytyi erittäin edullinen evaluointikortti, jonka katsottiin käyvän kyseiseen tarkoitukseen erinomaisesti. Luonnollisesti evaluointikortin ohjelmoitiin täytyi samalla tilata sen ohjelmointisovitin.

### 5.5.4 Ohjelmointilaite V2.0

ZigBee-moduulin toisen version ohjelmointia varten suunniteltiin täysin erilainen ohjelmointilaite entisen ohjelmointilaitteen kuitenkin pysyessä yhteensopivana. Tämä ohjelmointilaite tehtiin mstack yhteensopivuuden takia. Laite suunniteltiin avoimen CC\_flasher-ohjelmointilaitteen pohjalta. Laite tehtiin edullisen atiny2313-kontrollerin pohjalta, johon USB-toteutus muodostettiin ohjelmiston avulla.



Käyttöjännite tehtiin 3,3 voltin regulaattorilla, josta saatiin myös käyttöjännite ohjelmitavalle laitteelle. Myöhemmin käytössä ilmeni, että ohjelmitavalle laitteelle menevä käyttöjännite olisi pitänyt eristää paremmin kontrollerin käyttöjännitteestä, koska oikosulut ja ZigBee-moduulin suuri kapasitiivinen kuorma saattoivat aiheuttaa ohjelmointilaitteen uudelleen käynnistymisen.

#### 5.5.5 Ohjelmointilaite V3.0

Tämä ohjelmointilaite on samantyyppinen kuin ohjelmointilaite V1.0, mutta toteutettuna itsesuunnitellulle piirilevyille. Koska tämän tyyppinen ohjelmointilaite on yhteensopiva Texas Instrumentsin ohjelmistojen kanssa, niin näitä laitteita on hyvä olla monta, että voidaan testata useampaa laitetta kerrallaan.

#### 5.5.6 USB-UART-Sovitin

ZigBee-moduulin ja PC-tietokoneen välisessä kommunikoinnissa käytetään pääasiassa asynkronista sarjadataa. Tähän tarkoitukseen suunniteltiin USB-UART-sovitin. Sovittimen vaatimuksina olivat alhainen hinta, pieni koko, sopiva USB-liitäntä sekä helppo liitäntä ZigBee-moduuleihin. Laite suunniteltiin Silicon Labsin CP2102-piirin pohjalle. Piiri luo virtuaalisen sarjaportin PC-tietokoneelle USB-liitäntän kautta.

ZigBee-moduulin käyttöjännite tulee UART-piirin 3,3 voltin sisäiseltä regulaattorilta, ja tässäkin huomattiin, että moduulien suuri kapasitiivinen kuorma voi kytkettäessä aiheuttaa uudelleen käynnistymisen.

#### 5.5.7 AVR-Ohjelmointilaite

Ohjelmointilaite V2.0:n laiteohjelman ohjelmointiin tarvittiin vielä AVR-mikropiirin ohjelmointilaite. Laite suunniteltiin USBasp-ohjelmointilaitteen toteutuksen pohjalle. Tämä laite käyttää myös ohjelmallista USB-toteutusta. Tämän laitteen ohjelmointi suunniteltiin toteutettavaksi suoraan rinnakkaisportin kautta.

## 5.6 Työn kulku

ZigBee-moduulin prototyypin testien jälkeen talvella 2010 suunniteltiin uudet ZigBee-moduulit sekä ohjelmointilaitteet. Piirilevyt tilattiin 2010 keväällä, ja noin viikko piirilevyjen tilausten jälkeen tehtiin komponenttitalaus. Piirilevyt sekä komponentit saapuivat samana päivänä noin kolme viikkoa ennen projektin päättymistä, joten olisi ollut hyvin aikaa kokoonpanoon, ohjelmointiin ja testaukseen, mutta valitettavasti piirilevyjen leikkaamiseen tarkoitettu saha rikkoutui ja saksilla leikkaamisen arvioitiin vääntävän piirilevyä liikaa, joten piirilevyt täytyi leikellä myöhemmin jyrsimellä, mikä hidasti työtä yli viikon verran. Laitteita rakennettiin muutamassa erässä, ja kaikki saatiin ajoissa valmiiksi.

## 5.7 Ohjelmistojen suunnittelu ja toteutus

Järjestelmään tarvittiin vähintään kaksi erilaista laiteohjelmaa sekä PC-ohjelma. Työssä ei lähdetty käyttämään tai muokkaamaan mitään valmiita ohjelmia, koska se olisi vaatinut melkein enemmän vaivaa, eikä tarpeisiin myöskään löydetty hyvin sopivia ohjelmia.

PC-sovellus toteutettiin QT-kehitysympäristön avulla. Sovelluksen pohjana käytettiin ”Elastic nodes” -esimerkkiohjelmaa. Suunnittelulähtökohtana oli että ohjelma voisi toimia sekä ZigBee- että 6LoWPAN-verkkojen kanssa.

USB-UART-sovittimen luoman virtuaalisen COM-portin kanssa kommunikointiin käytettiin QextSerialPort kirjastoa. Vaihtoehtona olisi ollut käyttää USB-UART-sovittimen ajurikirjastoa.

On suunniteltu, että PC-ohjelma:

- Näyttää sarjaportti-ikkunan sekä kartta-ikkunan.
- Listaa tietokoneen sarjaportit.
- Aloittaa portin kuuntelun sekä solmukohtien päivittämisen connect-napista.
- Lopettaa kuuntelun disconnect-napista.
- Listaa tunnistetut vastaanotetut arvot sarjaportti-ikkunaan.

- Lisää laitteita kartta-ikkunaan sitä mukaa, kun niitä tunnistetaan.
- Kun laitteelta tulee päivitysviesti sitä kuvaavan objektin väriä muutetaan kirkkaammaksi sekä yhteydet päivitetään.
- Antenninmääritys sovelluksella voidaan antennille määrittää yksiulotteinen tai moniulotteinen suuntakuvio.
- Antennin suuntakuvio voi olla joka laitteelle yksilöllinen tai kopioitu toisesta laitteesta (esimerkiksi ympäristön esteet vaikuttavat kiinteän pisteen suuntakuviin pysyvästi).
- Suuntakuvioiden määrittäminen tehdään manuaalisesti vastaanottimien etäisyyksiä muuttamalla.

Laiteohjelma tehtiin mstack-ohjelmapiinon päälle, joten se käytti vain 6LoWPAN-protokollaa. Laiteohjelmassa käytettiin ainoastaan ryhmälähetysviestejä, näin yhtään radiokanavalle lähetettyä viestiä ei hukata, eli jokaisesta viestistä RSSI-arvon saavat kaikki samassa tilassa sijaitsevat laitteet.

Laiteohjelman ominaisuudet ja toiminta:

- Liittyy alueelliseen IPv6 verkkoon.
- Kuuntelee tulevia multicast-lähetysviestejä.
- Lähetää paketin multicast-osoitteeseen noin kerran sekunnissa.
- Paketti sisältää edellisten vastaanotettujen lähetysviestien RSSI-arvot.

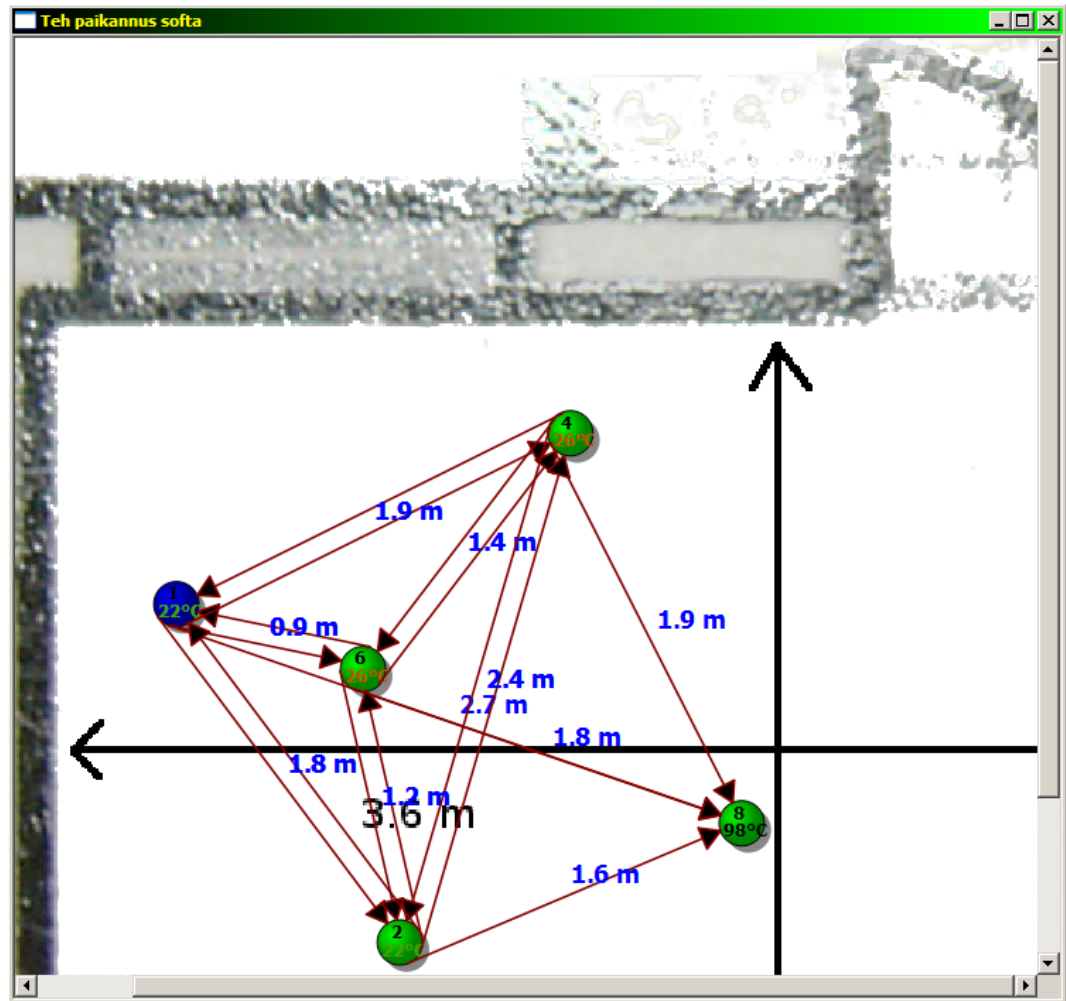
Kaikki ohjelmistot toteutettiin ketterillä koodausmenetelmillä. Käytetty ketterä menetelmä perustui iteratiiviseen ”trial-error”-prosessiin, ruokavalion hallintaan sekä ketterään taukoiliikuntaan. Ensin ohjelmointiin varattiin pitempi yhtenäinen jakso eli pyräys. Ohjelmointipyräyksessä on tärkeää, että työhön keskitytään herkeämättä, ja näin vältetään keskeytyksen aiheuttamilta hidastuksilta. Ohjelmistot toteutettiin suurilta osin kahdessa pyräyksessä. Dokumentaatiota menetelmien johdosta ei luonnollisestikaan tullut. Ohjelmat jäivät hieman puolivalmiiseen tilaan, mutta niitä voitiin silti kutsua valmiiksi tuotteeksi.

## 6 TESTAUKSET JA MITTAUKSET

Testaus aloitettiin ohjelmointilaitteen ja laiteohjelmointiprosessin toiminnan testaamisella. Aluksi ohjelmointi ei millään meinannut onnistua, ja luultiin jo, että suunniteltu ohjelmointilaite on epäsopiva kyseiseen käyttöön. USB-analysaattorilla tutkittaessa kuitenkin huomattiin, että Texas Instrumentsin toimittamissa ohjelmointilaiteajureissa oli eri laitetunnistekoodi käytetyn ohjelmointilaitteen käynnistintalataajaan verrattuna. Koodissa oli vain yhden merkin ero, ja kun se vaihdettiin, ohjelmointilaite tunnistui oikein. Itse käännetyn laiteohjelman lataaminen ZigBee-moduuliin osoittautui vielä hankalammaksi johtuen epämääräisestä virhesanomasta. Myöhemmin dokumentaatiosta löydettiin virheen syy, mutta ratkaisu oli esitetty sielläkin väärin. Ratkaisu löytyi lopulta yhdestä prosessorin määrittystiedostosta. Seuraavassa vaiheessa yritettiin toteuttaa yksinkertainen sarjadatalinkki kahden moduulin välille. Ensimmäisistä kolmesta rakennetussa laitteessa testauksen jälkeen kaksi osoittautui viallisiksi, joten täytyi rakentaa yksi laite lisää, jolla saatiin lopulta radioyhteys ja sarjadatalinkki toimimaan. Vain kahdella toimivalla laitteella ei paikannusverkon muodostaminen ollut mitenkään mahdollista, joten lisää laitteita jouduttiin nopeasti suunnittelemaan uusia ennen kuin ohjelmointityötä voitiin jatkaa.

Uudella ZigBee-moduulilla oli aluksi hankaluuksia saada moduulin sarjaportti toimimaan, mstack-pinosta johtuvien ongelmien takia. Lopulta se saatiin toimimaan ja ohjelmistoja ruvettiin kehittämään testauksen mukaan.

Paikannusohjelmaa testattiin kahdeksalla laitteella. Kuva anturiverkosta (Kuvio 1) muodostui muutamassa sekunnissa ja asettui muutamassa minuutissa. Paikanmääritys näytti toimivan melko hyvin jopa täysin nolla-konfiguraatiolla. Asettamalla kaksi pistettä kiinteästi oikeisiin kohtiinsa verkko oli hyvin lähellä oikean näköistä.



KUVIO 1. Paikannusverkko

ZigBee-moduulin suurin mitattu virrankulutus oli alle 40 mA, lepotilassa alle 0.01 mA. Mittaukset suoritettiin edullisella kiinalaisella yleismittarilla, jonka mittausalue ei riittänyt lepotilan virran mittaamiseen. Riippuu merkittävästi laitteen käyttökohteesta, miten paljon se on lepotilan ulkopuolella ja mikä on keskimääräinen virrankulutus.

Pariston testauksessa käytettiin japanilaista Sony CR2032-paristoa jonka hinta oli noin 50 senttiä sekä kiinalaista halpa-paristoa jonka hinta oli alle 20 senttiä. Kiinalainen halpa-paristo suoriutui tässä testissä Sonyn paristoa huomattavasti paremmin. Tunnin yhtämittaisesti jatkuneen lähetys ja vastaanotto käytön jälkeen kiinalaisen pariston sisäinen resistanssi ja jännite palautuivat erinomaisesti. Paris-

tot suoriutuivat yllättävän hyvin käyttötestissä, joskin tarvitaan oikea sovellus, että toiminta-aika voidaan määrittää.

Alle kahdenkymmenen metrin yhteysmatkalla seinien läpäisykyky oli hyvä, ja pakettihävikkiä ei tapahtunut merkittävästi. Yli 80 metrin yhteysvälillä pakettihävikki oli jo huomattavaa, ja antennin suuntaus vaikutti hävikkiin huomattavasti. Kantomatka oli jopa odotettua parempi ja riittää hyvin suunniteltuun käyttötarkoitukseen.

## 7 ARVIOINTI

Suurin osa laitteista saatiin toimimaan ensimmäisellä yrittämällä, ja suurimmat vaikeudet olivat ohjelmointipuolella. Valitettavasti IAR-ohjelmointiympäristön testijakso loppui ennen kuin uusia laitteita päästiin testaamaan. Texas Instrumentsin Z-Stack-pinon kääntöympäristö olisi ollut erittäin työlästä portata eri kääntäjälle, koska suurin osa pinosta oli IAR-kääntäjän kirjasto-formaatissa. Mstack-pinossa on muutamia heikkouksia Z-Stack-pinon verrattuna. Mstack on vielä maksullinen sekä suljettua koodia, ja dokumentaatio puuttui kokonaan. Z-Stack pino on ilmainen, ja dokumentaatio löytyy epäoptimaalisessa PDF-muodossa.

Jälkeenpäin mietittäessä olisi ehkä kannattanut valita Atmel tai Jennic radiopiirien toimittajaksi niiden avoimemman innovaatioympäristön vuoksi. Toisaalta Texas Instrumentsin piireillä saadan helposti yhteensopiva ohjelmointiympäristö, kun käytetään piirejä joissa ei ole integroitua mikroprosessoria; näin on menetelty useissa muissa projekteissa. Texas Instrumentsin piirit ja ohjelmistot olivat muuten odotusten mukaiset.

PC-sovellus on toteutettu vain testaus tarkoitukseen, joten monia ominaisuuksia puuttuu ja paikannuksen tarkkuus on vain suuntaa antava. Toisaalta täysin konfiguroimaton paikannustesti oli lupaava. Testeissä jäivät myös määrittämättä paikannuksen reaaliaikaisuus sekä tarkkuuden tarkat ominaisuudet.

## 8 YHTEENVETO

Kokonaisuudessaan tämä oli laaja ja haastava projekti, jossa oli useita elektroniikka- ja ohjelmistosuunnittelun haasteita. Erityisesti ohjelmistopino oli korkea, ja siellä olivat myös kaiken suurimmat ongelmat, nämä voitaisiin tulevaisuudessa välttää käyttämällä laitteita, joissa on vähemmän suljetut kehitysympäristöt. Positiivista ohjelmistokehityksessä oli vähäisestä QT-ohjelmointikokemuksesta huolimatta PC-sovelluksen kehittämisen sujuminen ongelmitta.

Elektroniikan suunnittelussa ei suuria vaikeuksia tullut eteen mutta huomattiin, että erityisesti antennin ja baluunin suunnittelu vaatisi huomattavaa tietopohjaa ja testaamista. Elektroniikan suunnittelu oli yleisesti työlästä, koska etenkin datalehtien tutkimiseen ja tiedon etsintään kului paljon aikaa sekä virheettömyys täytyi varmistaa ennen piirilevyjen valmistuttamista. Lopulta piirilevyihin jäi vain muutama pieni virhe, jotka voitiin kokoonpanovaiheessa korjata. Piirilevyjen tilaaminen sujui lähes ongelmitta ja arvioitiin, että valmistuttaminen tuli huomattavasti edullisemmaksi kuin tekeminen itse.

ZigBee-paikannuksen tulevaisuuteen vaikuttaa suuresti anturiverkkojen yleistymisen, myös uusi telecom-määrittäminen voi tuoda ZigBee-radion matkapuhelimiin ja näin suuresti edistää ZigBee-tekniikan yleistymistä. Työn tavoitteena oli ZigBee-paikannus, mutta laiteohjelmiston kehitysympäristön lisenssin loppuessa päädyttiin verkko toteuttamaan 6LoWPAN-pinolla, mutta tällä ei ollut suurta merkitystä, koska paikannustekniikoiden kannalta ei suurta eroa ole ja laitteet ovat samoja.

Ohjelmiston ja mittanauhan puutteiden vuoksi paikannuksen tarkkuutta ei kyetty tarkasti määrittämään, mutta arvioitiin, että paikannuksen tarkkuudeksi voitaisiin saada alle kolme metriä. Toteutettavan oikean anturiverkkojärjestelmän tarpeet määrittävät tarkemmin, minkälaiset ovat paikannusvaatimukset. Tämän työn pohjalta voidaan tulevaisuuden vaatimuksien mukaan valita mahdollisesti sopivin toteutus sovellutuksen tarpeiden mukaan.

## LÄHTEET

Chen, J., Wu, X.J., Wen, P.Z., Ye, F., Liu, J.W. 2010. A New Distributed Localization Algorithm for ZigBee Wireless Networks. IEEE Xplore.

Cheng, Y. 2009. Using ZigBee and Room-Based Location Technology to Constructing an Indoor Location-Based Service Platform. Department of Computer Science and Information Engineering, Shu Te University.

Dominguez-Duran, M., Claros, D., Urdiales, C., Coslado, F., Sandoval, F. 2010. Dynamic calibration and zero configuration positioning system for WSN. IEEE Xplore.

Ekahau. 2010. Wi-Fi and Zigbee RTLS Comparison. [viitattu 12.4.2010]  
Saatavissa: <http://www.ekahau.com/products/real-time-location-system/overview/zigbeewifi.html>.

Halder, S., Choi, T., Park, J., Kang, S., Yun, S., Park, J. 2008. On-Line ZIGBEE RSSI for Mobile Measurement Ranging Objects. IEEE Xplore.

Hooijdonk, A.. 2010. Many Positioning Systems exist.[viitattu 10.4.2010].  
Saatavissa: <http://www.gps-practice-and-fun.com/positioning-systems.html>.

IEEE 802.15.4-2006. 2006. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA. IEEE Computer Society.



Jennic. 2010. Product Brief: JN5148. Saatavissa:

[http://www.jennic.com/files/product\\_briefs/JN-PB-JN5148-1v2.pdf](http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-PB-JN5148-1v2.pdf).

Rantala, J., 2006. SENSORIVERKOT ÄLYKKÄISSÄ YMPÄRISTÖISSÄ. Saatavissa:

[http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-7100/vuosi06-07/harjoitustyot/Rantala\\_Sensoriverkot.pdf](http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-7100/vuosi06-07/harjoitustyot/Rantala_Sensoriverkot.pdf).

Schaefer 2008. How slow is Java? Not as much as you may think. [viitattu

13.4.2010]. Saatavissa: <http://cdtdoug.blogspot.com/2008/01/how-slow-is-java-not-as-much-as-you-may.html>.

Sony. 2010. CR2032.

Suomen Radionavigointiselvitys 2002.

Texas Instruments. 2009. CC2430 datasheet. Texas Instruments.

Wikipedia. IEEE 802.15.4-2006. [viitattu 15.4.2010]. Saatavissa:

[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.15.4](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4).

Wikipedia. 2010. 6lowpan. [viitattu 15.4.2010]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/6lowpan>.

Wu, L. 2010. ZigBee Wireless Location System Research. IEEE computer society.

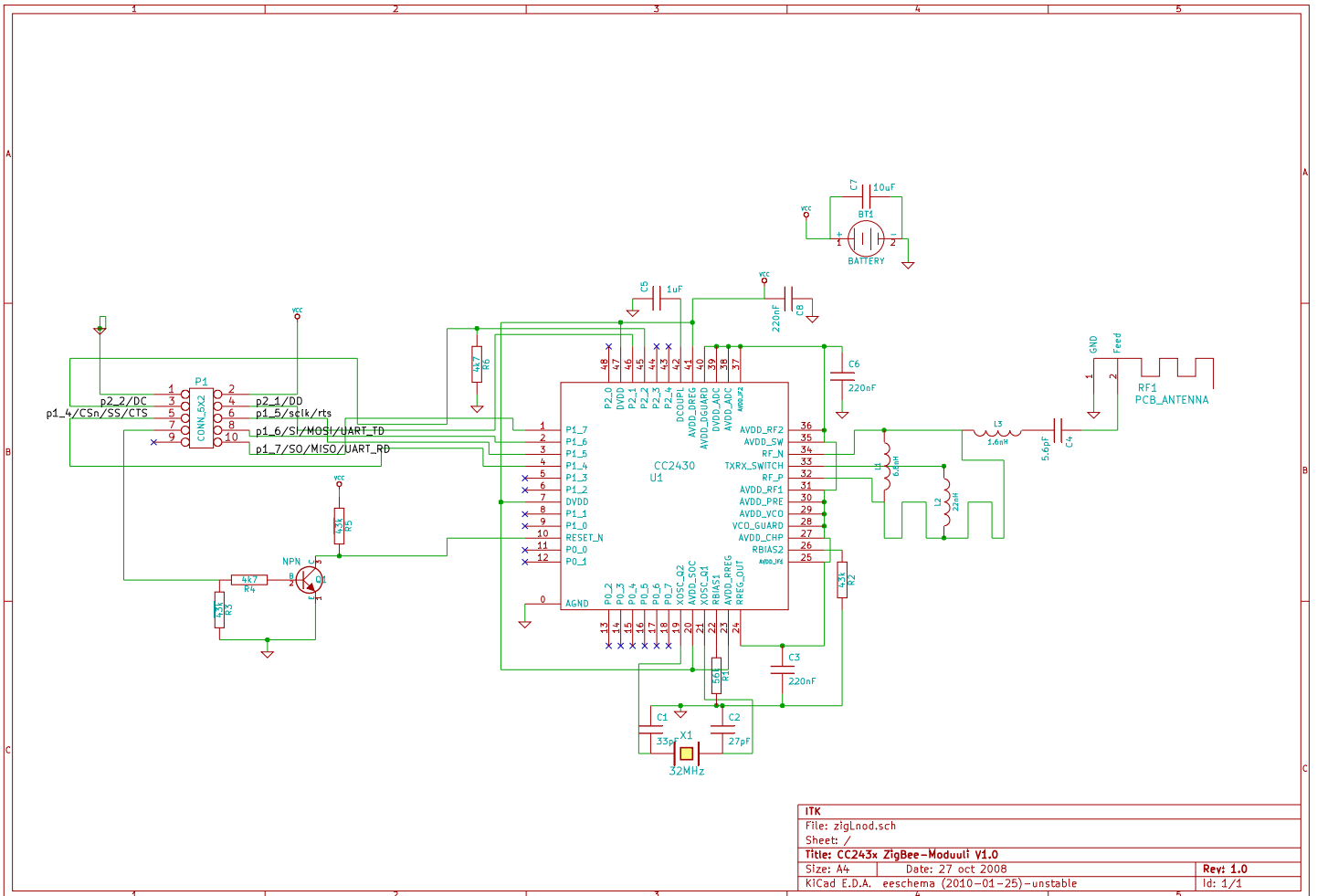
ZigBee Alliance. 2009. ZigBee Overview. [viitattu 12.4.2010]. Saatavissa: [http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop\\_download.asp?ContentID=12394](http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?ContentID=12394).

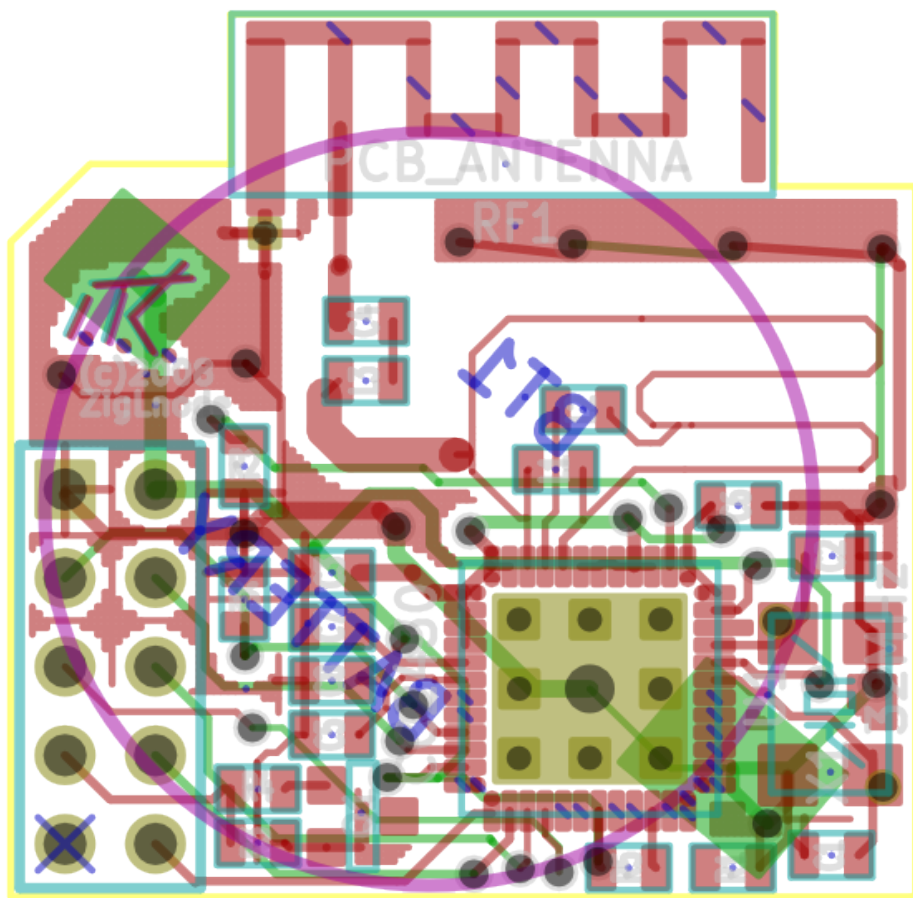
ZigBee alliance. 2007. zigbee and wireless radio frequency coexistence. ZigBee alliance.

## LIITTEET

- LIITE 1. Zigbee-moduulin prototyyppi, kytkentäkaavio
- LIITE 2. Zigbee-moduulin prototyyppi, piirikaavio
- LIITE 3. Zigbee-moduuli, kytkentäkaavio
- LIITE 4. Zigbee-moduuli, piirikaavio
- LIITE 5. ZigBee-moduulin valokuva
- LIITE 6. Ohjelmointilaite V2.0, kytkentäkaavio
- LIITE 7. Ohjelmointilaite V2.0, piirikaavio
- LIITE 8. Ohjelmointilaite V3.0, kytkentäkaavio
- LIITE 9. Ohjelmointilaite V3.0, piirikaavio
- LIITE 10. USB-UART-Sovitin, kytkentäkaavio
- LIITE 11. USB-UART-Sovitin, piirikaavio
- LIITE 12. AVR-Ohjelmointilaite, kytkentäkaavio
- LIITE 13. AVR-Ohjelmointilaite, piirikaavio
- LIITE 14. Komponenttien hinnat

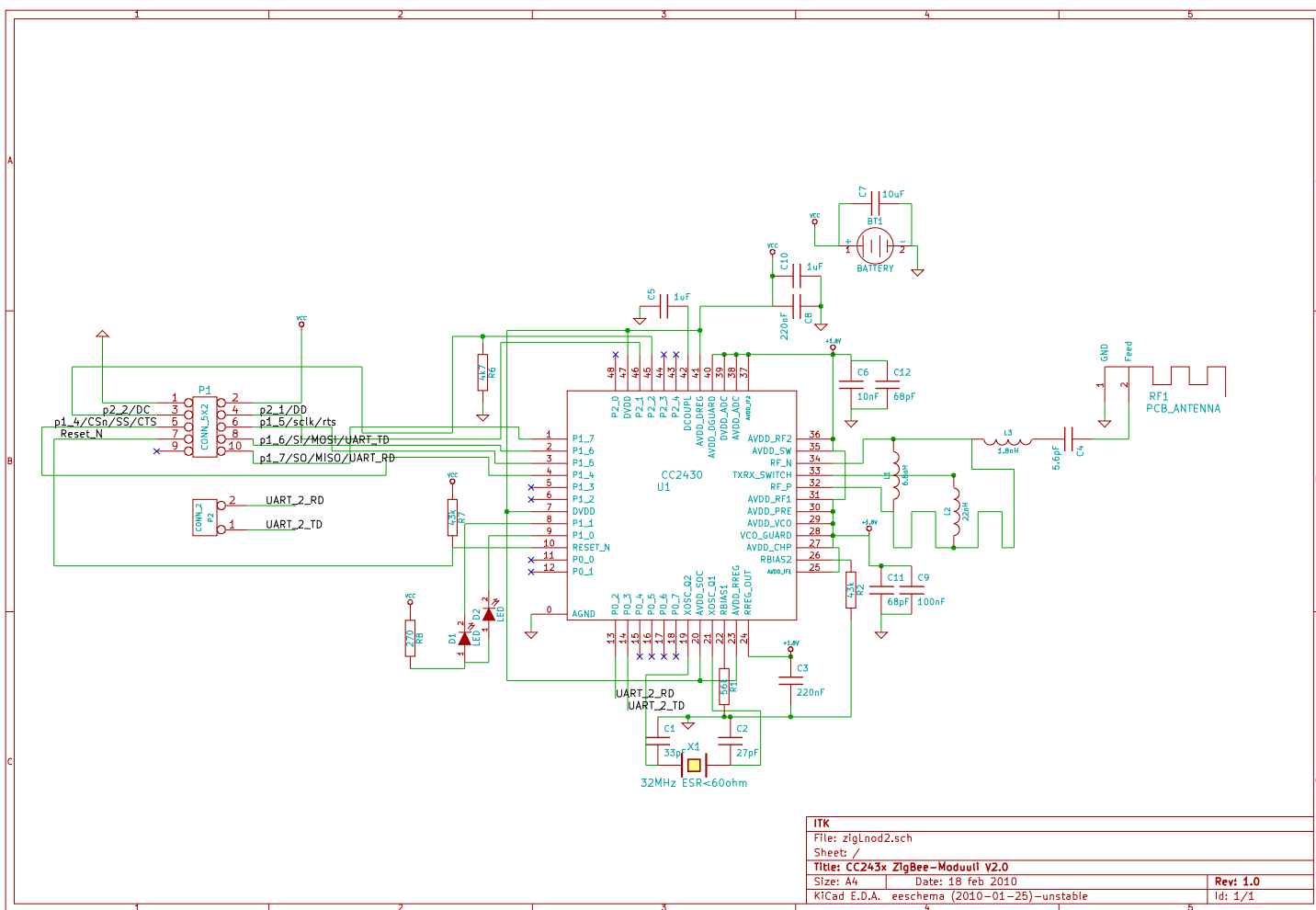
# LIITE 1. Zigbee-moduulin prototyyppi, kytkentäkaavio



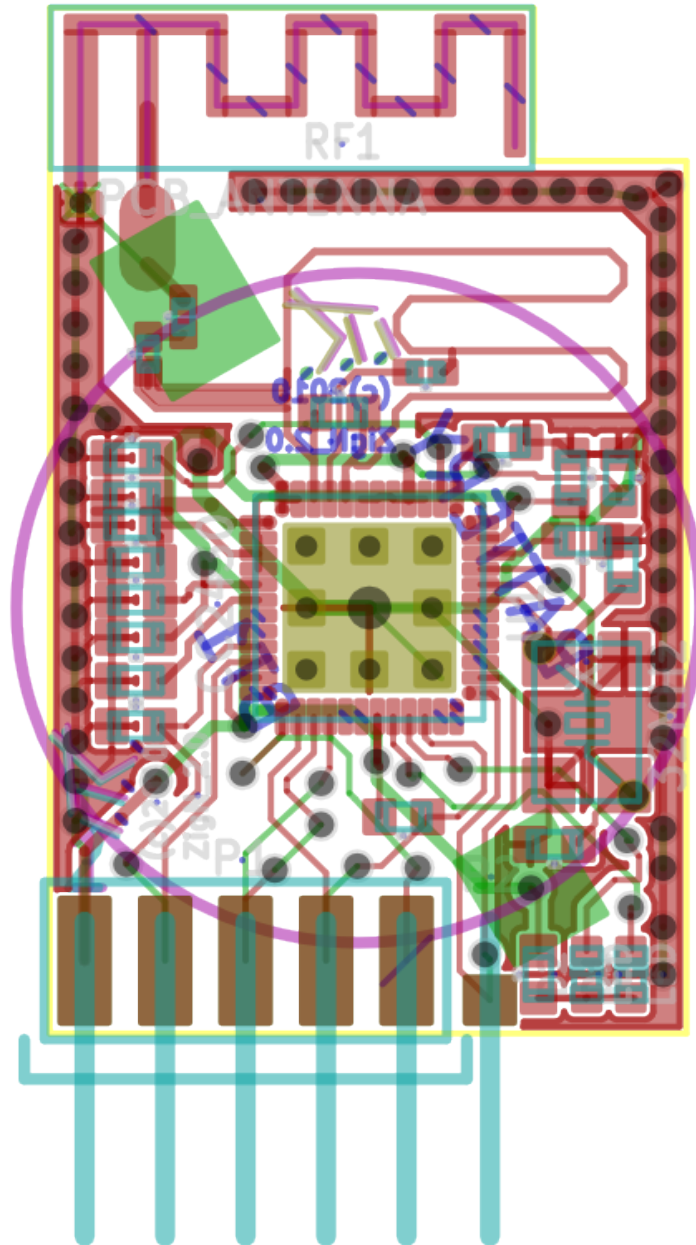


ITK	
File: zigLnod.brd	
Sheet: 1/1	
Title: CC243x ZigBee-Moduuli V1.0	
Size: User	Date: 29 oct 2008
KiCad E.D.A. pcbnew (2010-01-25)-unstable	Rev: 1.0
	Id: 1/1

# LIITE 3. Zigbee-moduuli, kytkentäkaavio

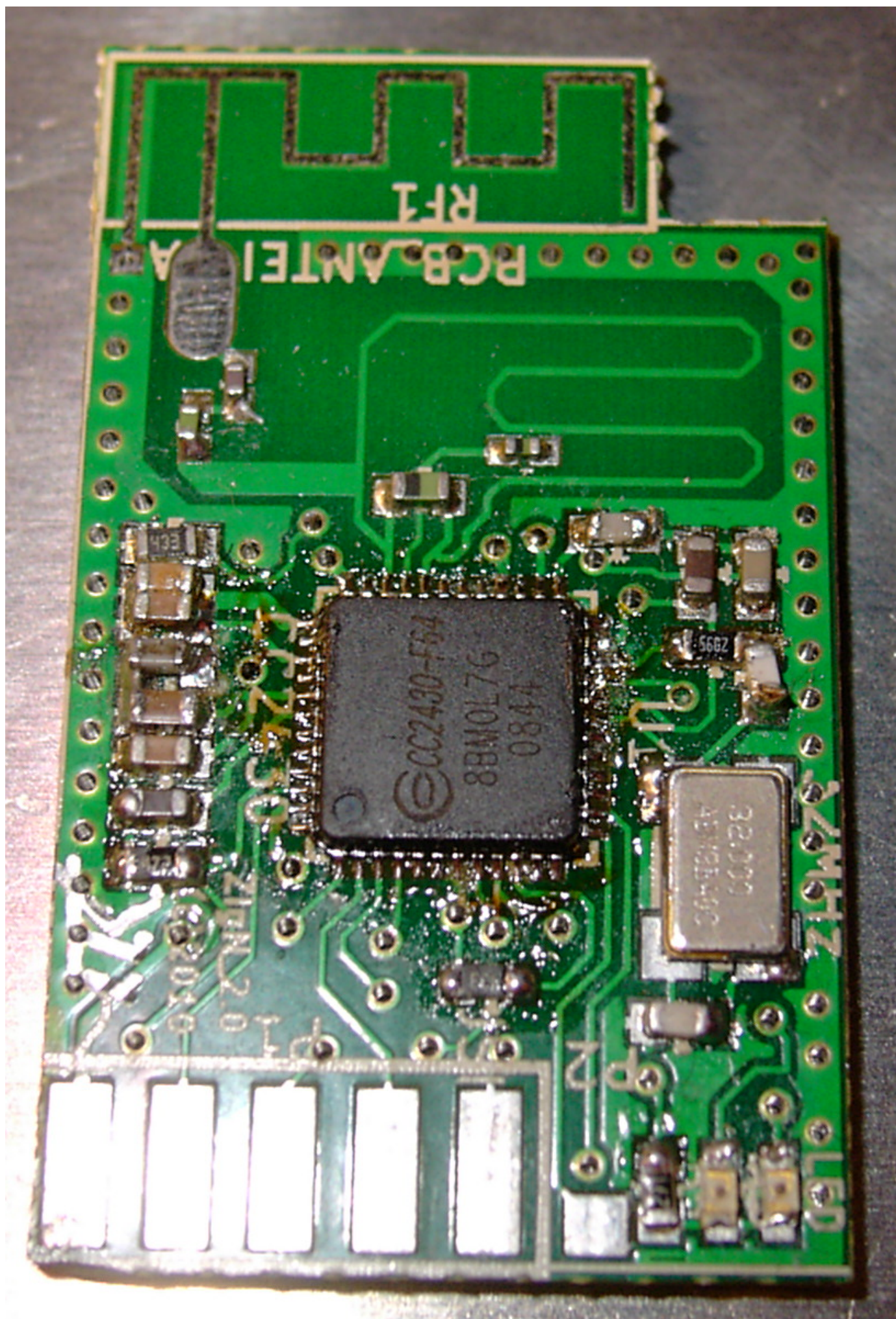


<b>ITK</b>			
File: zigLnod2.sch			
Sheet: /			
<b>Title: CC243x ZigBee-Moduuli V2.0</b>			
Size: A4	Date: 18 feb 2010	<b>Rev: 1.0</b>	
KiCad E.D.A. eeschema (2010-01-25)-unstable		Id: 1/1	

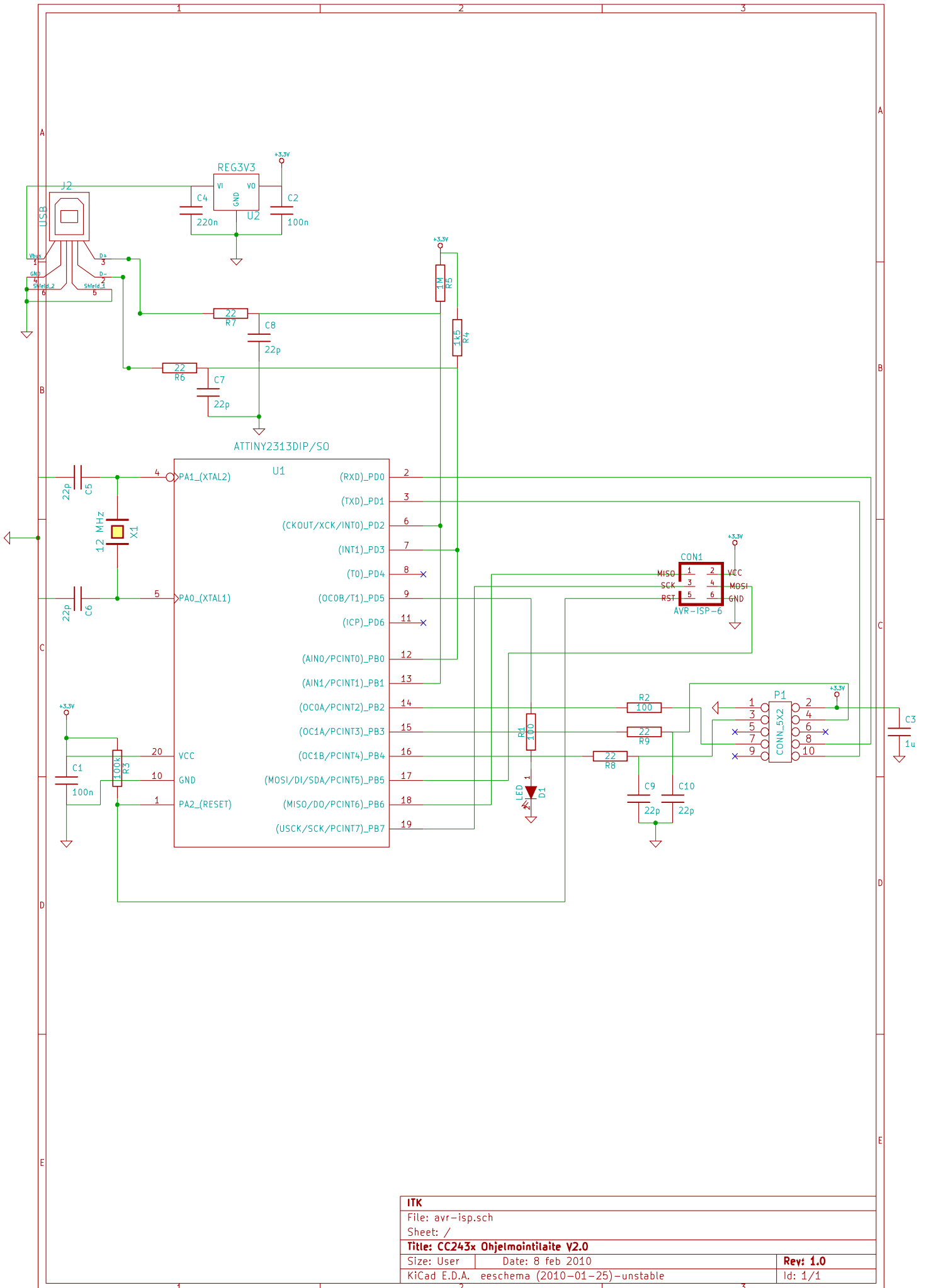


ITK	
File: zigLnod2.brd	
Sheet: 1/1	
Title: CC243x ZigBee-Moduuli V2.0	
Size: User	Date: 19 feb 2010
KiCad E.D.A. pcbnew (2010-01-25)-unstable	Rev: 1.0
	Id: 1/1



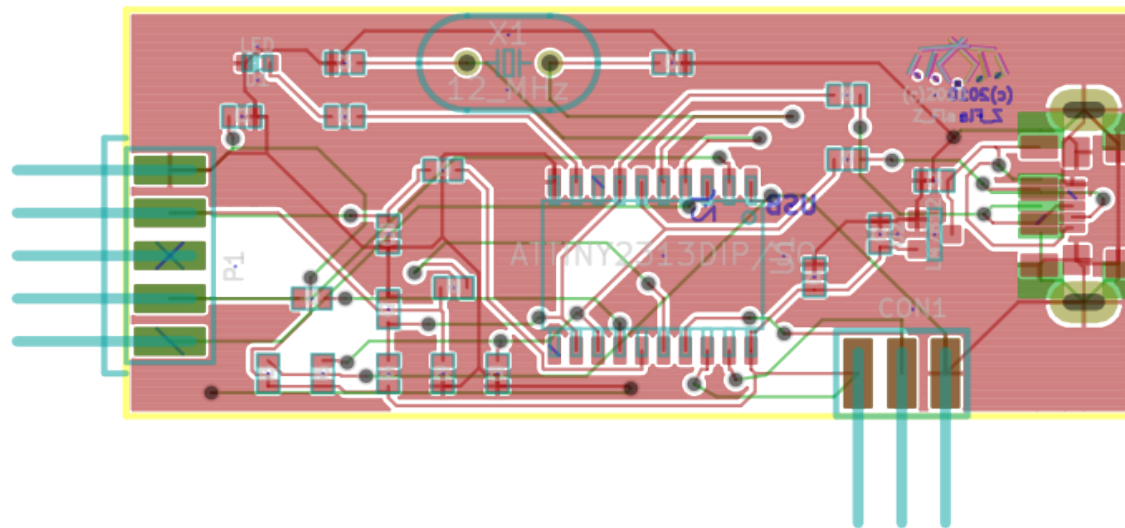


# LIITE 6. Ohjelmointilaite V2.0, kytkentäkaavio



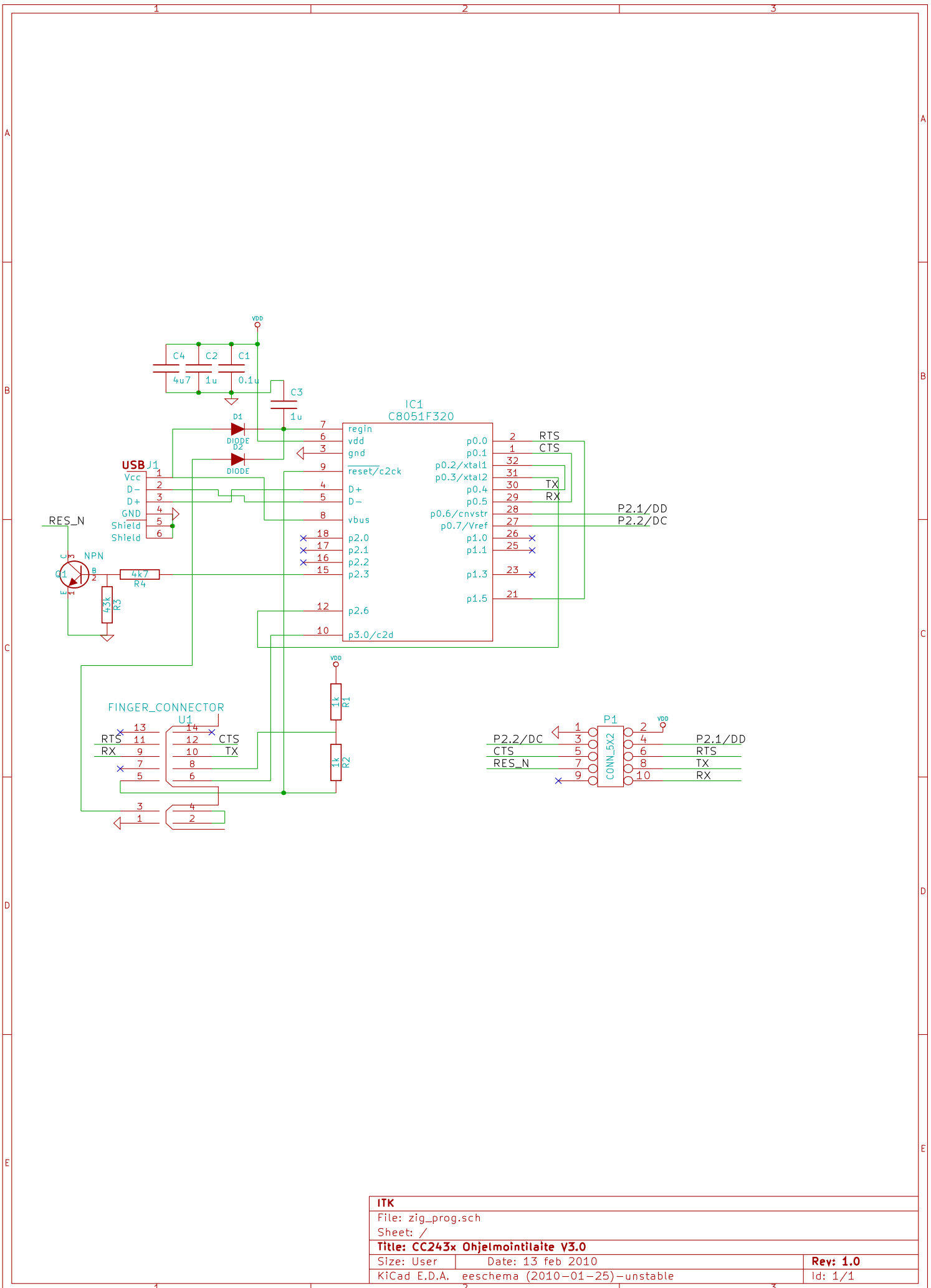
<b>ITK</b>		
File: avr-isp.sch		
Sheet: /		
<b>Title: CC243x Ohjelmointilaite V2.0</b>		
Size: User	Date: 8 feb 2010	<b>Rev: 1.0</b>
KiCad E.D.A. eeschema (2010-01-25)-unstable		Id: 1/1





ITK	
File: avr-isp.brd	
Sheet: 1/1	
Title: CC243x Ohjelmointilaite V2.0	
Size: User	Date: 19 feb 2010
KiCad E.D.A. pcbnew (2010-01-25)-unstable	Rev: 1.0
	Id: 1/1

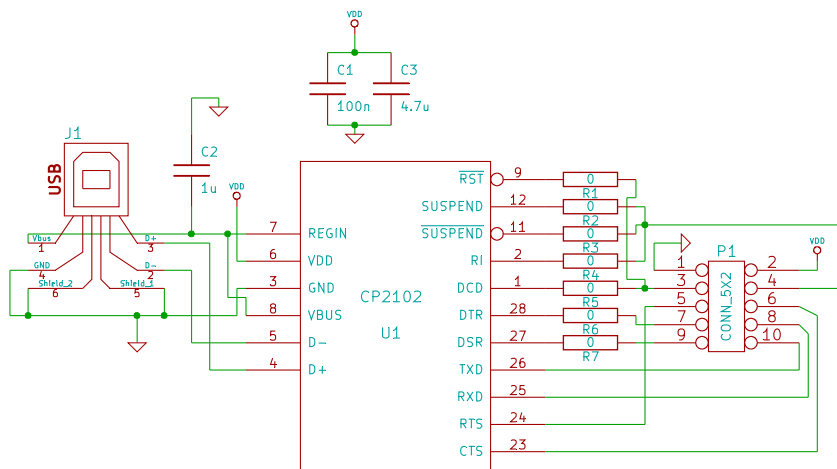
# LIITE 8. Ohjelmointilaite V3.0, kytkentäkaavio



<b>ITK</b>		
File: zig_prog.sch		
Sheet: /		
<b>Title: CC243x Ohjelmointilaite V3.0</b>		
Size: User	Date: 13 feb 2010	<b>Rev: 1.0</b>
KiCad E.D.A.	eeschema (2010-01-25) -unstable	Id: 1/1

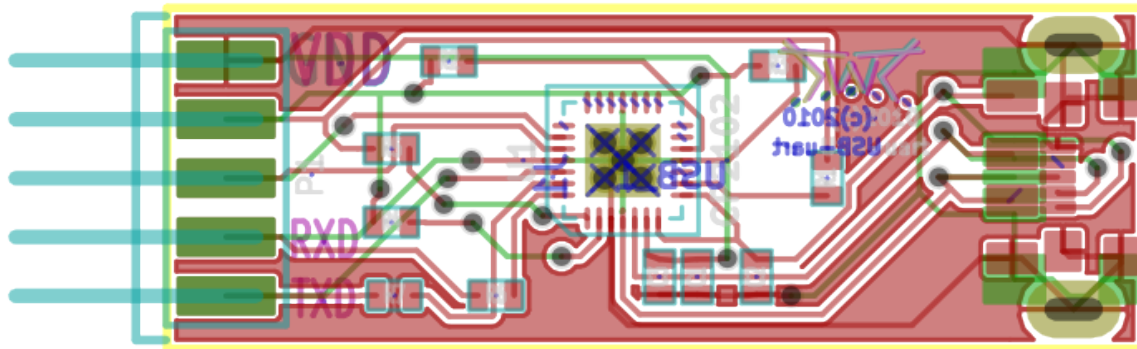


# LIITE 10. USB-UART-Sovitin, kytkentäkaavio



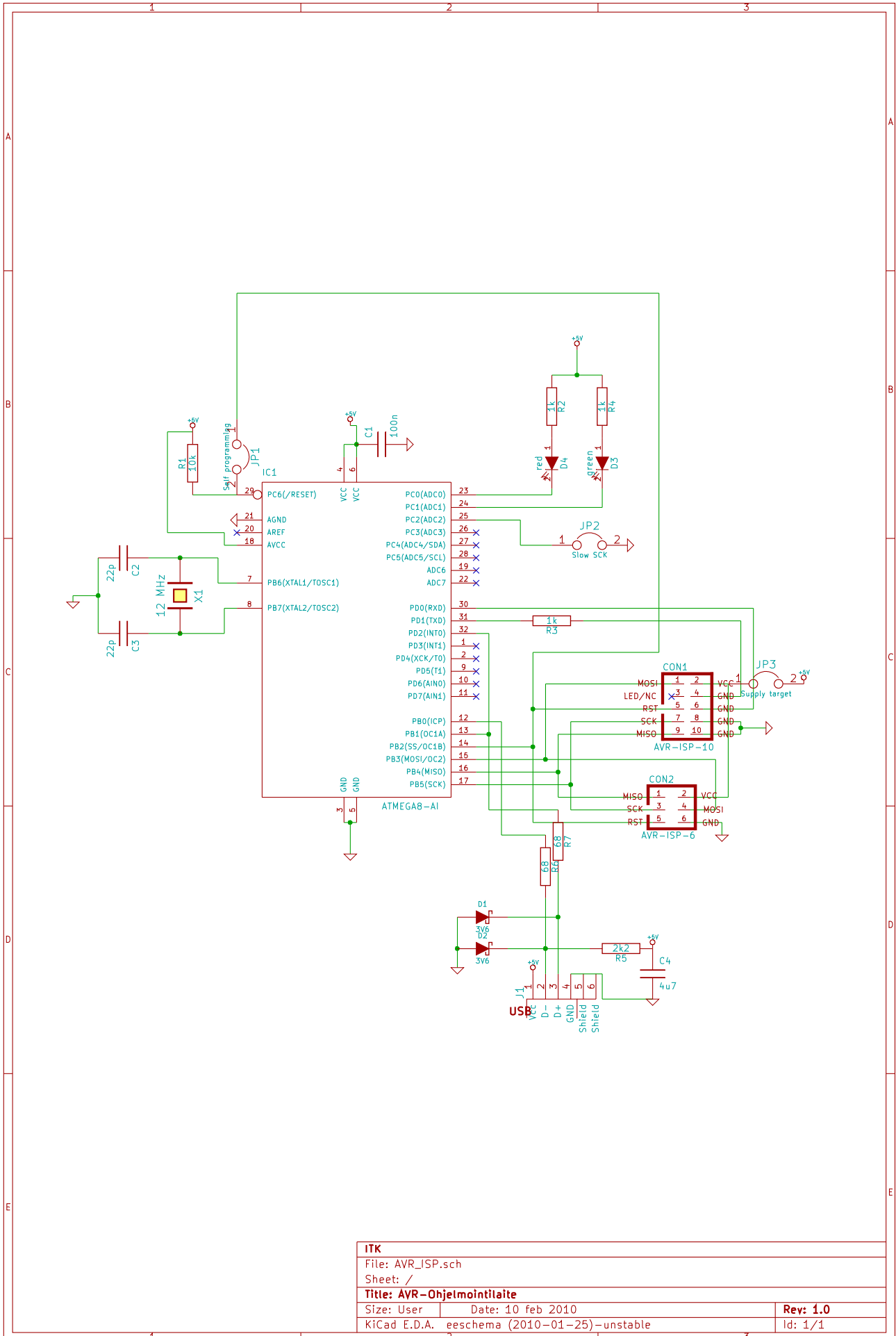
<b>ITK</b>		
File: uu.sch		
Sheet: /		
<b>Title: UART-Laite</b>		
Size: User	Date: 6 feb 2010	<b>Rev: 1.0</b>
KiCad E.D.A.	eeschema (2010-01-25)-unstable	Id: 1/1

# LIITE 11. USB-UART-Sovitin, piirikaavio



ITK	
File: uu.brd	
Sheet: 1/1	
Title: USB-UART-Lalte	
Size: User	Date: 19 feb 2010
KiCad E.D.A. pcbnew (2010-01-25)-unstable	Rev: 1.0
	Id: 1/1

# LIITE 12. AVR-Ohjelmointilaite, kytkentäkaavio



ITK	
File: AVR_ISP.sch	
Sheet: /	
Title: AVR-Ohjelmointilaite	
Size: User	Date: 10 feb 2010
KiCad E.D.A.	eeschema (2010-01-25)-unstable
	Rev: 1.0
	Id: 1/1



# LIITE 14. Komponenttien hinnat

## Ohjelmointilaite V2.0

Reference	value	footprint	Price €
C1	100n	SM0603	0.02
C2	100n	SM0603	0.02
C3	1u	SM0603	0.04
C4	220n	SM0603	0.02
C5	22p	SM0603	0.02
C6	22p	SM0603	0.02
C7	22p	SM0603	0.02
C8	22p	SM0603	0.02
C9	22p	SM0603	0.02
C10	22p	SM0603	0.02
CON1	AVR-ISP-6	pin_array_3x2_edge	0
D1	LED	LED-0603	0.08
J2	USB	USB_comp3	0.61
P1	CONN_5X2	PIN_ARRAY_5x2_edge_mirror	1
R1	100	SM0603	0.02
R2	100	SM0603	0.02
R3	100k	SM0603	0.02
R4	1k5	SM0603	0.04
R5	1M	SM0603	0.02
R6	22	SM0603	0.02
R7	22	SM0603	0.02
R8	22	SM0603	0.02
R9	22	SM0603	0.02
U1	ATTINY2313DIP/SC	avr-SOIC20S	1.94
U2	REG3V3	SOT23GDS	0.31
X1	12 MHz	crystal-HC49/S	0.27
PCB	FR4	14.75	1.13

## AVR-Ohjelmointilaite

Reference	value	footprint	Price €
C1	100n	SM0603	0.02
C2	22p	SM0603	0.02
C3	22p	SM0603	0.02
C4	4u7	SM0603	0.09
CON1	AVR-ISP-10	RAY_5x2_edge	0
CON2	AVR-ISP-6	RAY_3x2_edge	1
D1	3V6	SOD523	0.08
D2	3V6	SOD523	0.08
D3	green	LED-0603	0.08
D4	red	LED-0603	0.08
IC1	ATMEGA8-AI	TQFP32	2.03
J1	USB_C	USB_comp	0.76
JP1	elf programming	IN_ARRAY_2X	0
JP2	Slow SCK	IN_ARRAY_2X	0
JP3	Supply target	IN_ARRAY_2X	0
R1	10k	SM0603	0.02
R2	1k	SM0603	0.02
R3	1k	SM0603	0.02
R4	1k	SM0603	0.02
R5	2k2	SM0603	0.02
R6	68	SM0603	0.04
R7	68	SM0603	0.04
X1	12 MHz	crystal-HC49/S	0.27
PCB	FR4	8.82	0.68

## Ohjelmointilaite V3.0

Reference	value	footprint	Price €
C1	0.1u	SM0603	0.02
C2	1u	SM0603	0.04
C3	1u	SM0603	0.04
C4	4u7	SM0603	0.09
D1	DIODE	SOD523	0.05
D2	DIODE	SOD523	0.05
IC1	C8051F320	LQFP-32	6.05
J1	USB_C	USB_comp3	0.61
P1	CONN_5X2	PIN_ARRAY_5x2_edge_mirror	1
Q1	NPN	SOT23EBC	0.05
R1	1k	SM0603	0.02
R2	1k	SM0603	0.02
R3	43k	SM0603	0.04
R4	4k7	SM0603	0.04
U1	NGER_CONNECTC	ring_con	0
PCB	FR4	6.89	0.53

## USB-UART-Sovitin

Reference	value	footprint	Price €
C1	100n	SM0603	0.02
C2	1u	SM0603	0.04
C3	4.7u	SM0603	0.09
J1	USB_1	USB_comp3	1.21
P1	CONN_5X2	RAY_5x2_edge	1
R1	0	SM0603	0.04
R2	0	SM0603	0.04
R3	0	SM0603	0.04
R4	0	SM0603	0.04
R5	0	SM0603	0.04
R6	0	SM0603	0.04
R7	0	SM0603	0.04
U1	CP2102	QFN28	3.09
PCB	FR4	7	0.54

## Zigbee-moduuli

Reference	value	footprint	Price €	Price €/1000
BT1	BATTERY	Batt_socket	0.8	352
C1	33pF	c_0603	0.04	9
C2	27pF	c_0603	0.04	6
C3	220nF	c_0603	0.04	16
C4	5.6pF	c_0402	0.04	9
C5	1uF	c_0603	0.04	16
C6	10nF	c_0603	0.02	8
C7	10uF	c_0603	0.17	94
C8	220nF	c_0603	0.04	0
C9	100nF	c_0603	0.02	5
C10	1uF	c_0603	0.04	0
C11	68pF	c_0603	0.04	20
C12	68pF	c_0603	0.04	0
D1	LED	LED-0603	0.08	36
D2	LED	LED-0603	0.08	36
L1	6.8nH	c_0603	0.03	16
L2	22nH	r_0402	0.03	16
L3	1.8nH	r_0402	0.03	16
P1	CONN_5X2	PIN_ARRAY_5x2_edge	0	0
P2	CONN_2	PIN_ARRAY_3x2_edge	0	0
R1	56k	r_0603	0.04	8
R2	43k	r_0603	0.04	28
R6	4k7	r_0603	0.04	14
R7	43k	r_0603	0.04	0
R8	270	r_0603	0.03	16
RF1	PCB_ANTENNA	PCB_antenna_3	0	0
U1	CC2430	QLP48_4	6.6	5250
X1	12MHz ESR<60ohm	crystal-ABM3B_holes	0.98	654
PCB	FR4	6.6	0.51	507.69
			9.08	6780.69
				0.51
				6.78

## Piirilevy

PCB	cm*cm	Price €	€/ (cm*cm)
FR4	5*100cm*2	500	38.46
			0.08