

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikka

Tutkintotyö

Kalle Björninen

2,4 GHZ ZIGBEE -VASTAANOTTIMEN TOIMINTAPERIAATTEET

Tutkintotyö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkistettavaksi insinöörin tutkintoa varten
Tampereella 3.11.2009

Työn ohjaaja Ari Rantala
Työn teettäjä Tampereen Ammattikorkeakoulu
Tampere 2009

Tekijä:	Björninen, Kalle
Työn nimi:	2,4 GHz ZigBee-vastaanottimen toimintaperiaatteet
Päivämäärä:	3.11.2009
Sivumäärä:	34 sivua, 2 liitesivua
Hakusanat:	ZigBee, vastaanotin, IEEE 802.15.4
Koulutusohjelma:	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	Tietoliikennetekniikka
Työn ohjaaja:	Ari Rantala

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tarkoituksena on perehtyä langattomaan, IEEE 802.15.4 -standardin kanssa yhteensopivan ZigBee –vastaanottimen peruseriaatteisiin. Työssä tarkastellaan on Jennic JN5139-piiri.

Työssä käydään ensin läpi ZigBeen sekä IEEE 802.15.4 – standardit ja perehdytään niissä käytettäviin tiedonsiirtomenetelmiin. Työssä käsitellään digitaalisia modulaatiomenetelmiä sekä tarkastellaan ZigBeen käyttämiä radiotaajuuksia.

Seuraavaksi tutkitaan hieman verkkotopologioita, tarkastellaan IEEE 802.15.4 – standardin määrittelemiä protokollapinoja sekä niiden toimintoja. Työssä tarkastellaan kahta IEEE 802.15.4 – standardin määrittelemää verkkokerrosta, mutta niiden yläpuolella olevat kerrokset jätetään tämän työn ulkopuolelle.

Näiden jälkeen käydään läpi JN5139-piirin lohkoakaavio sekä tutustutaan radiovastaanottimen erilaisiin lohkoihin sekä vastaanottimen ominaisuuksiin.

Lopuksi tarkastellaan työn aikana tehtyjä mittauksia ja niistä saatuja tuloksia.

Author: Björninen, Kalle
Title: The principles of a 2,4GHz ZigBee wireless receiver
Date: 3.11.2009
Number of pages: 34 pages, 2 appendices
Keywords: ZigBee, wireless receiver, IEEE 802.15.4
Degree programme: Computer Systems Engineering
Specialisation: Telecommunications Engineering and Data Network Systems

Thesis Supervisor: Ari Rantala

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to look into the basics of a wireless IEEE 802.15.4 compliant ZigBee radio receiver. The focus is on a ZigBee module JN5139 manufactured by Jennic.

First, the ZigBee and IEEE 802.15.4 standards are reviewed along with the wireless transmission methods they apply, such as the digital modulation and frequencies.

After this, a quick overview of the network topologies and the protocols used in IEEE 802.15.4 is covered. Only two of the network layers defined for IEEE 802.15.4 are reviewed.

After these, the blocks of the Jennic's JN5139 circuit are covered. Then a more detailed look is cast into the building blocks of the wireless receiver along with its characteristics.

Finally, the results gathered from the measurements performed for the radio are presented.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen ammattikorkeakoululle koulutuspäällikkö Ari Rantalan pyynnöstä.

Tämä tutkintotyö on julkinen.

Tampereella

3.11.2009

Kalle Björninen

SISÄLLYS

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET	vi
1 JOHDANTO	1
1.1 MIKÄ ON ZIGBEE?	2
1.2 ZIGBEE ALLIANSSI	3
1.3 IEEE 802.15.4 -STANDARDI	3
2 IEEE 802.15.4 TAAJUDET, KANAVAT JA MODULOINTIMENETELMÄT	3
2.1 Kanavat	4
2.2 Modulointi	4
2.2.1 BPSK	5
2.2.2 O-QPSK	6
2.2.3 ASK	6
2.3 Pulssinmuokkaus	7
2.4 DSSS	7
3 LAITETYYPIT	9
3.1.1 FFD	9
3.1.2 RFD	9
3.1.3 Laitteiden roolit	9
4 VERKKOTOPOLOGIAT	11
4.1 Tähtitopologia	11
4.2 Peer-to-peer -topologia	12
5 IEEE 802.15.4 VERKKOKERROKSET	13
5.1 Fyysinen kerros	14
5.1.1 ED – Energy Detection	14
5.1.2 CS – Carrier Sense	15
5.1.3 LQI – Link Quality Indicator	15
5.1.4 Fyysisen kerroksen paketin rakenne	15
5.2 MAC-alikerros	16
5.2.1 MAC-alikerroksen kehykset	17
5.2.2 CSMA-CA	18
5.2.3 CSMA-CA ja hidden node	18

5.2.4	CSMA-CA ja exposed node	19
6	LIIKENNÖINTIMUODOT	20
6.1	Beacon-enabled -verkko	20
6.2	Superkehys	21
7	JENNIC JN5139 -PIIRI.....	22
8	JENNIC JN5139-PIIRIN VASTAANOTTIMEN LOHKOT	23
8.1	Antenni	24
8.2	LNA – Vähäkohinainen vahvistin	24
8.3	Paikallisoskillaattorit ja sekoittimet	24
8.4	Kaistanpäästösuodatin	25
8.5	Vahvistimet.....	25
8.6	Laskostumisen estosuodin	25
8.7	AD-muunnin.....	25
8.8	Demodulointi	26
8.9	Kantataajuusprosessori	26
9	VASTAANOTTIMEN OMINAISUUDET	27
9.1	Herkkyys.....	27
9.2	Herkkyuden parantaminen.....	28
9.3	Viereisen kanavan vaimennus	29
10	VIRRANKULUTUS	29
11	MITTAUKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	30
12	YHTEENVETO	32
13	LÄHTEET	33
14	LIITTEET	34

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

ADC	Analog to Digital Converter
ASK	Signaalin amplitudin vaihteluun perustuva vaiheavainnus (Amplitude Shift Keying)
BER	Bittivirhesuhde (Bit Error Rate)
BPSK	Binäärinen vaiheavainnus (Binary Phase Shift Keying)
CAP	Contention Access Period
CCA	CSMA-CA:n käyttämä metodi kanavan kuuntelulle (Clear Channel Assignment)
CFP	Contention Free Period
CS	Kantoaallon havainnointi (Carrier Sense)
CSMA-CA	Kanavanvarausmenetelmä (Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance)
CTS	Clear to Send
DAC	Digital to Analog Converter
dB	Desibeli
dBm	desibeliä suhteessa 1mW:een
DSSS	Suorasekvensointi (Direct Sequence Spread Spectrum)
ED	Energian havaitseminen siirtotiellä (Energy Detection)
FFD	Full Function Device
GHz	Gigahertsi
GTS	Guaranteed Time Slot
IF	Välitaajuus (Intermediate Frequency)
kbps	Kilobittiä per sekunti
LNA	Vähäkohinainen vahvistin (Low Noise Amplifier)
LO	Paikallisoskillaattori (Local Oscillator)
LQI	Yhteyden laadun ilmaisija (Link Quality Indicator)
mA	Milliampeeri
MAC	Medium Access Control
MFR	MAC footer
MHR	MAC header
MHz	Megahertsi
MLME	Medium Layer Management Entity
nA	Nanoampeeri
NF	Kohinaluku (Noise Figure)

NLME	Network Layer Management Entity
O-QPSK	Siirretty nelivaihevainnus (Offset Quarternary Phase Shift Keying)
OSI	Tiedonsiirtoprotokollien mallinnus (Open Systems Interconnect)
P2P	Peer-to-peer -verkkotopologia
PA	Päättevahvistin (Power Amplifier)
PAN	Likiverkko (Personal Area Network)
PER	Pakettivirhesuhde (Packet Error Rate)
PHR	Physical Header
PLL	Vaihelukittu silmukka (Phase Locked Loop)
PLME	Physical Layer Management Entity
PPDU	Physical Protocol Data Unit
ppm	Parts per million
PSDU	PHY Service Data Unit
QPSK	Nelivaihevainnus (Quarternary Phase Shift Keying)
RFD	Reduced Function Device
RTS	Request to Send
SFD	Start-of-frame delimiter
SHR	Synchronisation Header
VCO	Jänniteohjattu oskillaattori (Voltage Controlled Oscillator)
VGA	Variable Gain Amplifier
WLAN	Langaton lähiverkko (Wireless Local Area Network)
WPAN	Langaton likiverkko (Wireless Personal Area Network)
ZC	ZigBee-koordinaattori
ZEC	ZigBee -laite (ZigBee End Device)
λ	Aallonpituus
Ω	Ohmi

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella ZigBee- ja IEEE 802.15.4 -standardeja käyttävää, 2,45 GHz:n toiminta-alueella toimivan mikrokontrollerin vastaanottimen toimintaa. Työni alkuperäinen tavoite oli saada tuo kyseinen mikrokontrolleri purettua ja tutkittua tarkemmin siihen kytketyn radion toimintaa. Tämä tavoite muuttui, kun kävi ilmi, että sekä mikrokontrolleri että radiovastaanotin oli integroitu pienen piipalan sisään.

Työssä käsitellään radiovastaanottimen käyttämiä taajuusalueita, modulaatiotekniikoita, kanavanvarausmenetelmiä sekä vastaanottimen ominaisuuksia.

1.1 MIKÄ ON ZIGBEE?

ZigBee on ZigBee-allianssin vuonna 2004 määrittelemä standardi lyhyen kantaman tietoliikenneverkoille. ZigBee käyttää pohjanaan IEEE 802.15.4-standardia, joka määrittelee fyysisen kerroksen sekä MAC-kerroksen (Medium Access Control) ominaisuudet. ZigBee-laite on täten yhteensopiva 802.15.4 laitteen kanssa. /1, s. 2/

ZigBee kehitettiin alun perin standardiksi, jolla voitaisiin luoda sovelluksia teollisuuskäyttöön sekä kaupallisille markkinoille. Lähetettävän tiedon määrän ei teollisissa sovelluksissa tarvitse olla kovin suuri, sillä yleensä data koostuu muutamista tavuista kuten esimerkiksi lämpötilasta, ilmanpaineesta, kosteudesta jne. Kaiken pohjalla oli ajatus standardista, jossa olisi mahdollisimman pieni virrankulutus sekä kohtuullisen hyvä tiedonsiirtonopeus. IEEE 802.15.4 -standardin valitseminen ZigBeen alustaksi oli selvää, koska se tarjosi yksinkertaisemman ja täten vähemmän tehoa kuluttavan pohjan verrattuna esimerkiksi Bluetoothiin ja 802.11 standardeihin, joissa tehonkulutusta lisäävät tiedonsiirtonopeus sekä yhteyden muodostukseen, ylläpitoon sekä katkaisuun tarvittavat protokollat. /1, s. 3/

ZigBee –piirejä valmistavat mm. Texas Instruments, Atmel, Intel, Philips sekä Motorola. ZigBee ei ole vielä yleistynyt kaupallisissa sovelluksissa, mutta sen pohjalle on kehitelty jo mm. kaukosäätimiä. Standardin uskotaan yleistyvän lähivuosina niin kodin yleiselektronikassa kuin talotekniikassakin. Teollisuuden lisäksi ZigBeetä käytetään myös sairaaloissa potilaiden tarkkailussa sekä mm. erilaisten sairaalalaitteistojen paikantamisessa

1.2 ZIGBEE ALLIANSSI

ZigBee-allianssi on useista yrityksistä koostuva voittoa tavoittelematon organisaatio. Sen tavoitteena on kehittää avoimeen standardiin perustuvia luotettavia, kustannustehokkaita sekä vähän virtaa tarvitsevia hallinta- ja monitorointilaitteita, jotka voidaan kytkeä toisiinsa langattomasti. Jäseninä ovat yritykset kuten HP, Motorola, Philips, Huawei sekä monet muut. Allianssi keskittyy ZigBeen verkon sekä turvallisuuden ja sovelluskerroksen kehittämiseen. Lisäksi se keskittyy lisäämään markkinoiden ja erilaisten yritysten tietoisuutta ZigBee -standardista. /8/

1.3 IEEE 802.15.4 -STANDARDI

IEEE 802.15.4-standardi määrittelee pienitehoisen radiorajapinnan tietoliikenneverkolle, joka kykenee tiedonsiirtoon häiriöisessäkin ympäristössä. Standardi ilmoittaa signaalin kantamaksi 100 metriä. Hyvän häiriönsietokyvyn lisäksi 802.15.4 mahdollistaa laitteiden verkottamisen, mikä on hyödyllistä silloin kun näköyhteyttä toiseen laitteeseen ei ole tai kun aktiivinen yhteys syystä tai toisesta menetetään. Tällöin uuden, vaihtoehtoisen reitin löytäminen on helppoa ja tarvittava tieto saadaan perille väliaikaisista häiriöistä huolimatta. Tämä ominaisuus lisää myös mainitun kantaman pituutta mahdollistaen datan siirtämisen pitkiäkin matkoja eri laitteiden välillä. /9, s.218/

IEEE 802.15.4 -standardin mukaisia langattomia verkkoja kutsutaan nimellä WPAN (Wireless Personal Area Network).

2 IEEE 802.15.4 TAAJUUDET, KANAVAT JA MODULOINTIMENETELMÄT

Toukokuussa 2003 määritellyssä IEEE 802.15.4 tietoliikennestandardissa on käytössä kolme eri taajuusaluetta, joista jokaiselle on olemassa omat modulointimenetelmänsä, levitystekniikkansa sekä datanopeutensa (taulukko 1).

Taulukko 1 802.15.4 eri taajuudet ja ominaisuudet

Taajuus (MHz)	Kanavat lkm	Modulointi	Chip rate (Kb/s)	Bittinopeus (Kb/s)	Symboli- nopeus (ksymbolia/s)	Levitys
868 - 868,6	1	BPSK	300	20	20	Binäärinen DSSS
902 - 928	10	BPSK	600	40	40	Binäärinen DSSS
2400 - 2483,5	16	O-QPSK	2000	250	62,5	16-rivinen orthogonaalinen

Taajuuksista alin, 868 MHz, on käytössä Euroopassa. Käytössä on vain yksi kanava ja tiedonsiirtonopeus on alhainen johtuen kanavan leveydestä, joka on vain noin 600kHz. Seuraava taajuusalue, 915 MHz, on pääasiassa käytössä Pohjois-Amerikassa. Kanavia on täällä alueella enemmän ja kanavien väli on 2MHz. 2,4GHz:n taajuus on käytössä maailmanlaajuisesti ja se onkin käytetyistä taajuusalueista yleisin. Se mahdollistaa 802.15.4 standardin määrittelemän maksimitiedonsiirtonopeuden 250 kbps sekä tarjoaa eniten kanavia. Kanavaväli 2,4 GHz:n taajuudella on 5Mhz. /7, s.17/

2.1 Kanavat

IEEE 802.15.4 -standardissa on käytössä 27 kanavaa, eli kanavat 0-26. Näistä 2,45 GHz:n taajuudella on käytössä 16 kanavaa. Kanavanumerot ovat tällä taajuudella 11-26. Kanavan taajuus voidaan laskea kaavalla (1)

$$F_c = 2405 + 5(k - 11)\text{MHz} \quad (1)$$

missä F_c =Kantoaallon taajuus ja k =kanavan numero välillä 11-26. /7, s. 29/

2.2 Modulointi

Modulointitavoista BPSK (Binary Phase Shift Keying ja O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) perustuvat informaation välitykseen signaalin

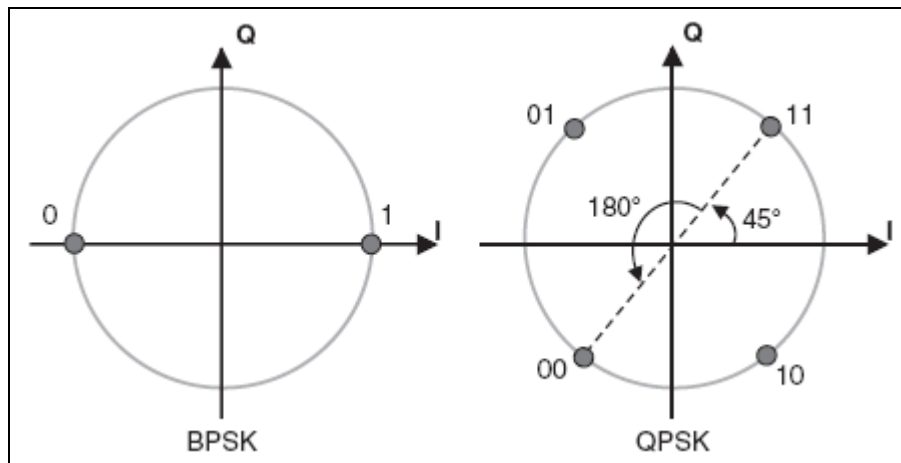
vaiheessa, joihin kyseisten menetelmien nimikin viittaa. ASK:ssa informaatio kulkee lähetettävän signaalin amplitudissa.

Vaiheavainnus on yleinen modulointitekniikka digitaalisissa kommunikointijärjestelmissä. Vaiheavainnuksen etuna on se, että lähettimissä voidaan käyttää epälineaarisia vahvistimia, jotka kuluttavat vähemmän virtaa ja lisäävät näin laitteen toiminta-aikaa huomattavasti. Tämä etu saavutetaan sillä, että informaatio kulkee juuri signaalin vaiheessa. Tällöin amplitudin vaihteluilla ei ole merkitystä. Vaiheavainnuksessa siirrettävä data kulkee nimensä mukaisesti signaalin vaiheessa ja sen muutoksissa. Signaalin amplitudi ja taajuus pysyvät vakiona.

2.2.1 BPSK

BPSK, eli Binary Phase Shift Keying, on yksinkertaisin digitaalisista vaiheavainnustekniikoista. Siinä signaalilla voi olla vain kaksi vaihetilaa 0° ja 180° , joista toisella on bittiarvo 0 ja toisella 1. Symbolinopeus on BPSK:ssa sama kuin bittinopeus, koska käytössä on ainoastaan kaksi symbolia. /5/

BPSK tarjoaa yksinkertaisen modulointitavan, mutta sen tarjoama spektritehokkuus on huono johtuen alhaisesta symbolinopeudesta /6/. BPSK:ta voidaan ZigBeessä käyttää 868-868,6 MHz:n ja 902-928 MHz:n taajuusalueilla. Siinä informaatio kulkee signaalin vaiheessa, jolla voi olla kaksi arvoa 0° ja 180° . /1, s. 147/



Kuva 1 BPSK ja O-QPSK –signaalitilat yksikköympyrällä /1, s. 147/

2.2.2 O-QPSK

802.15.4-standardi määrittelee 2,4GHz:n taajuudelle modulointitavaksi O-QPSK:n (Offset Quaternary Phase Shift Keying). O-QPSK:ssa on käytössä neljä vaihetta, jotka ovat 45° , 135° , -45° ja -135° . Näillä vaiheilla saadaan esitetyksi signaalitilat 00, 01, 10 ja 11 (kuva 1). Symboleiden määrä on kaksinkertainen BPSK:n verrattuna, mikä tarkoittaa nopeampaa tiedonsiirtonopeutta ja samalla spektritehokkaampaa tiedonsiirtoa. /1, s. 147; 6, s. 27/

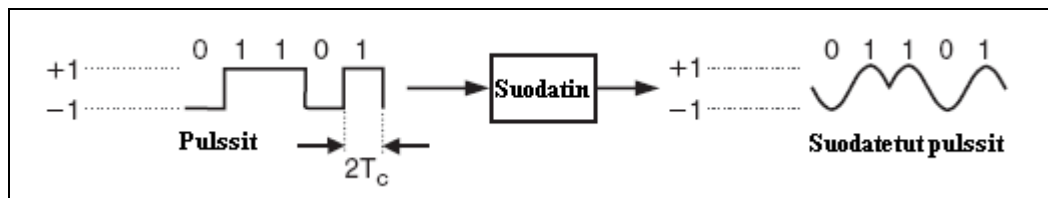
O-QPSK eroaa QPSK-moduloinnista siinä, että Q-haaraan johdettavaa bittijonoa viivästytetään lähetyksessä puolen jakson ajan. Tämä viive aiheuttaa sen, että vaiheen muutos ei koskaan ole yli 90° . Tällä mahdollistetaan se, että amplitudin vaihtelut jäävät vähäisiksi lähettimellä, jolloin käytössä olevalle päätevahvistimelle ei kohdistu niin suuria rajoituksia. /1, s. 149/

2.2.3 ASK

ASK, eli amplitudi-vaiheavainnus kuljettaa informaation signaalin amplitudissa. ASK:ta voidaan ZigBeessä käyttää 868-868,6 MHz:n ja 902-928 MHz:n taajuusalueilla.

2.3 Pulssinmuokkaus

Ennen varsinaista modulointia on digitaalisen signaalin muotoa muokattava. Digitaalisella kanttiaallolla modulointi vaatisi teoriassa äärettömän leveän taajuuskaistan, johtuen kanttiaallon sisältämistä taajuuskomponenteista. Lähetettävä bittivirta muokataan sopivaksi pulssinmuokkauksen avulla. 802.15.4-standardi määrittelee kolme pulssinmuokkaustapaa, joista tämän työn tarkastelun alla oleva Jennicin JN-5139-piiri käyttää näistä *half-sin* – suodatinta. Tämä pyöristää digitaalisen kanttiaallon lähetykselle sopivaan muotoon (kuva 2).



Kuva 2 Pulssinmuokkaussuodattimen vaikutus kanttiaaltoon /1, s. 149/

2.4 DSSS

DSSS (Digital Sequence Spread Spectrum) on digitaalisissa hajaspektritekniikoissa käytetty levitysmenetelmä, jonka tarkoituksena on saada lähetettävä informaatio levitettyä laajalle taajuuskaistalle. Leveämpi taajuuskaista parantaa vastaanottimen herkkyyttä, viereisen kanavan vaimennusta sekä monitie-edenneiden signaalikomponenttien vastaanottoa. IEEE 802.15.4 standardissa 2,4 GHz:n taajuusalueella jokaista lähetettävää neljää bittiä vastaa 32-bittinen levityskoodi (taulukko 2).

Taulukko 2 DSSS-suorasekvensoinnin käyttämät pseudosatunnaiset levityskoodit /7, s. 48/

Data-symboli (10-luku)	Data-symboli (binäärinen) (b0, b1, b2, b3)	Levityskoodi (c0, c1 ... c30, c31)
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	1000	11101101100111000011010100100010
2	0100	00101110110110011100001101010010
3	1100	00100010111011011001110000110101
4	0010	01010010001011101101100111000011
5	1010	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	1110	10011100001101010010001011101101
8	0001	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	0101	01111011100011001001011000000111
11	1101	01110111101110001100100101100000
12	0011	00000111011110111000110010010110
13	1011	01100000011101111011100011001001
14	0111	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

Kahden koodin $x(n)$ ja $y(n)$ erilaisuus tai orthogonaalisuus saadaan laskemalla niiden välinen ristikorrelaatio, kaavan (2) mukaisesti. Koodien nollat ja ykköset muutetaan -1:ksi ja +1:ksi ennen kaavaan sijoittamista.

$$r_{xy}(0) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x(n)y(n) \quad (2)$$

Mitä suurempi tulos, sitä vähemmän koodit ovat orthogonaalisia. Ideaaliset levityskoodit ovat keskenään täysin erilaisia, eli niiden ristikorrelaatio r_{xy} on nolla. 802.15.4 standardissa käytetyt levityskoodit eivät ole keskenään täysin erilaisia ja niitä kutsutaankin lähes-ortogonaalisiksi. /1, s. 144-145/

Vastaanottopäässä signaali käsitellään päinvastaisella menetelmällä. Jokaista vastaanotettua 32-bitin jonoa verrataan taulukon 1 mukaisiin koodeihin ja eniten

yhtäläisyyksiä sisältävä valitaan. Virheiden aiheuttamien väärin tulkinnoiden osuus vähenee käytettäessä 32-bittisiä sekvenssejä ilmaisemaan 16 eri koodia. Tämä johtuu juuri koodien ortogonaalisuudesta. Vaikka yksi bitti muuttuisikin, on silti erittäin todennäköistä, että vastaanotetulle koodille löytyy juuri oikea pari taulukosta ja että välitetty tieto säilyy muuttumattomana. Mikäli sama tehtäisiin neljällä bitillä, tarkoittaisi yksikin bittivirhe tiedon vääristymistä. Taulukosta valittua koodia verrataan edelleen taulukosta löytyviin neljän bitin jonoihin, jolloin data voidaan lukea. Tätä jatketaan kunnes kaikki lähetetty data on luettu.

3 LAITETYYPIT

Langattoman 802.15.4 verkon standardi määrittelee kaksi laitetyyppiä. Nämä laitetyypit ovat Full Function Device (FFD) ja Reduced Function Device (RFD).

3.1.1 FFD

FFD on älykkäämpi laitetyyppi, jolla on käytössä enemmän muistia kuin RFD:llä. FFD huolehtii verkon muodostamisesta, se voi suorittaa kaikkia 802.15.4 -standardin mukaisia toimintoja, keskustella verkon jokaisen laitteen kanssa ja toimia minä laitteena tahansa. /1, s. 9; 3/

3.1.2 RFD

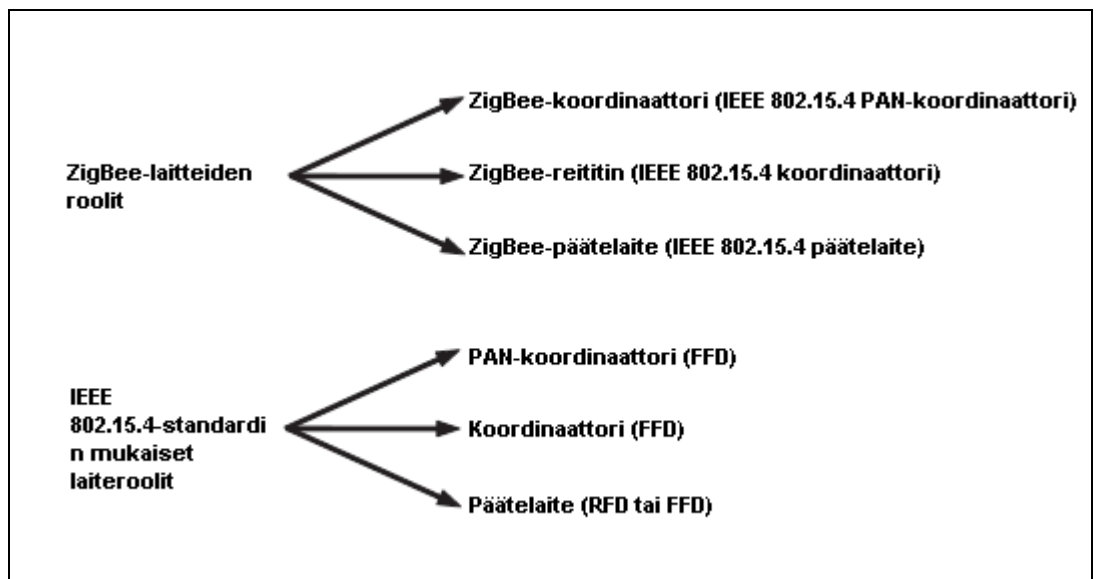
RFD puolestaan on yksinkertaisempi ja sillä on vähemmän ominaisuuksia. RFD voi keskustella ainoastaan FFD:n kanssa. RFD-laitteet suorittavat yleensä vain yksinkertaisia toimintoja verkossa. Näitä voivat olla erilaisten mittaustietojen, kuten lämpötilan, paineen tai kosteuden lähettäminen FFD:lle. /1, s. 9/

3.1.3 Laitteiden roolit

802.15.4 määrittelee laitetyypeille kolme erilaista roolia. Nämä ovat koordinaattori, PAN-koordinaattori sekä pelkkä laite (device). Koordinaattorina toimii FFD. Sen

tehtäviin kuuluu viestien välittäminen eteenpäin verkon muille laitteille. Mikäli koordinaattori on vastuussa koko verkosta, eli on sen pääasiallinen koordinaattori, voidaan sitä nimittää myös PAN-koordinaattoriksi.

ZigBee-verkossa laitteilla on käytössä hieman eri nimitykset. Laitteita voi olla kolmenlaisia. Näitä ovat ZigBee-koordinaattori ZC, joka vastaa 802.15.4-verkon PAN-koordinaattoria, ZigBee-reititin, joka on 802.15.4-verkossa koordinaattori sekä ZigBee End Device tai ZEC (kuva 3). Koordinaattorin tehtävänä on muodostaa ja hallinnoida verkkoa. Yhdessä ZigBee-verkossa voi olla vain yksi koordinaattori. Reitittimen tehtäviin kuuluu nimensä mukaisesti datan reititys verkon muille laitteille. ZEC on verkon laitteista yksinkertaisin niin ominaisuuksien kuin muistinkin suhteen. Se on myös verkon halvin laite. /1, s. 9/



Kuva 3 IEEE 802.15.4 ja ZigBee standardien laiteroolit

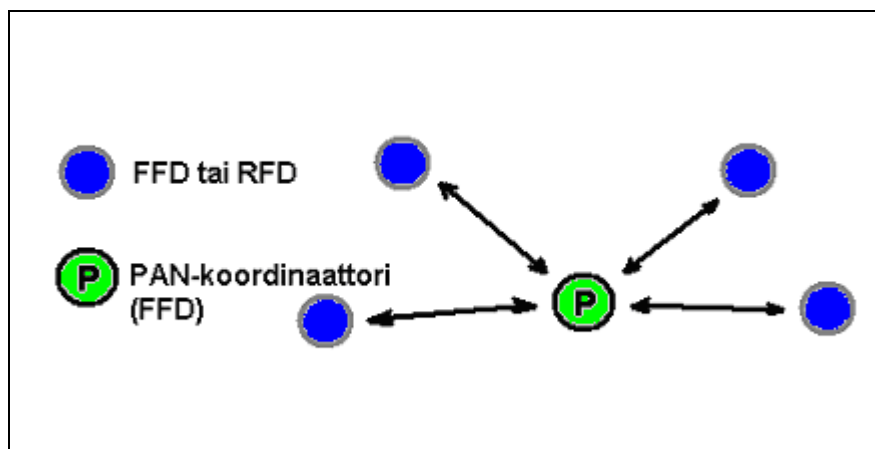
4 VERKKOTOPOLOGIAT

Langaton ZigBee-verkko voidaan muodostaa käyttämällä kahta erilaista verkkotopologiaa. Nämä ovat tähti- ja peer-to-peer (P2P) -topologiat. Nämä topologiat on määritelty IEEE 802.15.4 -standardissa.

Verkon jokaiselle laitteelle voidaan määrittellä joko lyhyt 16-bittinen osoite tai laajennettu 64-bittinen osoite. 16-bittinen osoite sallii osoitteiden käytön yhdessä ainoassa verkossa (esim. P2P tai tähti) ja sen käyttäminen vähentää muistin tarvetta verkon laitteilla. 64-bittistä osoitetta käyttämällä voidaan muodostaa monien erillisten verkkojen joukko, jossa laitteiden määrä on lähes rajaton. /1, s. 16; 7, s. 14/

4.1 Tähtitopologia

Tähtitopologiassa verkon jokainen jäsen voi keskustella ainoastaan verkon PAN-koordinaattorin kanssa (kuva 4). PAN-koordinaattori muodostaa verkon ja sen tehtävänä on lisäksi datan reitittäminen, yhteyksien muodostaminen sekä katkaiseminen. Tähtitopologiassa verkon koordinaattori saa usein virtansa kiinteästä virtalähteestä. Tämä siksi, että koordinaattori on suurimman osan ajasta päällä, jolloin virtaa kuluu enemmän kuin verkon yksinkertaisimmilla laitteilla. Tyypillisiä tähtitopologiaa käyttäviä sovelluksia löytyy mm. kodin automaatiotekniikasta. /1, s. 10/

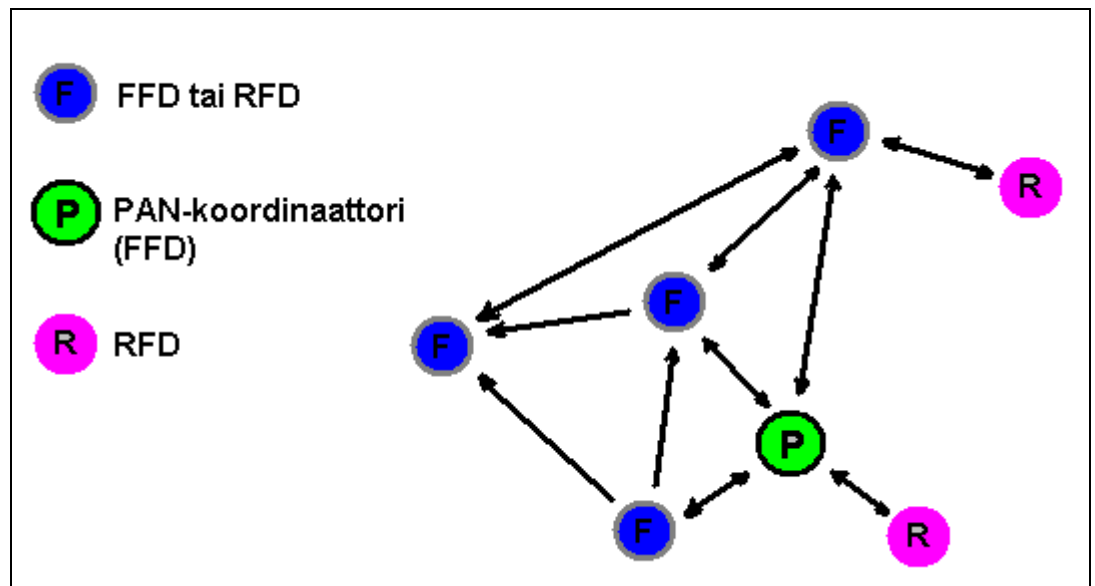


Kuva 4 Tähtitopologia 802.15.4 WPAN-verkossa

4.2 Peer-to-peer -topologia

Peer-to-peer – topologia (P2P) eroaa tähtitopologiasta siinä, että tämän verkon kaikki laitteet voivat keskustella toistensa kanssa, mikäli ovat kantaman sisäpuolella (kuva 5). P2P-verkot ovat toiminnaltaan tehokkaampia ja voivat muodostaa isompia verkkoja kuin mitä tähtitopologiaa käyttämällä olisi mahdollista. P2P-verkkotyyppeihin voidaan lisätä ylemmille protokollakerroksille reititysmenetelmiä, joilla voidaan nopeasti määrittellä vaihtoehtoisia reittejä paketeille kun verkko esim. ruuhkautuu tai sen tietyillä osuuksilla on havaittavissa katkoksia tms. Näillä ominaisuuksilla saadaan verkko korjaamaan itse itsensä vikatilanteissa, mikä tehostaa sen toimivuutta sekä vähentää käyttökustannuksia. /1, s. 10-11; 7, s. 15/

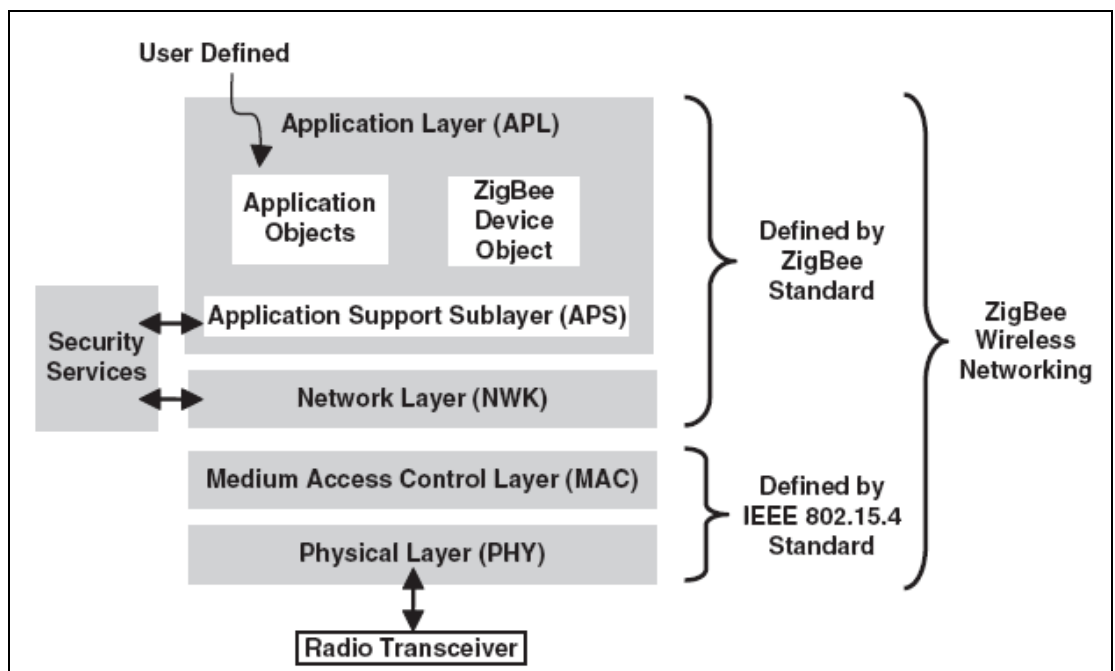
Peer-to-peer –verkossa voi olla useampi FFD-laite, joista kuitenkin vain yksi voi toimia PAN-koordinaattorina. Tämä on yleensä sellainen laite, jolla on eniten laskentatehoa sekä muistia. PAN-koordinaattorin määrittäminen voidaan usealla tavalla. Verkossa kiinni olevat RFD-laitteet eivät osallistu pakettien reitittämiseen, vaan kommunikoivat suoraan PAN-koordinaattorin kanssa. /1, s. 9; 7, s. 13/



Kuva 5 P2P-verkkotopologia IEEE 802.15.4 verkossa

5 IEEE 802.15.4 VERKKOKERROKSET

Yleisin tapa muodostaa tietoliikenneverkko on määrittellä sille erilaiset verkkokerrokset, jossa jokainen kerros on vastuussa sille määritellystä tehtävästä. Kerrokset kommunikoivat keskenään jakamalla yleensä tietoa vain suoraan ylempään ja alemman verkkokerroksen kanssa. ZigBeen verkkokerrokset perustuvat OSI-malliin (Open Systems Interconnect) (kuva 6).



Kuva 6 ZigBeen käyttämät protokollakerrokset /1, s. 5/

Kuten kuvasta käy ilmi, on verkon kaksi alinta kerrosta, eli fyysinen sekä MAC-kerros, määritelty IEEE 802.15.4-standardissa. IEEE 802.15.4 on kehitetty omaksi standardikseen. Tämä mahdollistaa lyhyen kantaman verkon luomisen, joka perustuu pelkästään 802.15.4 standardille, jonka päälle voidaan luoda käyttäjän määrittelemät kerrokset. Näin voidaan luoda sovelluskohtaisia verkkoja, joille esim. vaatimukset muistin suhteen voivat olla huomattavasti pienemmät ilman ylempien verkkokerrosten määrittelyä, millä puolestaan voidaan vähentää tuotantokustannuksia. Mikäli ZigBeen määrittelemät kerrokset otetaan mukaan, saavutetaan toisten valmistajien kanssa yhteensopiva laitteisto. /1, s. 5-6/

Seuraavat kappaleet käsittelevät fyysisen- ja MAC-kerroksen rakennetta, jotka on IEEE 802.15.4 -standardissa määritelty. Ylempien kerroksien rakenteeseen ei tässä työssä oteta kantaa.

5.1 Fyysinen kerros

Fyysinen kerros on ZigBeen käyttämistä protokollakerroksista alimmaisena. Sen tehtäviä ovat vastaanottimen aktivointi lähetyksen saapuessa sekä oikean taajuuden (kanavan) valinta. Fyysinen kerros suorittaa käytetylle kanavalle myös erilaisia mittauksia, joita tarvitaan kun kanavaa halutaan käyttää vastaanotossa ja lähetyksessä. Nämä toiminnot suorittaa fyysisellä kerroksella Physical Layer Management Entity, eli PLME.

Näitä mittauksia ovat mm. energiatason määrittely, 802.15.4 yhteensopivan liikenteen havainnointi kanavalla, eli CS (Carrier Sense) sekä yhteyden laadun tarkkailu, eli LQI (Link Quality Indicator). Lisäksi CSMA-CA, eli Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, suoritetaan fyysisellä kerroksella. /1, s. 17; 7, s. 27/

5.1.1 ED – Energy Detection

IEEE 802.15.4 -standardin mukaan, vastaanottimen on kyettävä havaitsemaan kanavalla olevat energiatasot, jotka ovat 10dB korkeampia kuin mitä vastaanottimen minimiherkkyys. Jennic 5139 -piirin vastaanottimen herkkyys on -97dBm, mikä tarkoittaa, että sen on kyettävä havaitsemaan signaalitasot, jotka ovat -87dB tai korkeampia. Energiatasoa mitattaessa vastaanotin ei tarkista onko havaittu energia peräisin 802.15.4 yhteensopivasta signaalista, se tarkistaa vain onko samalla taajuudella signaaleja. /1, s. 36/

5.1.2 CS – Carrier Sense

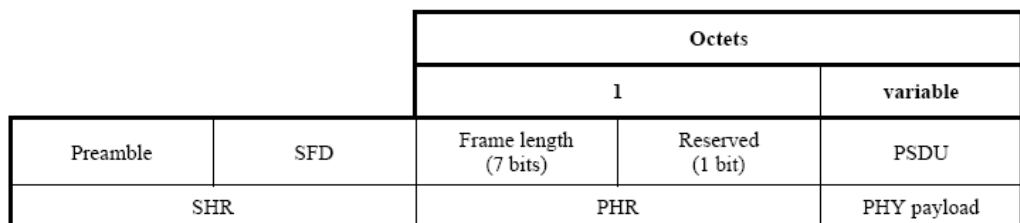
Haluttua kanavaa kuunnellaan ja vastaanotettua signaalia yritetään demoduloida. Mikäli tämä onnistuu, on vastaanotettu signaali yhteensopiva 802.15.4 standardin kanssa ja kanavaa voidaan pitää varattuna riippumatta sen energiatasosta. /1, s. 36-37/

5.1.3 LQI – Link Quality Indicator

Tällä tarkkaillaan vastaanottimeen saapuvien datapakettien laatua. Vastaanotetun signaalin voimakkuus, eli RSS (Received Signal Strength) kertoo yhteyden laadusta, mikä perustuu saapuvan signaalin kokonaisenergiatiheyteen. Yhteyden laatua voidaan myös mitata sen signaali-kohinasuhteella, mikä on kokonaisenergian suhde havaittavaan kohinatasoon kyseisellä taajuudella. Mitä korkeampi signaali-kohinasuhde, sitä laadukkaampi yhteys on kyseessä. Jokaiselle saapuvalla datapakettilla suoritetaan LQI, josta saatu tieto välitetään edelleen MAC-kerrokselle. Yhteyden laatua tarvitaan verkkokerroksella, jossa eri yhteyksien mittauksista saatuja tietoja voidaan käyttää hyväksi signaalin reitittämiseen. Signaali ohjataan niitä linkkejä pitkin, missä yhteyden laatu on mahdollisimman hyvä. /1, s. 37/

5.1.4 Fyysisen kerroksen paketin rakenne

Tieto kulkee kahden laitteen välillä paketteina. 802.15.4 standardi määrittelee fyysisen kerroksen käyttämän pakettiformaatin, eli PPDU:n (Physical Protocol Data Unit) (kuva 7).



Kuva 7 PPDU:n rakenne /7, s. 43/

PPDU (PHY Protocol Data Unit) koostuu kolmesta osasta. Nämä osat ovat synkronisointikehys (SHR), fyysinen kehys (PHR) sekä datakehys (PHY payload). PPDU lähetään siirtotielle 4 bitin sarjoissa, joista jokaista verrataan pseudosatunnaisiin koodeihin. Vastaanotetusta signaalista puretaan alkuperäinen datapaketti vertaamalla jokaista 32 bitin pituista bittijonoa sitä vastaavaan, 4 bitin mittaiseen data-symboliin.

Synkronisointikehys koostuu kahdesta osasta, joiden tehtävinä on aktivoida vastaanotin ja synkronisoida se saapuvan bittivirran kanssa. Ensimmäisen osan, preamblen, kaikki bitit ovat nollija ja tämän osan kesto on 128 μ s. Seuraavan osan, SFD:n (Start-of-frame delimiter), tehtävänä on ilmoittaa vastaanottimelle, että synkronisointikehys päättyy ja että fyysinen kehys alkaa.

Ensimmäiset 7 bittiä fyysisellä kehyksellä pitää sisällään saapuvan datan pituuden. Pituus voi olla väliltä 0-127 oktetia. Viimeisin osa, eli datakehys, pitää sisällään PSDU:n (PHY Service Data Unit) jossa on dataa ylemmältä, eli MAC-alikerrokselta. PSDU:n pituus vaihtelee lähetettävän datan mukaan. /7, s. 43-45/

5.2 MAC-alikerros

MAC-alikerros on fyysisen verkon yläpuolella oleva verkkokerros, joka kommunikoi fyysisen kerroksen PLME:n sekä suoraan yläpuolellaan olevan verkkokerroksen, NLME:n (Network Layer Management Entity) kanssa. MAC-kerroksen toiminnoista vastaa MAC Layer Management Entity, eli MLME, jonka tehtäviin kuuluvat mm. beacon -kehysten luonti (koordinaattori), synkronisointi beacon -kehyksiin, PAN-verkon muodostaminen ja purkaminen, laitteen suojauksen tuki, CSMA-CA:n soveltaminen sekä luotettavan yhteyden muodostaminen kahden laitteen välille. /7, s. 67/

5.2.1 MAC-alikerroksen kehykset

IEEE 802.15.4 -standardi määrittelee neljä kehyrakennetta MAC-alikerrokselle. Nämä ovat Beacon –kehys, datakehys, kuittauskehys sekä MAC -komentokehys. /1, s. 68/

Beacon – kehyksen tehtävänä on verkon laitteiden synkronisointi. Lisäksi koordinaattori voi käyttää sitä kertoakseen tietylle verkossa olevalle laitteelle, että tälle on dataa jonossa koordinaattorilla. Tällöin kyseinen laite lähettää koordinaattorille datanlähetyksen pyynnön, jonka seurauksena koordinaattori lähettää eteenpäin jonossa olevan datan. Tämä on nimeltään epäsuora lähetyksen. /1, s. 19/

MAC – datakehys rakentuu ylemmän kerroksen, verkkokerroksen datasta.

MAC–kuittauskehys on yksinkertaisin MAC – kehyksistä. Se ei pidä sisällään varsinaista dataa vaan sen tehtävänä on välittää paketin lähettäjälle tieto paketin onnistuneesta vastaanotosta. /1, s. 20/

MAC–komentokehukset ovat verkon hallinnan kannalta tärkeitä kehyksiä. Niiden avulla uudet laitteet lähettävät verkon koordinaattorille tiedon siitä, että ovat liittymässä verkkoon tai vastaavasti jättämässä sen. Komentokehysillä voidaan myös pyytää verkon koordinaattorilta GTS, varmistaa onko dataa jonossa laitteelle tai ilmoittaa synkronisoinnin epäonnistumisesta koordinaattorille. /1, s. 21/

MAC-kehyksille generoidaan myös 16-bittinen tarkistussumma FCS (Frame Check Sum), joka tarkistetaan vastaanottopäässä. Tällä taataan lähetteen luotettavuus. /4, s. 27/

Jokainen MAC-alikerroksen kehyksistä välitetään edelleen alimmalle, fyysiselle kerrokselle, jossa se kapsuloidaan fyysisen kerroksen PSDU:n sisään ja lähetetään siirtotielle.

5.2.2 CSMA-CA

CSMA-CA on lyhenne sanoista Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. Se on MAC-kerroksen käyttämä kanavanvarausmenetelmä, joka on käytössä monissa langattomissa tietoliikennetekniikoissa. Protokolla perustuu käytettävän kanavan tarkkailuun ja kuunteluun. Mikäli kanavalla havaitaan liikennettä, ei lähetystä aloiteta. Lähetysten aloitusta lykätään tietyllä ajalla, jonka jälkeen kanavaa kuunnellaan uudelleen.

CSMA-CA toimii siten, että MAC-kerros lähettää fyysiselle kerrokselle pyynnön, jolla tarkkaillaan onko kanava jo käytössä. Tämä pyyntö on nimeltään CCA (Clear Channel Assessment). Kanavan mittausta on kolmea tyyppiä:

CCA 1: Ainoastaan kanavan energiatiheys otetaan huomioon. Mikäli energiataso on yli määritellyn, voidaan kanavaa pitää varattuna eikä lähetintä aktivoida kyseiselle kanavalle. Energiataso on valmistajan määriteltävissä.

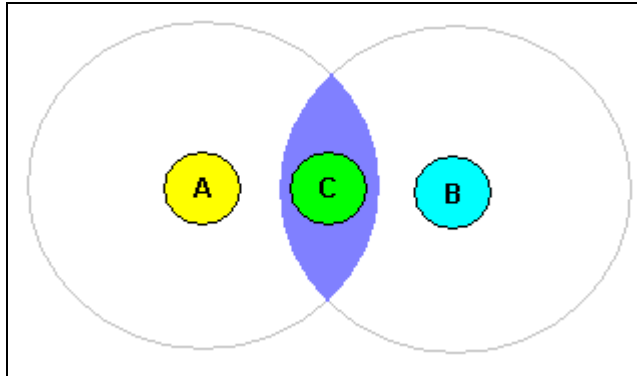
CCA 2: Mikäli kanavalla havaitaan 802.15.4 yhteensopivaa liikennettä, voidaan kanavaa pitää varattuna.

CCA 3: CCA 1:n ja CCA 2:n yhdistelmä, jossa joko molemmat tai vai toinen ehdoista vaaditaan, jolloin kanavaa pidetään varattuna. /1, s. 38/

5.2.3 CSMA-CA ja hidden node

IEEE 802.15.4 -standardin määrittelemä CSMA-CA poikkeaa 802.11 -standardin käyttämästä törmäyksenesto-menetelmästä siinä, että se ei käytä CTS (Clear to Send) tai RTS (Request to Send) –signaaleja. Tämä aiheuttaa ongelman silloin, kun kaksi toisistaan kaukana olevaa laitetta, A ja B, yrittävät lähettää samanaikaisesti dataa kolmannelle laitteelle, C, käyttäen samaa kanavaa (kuva 8). Laitteet ovat niin kaukana, että ne eivät pysty havaitsemaan toistensa signaaleja. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että signaalit törmäävät laitteessa B. Tämä ilmiö on nimeltään *hidden node* ja sen ratkaisemiseksi ainoat vaihtoehdot on asettaa laitteet A ja C lähemmäksi

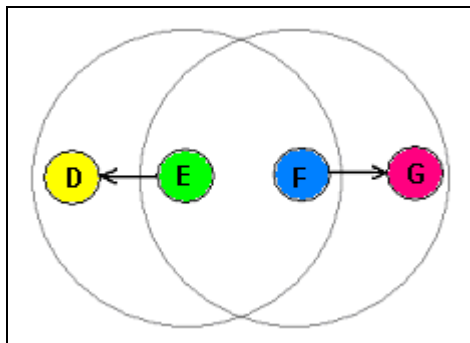
toisiaan tai sitten lisätä niiden lähetystehoja, jolloin CSMA-CA pystyisi estämään samanaikaiset lähetykset. /1, s. 55/



Kuva 8 Hidden node, CSMA-CA:n ongelma

5.2.4 CSMA-CA ja exposed node

Exposed node on toinen CSMA-CA:n ongelmista. Ongelma muodostuu, kun laite E haluaa lähettää paketin laitteelle D ja samankaikaisesti laite F laitteelle G (kuva 9).



Kuva 9 CSMA-CA ja Exposed Node-ongelma

Lähettävä laite F luulee, että sen lähetykset sotkee E:n lähettämän datan laitteelle D, vaikka todellisuudessa F:n lähetykset eivät edes kanna laitteelle D asti. Tällöin F ei lähetä omaa pakettiaan vaan jää odottamaan, että siirtotie on vapaa. Tällainen tilanne aiheuttaa sen, että kaistaa ei käytetä kyllin tehokkaasti, mikä puolestaan vähentää verkon toimivuutta. /1, s. 55/

6 LIKENNÖINTIMUODOT

Langattomassa 802.15.4 –verkossa voidaan käyttää kahta eri liikennöintimuotoa. Nämä ovat contention-based ja contention-free. Näistä contention-based –tyyppinen liikennöinti käyttää edellä kuvattua CSMA-CA –metodia, eli haluttua kanavaa kuunnellaan ja mikäli liikennettä ei havaita, voidaan lähetys aloittaa.

Contention-free –tyyppisessä liikennöinnissä ei CSMA-CA:ta käytetä vaan verkon PAN-koordinaattori jakaa jokaiselle verkossa kiinni olevalle laitteelle oman aikajaksonsa, joka on nimeltään GTS (Guaranteed Time Slot). Jokainen laite lähettää siis sille varatulla aikajaksolla ilman CSMA-CA:ta. /7, s. 13/

6.1 Beacon-enabled -verkko

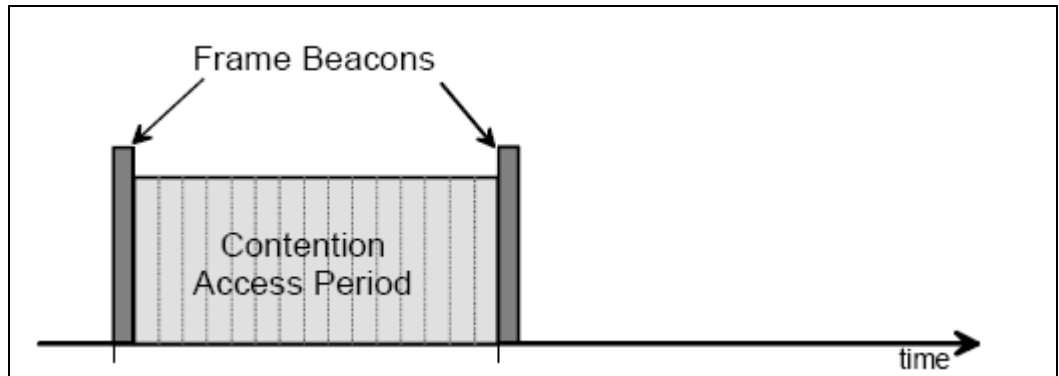
Jotta verkon kaikki laitteet olisivat tietoisia yhteisistä aikajaksoistaan, on verkossa olevat laitteet synkronisoitava. Verkon PAN-koordinaattori lähettää contention-free – tyyppisessä verkossa laitteille beacon-kehysten, joka pitää sisällään verkon käyttämän ajan. Näin ollen laitteet pysyvät synkronisoituina, eikä päällekkäisiä lähetyksiä synny.

Haittapuolena beacon-tyyppisessä verkossa on se, että jokaisen laitteen on kuunneltava beacon-kehysiä tietyin väliajoin, vaikka niillä ei olisi edes mitään lähetettävää. Tämä lisää laitteiden virrankulutusta merkittävästi ja lyhentää näin akkujen kestoa.

Verkko, jossa beacon-kehysiä eikä varattuja aikajaksoja käytetä on nimeltään non-beacon-verkko. Tällaisen verkon laitteiden virrankulutus on luonnollisesti alhaisempi kuin beacon-tyyppisessä verkossa. /1/, /7, s. 13/

6.2 Superkehys

Beacon-enabled – verkossa on mahdollista käyttää superkehystä. Superkehys on rajattu kahden beacon-signaalin välille ja se koostuu 16 yhtä suuresta lohkokosta (kuva 10).

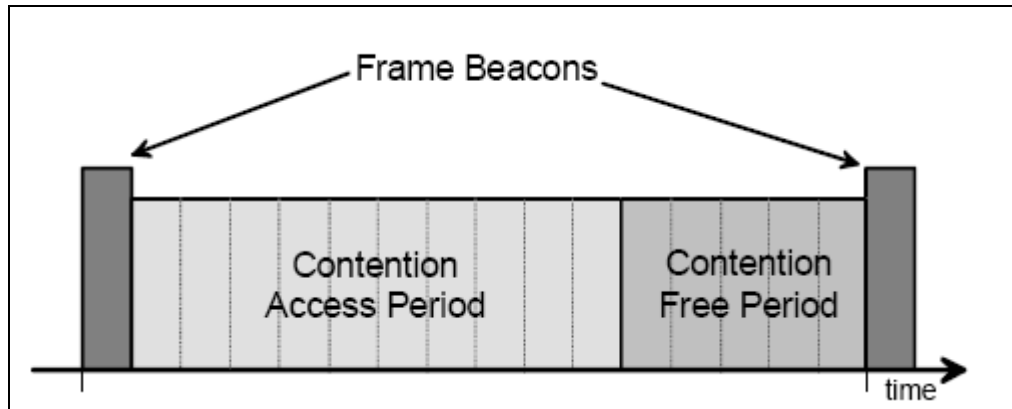


Kuva 10 Superkehysten rakenne /7, s. 18/

Superkehyksessä voi olla aktiivinen ja ei-aktiivinen tila, joista jälkimmäisessä laitteet voivat siirtyä vähän virtaa kuluttavaan tilaan. Superkehysten rakenteen määrittelee verkon koordinaattori ja se määritellään verkkokerroksella.

Beacon -kehys lähetetään superkehysten ensimmäisenä kehyksenä. Sen tehtävänä on synkronisoida verkkoon liitetyt laitteet sekä kertoa niille superkehysten rakenne. Beacon -kehysten väliin jäävät kehykset on varattu verkon muiden laitteiden lähetyksille. Tämä väli on nimeltään CAP (Contention Access Period). Mikäli laite haluaa lähettää jollakin kyseisistä kehyksistä on sen kilpailtava siitä verkon muiden laitteiden kanssa käyttäen CSMA-CA – kanavanvarausmenetelmää. Kaikki tällä välillä lähetetyt paketit joutuvat käyttämään CSMA-CA:ta paitsi nopeat kuittaukset, jotka vastaanottaja lähettää paketin lähettäjälle /7, s.17, 18/

Koordinaattori voidaan myös määrittää jakamaan jokaiselle verkon laitteelle oman aikavälinsä, eli GTS:n. Määritellyt aikavälit muodostavat CFP:n (Contention Free Period), joka alkaa heti CAP:n jälkeen. Koordinaattori voi myöntää seitsemän GTS:a verkon laitteille, mutta loput on jätettävä CAP:n käyttöön (kuva 11).

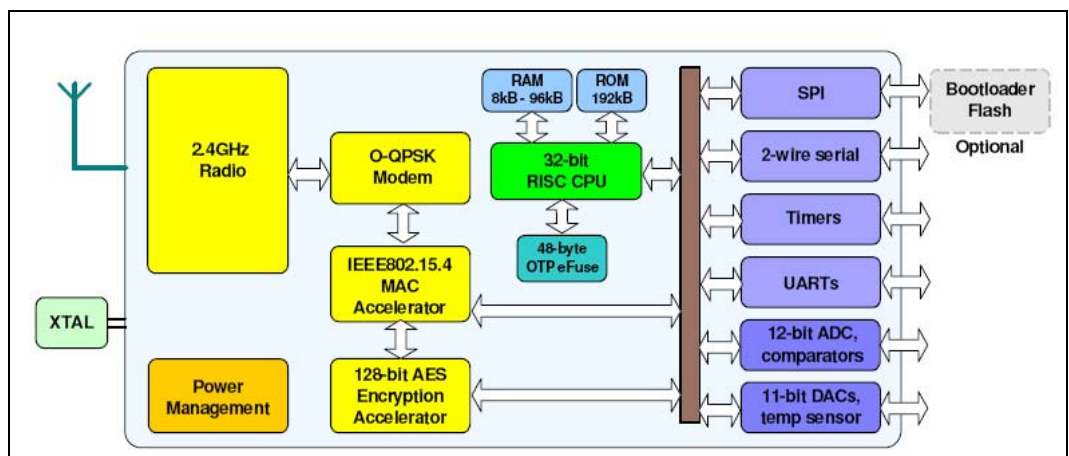


Kuva 11 CAP ja CFP superkehyksessä /7, s. 18/

Uudet verkkoon liittyvät laitteet tarvitsevat CAP:n jotta voisivat onnistuneesti kommunikoida muiden laitteiden kanssa. /7, s. 18/

7 JENNIC JN5139 -PIIRI

Piiri, jota tässä työssä on tutkittu, on Jennic JN5139. Se on langaton mikrokontrolleri, joka täyttää kaikki IEEE 802.15.4-standardin vaatimukset. Piiri on fyysisiltä mitoiltaan kilpailijoidensa kaltainen. Siinä on 56-nastaa ja sen koko on 6,4x6,4 millimetriä.



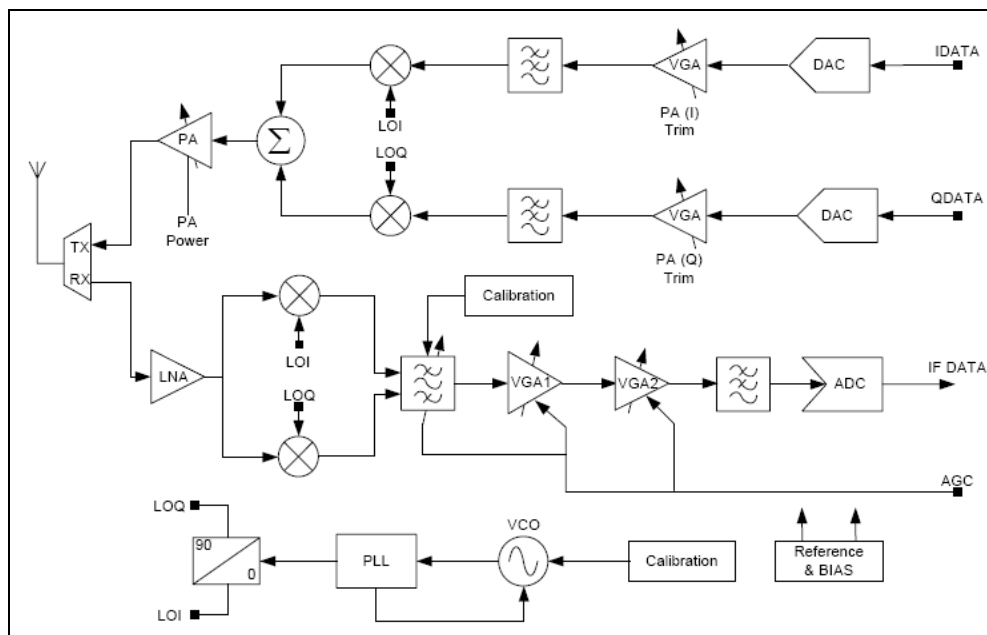
Kuva 12 JN5139 -piirin lohkokaavio /11 s. 2/

Piirissä on 32-bittinen RISC-prosessori (Reduced Instruction Set Computer) 192 kB:n ROM- ja 96kB:n RAM-muisti sekä liitännät analogisille ja digitaalisille

tuloille ja lähdöille. Ulkoisia komponentteja ovat ainoastaan 16MHz:n kide sekä valinnainen FLASH-muisti (kuva 12). /11, s. 2/

8 JENNIC JN5139-PIIRIN VASTAANOTTIMEN LOHKOT

JN5139-piirin radio on täysin integroituna 6,4x6,4 millimetrin piipalalle.



Kuva 13 Jennic-5139 radion lohkokaavio /4, s. 23/

Vastaanottimen lohkokaavio pitää sisällään seuraavat elementit: antenni, vähäkohinainen vahvistin, paikallisoskillaattorit I- ja Q-signaaleille, kaistanpäästösuodatin, vahvistin 1, vahvistin 2, alipäästösuodatin (laskostumisen estosuodatin), sekä AD-muunnin (kuva 13).

Piiriin liitettävä 16 megahertsin kiteestä saadaan syntetisoijalle referenssijännite jakajan avulla. Syntetisoija pitää sisällään mm. ohjelmoitavan jännitepumpun, vaiheenilmaisimen sekä sisäänrakennetun jänniteohjatun oskillaattorin, VCO:n (Voltage Controlled Oscillator). VCO ei pidä sisällään ulkoisia komponentteja. Se sisältää kalibrointipiirin, jolla lämpötilan vaihtelun aikaansaamat muutokset

voidaan säätää kohdalleen. Vaihelukittu silmukka (PLL – Phase Locked Loop) ohjaa VCO:n toimintaa. /4, s. 23/

8.1 Antenni

Antenni vastaanottaa lähetetyn signaalin ja muuntaa sen jännitteeksi vastaanottimen vahvistimelle. Antennin toiminta on ohjattavissa kytkimellä. Kytkimen asento määrittelee onko antenni käytössä lähetyksessä vai vastaanotossa.

Jennicin JN5139 -piirissä hyödynnetään antennin diversiteettiä. Tämä tarkoittaa sitä, että käytössä on kaksi antennia, joiden etäisyys toisistaan on $0,25$ aallonpituutta (λ). Kahden antennin merkitys tulee esille silloin, kun lähetykseen ei saada kuittausta. Lähetystä voidaan tällöin kokeilla toisella antennilla, jolloin saadaan mahdollisesti parempi lopputulos. /4, s.24/

JN5139-piirissä antennin impedanssi on 200Ω .

8.2 LNA – Vähäkohinainen vahvistin

Vähäkohinaisen vahvistimen tehtävänä on vahvistaa antenniin indusoitunut signaali ja olla lisäämättä siihen kohinaa. Vahvistimen hyvyttä kuvataan sen kohinaluvulla NF, mikä on desibelin arvo. Se ilmoittaa vahvistimen ulostulosta mitatun signaalin kohinan suhdetta sisäänmenevän signaalin kohinaan. Mitä alhaisempi kohinaluku, sitä laadukkaampi vahvistin on kyseessä. /1/

8.3 Paikallisoskillaattorit ja sekoittimet

Paikallisoskillaattoreiden LOI ja LOQ taajuudet ovat vastaanottimessa samat kuin kuunnellun kanavan taajuus. Paikallisoskillaattoreiden signaalit syötetään I- ja Q haaroille ja ne sekoitetaan vastaanotetun signaalin kanssa mikserissä. Mikserin, eli sekoittimen ulostulossa on matalataajuinen IF-signaali, joka pitää nyt sisällään RF-signaalin datan. Matalataajuisempaa signaalia on helpompi käsitellä seuraavilla lohkoilla kuin korkeaa, 2,4GHz:n signaalia. /1, s.294/

8.4 Kaistanpäästösuodatin

Kaistanpäästösuodattimen tehtävänä on poistaa mikseriltä tulevasta signaalista ei-toivotut ylä- ja alataajuudet. Lisäksi sen tehtävänä on estää vastaanotetun taajuuden peilitaajuudet sekä määrittellä vastaanotettu kanava. /4, s.23/

8.5 Vahvistimet

JN5139-piirissä on käytössä kaksi vahvistinta VGA1 ja VGA2. Vahvistusta ohjataan automaattisella vahvistuksella, AGC (Automatic Gain Control). AGC tarkkailee saapuvaa signaalia ja säätelee vahvistusta vastaanotetun signaalin tason mukaisesti. /4, s.25/

8.6 Laskostumisen estosuodin

Laskostumisen estosuodattimen on alipäästösuodatin, jonka tehtävänä on suodattaa pois ne ylätaajuudet, joita ei vahvistimen seuraavilla lohkoilla tarvita ja jotka eivät sisällä informaatiota.

8.7 AD-muunnin

Käytössä olevan AD-muuntimen resoluutio on 12 bittiä. AD-muunnin saa kellotaajuutensa JN5139-piirin yhteiseltä 16MHz:n oskillaattorilta. Se voidaan asettaa toimimaan myös taajuuksilla 2MHz, 1MHz, 500kHz ja 250kHz. AD-muunnoksen aikana, signaalista otetaan tietyn ajanjakson mittainen näyte. Muunnoksen kesto on $(3 \times \text{ADC:n kellojakso}) + 14$ kellojaksoa. ADC:n kellojaksot voidaan ohjelmoida väleillä 2, 4, 6 ja 8. Näin ollen 1MHz:n taajuudella, käyttäen neljää ADC:n kellojaksoa, on koko muunnoksen kesto yhteensä 26 kellojaksoa eli 26 μ s. /4, s.46/

8.8 Demodulointi

Demoduloinnissa vastaanotetun signaali ohjataan I ja Q kanaville ja niissä oleva data demoduloidaan. JN5139-piirissä käytössä olevalla demodulaattorilla on suuri toleranssi signaalissa tapahtuviin taajuuden muutoksiin. Signaali pystytään demoduloimaan, vaikka siinä olisi heittoa ± 80 ppm. Esimerkiksi kanavassa 15, jonka keskitaajuus kaavan 1 mukaisesti sijaitsee taajuudella 2,425GHz, voi vaihdella ± 194 kHz. /4, s.25/

8.9 Kantataajuusprosessori

Modeemin avulla purettu bittivirta johdetaan kantataajuusprosessorille, jonka tehtävänä on suorittaa vastaanotetulle signaalille kaikki aikakriittiset MAC-kerroksen vaatimat tehtävät. Tätä varten oleva laitteisto takaa että tehtävät suoritetaan täsmällisesti, mikrosekunnin tarkkuudella. Ylempien protokollapinojen lähettämät verkon ylläpitoviestit lähetetään kantataajuusprosessorin tarjoamien ominaisuuksien avulla. /4, s.26/

Kantataajuusprosessori huolehtii lisäksi kuittauksen lähettamisestä vastaanotetuille paketeille sekä kuittauspyynnön lähettamisestä. Kuittaus lähetetään heti vastaanoton jälkeen eikä sille tarvitse suorittaa CSMA-CA:ta. /4, s.26/

Datakehysten saapuessa modeemilta kantataajuusprosessorille, tarkistetaan kehysten eheys tarkistussumman FCS:n avulla. Kehyksen sisältämästä datasta luodaan tarkistussumma, jota verrataan kehysten päässä olevaan tarkistussummaan. Mikäli tarkistussummat ovat samat, voidaan kehys hyväksyä. Väärä tarkistussumma aiheuttaa paketin hylkäämisen. /4, s.27/

Kantataajuusprosessori vähentää piirin pääprosessorin käyttöä ja vähentää näin myös virrankulutusta.

9 VASTAANOTTIMEN OMINAISUUDET

Vastaanottimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat sen herkkyys sekä viereisen kanavan vaimennus

9.1 Herkkyys

Vastaanottimen herkkyydellä tarkoitetaan pienintä signaalin tehotasoa, jolla vastaanotetusta läheteestä pystytään erottamaan data alle 1 prosentin pakettivirhesuhteella PER (Packet Error Rate). Tämä herkkyyden määritelmä perustuu IEEE 802.15.4 spesifikaatioihin. Herkkyys ilmaistaan yleisesti desibelisenä arvona suhteessa yhteen milliwattiin [dBm] ja se on laskettavissa kaavalla (3).

$$10^{\frac{\text{dBm}}{10}} \cdot 0,001\text{W} \quad (3)$$

Tehotaso voidaan edelleen muuttaa jännitteeksi kaavan (4) mukaisesti

$$V = \sqrt{P \cdot R} \quad (4)$$

missä V on jännite, P teho watteina ja R resistanssi ohmeina.

802.15.4-standardissa on minimiherkkyys määritelty modulointitavan sekä käytetyn taajuusalueen mukaan. 2,4 GHz:n taajuusalueella vaadittava herkkyys vastaanottimelle on -85dBm. Useat markkinoilla olevat vastaanottimet yltyvät tähän arvoon ja tarjolla on monia, joilla herkkyys on huomattavasti parempi.

Jennicin JN5139 –piirin vastaanottimen herkkyydeksi ilmoitetaan -97dBm.

Kaavalla 3 laskettuna tämä tarkoittaa noin 200 femtowattia. Tämä voidaan edelleen muuntaa jännitteeksi kaavan (4) avulla. JN5139-piirin antennin impedanssi on 200

ohmia, joten jännitteeksi saadaan tällöin $\sqrt{200 \cdot 10^{-15} \text{ W} + 200\Omega} = 6,32$ mikrovolttia.

Minimiherkkyyden lisäksi on 802.15.4 standardissa määritelty myös maksimiteho, jonka vastaanottimen on pystyttävä käsittelemään ilman PERin nousua yli yhden prosentin. Tämä maksimiteho on -20dBm tai korkeampi. /7, s. 140 /

9.2 Herkkyyden parantaminen

Vastaanottimen herkkyyttä voidaan parantaa suuntaavilla antenneilla niin lähetyksen kuin vastaanottopäässäkin. Lähettimen suunta-antennilla saadaan signaalin energia keskitettyä kapeammalle alueelle, jolloin kantama paranee. Vastaanotinpuolella puolestaan pienempi signaalin tehotaso riittää indusoimaan antenniin jännitteen, josta lähetettävä informaatio voidaan onnistuneesti tulkita.

Tärkeimmät vastaanottimen herkkyyteen vaikuttavat tekijät ovat vastaanottimen vähäkohinaisen vahvistimen (LNA) vahvistus sekä vastaanottimen kohinaluku. Signaalissa ilmenevän kohina määritellään signaali-kohina-suhteella (SNR), joka on desibelinen arvo. Kohinaluvulla tarkoitetaan lohkon sisään menevän SNR:n suhdetta ulostulon SNR:ään. Mitä pienempi kohinaluku, sitä parempi vastaanotin on kyseessä. /1, s. 293 /

Vastaanottimen kokonaiskohinaluku voidaan laskea ns. Friisin kaavalla kun tiedetään vastaanottimien lohkojen kohinakertoimet. Kohinaluku voidaan myös määritellä kaavan (5) mukaisesti kun tunnetaan signaali-kohinasuhde sekä herkkyyden

$$NF_{\text{dB}} = RF - \text{herkkyyss}[dBm] - K \cdot T_0 - 10 \cdot \log(BW_{\text{IF}}) - \frac{S}{N} [dB] \quad (5)$$

missä K on Boltzmannin vakio, T_0 on lämpötila Kelvineinä ja BW on kaistanleveys.

Antennin impedanssi on usein määritelty vakioksi. Vastaanottimessa sijaitsevan vahvistimen sisäänmenoimpedanssi pitää olla sovitettuna antennin impedanssin kanssa, jotta vahvistus saataisiin mahdollisimman suureksi. Vaikka ideaalinen impedanssisovitus tarjoaa parhaan vahvistuskertoimen, ei se kuitenkaan välttämättä anna vastaanotinlohkolle parasta kohinalukua. Usein impedanssisovituksen kanssa tehdäänkin kompromissi, jotta saataisiin kohinaluku mahdollisimman pieneksi. /1, s. 293/

9.3 Viereisen kanavan vaimennus

Viereisen kanavan vaimennuksella tarkoitetaan vastaanotetun kanavan ala- tai yläpuolella 5MHz:n etäisyydellä sijaitsevan kanavan vaimennusta. Vastaavasti 10MHz:n etäisyydellä olevia kanavia nimitetään ”vaihtoehtoisiksi kanaviksi”. Standardin mukaan kuunnellun kanavan data on pystyttävä vastaanottamaan ja demoduloimaan alle 1 prosentin pakettivirhesuhteella viereisen kanavan käyttäessä samaa tehotasoa. Vaihtoehtoinen kanava saa puolestaan olla tehotasoltaan 30 desibeliä korkeampi ja sama tulos on silti saavutettava. /1, s. 50/

10 VIRRANKULUTUS

Virrankulutus vastaanottotilassa riippuu käytetystä antennista sekä tietenkin vastaanotettujen pakettien määrästä. Jennicin JN5139-piirille ilmoitetaan virrankulutukseksi vastaanottotilassa 37mA kun prosessori on lepotilassa. Lähetystilassa virtaa kuluu vastaavasti 38mA. Syvässä lepotilassa valmistaja ilmoittaa piirille virrankulutukseksi 60nA. /4, s. 51./

Liitteessä 1 on esillä piirin virrankulutus sekä yleiset sähköiset ominaisuudet.

11 MITTAUKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Jennicin JN5139 – piirille on antennityyppinä valittavissa kolmea erilaista: keraaminen integroitu moduuli (N5139-xxx-M00), lisäantenniliittimellä varustettu moduuli (JN5139-xxx-M01/M03) sekä antennivahvistimella varustettu moduuli (JN5139-xxx-M02/04). Näistä oli mittauksissa käytössä integroitu sekä lisäantenniliittimellä varustetut moduulit.

Jennicin JN5139 – piirille luvataan spesifikaatioissa maksimilähetystehoksi +2,7dBm ja minimitehoksi -30,1dBm /6, s. 60/. Lisävahvistimella varustettua lähetinmoduulia ei ollut mahdollista testata sen suuren säteilytehon vuoksi. Lähettimelle luvataan spesifikaatioissa lähetystehoksi +19dBm, mikä vastaa noin 80 milliwatin tehoa. Suomen Viestintävirasto määrittelee suurimmaksi lähetystehoksi 2400,000 – 2483,500 MHz:n alueella 10mW eli 10dBm. /12/

Kantamamittaukset suoritettiin sekä keraamisella että lisäantennilla varustetuilla moduuleilla. Keraamisen antennin kantamaksi saatiin neljän mittaustuloksen perusteella 92 metriä. Lisäantennilla sama mittaus tuotti tulokseksi noin 450 metriä. Lisäksi keraamisen antennin kantama mitattiin vielä vaimentavalla laatikolla, jossa vaimennus 24 desibeliä. Tätä käyttäen putosi signaalin kantama noin 25 metriin.

Mittauksia suoritettiin lisäksi Tampereen Ammattikorkeakoulun A-siivessä. Mittauksissa haluttiin tarkastella signaalin kuulumista eri kerrosten välillä. Tuloksista havaittiin, että signaali kantoi juuri kahden kerroksen läpi, mutta tällöin vastaanottimen tuli olla juuri lähettimen alapuolella, muuten virheellisten pakettien määrä alkoi kasvaa ja yhteys menetettiin.

Muita mittauksia olivat mm. RFD:n lähettämä signaali kun FFD-laitetta ei ollut kytketty päälle. Liitteessä 2 on esillä RFD:n lähettämä signaali spektrianalyysaattorilla mitattuna. Tässä mittauksessa laitetta pidettiin aivan spektrianalyysaattorin antennin vieressä, jotta saataisiin mahdollisimman selkeä ja vahva signaalikuva.

Gigahertsin alueella olevat radiosignaalit noudattavat vapaan tilan vaimennusta kaavan (6) mukaisesti

$$L_{dB} = 92,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (6)$$

missä L_{dB} on vaimennus desibeleinä, d yhteysvälin pituus kilometreinä ja f taajuus gigahertseinä.

Koska mittauksia ei suoritettu vapaassa tilassa, vaan lähellä maan tasoa, ei samaa yhteysvälivaimennuksen kaavaa voida soveltaa, mutta vastaavanlainen kaava voidaan arvioida karkeasti saatujen mittaustulosten perusteella.

Jennicin JN5139 – piirin radiovastaanottimen ominaisuuksia käyttäen voidaan luoda kaava, joka noudattaa lähes samoja parametreja kuin mitä kaava 6. Piirin lähetystehoksi ilmoitetaan +2,5dBm ja vastaanottimen herkkyudeksi -97dBm. Nämä yhteen laskemalla saadaan yhteysvälivaimennukseksi 99,5dB. Sijoitetaan saatu arvo kaavaan 6 ja lisätään keraamisella antennilla etäisyydeksi saatu tulos 92 metriä ja taajuudeksi 2,4GHz ja ratkaistaan kaavan eteen sijoitettavan vakion arvo. Vastaukseksi saadaan 152,6. Vastaava arvo lisäantennilla saaduille mittauksille on 98,8.

Saatujen tulosten perusteella voidaan karkeasti sanoa, että keraamisella antennilla varustettu moduuli noudattaa kaavan (7) mukaista vapaan tilan vaimennusta

$$L_{dB} = 152,6 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (7)$$

Vastaava yhteysvälivaimennuksen kaava lisäantennilla varustetulle moduulille olisi kaavan (8) mukainen

$$L_{dB} = 98,8 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (8)$$

Saadut kaavat ovat hyvin karkeat ja niissä on suuri virhemarginaali. Virhemarginaalia lisäävät mittauspaikan sijainti rakennuksiin nähden sekä laitteen etäisyys maahan. Lisäksi laitteissa käytettyjen lähetystehojen taso ei mittausten aikana ollut tiedossa vaan se on kaavoja laadittaessa toiminut oletuksena.

Vapaan tilan vaimennuksen kaava ei sovi mallintamaan ZigBee – verkoissa käytettyjen laitteita. Laitteet eivät käytännössä ole koskaan vapaassa tilassa vaan sijaitsevat teollisuushalleissa sekä rakennuksissa, jossa on seinien ja esteiden lisäksi mahdollisesti myös muita, samalla taajuudella toimivia laitteita. Sopivan vaimennusmallin luominen vaatisi enemmän kuin pelkän etäisyyden mittauksen eikä siihen tässä työssä ole mahdollisuutta.

12 YHTEENVETO

Tässä työssä tutustuttiin ZigBee- ja IEEE 802.15.4 – standardeihin sekä niitä soveltavan vastaanottimen JN5139 toimintaan. Työn alussa käsiteltiin ZigBeen ja IEEE 802.15.4:n historiaa sekä merkitystä. Sitten tutustuttiin näiden käyttämiin taajuuksiin, kanaviin, modulointitekniikoihin sekä levitysmenettelyyn DSSS:iin. Näiden lisäksi tarkasteltiin ZigBee –verkossa käytössä olevia verkkotopologioita ja laitteiden rooleja.

Tämän jälkeen tarkastelun alla olivat IEEE 802.15.4:n verkkokerrokset sekä näiden tehtävät, pakettien rakenteet sekä verkossa käytetyt liikennöintimuodot.

Työn loppuvaiheessa tarkasteltiin Jennicin JN5139 – piirin osia ja ne käytiin läpi karkealla tasolla. Piirissä integroituna olevan radiovastaanottimen lohkot käsiteltiin jokainen omana kappaleenaan sekä perehdyttiin niiden ominaisuuksiin sekä standardin määrittelemiін arvoihin. Lisäksi tutkittiin vielä vastaanottimen tärkeimpiä ominaisuuksia ja piirin yleistä virrankulutusta.

Piirillä tehdyt mittaukset jäivät etäisyysmittaukseen sekä vaimentavalla laatikolla tehtyihin mittauksiin. Tuloksista havaittiin, että yhteysvälivaimennuksen kaavaa on vaikea näiden mittausten perusteella laatia ja johtuen ZigBeen sovelluskohteista, ei vapaan tilan mallintaminen anna oikeaa käsitettä etenevien signaalien luonteesta.

13 LÄHTEET

1. Farahani, Shahin, ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Elsevier 2008.
2. Direct-sequence spread spectrum – Wikipedia, the free encyclopedia- [www-sivu]. Viitattu [20.3.2009]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/DSSS>
3. ZigBee – Wikipedia. [www-sivu]. Viitattu [30.0.2009]. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/ZigBee#Verkon_osat_ja_verkkotopologiat
4. JN-DS-JN5139-1v6 Spesifikaatiot
5. PSK – Wikipedia. [www-sivu]. Viitattu [7.5.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/8PSK>
6. Penttinen, Jyrki, Tietoliikennetekniikka – 3G ja erityisverkot. WSOY 2006.
7. IEEE Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)
8. ZigBee Alliance. [www.sivu]. Viitattu [28.5.2009]. Saatavissa: www.zigbee.org
9. Halit Eren, *Wireless Sensors and Instruments Networks, Design, and Applications*, Taylor & Francis 2006
10. 095016r00ZB_ZOPS-Awarepont_with_ZigBee_Improve_Patient_Care_and_the_Bottom_Li.pdf
Saatavissa: www.zigbee.org/imwp/download.asp?ContentID=15796
11. JN5139_PB_021008_v1.23_2.pdf
12. Viestintävirasto15Y2008M.pdf.

14 LIITTEET

1. JN-5139 – piirin virrankulutus
2. JN-5139 – piirin lähettimen signaali spektrianalysointorilla mitattuna

17.2.2 DC Current Consumption

VDD = 2.2 to 3.6V, -40 to +85° C

17.2.2.1 Active Processing

Mode:	Min	Typ	Max	Unit	Notes
CPU processing		2.85 + 0.295/MHz	4.5 + 0.480/MHz	mA	SPI, DIOS enabled
Radio transmit [boost mode]		38 [42]	50 [55]	mA	CPU in software doze – radio transmitting
Radio receive [boost mode]		37 [40]	48 [53]	mA	CPU in software doze – radio in receive mode
The following current figures should be added to those above if the feature is being used					
ADC		655		µA	Temperature sensor and battery measurements require ADC
DAC		215 / 235		µA	One / both
Comparator		67.5 [1.2]		µA	Fast response time [low-power]
UART		95		µA	For each UART
Timer		65		µA	For each Timer
2-wire serial interface		75		µA	

17.2.2.2 Sleep Mode

Mode:	Min	Typ	Max	Unit	Notes
Sleep mode with I/O wakeup (Waiting on I/O event)		0.1		µA	
Sleep mode with I/O and timer wakeup – measured at 25°C		1.2	2.5	µA	As above but also waiting on timer event. If both wakeup timers are enabled then add another 0.3µA
The following current figures should be added to those above if the feature is being used					
RAM retention – measured at 25°C		2.4		µA	For full 96kB retained.
Comparator (low-power mode)		1.2		µA	Reduced response time.

17.2.2.3 Deep Sleep Mode

Mode:	Min	Typ	Max	Unit	Notes
Deep sleep mode – measured at 25°C		60	250	nA	Waiting on chip RESET or I/O event.



11:39:23 Feb 24, 2009

Ref -5 dBm

Atten 5 dB

Mkr1 2.4396 GHz

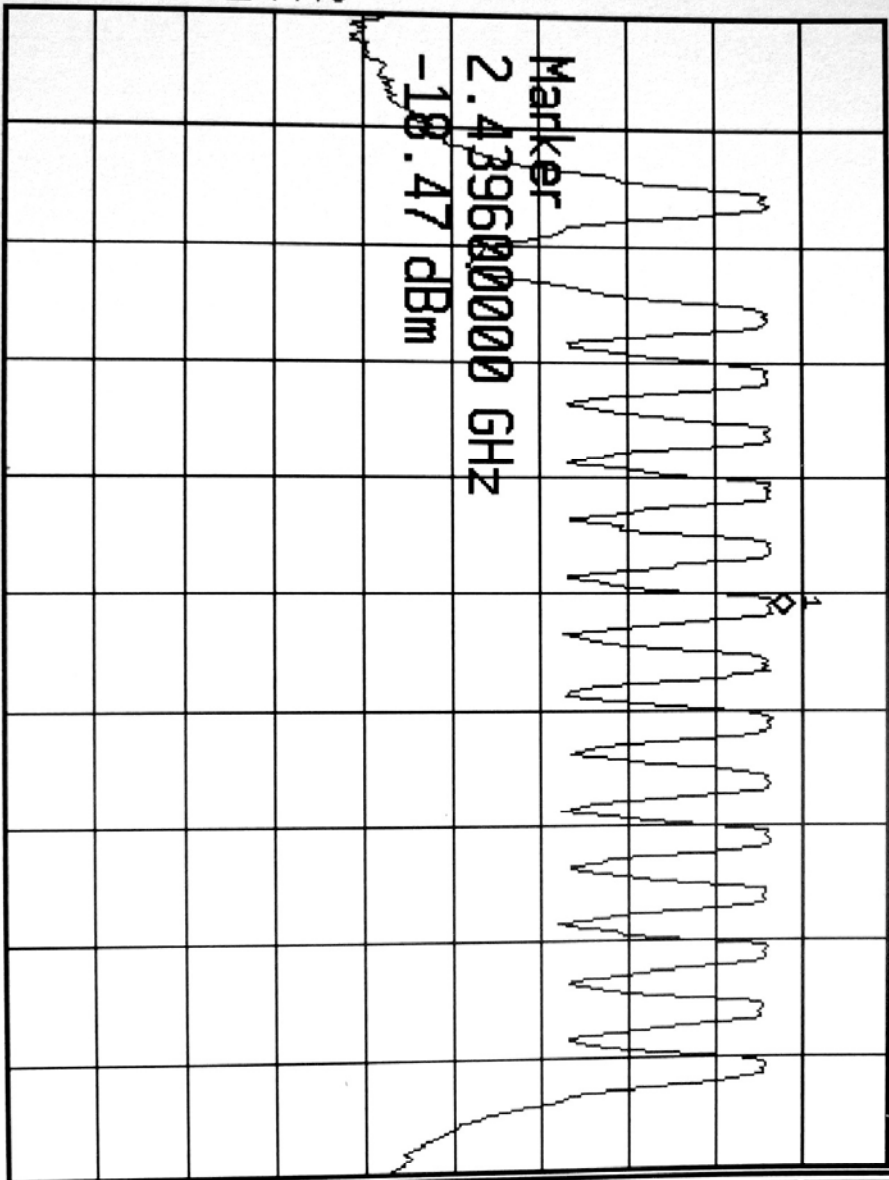
-18.47 dBm

Peak

Log

10

dB/



M1 S2
S3 FC
AA

Center 2.439 GHz
Res BW 1 MHz

VBW 3 MHz

Span 100 MHz
Sweep 5 ms

No Peak Found

Marker Search

Meas Tools

Next Peak

Next PK Right

Next PK Left

Min Search

PK-PK Search

More
1 of 2