

Säätö- ja digitaalitekniikan laboratorio

5.9.2008

Tekniikan kandidaatintyö  
Kaupallisten lyhyenkantaman radiotekniikoiden kartoitus ja  
soveltuvuusanalyysi metallisorvin ohjauksessa käytettävään point-to-point  
yhteyteen

Ville Niskanen 0260386

---

PL 20, 53851 LAPPEENRANTA, p. 05 62111, fax. 05 621 6799  
<http://www.ee.lut.fi/fi/lab/LTY>

## SISÄLLYLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	3
1 JOHDANTO .....	5
2 TEKNINEN MÄÄRITTELY .....	6
2.1 Kaistanleveys.....	7
2.2 Virheenkorjaus .....	10
2.3 Toimintaetäisyys.....	10
2.4 Tehonsyöttö.....	10
2.5 Toteutuksen yksinkertaisuus .....	10
2.7 Hinta ja saatavuus .....	11
3 KESKEISIÄ TEKNISIÄ MÄÄRITELMÄ .....	12
3.1 CRC-tarkistussumma .....	12
3.2 Suorasekvenssi kanavointi .....	12
3.3 EDR ja FCS-tarkistussumma .....	13
3.5 Taajuushyppelykanavointi .....	13
3.6 GFSK .....	13
3.7 OQPSK .....	13
3.8 RFcomm.....	14
3.9 8DQPSK.....	15
4 TARKASTELTAVAT LIIKENNEPROTOKOLLAT .....	17
4.1 ZigBee (802.15.4).....	17
4.2 Standardoimattomat radiopiirit.....	17
4.3 Bluetooth 1.0v & 1.2v (802.15.1).....	18
4.4 Bluetooth v2.0 ja v2.1 EDR ( 802.14.3).....	19
4.5 WUSB UWB (IEEE 802.15.3).....	20
4.6 WLAN, WiFi (IEEE 802.11) .....	20
4.7 WIRELESS Profibus (802.11) .....	21
4.8 IrDA.....	21
4.9 Wireless HART .....	22
5 KÄYTÄNNÖNLÄHEINEN SOVELTUVUUSTARKASTELU.....	24
5.1 Ohjelmitavuus.....	24
5.2 Bluetooth 2.1 +EDR .....	24
5.4 Puskuroinnin laskenta .....	26
5.5 WUSB .....	31
6 SIIRRETTÄVÄN DATAMÄÄRÄN OPTIMOINTI.....	33
7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	35

8 YHTEENVETO .....	36
LÄHDELUETTELO .....	37

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

ACC	Kiihtyvyyssmitta-anturi
AE	Akustinen Emissio
ARM	Advanced RISC Machine
B	tavu
BW	Band Width, kaistanleveys
CCK	Complementary Code Keying
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRC	Cyclic Redundancy Check
DBPSK	Differential Binary Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECC	Verhokäyräpiiri
EDR	Enhanced Data Rate
EMI	Electro Magnetic Interference
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FIR	Fast Infrared
FPGA	Field Programable Gate Array
$f_s$	näytteistystaajuus [Hz]
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
HCI	Hardware Control Interface
IRQ	Interrupt Request, keskeytys pyyntö
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LOS	Line Of Sight
MB-OFDM	Multiband-OFDM
Mb	Mega bitti
MIC	Mikrofoni
MIR	Medium Infrared
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying

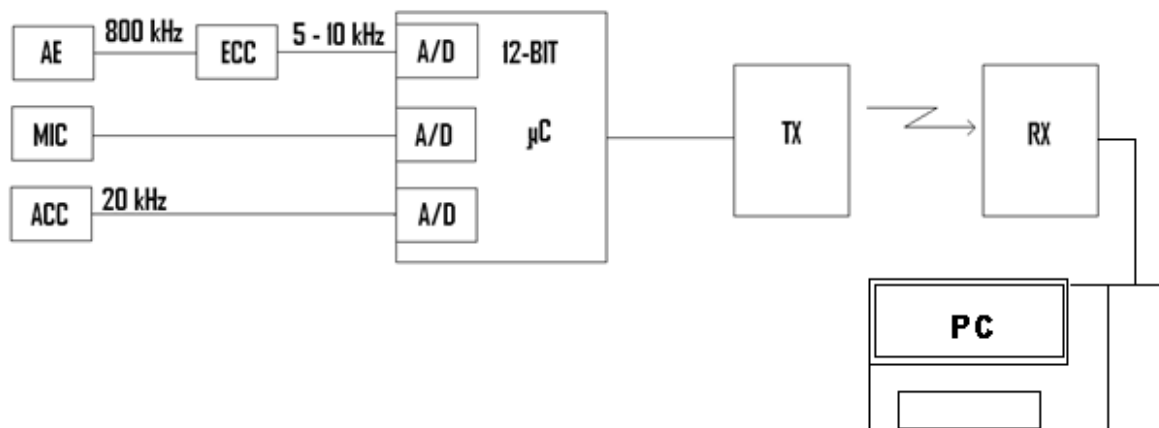
PCF	Packet Control Field
PC	Personal Computer
PL	Pay Load, hyötydata
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RX	vastaanotin
SAR	Successive Approximation Register
SIR	Serial Infrared
SPI	Serial Peripheral Interface
TX	lähetin
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UFIR	Ultra Fast Infrared
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wideband
VFIR	Very Fast Infrared
WLAN	Wireless Local Area Network
WUSB	Wireless Universal Serial Bus

## 1 JOHDANTO

Työssä kartoitettiin markkinoilta löytyvien lyhyen kantaman radiolinkkiteknikoiden vahvuuksia ja heikkouksia. Lyhyen kantaman radiolinkillä tarkoitetaan radiopiirejä, joiden toimintaetäisyys on n. 10 m. Tarkastelu suoritettiin soveltuvuustarkasteluna, eli haettiin parhaiten sopivaa teknistä ratkaisua jo tiedossa olevaan sovelluskohteeseen. Sovelluskohteessa sulautetulla ohjausjärjestelmällä ohjataan kappaleen työstöä metallisorvissa. Mittauspisteet sijaitsevat liikkuvassa koneen osassa, jolloin langallisen viestiyhteyden hyödyntäminen ei ole mahdollista. Kyseessä on sorvin automatisoidun ohjausjärjestelmän takaisinkytkennän RF-linkkipiirin (Radio Frequency) valinta. Eri mahdollisuuksien kartoitus aloitettiin protokollatarkastelulla. Tarkastelussa etsittiin langattomassa tiedonsiirrossa käytettäviä protokollia, jotka täyttävät tarvittavat tekniset spesifikaatiot. Rajaavista reunaehdoista oleellisin oli tiedonsiirtonopeus. Ollakseen vartenotettava vaihtoehto sovellukseen protokollan täytyi ehdottomasti täyttää siirtotielle asetettu kaistanleveysvaatimus. Tämän jälkeen tarkastelukriteereistä merkittävimpiä olivat toteutuksen yksinkertaisuus, häiriöidensietokyky, sähköinen yhteensopivuus, virheenkorjaus tai -havainnointi, hinta sekä saatavuus.

## 2 TEKNINEN MÄÄRITTELY

Kuvassa 1 on esitetty lohkokaaviokuva mittausjärjestelmästä, jonka osana RF-linkki toimii.



Kuva 1. Järjestelmän lohkokaavio.

Kuvasta 1 nähdään järjestelmän lohkokaavio, missä AE (Akustinen Emissio) tarkoittaa akustisenemission mittausta, ECC (Envelope Creator Circuit) verhoikäyräpiiriä, MIC (Mikrofoni) mikrofonia, sekä ACC (Acceleration) kiihtyvyyssmitta-anturia. Etsittävän RF-linkin täytyy soveltua kyseiseen järjestelmään.

Tekninen määrittely pitää sisällään reuna- tai vähimmäisehdot, jotka radiotekniikan tulee täyttää ollakseen käyttökelpoinen kyseisessä sovelluksessa. Työhön kuului kaksi karsintakierrosta. Ensimmäisellä kierroksella esitellään jokainen vaihtoehtoratkaisu lyhyesti, sekä suoritettiin karkea rajaava katselmus. Toiselle kierrokselle valitut tekniikat otettiin lähempään tarkasteluun, eli tekniikoiden spesifikaatiot täyttivät kaikki teknisen määrittelyn asettamat reunaehdot. Toisella kierroksella painotetaan ja tarkastellaan tekniikoita toteutettavuuden kannalta.

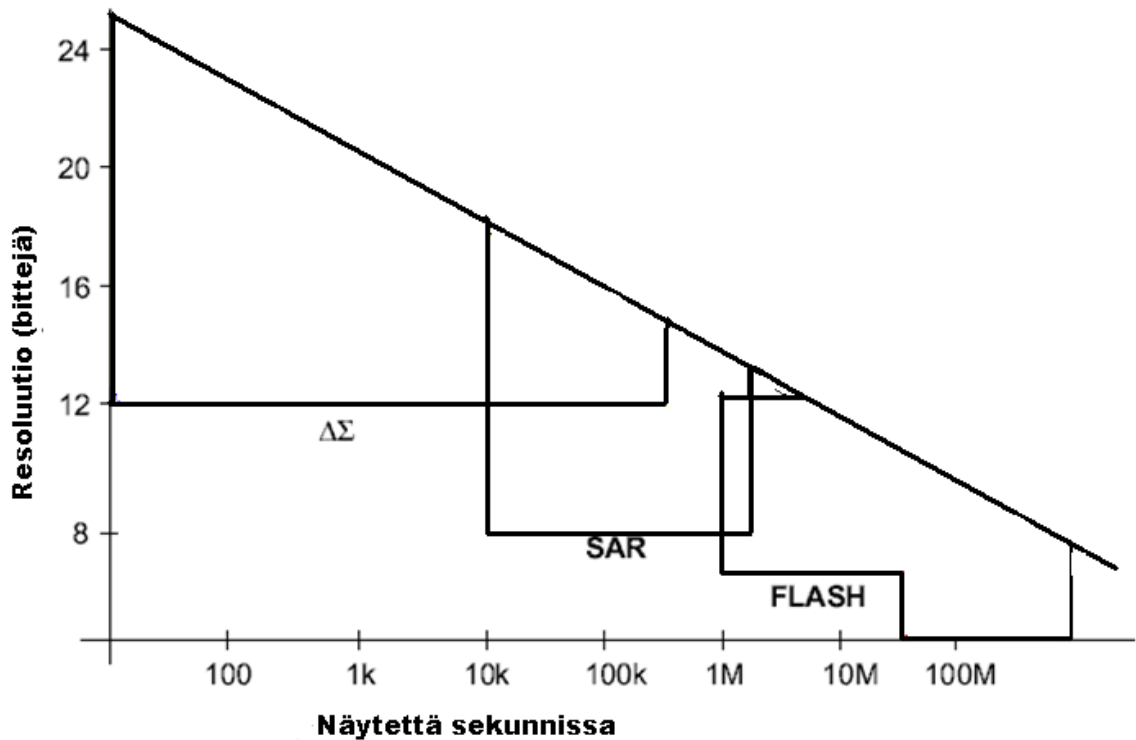
Tarkastelu rajattiin markkinoilta löytyviin valmiisiin radiopiirimoduuleihin, jotta toteutus olisi mahdollisimman suoraviivaista. Huomiota kiinnitetään moduuleiden saatavuuteen sekä niiden ohjelmitavuuteen. Työssä arvioidaan ohjelmointia helpottavia tekijöitä, kuten saatavilla olevia firmware-ohjelmia sekä ohjelmointiesimerkkejä.

Moduuleiden halutaan toimivan autonomisena lähetin-vastaanotin-parina, joihin voidaan ohjelmallisesti määrittää vasta-asema. Sovelluksessa on siis kyse point-to-point-linkistä. Radiopiiriin ei tarvitse soveltaa monimutkaisiin verkkotopologioihin. Vastaanotin voidaan liittää suoraan PC:hen (Personal Computer), mutta lähettimessä ei ole mahdollista hyödyntää PC:tä. Lisäksi lähetinyksikön on toimittava itsenäisenä orja-yksikkönä, jossa on jokin yleiskäyttöinen sovellettavissa oleva liityntärajapinta kuten USB (Universal Serial Bus), UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) tai SPI (Serial Peripheral Interface). Lähetinyksikön ohjelmallisen kapasiteetin rajallisuus on myös otettava huomioon, sillä lähetinyksikkö ei RF-moduulin lisäksi sisällä kuin mahdollisen mikrokontrolleripiiriin. Tästä johtuen esimerkiksi monimutkaisia ajuriohjelmia vaativia järjestelmäosia ei voida käyttää. Mikäli ajuriohjelmistoa tarvitaan, tekniikka oli hylättävä.

## 2.1 Kaistanleveys

Radiotekniikan tulee mahdollistaa vähintään 480 kb/s hyötydatan tiedonsiirtonopeus. Mikäli tarkasteltava tekniikka sisältää virheenkorjausta tai datan paketoitua, toimenpiteisiin tarvittavat bitit eivät sisälly 480 kb/s:n tiedonsiirtonopeuteen. Nämä pakettikehykseen lisättävät bitit siis kasvattavat siirtotielle asetettavaa kaistanleveysvaatimusta. Kuvassa 1 on esitetty järjestelmän lohkokkaavio, jonka osana radiolinkkiä käytetään. Kuvassa 2 on esitetty, eri A/D-muunnin tyyppien ominaisuuksia. Kuvasta 2 nähdään, että alle 1 MHz:n näytteistystaajuuksilla käytetyin A/D-muunnintyyppi on SAR (Successive Approximation Register). Näytteen valmistumisen jälkeen kuluu tekniikasta riippuen joitakin kellojaksoja, joiden aikana A/D-muunnin nollataan eli alustetaan. Tämän jälkeen voidaan aloittaa seuraavan näytteen otto. Jokaisen kellojakson aikana valmistuu yksi bitti A/D-muunnokseen. A/D-muuntimiin perehdytään syvemmin järjestelmäsuunnittelun yhteydessä.





Kuva 2 A/D-muunnintyyppien suorituskyvyt.[1]

Soveltaessa Nyquistin teoriaa: ”Näytteenottotaajuuden on oltava kaksinkertainen suurimpaan signaalin kaistanleveyteen nähden, tällöin signaali voidaan palauttaa muuttumattomana”. Voidaan määrittää näytteistystaajuus  $f_s$  yhtälön 1 mukaisesti.

$$f_s = 2 \cdot (f_{\max} - f_{\min}) \quad (1)$$

missä  $f_{\max}$  on näytteistettävän signaalin suurin taajuus, sekä  $f_{\min}$  näytteistettävän signaalin pienin taajuus. Kuvasta 1 nähdään järjestelmän leveäkaistaisimman signaalin tulevan ACC-anturilta. Signaalin analoginen kaistanleveys ACC-anturilta on 20 kHz. Näytteistystaajuus saadaan sijoittamalla ACC-anturin signaalin kaistanleveys yhtälöön 1. Saadaan

$$f_s = 2 \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ Hz} = 40 \text{ kHz}$$

Jaksonaika, jossa yksi näyte valmistuu, on näytteistystaajuuden käänteisluku. Yhtälön 2 mukaisesti.

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2)$$

Sijoittamalla näytteistystaajuus yhtälöön 2 saadaan

$$T_s = \frac{1}{40 \cdot 10^3} s = 2,5 \mu s$$

Täten A/D-muuntimelta valmistuu yksi näyte 25  $\mu s$ :n välein. Ideaalitapauksessa samanaikaisesti edellinen 12-bittinen A/D-muunnos lähetetään siirtotielle mahdollisten virheenkorjaus- ja pakettikehysbittien kanssa. Koska tietoliikenne langattomassa linkissä on sarjamuotoista, lähetetään bitit peräkkäin siirtotielle. Tällöin siirtotien kaistanleveyden tulee olla näytteiden määrä kerrottuna näytteen sisältämien bittien määrällä. Teoreettinen minimi tiedonsiirtonopeudelle siirrettäessä dataa sarjamuotoisena saadaan yhtälön kolme mukaisesti

$$BW = N \cdot b_N \quad (3)$$

missä  $N$  on näytteiden määrä aikayksikköä (näytteistystaajuus) kohden ja  $b_N$  bittien määrä yhdessä näytteessä. Minimikaistanleveydeksi siirtotielle saadaan yhtälön 3 mukaisesti

$$BW = 40000 \frac{1}{s} \cdot 12 b = 460 kb/s$$

On huomioitavaa että saatu arvo on minimi, joka teoriassa täyttää siirtotielle asetetut vaatimukset. Otettaessa huomioon sovelluskohteen ympäristö ja eri tekniikoihin sisältyvät virheenkorjausmenetelmät sekä pakettikehysrakenteet, siirtotieltä edellytetty kaistanleveys nousee.

Ideaalitilanne on saada valmistunut 12-bittinen A/D-muunnos siirrettyä radioteitse samanaikaisesti kun seuraavaa näytettä valmistetaan. Näin ollen minimitiedonsiirtonopeutena voidaan pitää 0,5 Mb/s.

## **2.2 Virheenkorjaus**

Kaistanleveys oli tärkeämpi kriteeri kuin lähetyksen virheettömyys. Virheellinen lähete haluttiin kuitenkin havaita, jotta varmistuttaisiin siitä, ettei virheellistä signaalia käytetä säätöreferenssinä. Esimerkiksi CRC-tarkistussumman (Cyclic Redundancy Check) käyttöä virheiden havainnointiin pidettiin hyvänä menettelynä. Mikäli paketti havaitaan CRC-tarkistussumman perusteella virheelliseksi, paketti hylätään.

## **2.3 Toimintaetäisyys**

Radioyhteyden täytyi mahdollistaa tarvittava tiedonsiirtonopeus välimatkan ollessa n. 1 m. Liian pitkän toimintaetäisyyden tiedetään voivan aiheuttaa häiriöitä samassa ympäristössä toimiviin muihin radioverkkoihin. Toimintaetäisyyteen voidaan vaikuttaa lähetystehoä säätämällä. Sovelluskohteesta johtuen radiosignaalin säteilyn ympäristöön oletettiin kuitenkin olevan suhteellisen vähäistä. Sillä RF-linkki on suurimmaksi osaksi metalliosien ympäröimä.

## **2.4 Tehonsyöttö**

Lähettimen teholähteenä käytetään paristoa tai akkua. Vastaanottimen tehonsyöttötapa ei ole niinkään kriittinen, koska on mahdollisuus ottaa käyttösähkö vaikka verkkolaitteesta. Radiopiirin tehonkulutuksen oletettiin olevan häviävän pientä verrattaessa oheispiirien tehonkulutukseen. Lähettimessä tehonkulutuksen minimoimiseksi tulee lähetysteho säätää pienimmälle tasolle, jolla radioyhteys pysyy vielä toimivana.

## **2.5 Toteutuksen yksinkertaisuus**

Etenkin prototyyppiä rakennettaessa järjestelmä koostuu useasta eri moduulista. Tällöin moduulien rajapintojen tulisi olla yksinkertaisia liittynältään. Toteutuksen yksinkertaistamiseksi on edullista, että radiopiirit voidaan liittää järjestelmään jollain yleiskäyttöisellä väyläarkkitehtuurilla. Ohjelmallisella puolella ylimääräisten toimintojen

pois jättäminen helpottaa perustoiminnan testausta, sekä mahdollisten muutosten tekemistä järjestelmään. Liityntäraajapintojen ollessa yksinkertaisia kehitysprojektia on helpompi kontrolloida. Moduuleista koostuvassa järjestelmässä moduulien liityntäraajapintojen yksinkertaisuus lisää järjestelmän toimintavarmuutta, tekniikka moduulien sisällä voi olla monimutkaistakin. RF-moduulien tapauksessa toiminnallisuuden määrittely tapahtuu asetusrekisterien ohjelmoinnilla, tällöin ohjelmoinnin tulisi olla mahdollisimman yksinkertaista. Vähän toiminnallisuutta sisältävä radiopiiri on yleisesti ajateltuna halvempi, kuin monimutkainen. Turhat toiminnot voivat hidastaa järjestelmän toimintaa. Kyseisessä sovelluksessa ylimääräisiä toimintoja ovat esimerkiksi paketin vastaanoton kuittaus, sekä virheellisen paketin uudelleenlähetys. Järjestelmä tulisi toteuttaa siten, että radiopiirin valmistajan toimittamaa standardiohjelmaa voidaan käyttää suoraan tai mahdollisimman vähän muunneltuna.

## **2.7 Hinta ja saatavuus**

Työssä arvioidaan myös eri RF-moduulien saatavuutta, eli kuinka paljon eri toimittajia tuotteelle markkinoilta löytyy. Toiselle tarkastelukierrokselle päässeiden tuotteiden valmistajien kanssa käytiin myös keskusteluja sähköpostin välityksellä ennen lopullisen valinnan tekemistä.

### 3 KESKEISIÄ TEKNISIÄ MÄÄRITELMÄ

Kappaleessa esitellään pintapuolisesti muutamia keskeisimpiä tekniikkatarkastelussa esille tulevia teknisiä käsitteitä, sekä määritteiden käyttökohteita.

#### 3.1 CRC-tarkistussumma

Binäärimuotoinen data muutetaan lähettimen mikrokontrollerissa polynomimuotoon. Tämä polynomimuoto jaetaan toisella ennalta määrätyllä polynomilla, jota kutsutaan avaimeksi. Jakolaskusta saatu osamäärä on CRC-viesti. Pakettikehyksessä lähetetään binäärimuodossa olevat hyötydata sekä CRC-viesti. Vastaanottopäässä suoritetaan vastaavanlainen toimenpideketju. Vastaanotettu polynomimuotoon muutettu hyötydata jaetaan samalla ennalta määrätyllä polynomimuotoisella CRC-avaimella ja saatua osamäärää verrataan CRC-viestiin. Mikäli saatu osamäärä eroaa vastaanotetusta CRC-viestistä, on CRC-tarkistussummalla suojatun datan sisältö muuttunut. Useasti tiedonsiirtoprotokollat mahdollistavat virheellisen paketin uudelleenlähetyksen. Siirtotien kaistanleveyden ollessa juuri ja juuri riittävä hyötydatan yhdensuuntaiseen siirtoon, joudutaan pakettien uudelleenlähetyksestä tinkimään. Mikäli paketin mukana tullut CRC-viesti täsmää vastaanotimessa lasketun CRC-tarkistussumman kanssa, voidaan olettaa viestipaketin säilyneen sisällöltään muuttumattomana. Mitä pidempää CRC-avainta sovelletaan, sitä luotettavampi tarkistus on. On huomioitava, että CRC-viestin pituuden kasvattaminen lisää siirtotien kaistanleveysvaatimusta. [2]

#### 3.2 Suorasekvenssikanavointi

Suorasekvenssihajaspektritekniikka, DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) on taajuushyppelykanavoinin, FHSS:n (Frequency Hopping Spread Spectrum), lisäksi toinen koodijakokanavointi CDMA:a (Code Division Multiple Access ) toteutettaessa käytössä olevista tekniikoista. Tekniikassa satunnaislukugeneraattorin tuottama suurinopeuksinen kohinaan verrattavissa oleva bittivirta moduloidaan pieninopeuksisella digitaalisesti moduloidulla informaatio-signaalilla eli viestillä. Kohinaa muistuttavan suurinopeuksisen bittivirran sekvenssi on lähettimen ja vastaanottimen tiedossa, täten vastaanotin erottaa signaalin kohinasta. Tekniikan ansiosta signaalit voidaan tulkita oikein jopa signaali-kohinasuhteella -35 dB [4]. Tekniikka mahdollistaa usean laitteen toiminnan samalla taajuuskaistalla ilman yhteyden laadun merkittävää heikentymistä. [3][4]

### 3.3 EDR ja FCS-tarkistussumma

Muuttuva tiedonsiirtonopeus, EDR (Enhanced Data Rate). Bluetooth v2. hyödyntää kyseistä ominaisuutta nopeuttamaan tiedonsiirtoa. Järjestelmä muuttaa modulaatiotapaa dynaamisesti kesken pakettikehyksen lähetyksen, jolloin hyötybitit siirretään suuremmalla nopeudella siten, että esimerkiksi 8DQPSK:a (8 Differential Quadrature Phase Shift Keying) käytettäessä yhdellä symbolilla saadaan esitettyä kolme bittiä.[5] FCS-tarkistussumma (Frame Check Sequence) on niin ikään Bluetooth:ssa käytetty ominaisuus. FCS-tarkistussumma on CRC-tarkistussumman variaatio, jossa CRC-tekniikalla ei suojata pelkästään hyötydatan paikkansapitävyyttä, vaan koko pakettikehys sisältyy suojauksen piiriin. [6]

### 3.5 Taajuushyppelykanavointi

Taajuushyppely on kanavointitekniikka, joka käyttää kapeakaistasta kantoaaltoa. FHSS:ssa kantoaallon taajuutta vaihdetaan siten, että vain lähetin ja vastaanotin tietävät millä taajuudella seuraava lähetyksjakso tapahtuu. Hyppelykaava on siis vain lähettäjän ja vastaanottajan tiedossa. Tarkoin synkronoituna tiedonsiirtokanava näkyy yhtäjaksoisena lähettimen ja vastaanottimen välillä. Laitteelle, joka ei osallistu tiedonsiirtoon FHSS näkyy vain lyhyenä häiriöpulssina. Kanavien määrä vaihtelee toteutustekniikasta riippuen, ja esimerkiksi Bluetooth käyttää 79 kanavaa ja nRF24L01 126 kanavaa. [7]

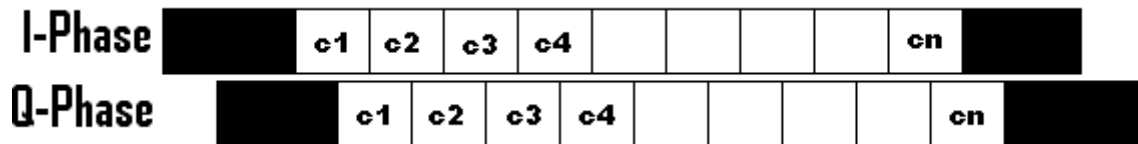
### 3.6 GFSK

GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) on parannettu versio FSK-moduloinnista. Hyötysignaali viedään gaussin-suotimen läpi ennen modulointia, tällöin signaalin siirtoon tarvittava kaistanleveys pienenee.[8]

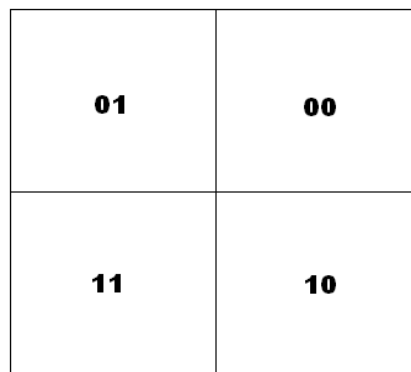
### 3.7 OQPSK

OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) on erikoisversio QPSK:sta (Quadrature Phase Shift Keying). OQPSK:ssa lähetettyä signaalia ei ole amplitudimoduloitu. Amplitudimodulaation seurauksena ilmeni 180° vaihesiirtoja. OQPSK:ssa lähetettävä signaali on jaettu modulaattorissa kahteen komponenttiin I (In phase) ja Q (Quadrature), jotka lähetetään puoli jaksonaikaa limittäin. Vaihekomponenttien limitys on esitetty kuvassa 3. Limittämisen johdosta päästään eroon origon leikkaamiselta, täten ei esiinny myöskään 180° vaihesiirtoja. Koska I- ja Q-komponentit ilmenevät eri aikaan saavutetaan

aina  $90^\circ$  vaihesiirto kerrallaan.[9],[10] OQPSK:ssa aivan kuten QPSK:ssa yhdellä symbolilla voidaan esittää kaksi bittiä. OQPSK:n konstellatiodiagrammi on esitetty kuvassa 4.



Kuva 3 OQPSK In phase ja Quadrature komponenttien limittäminen.



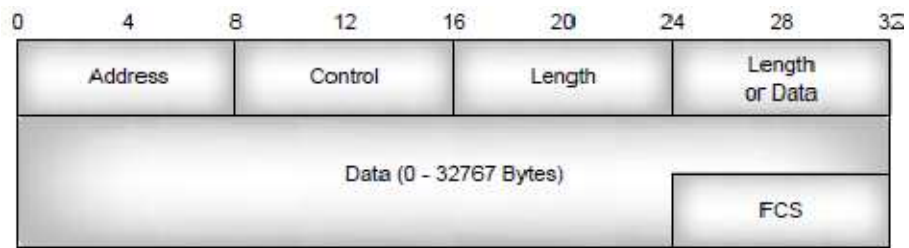
Kuva 4. OQPSK:n konstellatiodiagrammi [11]

### 3.8 RFcomm

Bluetooth-pino sisältää käyttömoodin, jossa Bluetooth-laite toimii laiterajapintana, joka näyttää ulkoapäin katsottuna sarjaliikenneväylältä. Todellisuudessa sarjaliikenneväylä on korvattu RF-linkillä. RFcomm-moodin käyttö karsii pois ylempien tasojen toimintoja Bluetooth-pinosta samalla yksinkertaistaen lähetettävää pakettikehysrakennetta sekä laitteiston ohjelmallista toimintaa. Alempien kerrosten tarjoamat ominaisuudet ovat edelleen hyödynnettävissä, eikä esimerkiksi RFcomm-moodin käyttö estä EDR:n käyttöä Bluetooth:n v2:ssa. RFcomm-moodin pakettirakenne on ETSI standardin TS 07.10 mukainen, joskin joitakin ominaisuuksia on karsittu. RFcomm-moodissa pakettiin voidaan sisällyttää maksimissaan 32767 hyötydatatavua. On huomioitava, ettei paketin sisältöä vastaanottopäässä pystytä tulkitsemaan tai tarkistamaan ennen kuin FCS-viesti on

saapunut. Täten vastaanotetun paketin sisältöäkään ei päästä hyödyntämään aikaisemmin.

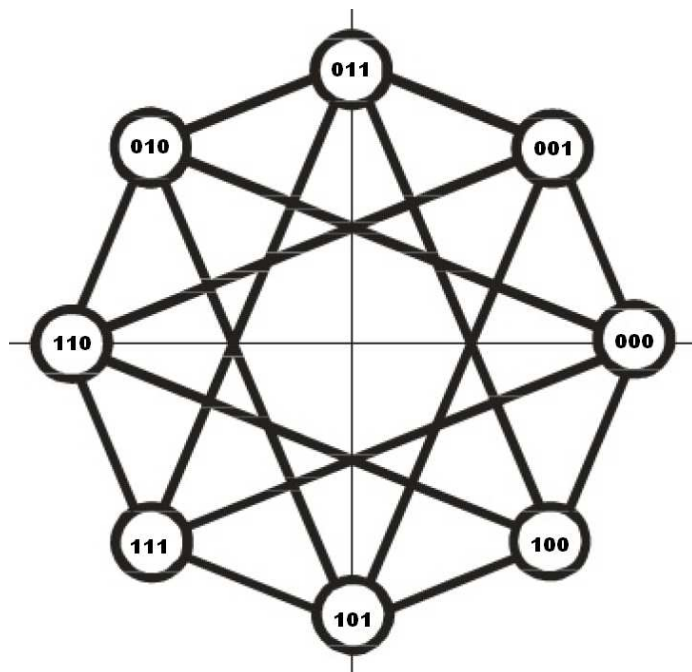
[14] Kuvassa 5 on esitetty RFcomm-moodin pakettirakenne.



Kuva 5. RFcomm-moodissa käytetty ETSI standardin TS 07.10 mukainen pakettikehysrakente.[12]

### 3.9 8DQPSK

8DQPSK (8 Differential Quadrature Phase Shift Keying) on digitaalinen modulointimenetelmä, jonka konstellatiopisteet ovat  $45^\circ$  välein. Tällöin  $360^\circ$  sisältää mahdollisia pisteitä kahdeksan kappaletta. Käytettäessä 8DQPSK-modulaatiota voidaan yhdellä symbolilla esittää kolme bittiä.[15] Kuvassa 6 on esitetty 8DQPSK:n konstellatiodiagrammi.



Kuva 6. 8DQPSK konstellatio diagrammi.[5]



Kuvasta 6 nähdään 8DQPSK:n konstaatiodiagrammin koostuvan kahdesta  $45^\circ$  limittäin olevasta QPSK-diagrammista.

## **4 TARKASTELTAVAT LIIKENNEPROTOKOLLAT**

Kappaleessa käydään läpi kaikki kartoitukseen mukaan otetut protokollat. Protokollan suorituskyvyn tulee täyttää sille asetetut reunaehdot ollakseen hyödynnettävissä sovelluskohteessa. Protokollatarkastelussa käydään läpi eri standardien keskeisiä suorituskykyparametrejä. Esittelyn lopuksi todetaan tekniikkakohtaisesti edellä läpikäytyjen teknisten spesifikaatioiden pohjalta, onko tekniikka käyttökelpoinen sovelluskohteessa. Seuraavaksi esitellään jokaisen tekniikan perusominaisuudet. Lopuksi taulukkoon on koottu tekniikoiden keskeisiä ominaisuuksia. Koonti esitetään taulukossa 1.

### **4.1 ZigBee (802.15.4 )**

Zigbee on helppokäyttöinen anturiverkkojen langaton tiedonsiirtopiiritekniikka. Zigbee:stä on markkinoilla valmiita moduuleja, joissa on UART- tai SPI-väyläliityntä ulkoista mikrokontrolleria tai vastaavaa varten. Zigbee on suunniteltu pienten datapakettien lähettämiseen. Zigbee:n ohjelmointi on yksinkertaista ja valmiita lähdekoodeja sekä ohjelmointiesimerkkejä sisältäviä kehityskittejä löytyy runsaasti. Maksimi lähtöteho on +10 dBm, joka esteettömässä ympäristössä riittäisi mahdollistamaan useiden satojen metrien tiedonsiirtoetäisyyden. Zigbee toimii myös joidenkin esteiden, kuten seinien läpi. Zigbee käyttää DSSS-tekniikkaa kanavointitekniikkana. Hyötysignaali moduloidaan OQPSK-tekniikalla toimittaessa 2,4 GHz:n ISM taajuuskaistalla. OQPSK-tekniikalla päästään 2,4 GHz:n taajuusalueella n. 250 kb/s nimelliseen fyysisen tason tiedonsiirtonopeuteen. Hyötydatan siirtonopeus on parhaimmassakin tapauksessa vain puolet fyysisen tason siirtonopeudesta. Täten tekniikkaa ei sovellu käyttökohteeseen. ZigBee ei ole yhteensopiva aikaisempien standardisukupolvien kanssa. Vanhassa standardissa huomattiin suuria puutteita laitteiden osoitejaottelun kohdalla. Uusimman vuonna 2007 laaditun standardin mukaan laitteiden osoitepuun ei tarvitse enää olla symmetrinen. Täten tekniikalla on mahdollista toteuttaa käytännötasolla verkkorakenteita, jotka voivat sisältää kymmeniä tuhansia laitteita. [10],[16],[17],[18]

### **4.2 Standardoimattomat radiopiirit**

Standardoimattomilla radiopiireillä tarkoitetaan piirejä, joiden yhteensopivuus on rajoittunut mahdollisesti jopa laitevalmistajatasolle. Toisin sanoen piiri ja käytetty

tekniikka on yhteensopiva vain saman valmistajan piirien kanssa. Tässä työssä tutkittiin Nordic Semiconductorin valmistamaa nRF24L01-lähetinvastaanotinpiiriä ja sen soveltuvuutta järjestelmään. Piiri valittiin muiden standardoimattomien radiopiirien joukosta, koska piirillä on useamman internet-tietolähteen mukaan toteutettu useita tiedonsiirtojärjestelmiä onnistuneesti. Alustavan tarkastelun pohjalta voidaan todeta siirtotien kaistanleveyden olevan riittävä. Piiri on toteutettu 3.3 V CMOS-tekniikalla, lisäksi piiri on yhteensopiva muiden Nordic Semiconductorin valmistamien RF-piirien kanssa. Huonona puolena on standardin puutteesta johtuva valmistajien pieni määrä. Prototyypitasolla asian katsottiin olevan merkityksetön, joten piiri otettiin mukaan jatkotarkasteluun.

#### 4.3 Bluetooth 1.0v & 1.2v (802.15.1 )

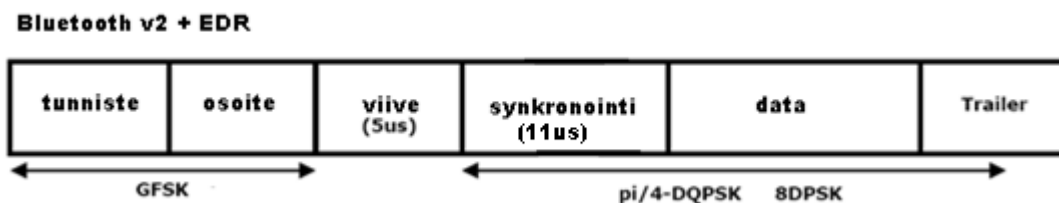
Bluetooth:ssa yleinen antenniin syötetty nimellisteho on 3 dBm, eli 2 mW. RF-linkki toimii 2,4 GHz:n ISM-taajuuskaistalla. Bluetooth käyttää taajuushyppelytekniikkaa kanavointitekniikkana (Frequency Hopping Spread Spectrum). Bluetooth käyttää 79 kanavaa. Kunkin kanavan kaistanleveys on 1 MHz. Ensimmäinen kanava alkaa taajuudelta 2,402 GHz ja 79 kanava päättyy taajuudelle 2,48 GHz. Toisin sanoen Bluetooth käyttää 79-kanavaa tiedonsiirtoon. Modulaatiotekniikkana käytetään GFSK-tekniikkaa. Bluetooth v1. päästään n. 723 kb/s:n fyysisentason tiedonsiirtonopeuteen. Nimellinen toimintamatka on 0,1 m:stä 10 m:iin. Kantomatkaa voidaan kasvattaa lisäämällä lähetystehoa. Standardin sallima lähetysteho voi olla enintään 20 dBm. Bluetooth:n v1.0- ja v1.2-versioiden tiedonsiirtonopeuden katsottiin olevan liian pieni ollakseen hyödynnettävissä sovelluksessa. Kuvasta 7 nähdään Bluetooth v1.0 ja v1.2 käyttämä pakettikehysrakenne. [16],[19]

<b>tunniste</b> 68/72b	<b>osoite</b> 54b	<b>data</b> 0-2745b
---------------------------	----------------------	------------------------

Kuva 7 . Bluetooth v1.0 ja v1.2 käyttämä pakettikehysrakenne.[20]

#### 4.4 Bluetooth v2.0 ja v2.1 EDR ( 802.14.3)

Bluetooth v2.x versiot, joissa fyysisen kerroksen tiedonsiirtonopeus on maksimissaan 3 Mb/s. Datapaketit lähetetään käyttäen kahta eri modulaatiotekniikkaa. Datapaketin määrittelyosa lähetetään käyttäen GFSK-modulointia, ja hyötydataosa 8DQPSK-vaihesiirtomodulointitekniikalla. 8DQPSK-vaihesiirtomodulaation käytöllä saadaan esitettyä aina kolme bittiä per symboli. On huomioitavaa, että nimellinen fyysisen tason maksimisiirtonopeus 3 Mb/s saavutetaan hetkellisesti siirrettäessä pakettirakenteen hyötydataosiota. Hyötydataosan mitta pakettikehyksessä on 32767 tavua. Etu Bluetooth v1. verrattuna tulee nimenomaan dataosan siirtonopeudessa. Pienillä hyötydata määrillä Bluetooth v1 on siirtonopeudeltaan parempi, sillä Bluetooth v1:n pakettikehys rakenne ei sisällä läheskään niin paljon paketin ohjaustavuja kuin Bluetooth v2. Lisäksi Bluetooth v1:ssä ei ole modulaatiotavan vaihdon tarvitsemaa synkronointi osaa, joka Bluetooth v2:sa osaltaan laskee keskimääräistä siirtonopeutta. Tekniikan soveltuvuus käyttökohteeseen todettiin hyväksi, koska viihde-elektronikassa Bluetooth:n 2-versiota on sovellettu onnistuneesti langattomissa audiosovelluksissa. Vaikkei sovelluskohteessamme siirretäkään ääntä, ovat siirtotieltä ja laitteistolta edellytetyt ominaisuudet hyvin samankaltaisia. Sovelluskohteessa lähetystehon tarvitsee olla maksimissaan 1 mW, joka on standardin puitteissa nostettavissa aina 20 dBm, eli 100 mW tehoon asti. Markkinoilla olevista moduulivaihtoehdoista on siis valittava versio, jonka lähetystehon saa asetettua riittävän alhaiseksi. Bluetooth v2.1 EDR valittiin toteutusläheiseen tarkasteluun. Kuvasta 8 nähdään Bluetooth v2:ssa sovellettu pakettikehysrakenne, sekä modulaatiotyypit eri paketin osioille.



Kuva 8 . Bluetooth v2. pakettikehysrakenne.[20]

#### **4.5 WUSB UWB (IEEE 802.15.3)**

WUSB-tekniikka (Wireless Universal Serial Bus) on kehitetty UWB-standardiin (Ultra Wide Band) pohjautuen. WUSB soveltaa UWB- standardissa määriteltyjä fyysistä- sekä MAC-kerrosta (Media Access Control). WUSB mahdollistaa fyysisen tason tiedonsiirtonopeudet aina 480 Mb/s asti. WUSB toimii taajuusalueella 3.1 GHz – 10 GHz. Modulaatiotekniikka on QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) ja kanavointi on toteutettu MB-OFDM-tekniikalla (Multi Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing). WUSB:n piirissä toimii kaksi eri leiriä, jotka kilpailevat teknologian standardisoinnista. WiMedia:n certifioidun langallisen USB-standardin USB-IF:n (USB Implementers Forum) rinnalle on julkaistu sertifioitu ”tuotestandardi” nimeltä CWUSB (Certificated Wireless USB), joka on yhteensopiva USB-IF:n kanssa. CWUSB toimii kuten normaalit langalliset USB-laitteet. CWUSB:hen voidaan liittää myös normaali langallinen USB-laite. WUSB:n suorituskyky täyttää vaatimukset, ja näin ollen WUSB valittiin toiselle tarkastelukierrokselle.[21],[22]

#### **4.6 WLAN, WiFi (IEEE 802.11)**

WLAN-tekniikka tarjoaa fyysisen tason tiedonsiirtonopeuksia 1 Mb/s ylöspäin. Standardiversiosta riippuen suurimmillaan saavutetaan 54 Mb/s fyysisen tason siirtonopeus. IEEE 802.11-standardissa on määritelty kolme erityyppistä fyysistä kerrosta. Suorasekvenssikanavointi (Direct Sequence Spread Spectrum), taajuushyppelykanavointi (Frequency Hopping Spread Spectrum), sekä infrapuna, IR (Infra Red). Käytännössä DSSS mahdollistaa tiedonsiirtonopeudet aina 2 Mb/s asti. 802.11b-standardi säilyttää yhteensopivuuden DSSS-tekniikan kanssa mahdollistaen lisäksi 5.5 Mb/s ja 11 Mb/s fyysisen tason tiedonsiirtonopeudet 802.11b-standardin laitteiden välillä. Toiminta tapahtuu 2,4 GHz:n ISM-taajuuskaistalla. 802.11b tukee tiedonsiirtonopeuksia 1,2,5.5 ja 11 Mb/s. 802.11a-standardi määrittelee täysin erityyppisen fyysisen kerroksen, joka soveltaa OFDM-tekniikkaa kanavointitekniikkana. 802.11a mahdollistaa fyysisen tason siirtonopeudet 6 – 54 Mb/s. 802.11b-standardi on edelleen käytetyin standardityyppi, vaikka siirtonopeudet ovat kasvaneet. 802.11b käyttää edelleen alkuperäistä 802.11 MAC-protokollaa. WLAN-laitteita käytetään runsaasti myös teollisuusympäristössä. Tästä johtuen WLAN:in hyödyntämistä sovelluskohteessa pidettiin huonona ideana, niin

tekniikan kompleksisuuden kannalta, kuin myös mahdollisten sähkömagneettisten yhteensopivuusongelmien takia. [23][24]

#### **4.7 WIRELESS Profibus (802.11)**

Wireless Profibus DP on tarkoitettu point-to-point tai point-to-multipoint verkkoihin. Wireless Profibus tarjoaa siirtonopeuksia aina 12 Mb/s asti. On huomioitavaa, että Wireless Profibus on PHY- (fyysinen) ja MAC-kerrokseltaan ”WLAN-standardin” mukaisia, eli PHY- ja MAC-kerros ovat 802.11-standardiin pohjautuvia. Tästä johtuen Profibus DP:tä ei voida käyttää sovelluskohteessa.[16]

#### **4.8 IrDA**

IrDA:ssa (Infrared Data Association) on optinen tiedonsiirtotekniikka. Siirtonopeudet vaihtelevat 1 kb/s:stä 16 Mb/s:n siirtonopeuteen. Etuna tavanomaisiin ISM-taajuusalueella toimiviin radiotekniikoihin nähden on käytetty taajuuskaista, missä ei ole muita langattomia verkkoja. Teollisuusympäristöstä löytyvät häiriölähteet tuottavat verraten vähän IR-taajuuksien häiriöitä. Lisäksi Toimintasäteen ollessa sovelluskohteen nimellisvälimatka, häiriintyminen toisista samassa ympäristössä toimivista radiojärjestelmistä on epätodennäköistä. IR-lähettimien ja -vastaanottimien optiikan suuntaavuus on myös merkittävän hyvä, toiminta kulma on noin 30°, eli 15° keilan keskeltä puolelleen. IrDA-linkki edellyttää näköyhteyttä lähettimen ja vastaanottimen välillä. Tämä on ehdottomasti sovelluskohdetta ajatellen tekniikan huono puoli. Mikäli siirtotie saadaan suljetuksi siten, ettei siirtotielle tule näköesteitä, tekniikka on varteenotettava vaihtoehto. IR-linkkejä löytyy kolmea eri kategoriaa, SIR (Serial Infra Red), MIR (Medium Infra Red) ja FIR (Fast Infra Red), joista MIR (0,576 Mb/s ja 1,152 Mb/s) ja FIR (4 Mb/s) soveltuvat käyttökohteeseen kaistanleveydeltään. Mikäli lähettimen ja vastaanottimen välimatka ei ole vakio, voivat suuret välimatkan muutokset vaikeuttaa tekniikan sovellettavuutta. Vastaanotin voi ylioijautua liian voimakkaasta signaalista, tämä tapahtuu yleensä välimatkan lyhentyessä nimellistä toimintaetäisyyttä pienemmäksi. Jonkin verran asiaa helpottaa se, että markkinoilla on eri etäisyysalueille suunniteltuja lähetin vastaanotinpiirejä. IrDA toimii half-duplex-moodissa, sovelluskohteesta johtuen langattoman yhteyden tarvitsee olla ainoastaan yksi suuntainen. Tulevaisuudessa VFIR (16

Mb/s) (Very Fast Infra Red) markkinoilta löytyvä esimerkki lähetinvastaanotinpiiri TFDU8108 mahdollistaa jopa 16 Mb/s tiedonsiirtonopeuden. Modulaatiotapana toimii perustaajuisen signaalin modulointi ja modulointitekniikkoina ASK, PSK, sekä QAM. Muuttuva toimintaympäristö huomioiden IrDA-tekniikalla ei saavuteta riittävää tiedonsiirtovarmuutta, lisäksi näköyhteyden säilyttämisen lähettimen ja vastaanottimen välillä oletettiin olevan vaikeaa. Kotelointikysymysten arveltiin myös vaikeuttavan tekniikan sovellettavuutta.[25],[26]

#### **4.9 Wireless HART**

HART 7 käyttää IEEE 802.15.4-standardissa määriteltyä fyysistä kerrosta. Standardin mukainen modulaatiotekniikka on OQPSK. Eroavaisuutena esim. Zigbee:hen on aikasykronointiin perustuva MAC-kerrostekniikka. Kanavointitekniikkana käytetään TDMA-tekniikkaa. Jako on asetettu 10 ms:n kiinteisiin aikaikkunoihin taajuusalueella 2,400 - 2,4845 GHz. Wireless HART soveltuu mesh-, star-, sekä cluster-verkkotopologioihin. Koska fyysisellä tasolla sovelletaan 802.15.4-standardia, on fyysinen taso siirtonopeus standardissa määritelty 250 kb/s. Täten Wireless HART ei sovellu radiotekniikkansa puolesta käyttökohteeseen.[27],[28]

Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto tarkastelluista tekniikoista.

Taulukko 1. RF-tekniikkavertailu

<b>Tekniikka</b>	<b>Bluetooth v 1 (802.15.1)</b>	<b>Bluetooth 2.0 + EDR</b>	<b>W-USB v2.0 (802.15.3a)</b>
<b>Taajuuskaista(t)</b>	<b>2,4 GHz ISM</b>	<b>2,4 GHz ISM</b>	<b>3.1 GHz – 10.6 GHz</b>
<b>Siirtonopeus</b>	<b>721 kb/s</b>	<b>Max. 3 Mb/s</b>	<b>480 Mb/s (3 m),</b>
<b>Modulaatio</b>	<b>GFSK</b>	<b>GFSK, 4DQPSK, 8DQPSK</b>	<b>QPSK</b>
<b>Kantama</b>	<b>&lt; 100 m</b>	<b>&lt; 100 m</b>	<b>n. 10 m</b>
<b>Lähetysteho</b>	<b>+20 dBm, +4 dBm, 0 dBm</b>	<b>+20 dBm, +4 dBm, 0 dBm</b>	<b>+20 dBm</b>
<b>Saatavuus</b>	<b>moduuli</b>	<b>moduuli</b>	<b>Erillispiireinä, ei moduleja</b>
<b>Kanavointitekniikka</b>	<b>FHSS</b>	<b>FHSS</b>	<b>MB-OFDM</b>
<b>Tekniikka</b>	<b>Wireless Profibus DP (802.11)</b>	<b>IEEE802.11x Wi-Fi, WLAN</b>	<b>IEEE 802.15.4-2003 (ZigBee)</b>
<b>Taajuuskaista(t)</b>	<b>900 MHz</b>	<b>2,4 GHz / 5 GHz</b>	<b>2,4 GHz ISM</b>
<b>Siirtonopeus</b>	<b>12 Mb/s</b>	<b>Min. 1 Mb/s, Max. 54 Mb/s</b>	<b>250 kb/s</b>
<b>Modulaatio</b>		<b>DBPSK, DQPSK, CCK</b>	<b>BPSK, OQPSK</b>
<b>Kantama</b>	<b>Vrt. WLAN</b>	<b>60 m, 1 Mb/s</b>	<b>&lt; 100 m</b>
<b>Lähetysteho</b>		<b>23 dBm</b>	<b>+10 dBm</b>
<b>Saatavuus</b>	<b>moduuli</b>	<b>moduuli</b>	<b>moduuli</b>
<b>Kanavointitekniikka</b>		<b>DSSS, OFDM</b>	<b>DSSS</b>
<b>Tekniikka</b>	<b>IrDA</b>	<b>HART 7, Wireless HART</b>	<b>nRF24L01</b>
<b>Taajuuskaista(t)</b>	<b>343 THz (875 nm)</b>	<b>2,4 GHz</b>	<b>2,4 GHz</b>
<b>Siirtonopeus</b>	<b>min. 2.4 kb/s max. 16 Mb/s</b>	<b>250 kb/s</b>	<b>2 Mb/s</b>
<b>Modulaatio</b>		<b>OQPSK</b>	<b>GFSK</b>
<b>Kantama</b>	<b>joitakin metrejä</b>	<b>100 m</b>	
<b>Lähetysteho</b>		<b>+10 dBm</b>	<b>+4 dBm</b>
<b>Saatavuus</b>		<b>moduuli</b>	<b>moduuli</b>
<b>Kanavointitekniikka</b>		<b>TDMA 10 ms</b>	<b>FHSS</b>

**lähteet**

[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21],[22],[23][24][25],[26],[27],[28],[29],[30],[31],[32],[33],[34]



## **5 KÄYTÄNNÖNLÄHEINEN SOVELTUVUUSTARKASTELU**

Tässä osiossa tarkastellaan ja eritellään protokollaltaan soveltuvaksi havaittuja radiotekniikoita syvällisemmin. Tarkastelussa tutkitaan suorituskyvyltään riittäviä piirejä tekniikan toteutuksen helppouden kannalta, eli keskitytään käytännönläheisiin kysymyksiin. Tulosten pohjalta valitaan tekniikka, jolla RF-linkki toteutetaan.

### **5.1 Ohjelmitavuus**

Koska kyseessä on ohjelmallisen osan sisältävä sulautettujärjestelmä, radiopiirin ohjauksen ja ohjelmitavuuden yksinkertaisuutta pidettiin tärkeänä kriteerinä. Valmiissa moduulirakenteessa, kuten myös yksittäisessä piirirakenteessa toiminnallisuuden määrittely aina fyysistä tasoa myöten tapahtuu ohjelmallisesti. Tarkasteluun valittiin kolme tekniikkaa: Bluetooth v2.0, WUSB ja standardoimaton radiomodulipiiri, Nordic Semiconductorin valmistama nRF24L01.

### **5.2 Bluetooth 2.1 +EDR**

Tarkastellaan Bluetooth v2.1:stä, jota halutaan käyttää RFcomm-moodissa. Tarkastellaan markkinoilta löytyvää Bluegiga Oy:n WT32-moduulia. Bluegiga Oy:n teknisen tuen mukaan RFcomm-moodissa standardi-firmwarella ylletäisiin 500 - 550 kb/s:n hyötydatan siirtonopeuteen, mikä sinänsä vastaisi teoreettisella tasolla sovelluksen vaatimuksia, tähän väitteeseen kuitenkin suhtauduttiin varauksellisesti. Sillä WT32-moduulin datalehdessä kerrotaan moduulin yltävän 350 kb/s:n siirtonopeuteen. Datalehdessä ei ole esitetty yhtälöä, josta voitaisiin laskea pakettikehyksen lähetysyykliin kuluva aika. RFcomm-moodissa toimittaessa tarvitaan ulkoinen A/D-muunnin, sekä ulkoinen mikrokontrolleri RF-moduulin ohjaukseen. Bluegiga Oy:n yhteyshenkilön mukaan käytettäessä Bluetooth-moduulia HCI-moodissa (Hardware Control Interface) kaistanleveys nousee 2.1 Mb/s:iin asti. HCI-moodin käyttö vaatii ulkoisen prosessorin, sekä paljon ohjelmointia. Tämä menettely on vastoin pyrkimystä suoraviivaiseen toteutustapaan. Valmistajan kanssa käytiin sähköposti keskusteluja tuotteen soveltuvuudesta sovelluskohteeseen. WT32 tukee Bluetooth v2.1+EDR standardia, joka soveltuu hyvin audiojärjestelmiin. WT32 voidaan konfiguroida toimimaan ja näyttämään ulkoiselta USB-laitteelta. Tämä liityntä mahdollisuus olisi hyödynnettävissä vastaanotinpäässä, jolloin liityntä PC:lle olisi helppo

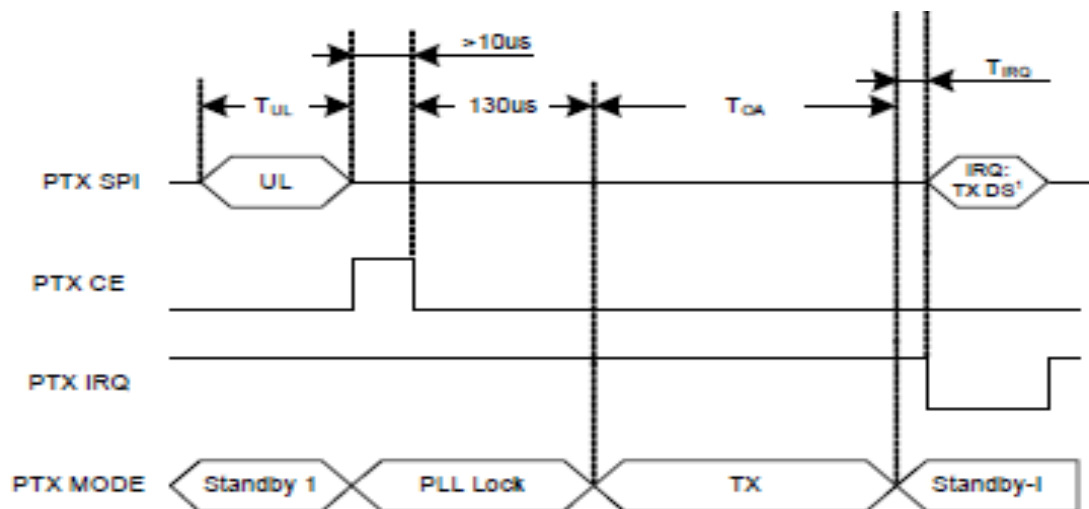
toteuttaa USB-väylällä. Free2move-yhtiö tarjoaa niin ikään omia Bluetooth-moduulejaan markkinoille. Perus laitemääritykset ovat samat Bluegiga Oy:n moduulien kanssa. Sivuilta löytyy kuitenkin paljon tietoa RFcomm:n (wireless UART) käyttöön ja käyttöönottoon liittyen [29]. Sivuilta voi myös ladata valmiinohjelmiston, jolla Bluetooth-moduuli saadaan ohjelmoitua RFcomm-moodiin. Free2move:n valmistama F2M03ALA-moduulin datalehti kertoo RFcomm-moodin siirtonopeuden jäävän 1 Mb/s:n fyysisentason siirtonopeudella Throughput-moodissa 234,4 kb/s:in, kun siirtosuuntana on orjalaitteelta isäntälaitteelle.[30] Free2move AB:sta kerrotaan RFcomm-moodissa hyötydatan siirtonopeuden olevan Max. 380 kb/s [31], tällöin käytössä on EDR-ominaisuus. Kuten Bluegiga, myös Free2move tarjoaa omille moduuleilleen kehitysalustaa. Datasoft AB myy F2M03ALA-moduulia hintaan 21.60 €. Ohjelmointilauta maksaa 245 € sekä Dual kit 465 €. [32]

Kuvasta 8 nähdään EDR-ominaisuuden nopeuttavan paketin hyötydataosion siirtoa. Täten pakettien siirto nopeutuu vasta, kun hyötydataosiossa on riittävästi tavuja. [33] Sovelluksessa voidaan käyttää puskurointia, eli kerätään aina useamman näytteen sarja, joka lähetetään aina samassa kehyksessä. Tällöin hyötydatan suhteellinen osuus pakettikehyksessä kasvaa ja sitä mukaa kasvaa hyötydatan siirtonopeus. RFcomm-moodissa pakettikehys käsittää osoitekentän, jonka pituus on kahdeksan bittiä, osoitekenttää seuraa kahdeksan-bittinen paketin ohjauskenttä. Hyötydatan pituus määritellään niin ikään kahdeksalla bitillä. RFcomm-moodissa dataa voidaan sisällyttää kehykseen 32767 tavua. Lopuksi paketti suljetaan FCS-osiolla, joka sisältää 16 bittiä. RFcomm-moodissa ei ole virheenkorjausta, vain virheen havainnointi, jonka perusteella voidaan suorittaa paketin uudelleen lähetyspyyntö. Paketin uudelleen lähetystä ei haluttu käyttää sovelluksessa. RFcomm-moodin pakettikehysrakenne on esitetty aikaisemmin kuvassa 5.

### **5.3 nRF24L01**

nRF24L01 on periaatteessa samankaltainen kuin Bluetooth v2. HCI-moodissa. Pakettikehysrakenne on molemmissa pääosin sama, pois lukien hyötydatakentän pituus, joka nRF24L01:ssä on vain murto-osa Bluetooth:n hyötydatakentän pituudesta. nRF24L01 voidaan kytkeä SPI-väylän kautta ulkoiseen mikrokontrolleriin. Piiri soveltuu hyvin point-

to-point yhteyden toteuttamiseen. Piirin toiminnallisuus on laajalti aseteltavissa rekisterien ohjelmoinnilla. nRF24L01 mahdollistaa CRC-tarkistussumman käytön virheiden havainnoinnissa. nRF24L01 toimii joko Enhanced ShockBurst™- tai ShockBurst™-moodissa. nRF24L01:ssä voidaan ohjelmallisesti määrittellä staattinen data-osion pituus. Staattisen data-osion ansiosta PCF (Packet Control Field) häviää kokonaan pakettikehyrakenteesta. Nuhorizon myy valmiita moduuleja, joidenka ohjelmointiin ja testaukseen löytyy oma ARM-pohjainen (Advanced RISC Machine) ohjelmointialusta. Esimerkkiohjelmakoodit löytyvät ainakin Olimexiltä. Markkinoilla on ARM-pohjainen SPI-väylän (Serial Peripheral Interface) kautta toimiva kehitys- ja evaluointikitti. USB-ohjelmointilaudan hinta Olimexilla on 54 €. nRF24L01-moduuleja on saatavissa Farnell:lta. Halvin moduuli maksaa 32,67 €. Moduuleissa on SPI-väyläliityntä ja ne sisältävät oheiskomponentit, kuten kiteen ja jänniteregulaattorin. Kuvassa 9 on esitetty nRF24L01-pakettikehyksen lähetysyökin osatekijät paketin kuittauksen ja uudelleenlähetyksen ollessa pois käytöstä. [34]



Kuva 9. nRF24L01 Enhanced ShockBurst™ ja ShockBurst™ paketin lähetysyökin ilman paketin kuittausta ja uudelleenlähetystä. [34]

#### 5.4 Puskuroinnin laskenta

Lasketaan tarvittava puskurointi käytettäessä nRF24L01-piiriä ShockBurst™-moodissa. Halutaan lähettää 40 kSa/s, eli yhden A/D-muunninkanavan näytteet. Suoritetaan laskenta siten, että jokaista näytettä varten varataan tilaa 16 bittiä, eli kaksi tavua. Nordic

Semiconductorin nRF24L01 datalehdessä on esitetty yhtälö, jolla saadaan laskettua yhden pakettikehyksen lähetysyykliin menevä aika. ShockBurst<sup>TM</sup>-moodissa toimittaessa lähetysyökkinkesto saadaan yhtälön 5 mukaisesti.

Toiminnan oletetaan olevan IRQ ohjattua eli uusi paketti kirjoitetaan lähettimeen IRQ-signaalin kuittauksen jälkeen. Kuvasta 9 nähdään PLL:n (Phase Lock Loop) lukittumisajan maksimissaan olevan 130  $\mu$ s. Laskennassa oletetaan vastaanottimen pystyvän vastaanottamaan ja välittämään kaiken lähettimestä lähetetyn datan. Laskenta perustuu IRQ-pohjaiseen liikennöintiin. IRQ-signaalilla ilmoitetaan uuden paketin saapumisesta vastaanottimeen, sekä paketin lähetysen päättymisestä lähettimessä

$$T_{SB} = T_{UL} + PLL_{lock} + T_{OA} + T_{IRQ} + T_{IRQkuittaus} \quad (5)$$

Missä  $T_{UL}$  on hyötydatan latausaika SPI-väylältä,  $T_{OA}$  Paketin lähetykseen kuluva aika, Time-on-air.  $T_{IRQ}$  keskeytyslinjan alas vetoon kuluva aika, sekä  $T_{IRQkuittaus}$  IRQ:n kuittaukseen kuluva aika. Käytettäessä 2 Mb/s siirtonopeutta  $T_{IRQ}$  on 6 ns.  $T_{UL}$  saadaan yhtälöstä 6 sekä  $T_{OA}$  yhtälöstä 7. Yksi näyte sisältää 16 bittiä ja yhdessä paketissa on  $N_p$  määrä näytteitä. [34]

$$T_{UL} = \frac{16 \cdot b \cdot N_p}{C_{SPI} [bit/s]} \quad (6)$$

missä  $B_{hyötydata}$  hyötytavujen määrä paketissa,  $N_p$  näytteiden määrä paketissa,  $C_{SPI}$  SPI-väylänsiirtonopeus.

$$T_{OA} = \frac{([B_{alustus}] + 3 \cdot [B_{osoite}] + N_p \cdot 16 \cdot b + 2 \cdot [BCRC])}{C_{AIR} [b/s]} \quad (7)$$

$C_{AIR}$  RF-linkin siirtonopeus,  $B_{alustus}$  paketin alustuskentän tavujen määrä,  $B_{osoite}$  paketin osoitekentän pituus tavuina.

Lisäksi lasketaan IRQ:n kuittaukseen menevä aika yhtälöllä 8.

$$T_{\text{IRQkuittaus}} = \frac{b_{w\_status} + b_{status}}{C_{\text{SPI}}} \quad (8)$$

missä  $b_{w\_status}$  on status-rekisteriin kirjoituskäskyn bittien määrä, sekä  $b_{status}$  status-rekisteriin kirjoitettavien bittien määrä.

Tiedetään, että jokainen pakettikehys sisältää erinäisiä ohjausbittejä joiden määrä pakettikehystä kohden on vakio. Mitä enemmän hyötydataa sisällytetään samaan pakettikehykseen sitä suurempi osa siirtotiellä siirrettävästä datasta on hyötydataa. Toisaalta suuren hyötydatamäärän sisällyttäminen samaan pakettikehykseen vaatii enemmän puskurointia. Puskuroitaessa näytteitä siirtoviive kasvaa. Täten puskurointia tulisi käyttää mahdollisimman vähän, jotta päästäisiin mahdollisimman reaalitietä ohjaukseen. Lasketaan tarvittava minimi puskurointi, eli vähimmäisnäytemäärä, joka tulee sisällyttää yhteen pakettikehykseen halutun siirtonopeuden saavuttamiseksi. Valmiiksi tiedetään, että SPI-väylän siirtonopeus on 8 Mb/s, sekä RF-linkin siirtonopeus 2 Mb/s. yksi näyte on 16 bittiä eli 2 tavua

$$T_{UL} = \frac{N_p \cdot 16}{8 \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{bit}}{\text{s}} \right]} = N_p \cdot 2 \mu\text{s}$$

Yhden paketin lataamiseen menee siis  $N_p \cdot 2 \mu\text{s}$ . Lasketaan vielä lähetykseen menevä aika, kun paketinalustusosion (Preamble) tiedetään vievän tilaa yhden tavun verran, osoitteen kolme tavua. Hyötydataosio pituus on vapaasi valittavissa väliltä 0 - 32 tavua. Virheen havainnointiin varataan yksi tavu CRC-viestiin. Lisäksi käytetään 2 Mb/s siirtonopeutta RF-linkissä.

$$T_{OA} = \frac{(8b + 24b + N_p \cdot 16b + 16b)}{2 \cdot 10^6 \frac{b}{s}} = 24 \mu\text{s} + N_p \cdot 8 \mu\text{s}$$

Lähetettävien näytteiden määrä on paketin sisältämien näytteiden määrä kerrottuna pakettien määrällä, yhtälön 9 mukaisesti.

$$n \cdot N_p = N_s \quad (9)$$

Lähetettävä datamäärä määrättiin olevan 40000 näytettä sekunnissa. Sijoitetaan siirrettävä datamäärä yhtälöön 9

$$n \cdot N_p = 40000$$

Lasketaan tarvittava puskuointi.

$$1s \geq n \cdot (N_p \cdot 2 \mu s + 140 \mu s + 24 \mu s + N_p \cdot 8 \mu s + 6 ns + 2 \mu s)$$

$$1s \geq n \cdot N_p \cdot 10 \cdot 10^{-6}s + n \cdot 166,006 \cdot 10^{-6}s$$

Sijoitetaan yhtälö 9, jolloin saadaan

$$1s \geq 40000 \cdot 10 \mu s + n \cdot 166,006 \mu s$$

$$3614,33 \geq n$$

Käytännössä siis pakettien määrän täytyy olla 3615. Tämä on enimmäismäärä paketteja, eli 40000 näytettä täytyy sisällyttää 3614 pakettiin. Yhtälöstä 9 ratkaistaan näytteiden määrä yhtä pakettikehystä kohden. Tämä on samalla minimi näyte määrä, joka täytyy puskuroida, että saavutetaan haluttu tiedonsiirtonopeus.

$$N_p \geq \frac{40000}{3614,33}$$

$$N_p \geq 11,07$$

käytännössä näytteitä täytyy puskuroida vähintään 12 kappaletta aina yhteen pakettikehykseen. Toisin sanoen hyötytavuja pakettia kohden täytyy minimissään olla 24. Tällöin Käytettäessä IRQ-pohjaista lähetyksen ohjausta, sekä ShockBurst-moodia, saavutettaisiin teoreettisella tasolla riittävä siirtonopeus. IRQ-pohjainen ohjaus ei ole paras mahdollinen toimintamalli. Teoreettisella tasolla tarkasteltaessa voidaan päätellä puskuroinnin vähintään 12 näytteen kimppuihin olevan riittävä. On huomioitavaa, että laskennassa ei ole huomioitu että näytteet voidaan ohjelmallisesti pakata siten, ettei turhia bittejä lähetetä. Nyt jokaista 12-bittistä näytettä varten on varattu kaksi tavua eli 16 bittiä. Laskenta esimerkissä paketin kuittaus ja uudelleen lähetys toiminnot on ajateltu poisjätetyiksi. Lisäksi on mahdollista päästä eroon hyötydatan latausaikaviiveestä, sillä nRF24L01 sisältää kolme asteisen TX-FIFO:n, joista muihin voidaan ladata dataa samanaikaisesti toisen rekisterin lähetyksen kanssa. Paketin lähetyksen päättymisestä kerrotaan keskeytyslipulla. Tämä tapahtuu SPI-väylän IRQ-linjan alas vedolla. Riippuen ohjaincontrollerin nopeudesta syntyy viive, jota ei ole otettu laskennassa huomioon, toisaalta mikäli käytettävissä on useita rinnakkaisia lähetettävän datan rekisterejä, joihin dataa voidaan ladata lähetyksen kanssa samanaikaisesti toisen rekisterin lähetyksen kanssa. Lähetyssekvenssin tarkempi tarkastelu on jätetty toteutusvaiheeseen.

Kuvasta 10 nähdään nRF24L01:n ShockBurst™ pakettikehysrakente. Laskettaessa pakettikehysen lähetysyökin kestoakaa, oletettiin pärjättävän kolme tavuisella osoitekentällä, samoin kuin CRC-viestiä varten varattiin kaksi tavua.

<b>Alustus 1 tavu</b>	<b>Osoite 3 tavua</b>	<b>Data 0 - 32 tavua</b>	<b>CRC 2 tavua</b>
-----------------------	-----------------------	--------------------------	--------------------

Kuva 10. ShockBurst™ pakettikehysrakente.

Pakettien lähetysyöki on molemmissa moodeissa kuvan 9 mukainen, lisäksi laskennassa käytettiin oletusta, ettei hyötydatan määrä vaihtelee pakettikohtaisesti, eli paketti osion pituus oli luonteeltaan staattinen. Lisäksi laskettiin vaan yhden A/D-muunninkanavan näytteiden siirtoon vaadittava puskurointi, kun rinnakkaisten A/D-muunninkanavien

määrää lisätään kasvaa myös puskuroinnin tarve. Mikäli A/D-muuntimen kanavien määrä kasvaa niin suureksi ettei kaikkia näytteitä voida lähettää yhdellä radiopiirillä, voidaan järjestelmään liittää rinnakkaisia RF-kanavia. Käytännössä tämä järjestelmään liitetään rinnakkaisia RF-linkkejä. Ohjausbittejä pakettia kohden tulee 48.

## **5.5 WUSB**

Teknisiltä spesifikaatioiltaan WUSB näytti erittäin varteenotettavalta tekniseltä vaihtoehdolta. Tarkasteltaessa WUSB piirien ja etenkin moduulien saatavuutta huomattiin, ettei markkinoilla ollut tekniikan uutuudesta johtuen käytännöllisesti katsoen minkäänlaista tarjontaa. Joitakin WUSB lähetinvastaanotinpiirejä kyllä löytyi, mutta toteutus valmiiksi tuotteeksi oheiskomponentteineen olisi vaatinut suuret määrät piiritason suunnittelua, sekä ohjelmointia. WUSB suljettiin pois toteutusvaihtoehdoista huonon saatavuuden takia. Muutaman vuoden sisällä löytynee markkinoilta jo valmiita moduuleita, jonka jälkeen sovellettavuus helpottuu huomattavasti.

Taulukoon 2 on koottu kahden Bluetooth v2.-moduulin, sekä Nordic Semiconductorin nRF24L01-radiopiirin keskeisiä teknisiä ominaisuuksia. WUSB:tä ei sen kummemmin eritelty, koska markkinoilla ei ollut kyseisellä tekniikalla toteutettuja moduuleja helposti saatavilla.



Taulukko 2. toteutusläheinen vertailu

	<b>Bluegiga</b>	<b>Nordic semiconductor</b>	<b>Free2move</b>
	<b>WT32</b>	<b>nRF24L01-CAL-SP</b>	<b>F2M03ALA</b>
<b>Rakenne</b>	<b>moduuli</b>	<b>moduuli</b>	<b>moduuli</b>
<b>ADC</b>	<b>ulkoinen</b>	<b>ulkoinen</b>	<b>ulkoinen</b>
<b>Firmware</b>	<b>tilattavissa kustomoitu softa</b>	<b>kotisivuilta[13]</b>	<b>wireless UART 4.0v + ohjelmointi softa</b>
<b>Tiedonsiirto nopeus</b>	<b>3 Mb/s, Rfcomm (450-550 kb/s? )</b>	<b>2 Mb/s</b>	<b>3 Mb/s (Rfcomm 320 kb/s)</b>
<b>Virran kulutus Stdby</b>	<b>57 uA</b>	<b>22 uA</b>	
<b>Rx</b>		<b>12.3 mA @ 2 Mb/s</b>	
<b>Tx</b>	<b>57 mA @ 0 dBm</b>	<b>11.3 mA @ 0 dBm</b>	
<b>Käyttöjännite</b>	<b>1.7 - 3.6 V</b>	<b>1,9 - 3.6 V</b>	
<b>Modulaatio</b>	<b>GFSK(1 Mbps), data 8DQPSK(3 Mbps)</b>	<b>GFSK</b>	<b>GFSK ( 1 Mb/s), data 8DQPSK ( 3 Mb/s)</b>
<b>Taajuusalue</b>	<b>2,4 GHz ISM</b>	<b>2,4 GHz ISM (2,400- 2,525)</b>	<b>2,4 GHz ISM</b>
<b>Dataliikenne väylä</b>	<b>USB, UART( 3 Mb/s),</b>	<b>SPI 8 Mb/s</b>	<b>USB, UART ( 3 Mb/s)</b>
<b>Ohjelmointi väylä</b>	<b>SPI (ohjelmointiin)</b>	<b>SPI 8 Mb/s</b>	<b>SPI</b>
<b>Virheenkorjaus</b>	<b>Rfcomm moodissa ei virheen korjausta</b>	<b>8/16 bit CRC</b>	
<b>Lähetys teho</b>	<b>0 dBm</b>	<b>0... -18 dBm @ ZL = 15+j88 ohm</b>	<b>4 dBm</b>
<b>Lisätietoja</b>	<b>10 ohjeloitavaa I/O terminaalia</b>	<b>ei mikrokontrolleria intgroituna</b>	<b>samat kuin Bluegigalla</b>
	<b>USB 2.0 yhteensopiva</b>		
<b>Kanavien määrä</b>	<b>79</b>	<b>126</b>	<b>79</b>
<b>Herkkyys</b>	<b>≤ -70 dBm</b>	<b>-82 dBm @ 2 Mb/s</b>	

[5],[30],[32],[34],[35]

## 6 SIIRRETTÄVÄN DATAMÄÄRÄN OPTIMOINTI

Periaatteessa on kaksi mahdollisuutta hyödyntää näytetavuihin (16 bittiin) tyhjäksi jäävää tilaa (4 bittiä). Vaihtoehtoina ovat joko tavujen pakkaaminen ohjainkontrollerissa ennen siirtoa, tai ohjaustiedon liittäminen tavuihin. Käytettäessä FPGA-piiriä ulkoisena ohjainkontrollerina hyötydatan pakkaus ja käsittely on helppo toteuttaa. Tarkastellaan tilannetta, jossa näytteet ovat 12-bittisiä ja jokaista näytettä kohden on varattu kaksi tavua (16 bittiä). Jokainen näyte sisältää siis neljä turhaa bittiä. Näihin ”tyhjiin” bitteihin voidaan sisällyttää näytteen järjestysnumero. Vaihtoehtoisesti puskuroidut näytteet voidaan limittää siten, että neljä tyhjäksi jäävää bittiä täytetään seuraavan näytteen neljällä ensimmäisellä bitillä. Limityskaavan ollessa tiedossa näytteet voidaan eritellä vastaanottopäässä takaisin yksittäisiksi näytteiksi. Osaan limityksellä säästyvästä tilasta voidaan sijoittaa paketin järjestysnumero. Kolmas vaihtoehto on käyttää 16 bittisiä näytteitä. Kuvaajassa 2 on esitetty eri näytemäärien vaatima tila tavutasolla pakettikehyksessä joko pakattuna tai pakkaamattomana.

Kuvassa 12 on esitetty sarjamuodossa oleva pakkaamaton data.

b11	b10	b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	0	0	0	0	b11	b10
-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	-----	-----

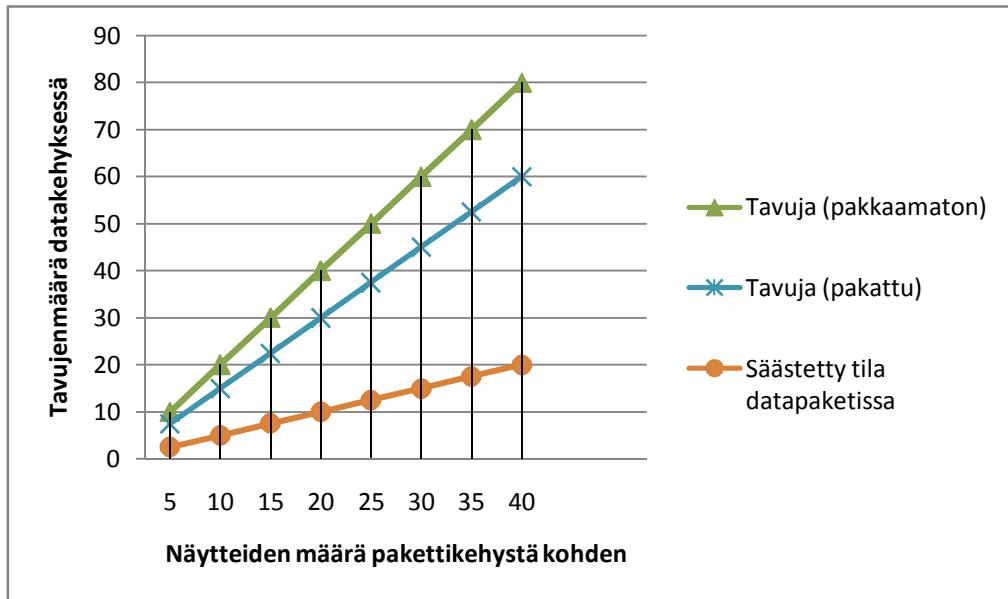
Kuva 12 hyötydata pakkaamattomana.

Kuvassa 13 on esitetty sarjamuotoinen data pakattuna.

b11	b10	b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b11	b10
-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----

Kuva 13 hyötydata pakattuna.

Kuvaajassa 2 on esitetty eri näytemäärien vaatima tila tavutasolla pakettikehyksessä joko pakattuna tai pakkaamattomana.



Kuvaaja 2. Hyötydatan pakkauksesta syntyvä säästö tavutasolla, sekä säästetty tila tavuina.

Pakkauksella saavutettava prosentuaalinen säästö saadaan laskennallisesti yhtälöllä 10

$$P_{\text{säästö}} = 1 - \frac{b_{\text{pakattu}}}{b_{\text{pakkaamaton}}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

missä  $P_{\text{säästö}}$  on pakkauksella saavutettu säästö hyötydataosion viemässä tilassa prosentteina.  $b_{\text{pakattu}}$  pakatun näytteen viemä tila bitteinä ja  $b_{\text{pakkaamaton}}$  pakkaamattoman näytteen viemä tila bitteinä.

$$P_{\text{säästö}} = 1 - \frac{12}{16} \cdot 100 \% = 25\%$$

Laskennallisesti pakkauksella säästetään tilaa 25%.

On huomioitavaa, että käytettäessä nRF24L01 RF-moduulia tavujen määrä pakettikehystä kohden on maksimissaan 32. Pakkaamattoman datan tapauksessa tämä tarkoittaa 16 näytettä pakettia kohden. Pakattaessa näytteet voidaan yhteen pakettikehykseen sisällyttää 21 12-bittistä näytettä.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Toteutus WT32:lla RFcomm-moodissa ei onnistu siirtonopeuden riittämättömyyden takia. HCI-moodin soveltaminen vaatii paljon ohjelmointia sekä järjestelmäsuunnittelua. On huomioitavaa että valittaessa nRF24L01-moduuli järjestelmään, joudutaan käymään läpi samat suunnitteluvaiheet kuin Bluetooth:n HCI-moodin tapauksessa. nRF24L01-moduulin hinta on kuitenkin hieman halvempi kuin markkinoilta löytyvien Bluetooth-moduulien. Bluetooth-moduulin ohjelmointilauta on kuitenkin suhteellisen hinnakas, varsinkin jos haluaa testata linkin toimivuutta kehityslaudoilla. nRF24L01-piiriin perustuva moduuli täyttää laskennallisesti siirtoteille asetetun kaistanleveysvaatimuksen. Ohjelmointiin löytyy esimerkkikoodeja ja kehityslaudan hinta on edullisempi kuin Bluetoothin. Moduuleja löytyy ainakin tilaustuotteena esimerkiksi Farnell:lta. Toteutus edellyttää ulkoisen ohjainkontrollerin käyttöä. Ulkoinen ohjainkontrolleri ja radiomoduuli käyttävät SPI-väylää tiedonsiirtoon. Radiopiiri ohjelmoidaan myös samaa SPI-väylää käyttäen. Jos tiedonsiirto olisi ollut mahdollista Bluetooth:n RFcomm-moodissa, toteutus olisi ollut helposti tehtävissä käyttäen Bluetoothia. Nyt RFcomm-moodin tiedonsiirtokapasiteetin riittämättömyyden takia nRF24L01 näyttää paremmalta vaihtoehdolta.

Järjestelmän ensimmäinen prototyyppi päätettiin toteuttaa nRF24L01-moduulilla. Seuraavaksi on valittava järjestelmään tarvittavat oheispiirit. On valittava ohjainkontrolleri ja A/D-muunnin. Kontrollereiksi mietittiin erilaisia FPGA-piirejä ja niiden soveltuvuutta käyttökohteeseen. Mikäli FPGA-piiri sijoitettaisiin ohjainkontrolleriksi, olisi mahdollista suorittaa mittaussignaalin käsittelyä jo lähettimessä. FPGA-piirien laskentakapasiteetti on mikrokontrolleireihin nähden hyvä lisäksi ne soveltuvat erinomaisesti yhtäjaksoisen ”virtaavan” datan käsittelyyn. Täysin tarkkaa tietoa maksimi näytteistystaajuudesta, sekä rinnakkaisten A/D-muunnin kanavien määrästä ei kuitenkaan ole. Täten on hyvä että RF-linkin kaistanleveys on reippaasti yli minimi tarpeen. Bluetooth:n soveltaminen mahdollistaisi vastaanottimen päässä helpomman toteutuksen. Käytettäessä nRF24L01-moduulia tarvitaan vastaanottimen päähän SPI/USB-muunnin tai vastaava. Prototyyppiin valittiin FPGA-piiri ohjainkontrolleriksi. Järjestelmän ohjelmakoodeihin ja tekniseen toteutukseen sekä mahdollisesti suorituskyvyn testauksiin syvennytään erikoistyön puitteissa.

## 8 YHTEENVETO

RF-linkki on toteutettavissa samalla työmäärällä myös Bluetooth v2:lla käytettäessä sitä HCI-moodissa. nRF24L01 valittiin, koska toteutus oli halvempi käytettäessä standardoimatonta piiritekniikkaa. Bluetooth:n hyvä puoli on se että Bluetooth on yhteensopiva useiden eri tiedonsiirto-standardien kanssa, tästä syystä samalla moduulilla voidaan kytkeytyä moneen erityyppiseen verkkoon. Tästä ominaisuudesta johtuen Bluetooth-piiri on monimutkaisempi tekniikaltaan. Monimutkaisuus nostaa moduulin hintaa, siksi Bluetooth-moduulit ovat nRF24L01-moduuleja kalliimpia. Mietittäessä sovellusympäristöä voidaan olettaa että pakettien lähetyksessä ilmenee virheitä. Ennalta tiedetään, ettei näytteitä voida puskuroida mielivaltaisen montaa samaan pakettiin, koska siirtoviive kasvaa liian suureksi. Lisäksi nRF24L01 pakettikehyksessä voidaan lähettää maksimissaan 32 tavua hyötydataa. RF-linkkiä on tarkoitus käyttää ilman pakettien uudelleenlähetyksiä. Paketeille suoritetaan kuitenkin virheentarkastus. Mikäli CRC on väärin, hylätään kyseinen paketti. Tämä tarkoittaa kaikkien paketin sisältämien näytteiden hylkäämistä. Havaitun virheen paikannus tiettyyn tavuun ei ole tässä tapauksessa mahdollista. Käytetystä säätötavasta johtuen ohjaussignaalin hetkellinen katoaminen ei haittaa. Ohjaussignaalin kadotessa säätöä ei suoriteta. Tärkeintä on varmistua, ettei virheellisen tiedon perusteella suoriteta ohjausta. Useimmat tarkastelussa mukana olleet radiotekniikat olivat liian pieniä kaistanleveydeltään. Kaistanleveys oli tärkein määrittelykriteeri tekniikkaa valittaessa. Hyötydatan pakkaamisella saavutetaan selvää tilan säästöä pakettikehysrakenteessa sekä RF-linkin kaistanleveys tarpeessa.

## LÄHDELUETTELO

[1]Tietokone-järjestelmät, Krister Wikström, Helsingin ammattikorkeakoulu, Tekniikka.  
<http://cs.stadia.fi/~pkoistin/tietokonejarjestelmat.ppt> (lainattu 9.10.2008)

[2]CRC määritelmä  
<http://www.relisoft.com/science/CrcMath.html>(lainattu9.10.2008)

[3]DSSS:n määritelmä  
<http://www.yourdictionary.com/dsss>

[4]<http://articles.gourt.com/fi/DSSS>

[5] Bluegiga WT32-moduuli Datasheet  
[http://www.bluegiga.com/files/bluegiga/Pub%20files/WT32\\_Datasheet.pdf](http://www.bluegiga.com/files/bluegiga/Pub%20files/WT32_Datasheet.pdf)

[6]Frame Check Secuency:n määritelmä.  
<http://www.yourdictionary.com/fcs>

[7] FHSS  
<http://www.webopedia.com/TERM/F/FHSS.html> (22.9.2008)

[8] Electrical Engineering Glossary Definition for GFSK  
<http://www.maxim-ic.com/glossary/index.cfm/Ac/V/ID/519/Tm/GFSK>(22.9.2008)

[9] EVM measurements for ZIGBEE signalsin the 2.4 GHz band  
[http://www2.rohde-schwarz.com/file\\_1180/1EF55\\_1E.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_1180/1EF55_1E.pdf) (22.9.2008)

[10] OQPSK  
[http://www.frequencymanager.de/TH\\_waveformdescription.pdf](http://www.frequencymanager.de/TH_waveformdescription.pdf) (OQPSK) (22.9.2008)

[11]What is QPSK  
<http://www.tech-faq.com/qpsk.shtml> (lainattu 7.10.2008)

[12] RFCOMM with TS 07.10 Serial Port Emulation

<http://www.bluetooth.com/NR/rdonlyres/1483FFFD-7A5C-49A8-9AFE-1156DA1D96C3/916/rfcomm1.pdf> (19.9.2008)

[13] Firmware: nRF24Z1\_firmware\_2\_0.zip (size: 7 kb)

[http://www.nordicsemi.com/index\\_popup.cfm?obj=product&act=displayWhitepapers&pro=86&con=development\\_tools](http://www.nordicsemi.com/index_popup.cfm?obj=product&act=displayWhitepapers&pro=86&con=development_tools) (17.9.2008)

[15] TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU, Tietotekniikan koulutusohjelma, Tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehto, Petri Tutti, 8. 5. 2006, LYHYEN MATKAN RF-TEKNIIKAT, BLUETOOTH 2, ZIGBEE JA UWB

<https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/5169/TMP.objres.533.pdf?sequence=1>  
(lainattu 9.10.2008)

[16] Wireless Technology in Industrial Networks  
Willig, A. Matheus, K. Wolisz, A. Hasso-Plattner-Inst., Univ. of Potsdam, Germany;  
This paper appears in: Proceedings of the IEEE, Publication Date: June 2005, Volume: 93, Issue: 6, On page(s): 1130-1151, ISSN: 0018-9219, INSPEC Accession Number: 8604033, Digital Object Identifier: 10.1109/JPROC.2005.849717, Date Published in Issue: 2005-05-31 08:32:06.0

[17] BL40A2000 Tietoliikenne-elektroniikan komponentit – Materiaalit, Ville Särkimäki, Lyhyen kantaman radiotekniikoista.

[http://www.ee.lut.fi/courses/Sa2910400/esitykset\\_2007/Lyhyen\\_kantaman\\_radiotekniikoista.pdf](http://www.ee.lut.fi/courses/Sa2910400/esitykset_2007/Lyhyen_kantaman_radiotekniikoista.pdf) (lainattu 9.10.2008)

[18] <http://fi.wikipedia.org/wiki/ZigBee> (16.9.2008)

[19] Bluetooth\* Architecture Overview, James Kardach, Mobile Computing Group, Intel Corporation [http://download.intel.com/technology/itj/q22000/pdf/art\\_1.pdf](http://download.intel.com/technology/itj/q22000/pdf/art_1.pdf) (7.9.2008)

[20]Bluetooth

[http://users.jyu.fi/~arjuvi/opetus/ties422/Bluetooth\\_ari.ppt](http://users.jyu.fi/~arjuvi/opetus/ties422/Bluetooth_ari.ppt) (lainattu9.10.2008)

[21] WiMedia UWB technology: 480Mb/s wireless USB

Leenaerts, D. van de Beek, R. Bergervoet, J. Kundur, H. van der Weide, G.

NXP Semicond. Res., Eindhoven; This paper appears in: Radio-Frequency Integration

Technology, 2007. RFIT 007. IEEE International Workshop on, Publication Date: 9-11

Dec. 2007, On page(s): 8-12, Location: Rasa Sentosa Resort, ISBN: 978-1-4244-1307-2,

INSPEC Accession Number: 9766027, Digital Object Identifier:

10.1109/RFIT.2007.4443907, Date Published in Issue: 2008-01-28 09:48:46.0

[22] UWB COMMUNICATIONS – A STANDARDS WAR

Eino Kivisaari, Helsinki University of Technology, Telecommunications Software and  
Multimedia Laboratory

[www.tml.tkk.fi/Opinnot/T-109.551/2004/reports/UWB.doc](http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/T-109.551/2004/reports/UWB.doc) (15.9.2008)

[23] Link-adaptation and Transmit Power Control for Unicast and Multicast in

IEEE 802.11a/h/e WLANs Grilo, A.; Nunes, M.; Local Computer Networks, 2003. LCN

'03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on 20-24 Oct. 2003

Page(s):334-345 Digital Object Identifier 10.1109/LCN.2003.1243159

[24] Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance

Kin K. Leung, Bruce McNair, Leonard J. Cimini, Jr., and Jack H. Winters

AT&T Labs – Research, Middletown, NJ 07748, 595, 0-7803-7400-2/02/\$17.00 © 2002

IEEE Leung, K.K.; McNair, B.; Cimini, L.J., Jr.; Winters, J.H.; Communications, 2002.

ICC 2002. IEEE International Conference on, Volume 1, 28 April-2 May 2002

Page(s):595 – 599, Digital Object Identifier 10.1109/ICC.2002.996922

[25] <http://en.wikipedia.org/wiki/IrDA>(15.9.2008)



[26] <http://www.faculty.iu-bremen.de/birk/lectures/PC101-2003/17bluetooth/bluetooth/irda.html>(15.9.2008)

[26] Jianping Song, Song Han, Al Mok, Deji Chen, Mike Lucas, Mark Nixon, Wally Pratt, "WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control," *rtas*, pp.377-386, 2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2008

[28] WirelessHART™ Technical Data Sheet  
[http://www.cds.caltech.edu/~shiling/wirelesshart\\_datasheet.pdf](http://www.cds.caltech.edu/~shiling/wirelesshart_datasheet.pdf) (23.9.2008)

[29] Data sheet Wireless UART firmware version 4  
[http://www.free2move.net/uploads/downloads/Wireless\\_UART\\_protocol\\_v4.pdf](http://www.free2move.net/uploads/downloads/Wireless_UART_protocol_v4.pdf)  
(18.9.2008)

[30] Low power Audio Bluetooth™ Module with antenna F2M03ALA Preliminary datasheet  
[http://www.free2move.net/uploads/downloads/74\\_1200058109\\_Datasheet\\_F2M03ALA.pdf](http://www.free2move.net/uploads/downloads/74_1200058109_Datasheet_F2M03ALA.pdf)  
(18.9.2008)

[31] Bluetooth  
Part 7: RFCOMM Kjell Jørgen Hole UiB, Last updated 23.03.08, Mail: Kjell.Hole@ii.uib.no, URL: [www.kjhole.com](http://www.kjhole.com)  
<http://www.kjhole.com/Standards/BT/BT-PDF/Bluetooth7alt.pdf>(15.9.2008)

[32] Art.no5308/Art.no5311/Art.no5312 F2M Bluetooth Evaluation Kit for General Purposes  
<http://www.datasoft.se>(18.9.2008)

[33] Joe Kelly, Ph.D. **Verigy** ,July 2008, Modulation Series Modulation - Fundamentals 2 Bluetooth EDR Demodulation on the V93000

[http://www.verigy.com/content/dam/verigy/Internet/Test%20Technology%20Resource%20Center/Test%20Methodologies/Part2ModulationSeries\\_v2.pdf](http://www.verigy.com/content/dam/verigy/Internet/Test%20Technology%20Resource%20Center/Test%20Methodologies/Part2ModulationSeries_v2.pdf) (lainattu 7.10.2008)

[34] nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification

[http://www.nordicsemi.com/files/Product/data\\_sheet/nRF24L01\\_Product\\_Specification\\_v2\\_0.pdf](http://www.nordicsemi.com/files/Product/data_sheet/nRF24L01_Product_Specification_v2_0.pdf)(13.9.2008)

[35] <http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth> (8.9.2008)

[36] RFcomm pakettikehysrakenne

[http://authors.phptr.com/bluetooth/bray/pdf/cr\\_ch10.pdf](http://authors.phptr.com/bluetooth/bray/pdf/cr_ch10.pdf)  
(lainattu 31.1.2009)