
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energia / Sähkötekniikan osasto
Säätö- ja digitaalitekniikan laboratorio

Kandidaatintyö
27. toukokuuta 2010

Ohjelmistoradion hyödyntäminen tiedonsiirron tutkimisessa LVDC-verkossa

Tuomas Hakkarainen

Säte 5

Sisältö

1	Johdanto	3
2	LVDC	5
2.1	LVDC-pilot-järjestelmä	7
3	Ohjelmistoradio	9
3.1	GNU-radio	11
3.2	USRP	11
3.3	Modulaatio	12
3.4	Bittinopeus	13
4	Bit error ratio (BER) ja signaalin kohinasuhde (SNR)	14
4.1	BER	14
4.2	Signaalin kohinasuhde	14
4.3	Bittinopeuden vaikutus BERin	15
4.4	Konvoluutiokoodaus	15
5	Mittaukset	17
5.1	Kaapelin kohina ja häiriöt	19
5.2	BER bittinopeuden suhteen	23
5.3	BER-arvot verrattuna signaalin kohinasuhteeseen.	24
6	Yhteenveto	32
7	Lähdeluettelo	34

Käytetyt merkit ja lyhenteet

LVDC	Low Voltage Direct Current
PLC	Power Line Communication
AMR	Automatic Meter Reading
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
GSM	Global System for Mobile Communications
3G	3rd Generation
RF	Radio Frequency
USRP	Universal Software Radio Peripheral
C++	Ohjelmointikieli
GNU	GNU's Not Unix
ADC/DAC	Analog to digital converter / Digital to analog converter
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying
SDR	Software Defined Radio
WLAN	Wireless Local Area Network
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
BER	Bit Error Ratio
f	taajuus

1 Johdanto

LVDC (Low Voltage Direct Current)-verkko on keskijännitehaarojen ja perinteisen pienjännite-AC-verkkojen tilalle suunniteltu verkkoratkaisu, joka toimii noin 1500 voltin tasajännitteellä. Keskijänniteverkon 20 kV:n vaihtojännite muunnetaan noin 1 kV vaihtojännitteeksi, joka tasasuunnataan ja siirretään asiakkaan asunnon läheisyyteen, jossa se vaihtosuunnataan takaisin 230 V:iin. LVDC-verkot ja niihin integroitavat sovellukset tarvitsevat tavan, jolla kommunikoida eri päätelaitteitten välillä. Tehoelektroniikka tarvitsee ohjaussignaaleja, jotka eivät vaimene tai vääristy kaapelissa ja uudet AMR(Automatic Meter Reading)-mittarit tarvitsevat väylän, jossa sähkönkulutuslukemat siirtyvät. Tiedonsiirto voidaan toteuttaa esimerkiksi PLC (Power Line Communication) tekniikalla, jossa asuntojen päätelaitteet kommunikoivat keskittimen kanssa, joka taas välittää viestit eteenpäin. Tämä malli on havaittu taloudelliseksi, koska tiedonsiirtokaapelointia ei tarvitse rakentaa jokaiseen taloon erikseen, vaan tieto siirtyy sähköverkossa keskittimeen asti, joka kokoaa pienempien alueiden datan ja lähettää sen eteenpäin.

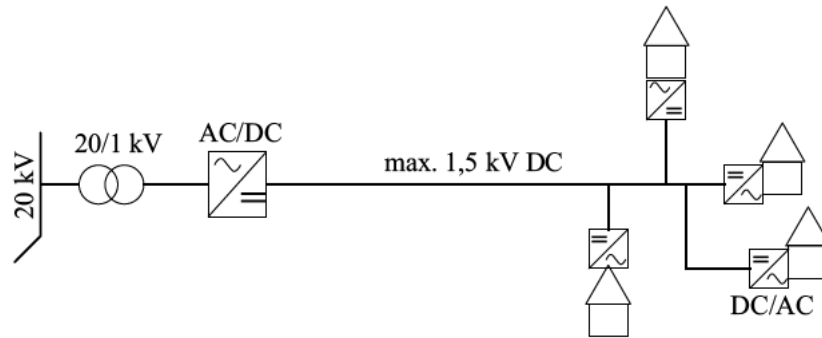
Nämä kaikki toiminnot tarvitsevat tiedonsiirtoväylän, joka on tarpeeksi nopea ja luotettava. Työssä testattiin AXMK-kaapelin muodostamaa tiedonsiirtokanavaa PLC-tekniikalle LVDC-koejärjestelyssä ja sen suorituskykyä tasaja vaihtosuuntaajan välillä ohjelmistoradiota hyödyntäen. Tiedonsiirtoa testattiin eri modulaatioilla, bittinopeuksilla ja amplitudin voimakkuuksilla ja tuloksia tarkasteltiin Bit Error Ration avulla. Signaaleja siirrettiin myös koodattuna ja vertailtiin koodauksen etuja ja haittoja verrattuna koodaamattomaan tietoon. Tarkoituksena on vertailla tiedonsiirron toteutumista lähet-

timen ja vastaanottimen välillä AXMK-kaapelissa. Lopullisissa sovelluksissa informaatiota ei saa kadota matkalla tai se pitää pystyä palauttamaan esimerkiksi koodausta tai protokollaa käyttäen. Mittaukset on tehty LUT:n sähköverkkolaboratoriossa, johon on rakennettu LVDC-pilot-koejärjestely.

2 LVDC

LVDC-verkko on pienjännitteellä toimiva tasajänniteverkko, jonka tarkoitus olisi parantaa kustannustehokkuutta ja vikasietoisuutta verrattuna nykyisiin ratkaisuihin, joissa keskijänniteverkko on tuotava kohtuullisen lähelle sähkökäyttäjää. Sen lisäksi LVDC-verkon käytössä pyritään saamaan myös seuraavia hyötyjä: Vähemmän jännitehuojuntaa ja suurempaa tehoa, kuin nykyisissä pienjänniteverkoissa. Parempi kustannustehokkuus saadaan aikaan, kun keskijänniteverkkoa ei tarvitse tuoda enää niin lähelle asiakasta, kuin 230/400 V pienjänniteverkoille. Jännitehuojuntaa saadaan vähennettyä, koska sähkönsiirto tapahtuu tasajännitteellä, toisin kuin nykyisissä vaihtovirtajärjestelmissä, joissa lisääntyvä kuormitus kasvattaa häviöitä kaapelissa ja pudottaa jännitettä. Pienempi keskijänniteverkko parantaa myös vikasietoisuutta, koska pienjänniteverkon vikatilanteet eivät vaikuta keskijänniteverkkoon, vaan vain tasajänniteverkon käyttäjiin. [3]

Myös uudet tuotantomuodot kuten aurinko- ja tuulivoima kasvattavat LVDC-verkkojen tarvetta, koska verkkoa pystytään hallitsemaan nopeasti säädettävällä tehoelektronikalla paremmin, kun tuotannon teho vaihtelee eri tuotantolaitoksissa. LVDC-verkko toteutetaan tasasuuntaamalla diodeilla tai kuusipulssisuuntaajalla keskijännitemuuntajalta tuleva 1 kilovoltin vaihtojännite ja vaihtosuuntaamalla se sitten kuluttajan asunnon läheisyydessä IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) transistoreilla toteutetulla invertterillä. Vaihtosuuntaamisen yhteydessä jännite lasketaan ± 750 V tasajännitteestä 230 V vaihtojännitteen tasolle. Tämä siis lisää tehoelektronikan määrää kuluttajan päässä, mutta toisaalta vähentää keskijännitelinjojen laajuutta. [4]

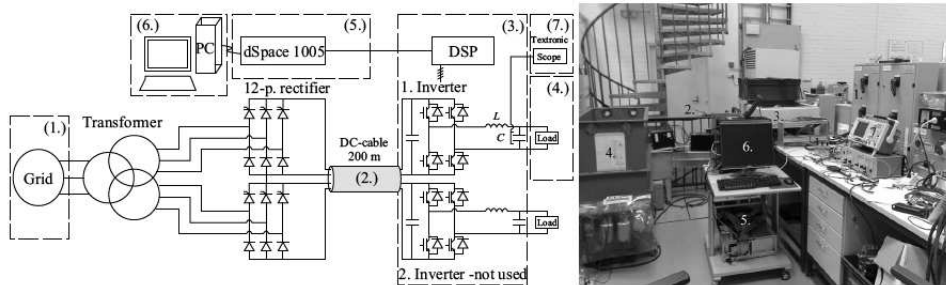


Kuva 1: LVDC-verkon periaatteellinen rakenne. [1]

Kuvassa 1 on esitetty LVDC-verkon periaatteellinen rakenne. LVDC-verkko on jatketta keskijänniteverkolle. Muuntajan jälkeen tulee tasasuuntaaja, tasajännitekaapeli ja kuluttajan lähellä olevat vaihtosuuntaajat, jotka muuttavat jännitteen 230 voltin tasolle. AXMK-kaapelin vikakestoisuus on kuitenkin parempi, koska se on maakaapelina eikä perinteiseen tapaan maaseudulla nähtävissä kolmen rinnakkain olevan avojohdon siirtolinjana. Avojohtot ovat alttiita katkeamaan tai aiheuttamaan maasulun esimerkiksi lumen painosta painuvien puiden lähellä. Koska AXMK-kaapeli on maakaapeli, pystytään sääolosuhteilta suojautumaan täysin. Tasasuunnattu sähkö kulkee bipolaarisessa LVDC-järjestelmässä neljässä johdossa, joissa kahdessa kulkee -750 V ja $+750\text{ V}$ jännitteet ja kahdessa on N-johtimet. Unipolaarisessa järjestelyssä jännite jää noin 1414 volttiin, koska ennen LVDC-verkkoa olevalta muuntajalla ei voida ottaa yli 1 kV suuruisia jännitteitä, koska yli 1 kV AC-jännitteet eivät ole enää pienjännitteitä.. [3]

2.1 LVDC-pilot-järjestelmä

Työssä on tarkoitus tutkia PLC-tekniikkaa ja sen toimintaa häiriöllisessä tehoelektroniikkaa sisältävässä kanavassa ohjelmistoradiota hyväksi käyttäen. Eli mitä esimerkiksi LVDC-järjestelmän häiriöt aiheuttavat PLC-signaalille. Kuvassa 2 on Laboratoriossa tehty koejärjestely LVDC-pilot-järjestelmästä. Kasvavien tiedonsiirtotarpeiden, kuten automaattisen mittarinluvun, sähkö-



Kuva 2: LUT:n laboratoriossa oleva koekytkentä. [1]

verkossa toimivan internetin, verkkon seurannan ja verkonohjauksessa käytettyjen signaalien välittämiseen tarvitaan joku reitti, jossa tieto saadaan kulkemaan. Tällä hetkellä langattomien verkkojen käyttö ei ole järkevää, koska mikään tämänhetkisistä vaihtoehdoista ei sovi täydellisesti sähköverkkojen tiedonsiirron tarpeisiin. GSM (Global System for Mobile Communications) verkkojen ja 3G (3rd Generation):n käyttö ei ole järkevää, koska verkko ei ole vielä millään operaattorilla niin laaja, että se kattaisi koko sähköverkkojen alueen. Sähköjakeluverkkojen toimintavarmuus täytyy myös olla turvattu, mikäli GSM verkko vikaantuu jostain syystä tai tiedonsiirtonopeus ei ole riittävä alueella. Lisäksi GSM operaattori perii verkon käytöstä aina maksun. Myöskään WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) tai

WLAN (Wireless Local Area Network) verkot eivät riitä lähellekään kattamaan koko sähköverkkojen aluetta. Langallisten puhelinverkkojen ongelmana on myös verkon riittämättömyys ja operaattorin tiedonsiirtomaksut.

PLC-tekniikalla toteutettu tiedonsiirto tarkoittaa olemassa olevien sähköverkkojen hyödyntämistä tiedonsiirtoverkkona. PLC-tekniikan hyviä puolia on esimerkiksi halpa hinta ja verkon kattavuus kaikkialla missä sähköverkkoja on. PLC:n käyttö ei siis tarvitse sähköverkon lisäksi erillistä tiedonsiirtoverkkoa, vaan pelkästään keskittimet joista useamman asiakkaan tietoliikenne lähetetään tai vastaanotetaan erilliseen tietoverkkoon sekä toistimia signaaloinnin kantaman varmistamiseksi. PLC-tekniikan haasteena on vielä keskeneräinen standardisointi ja eri laitevalmistajien laitteiden yhteensopimattomuus. [5]

3 Ohjelmistoradio

Ohjelmistoradio SDR (Software Defined Radio) koostuu ohjelmallisesta osasta ja fyysisestä laitteesta. Ohjelmallinen osa voidaan toteuttaa jollain ulkopuolisella laitteella esimerkiksi tietokoneella. Ohjelmaan voidaan määrittää modulaatio, amplitudi, taajuus. Variaatioiden määrää rajoittaa lähinnä ohjelmistoradion fyysinen laite USRP (Universal Software Radio Peripheral) ja sen fyysiset ominaisuudet. Ohjelmistoradio voidaan ohjelmallisesti määrittää lähettimeksi tai vastaanottimeksi.

Ohjelmistoradio on kehitetty alunperin 90-luvulla USA:n armeijan käyttöön. Myös Suomen armeija on kehittänyt omaa OHRA (OhjelmistoRadio) ohjelmistoradiotaan. Ensimmäiset versiot olivat suljettuihin ohjelmistoihin ja arkkitehtuureihin perustuvia. Sittenkin sekä ohjelmat, että arkkitehtuurit ovat siirtyneet avoimiin kaikkien muokattavissa oleviin sovelluksiin, jotka kuitenkin noudattavat yhteisiä pelisääntöjä. Juuri tämä muokattavuus on tuonut ohjelmistoradiot nykyisin myös siviilipuolelle. Sen eräänä tärkeimmistä ominaisuuksista voidaan pitää uudelleenohjelmoitavuutta. RF-osat ovat kiinteästi raudassa, mutta aallonmuotoa, amplitudia, lähetystehoa, vastaanottovahvistusta ja taajuutta voidaan ohjata ohjelmallisesti.

Ohjelmistoradio alkaa olla nykyään edullinen, koska ohjelmistoradion ostamisen jälkeen laitteen ohjelmointi uuteen käyttöön ja eri sovelluksiin on halpaa verrattuna uusiin RF laitteisiin. Toisaalta ohjelmistoradiolla ei välttämättä päästä kovin suuriin datanopeuksiin, mikäli ohjelmistoradion etuasteen kortti ei ole suunniteltu tarpeeksi suurille datanopeuksille, koska silloin modu-

lointi ja demodulointi joudutaan tekemään tietokoneella, eikä tämän hetken tietokoneet pysty moduloimaan tarpeeksi nopeasti kovin suuria tietomääriä. Ohjelmistoradioita on esimerkiksi kännykässä, jossa erilaiset protokollat voidaan hoitaa samaa RF osaa käyttäen. [4] [6]

Työssä käytetyillä tietokoneilla oli Ubuntu-Linux käyttöjärjestelmä, johon on asennettu vapaasti levitettävä GNU (GNU's Not Unix)-radiopaketti. GNU projekti on käynnistetty vuonna 1984 ja sen tarkoitus on tarjota ilmaisia ja kaikkien muokattavissa olevia UNIX-pohjaisia ohjelmia. Nykyiset ilmaiseksi jaossa olevat Linux-jakelut, kuten Ubuntu, ovat toteutettu Linux-kernelin päällä ajettavilla GNU ohjelmistoilla. [7] Itse ohjaus tapahtuu Python ohjelmointikieliselä ohjelmalla, joka linkittää C++ lohkot. Hardware laitteet ovat Ettusin valmistamia ja toimivat taajuusalueella 0-30 MHz. Lähettimen etuasteena toiminut kortti oli LFTX30M (Low Frequency TX) ja vastaanot-timen etuasteena oli LFRX30M (Low Frequency RX) kortti. Lähetystä ja vastaanottoa ohjaavien tietokoneitten komennot kirjoitetaan komentoriville esimerkiksi seuraavalla tavalla.

```
sudo python benchmark_tx.py --modulation=dbpsk -f 13.56M -r 35.714k  
--tx-amplitude=20000 --from-file=data_random.bin (lähettimelle)
```

```
sudo python benchmark_rx.py --modulation=dbpsk -f 13.56M -r 35.714k  
--rx-gain=20 (vastaanottimelle)
```

Sudo on Linuxissa käytetty komento pääkäyttäjän oikeuksien saamiseksi, - modulation tarkoittaa modulaatiota, -f kantoaallon taajuutta, -r bittinopeut-

ta, `-tx-amplitude` lähetyksen amplitudia, `-rx-gain` vastaanottimen sisääntulon vahvistusta ja `-from-file` tiedostoa, josta lähetettävä data luetaan. Lisäksi parametrinä voi olla `-s [tavua]`, joka ilmoittaa lähetettävän paketin suuruuden.

3.1 GNU-radio

GNU-radio on Eric Blossomin kehittämä USRP:tä (Universal Software Radio Peripheral) ohjaava vapaan lähdekoodin ohjelmisto, joka perustuu Python ohjelmointikieleen. GNU radion muunneltavuus perustuu erilaisiin C++:lla kirjoitettuihin signaalinkäsittelylohkoihin. Erilaiset lohkot yhdistellään Pythonin avulla ja ne määräävät USRP:lle tulevan tai lähtevän signaalin muodon. GNU radion ohjauksessa käytettiin asennuspaketissa valmiina olleita `benchmark_tx.py` ja `benchmark_rx.py` ohjelmia, joista `tx`-loppuinen lähettää dataa ja `rx`-loppuinen vastaanottaa. Komennot saavat parametreinä: kanta-aallon taajuuden, modulaation, bittinopeuden sekä amplitudin voimakkuuden. [2]

3.2 USRP

USRP on fyysinen rajapinta, joka on yhdistetty USB-kaapelilla tietokoneeseen, jossa on asennettuna GNU-radio paketit. USRP on esitetty kuvassa 3. USRP muuttaa tietokoneelta tulevan signaalin radiotaajuiseksi. Yksinkertaisimmillaan USRP sisältää taajuusmuuttajan ja ADC/DAC (Analog-to-Digital Converter / Digital-to-Analog Converter) muuntimet. ADC/DAC



Kuva 3: USRP laite. [5]

muuttaa analogisen signaalin digitaaliseksi tai digitaalisen analogiseksi. Ideaalinen USRP olisi toimiva koko radiotaajuusalueella 3 kHz:stä 300 GHz:iin ja sen vahvistus kaikilla taajuuksilla olisi sama. Käytännössä kuitenkin taajuuskaistaa on rajoitettu, koska komponenttien fysikaaliset ominaisuudet eivät riitä koko radiotaajuusalueen kattamiseen.

Testeissä käytetyissä laitteissa oli 12-bittiset ADC muuntimet ja 14-bittiset DAC muuntimet, jotka ovat kiinni koko toimintaa ohjaavassa FPGA (Field-Programmable Gate Array) prosessorissa.

3.3 Modulaatio

Kun kantaaltoa muokataan jollain ennalta sovitulla tavalla, niin, että se sisältää jotain informaatiota, sitä kutsutaan moduloinniksi. Koejärjestelyssä käytettiin DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying)- ja DQPSK (Differential Quadrature Phase-Shift Keying)-modulaatioita. Kummatkin mo-

dulaatiot kuuluvat Phase-shift keying modulaatioihin, joka tarkoittaa, että vaihe-ero kantoaallossa ilmoittaa onko bitti 0 vai 1. Phase-shift keying:ä käytetään digitaalisen informaation lähettämässä ja vaihe ero siis tarkoittaa joko ykköstä tai nollaa tai tiettyjä bittijonoja. DBPSK:ssa bitti 1 ilmoitetaan 180° vaihe-erolla ja bitti 0 0° erolla. DQPSK:ssa taas ilmoitetaan kaksi bittiä kerrallaan ja ero saadaan 90° vaihe-erolla.

3.4 Bittinopeus

Bittinopeus ilmoittaa kuinka monta bittiä voidaan lähettää sekunnissa. Bittinopeus riippuu kantoaallon taajuudesta, häiriöistä ja lähettimen kyvystä tuottaa tarpeeksi selkeää signaalia kyseisellä bittinopeudella ja vastaanottimen kyvystä erottaa signaali muusta häiriösignaaleista ja kohinasta. Hyötyinformaation bittinopeuteen vaikuttaa myös virheenkorjauksessa käytettävät koodaukset joihin palataan myöhemmin.

4 Bit error ratio (BER) ja signaalin kohinasuhde (SNR)

4.1 BER

BER:ä käytetään ilmoittamaan virheellisten bittien määrää vastaanotetussa datapaketissa suhteessa lähetettyjen bittien määrään. Kaapelin pituus vaikuttaa BER-arvoon ja kaapelivaimennus on taajuuden funktio. Kaapeli on häviöllinen komponentti, jolloin signaali vaimenee siinä kulkiessaan taajuuden funktiona. Myös kaapelin suojaus muilta häiriöiltä vaikuttaa BER-arvoon, koska kaapeliin indusoituvat virrat ja taustakohina aiheuttavat myös häiriöitä ja huonontavat signaalin kohinasuhdetta. BER:llä ei ole yksikköä, mutta se voidaan ilmoittaa esimerkiksi prosenteissa tai muuna suhdelukuna.

4.2 Signaalin kohinasuhde

Signaalin kohinasuhde ilmoittaa hyötysignaalin suhteen häiriötä ja vaimennusta aiheuttavaan kohinaan, jota on kaikissa kaapeleissa ja ylipäättään elektroniikassa. Lisää kohinaa voi tulla esimerkiksi kaapelin lähellä olevasta sähkölaitteesta indusoitumalla tai kapasitiivisesti kytkeytymällä. Tässä työssä merkittävimmän kohinan aiheuttaa kaapeliin ja tiedonsiirtokanavaan vaihtosuuntaaja ja siihen kytketyt kuormat. Signaalin kohinasuhde on parempi, mitä suurempi sen arvo on. Signaalin kohinasuhde voidaan laskea yhtälöllä 1,

jossa P_{signaali} on signaalin teho ja P_{kohina} on kohinateho.

$$SNR = \frac{P_{\text{signaali}}}{P_{\text{kohina}}} \quad (1)$$

4.3 Bittinopeuden vaikutus BERin

Yhtä kantaalta käytettäessä, bittinopeuden nosto laajentaa tehospektriä kantaallon ympärillä ja näin ollen teho bittiä kohden vähenee. Tehon vuotaminen kantaallon ympärille näkyy bittien ja kokonaisten pakettien huompana perille pääsemisenä. Tehospektrin laajeneminen johtuu siitä, että symbolin kesto aika kaapelissa pienenee, kun bittinopeutta nostetaan, jolloin bitin katoaminen on todennäköisempää.

4.4 Konvoluutiokoodaus

Konvoluutiokoodauksella on tarkoitus parantaa hyödyllisen informaation löytymistä signaalin seasta. Konvoluutiokoodaus perustuu kahden tai useamman bitin lähettämiseen per databitti, että saataisiin lähetettyä yksi bitti ja mahdollisessa virhetilanteessa korjaamaan satunnaiset virheet datassa. Tässä työssä käytettiin 2-bittistä konvoluutiokoodausta, joka pystyy korjaamaan vain yhden virheellisen bitin kahden virheettömän bitin välistä. $1/2$ -konvoluutiokoodattu informaatio vie kaksi kertaa enemmän bittejä kuin koodaamaton informaatio. Tehdyissä mittauksissa lähetettävä data on koodattu Matlab:lla ja lähetetty ohjelmistoradiolla samalla lailla, kuin koodaamatonkin data. Konvoluutiokoodauksen lisäksi käytettiin lomitusta, jossa sananpi-

tuus oli 32-bittiä ja kahden peräkkäisen bitin välinen etäisyys minimissään 7-bittiä, jolloin pystytään korjaamaan peräkkäiset virheet datassa. Vastaanotettu data on sitten purettu Matlab:lla käyttäen datanlomitusta ja siitä on laskettu BER-arvo. Mittauksissa ohjelmistoradio oli tiedonsiirron tutkimisen työkaluna ja koodaus, koodauksen purku ja lomitusta tehtiin tietokoneella Matlab-ohjelmistolla. Vaihtosuuntaajan kytkeminen aiheuttaa virhepurskeita kanavaan ja se vaikuttaa myös suoraan virhebitteihin.

5 Mittaukset

Työssä tutkittiin PLC-tekniikan toimivuutta LVDC-pilot järjestelmässä. Tiedonsiirron testituloksia analysoitiin BER:n ja lähetysenergian suhteena. Mittaukset tehtiin kahdella eri modulaatiolla DBPSK ja DQPSK. Lisäksi kummallakin modulaatiolla lähetetyt paketit olivat, joko konvoluutiokoodattuja ja lomitettuja tai koodaamattomia.

Koekytkentään kuului, kaksi ohjelmistoradiota, lähetin ja vastaanotin sekä niitä ohjaavat tietokoneet. Mittausten edetessä toinen ohjelmistoradioista hajosi ja loput mittaukset tehtiin yhdellä tietokoneella ja ohjelmistoradiolla, jossa oli sekä lähetin- ja vastaanotinpiirikortti. Ohjelmistoradiolla tehtiin seuraavat kytkennät:

- Lähetys nollajohdoissa:
 1. DBPSK 35.714k bittinopeudella tasasuuntaajalta invertterille ja invertteriltä tasasuuntaajalle
 2. DQPSK 71.428k bittinopeudella tasasuuntaajalta invertterille ja invertteriltä tasasuuntaajalle

Tasasuuntaajalta vaihtosuuntaajalle tehdyissä mittauksessa vastaanoton vahvistus oli täydellä teholla ja vaihtosuuntaajalta tasasuuntaajalle puolet täydestä vahvistuksesta. Kummassakin mittauksessa oli 1.7 kW:n testikuormitus päällä.

- Lähetys jänniteisessä- ja nollajohdossa:

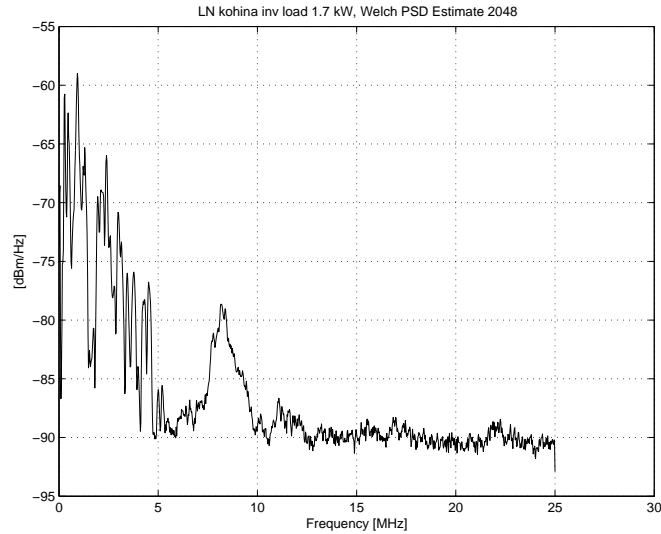
1. DBPSK 35.714k bittinopeudella tasasuuntaajalta invertterille
2. DQPSK 71.428k bittinopeudella tasasuuntaajalta invertterille

Vastaanoton vahvistus oli täydellä teholla siirrettäessä dataa vaihtosuuntaajalta tasasuuntaajalle ja tasasuuntaajalta vaihtosuuntaajalle.

Lisäksi 1.7 kW:n testikuormitus oli päällä.

Vaihtosuuntaaja ja tasasuuntaaja olivat kytkettyinä noin 200 metrin pituisella neljäjohtimisella AXMK-kaapelilla, joka myös muodosti tiedonsiirtokanavan ja tämän kanavan päihin kytkettiin myös ohjelmistoradiot.

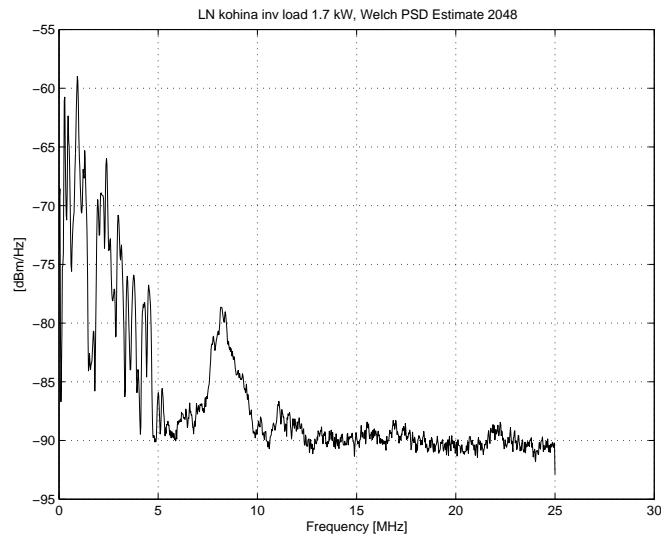
Lähetettävä data on täysin satunnaisia bittejä. Paketin koko oli, joko 12000 bittiä koodaamattomassa paketissa tai 24000 bittiä koodatussa paketissa. Paketteja lähetettiin 240 kappaletta. Kaapelista mitattiin oskilloskoopilla kohina ja signaalin muoto vaihtosuuntaajan ja tasasuuntaajan päästä 1.7 kW:n kuormitustilanteessa. Ohjelmistoradiot asetettiin 13.56 MHz kantoaaltotaajuudelle. Kantoaaltotaajuus 13.56 MHz on valittu siksi, koska se on vapailla ISM-taajuuksilla, joita saa käyttää ilman ilmoitusta viranomaisille. Lisäksi se on tarpeeksi suuri käytetyn datanopeuden siirtämiseksi ja kohinataso kyseisellä taajuudella on hyvin pieni vaikka kuorma olisi päällä, kuten kuvasta 4 näkyy. Muuttuvat parametrit olivat modulaatio, lähetyksen bittinopeus sekä lähetettävän signaalin amplitudi. Aluksi mitattiin kaapelissa BER, kun tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja eivät olleet päällä. Sen jälkeen 1.7 kilowatin kuorman kanssa.



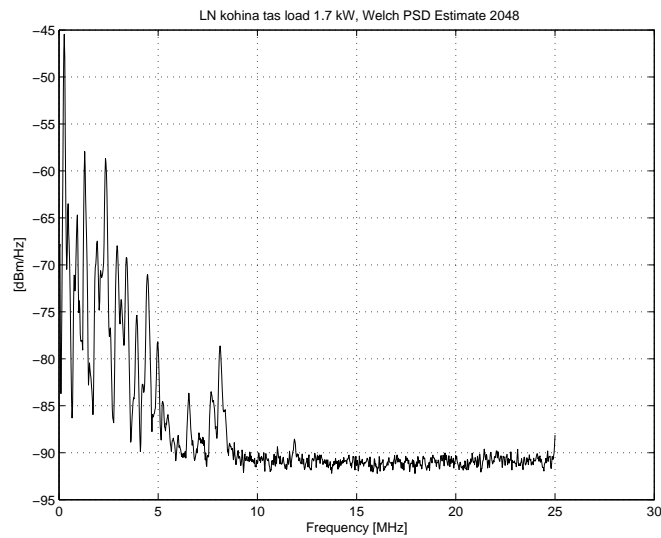
Kuva 4: Invertterin päästä ilman kytkentäraajapintaa mitattu kohina LN-kytkennällä ja 1.7 kW:n kuormituksella.

5.1 Kaapelin kohina ja häiriöt

Kaapelin kohinatehoitiheys mitattiin, kun invertteri, tasasuuntaaja ja 1.7 kW:n kuorma olivat kytkettyinä. Mittaukset tehtiin sekä invertterin ja tasasuuntaajan päästä, L ja N johtojen väliltä. Lisäksi samat mittaukset tehtiin myös NN-kytkennälle. Ohjelmistoradiota suojaavat rajapinnat olivat poissa mittausten aikana, joten niistä ei ole tullut vaimennusta kuvaajiin. Saadusta tuloksista määritettiin Matlabilla Welchin funktion avulla PSD (Power Spectral Density) ja kuvasta 5 nähdään, että invertterin päästä otetussa mitauksessa on kohinatehoitiheys suurempi, kuin tasasuuntaajan päästä otetussa kuvaajassa, kuva 6. Invertterin kohina aiheuttaa noin $-90 \frac{dBm}{Hz}$ kohinatehoitiheyden, kun taas tasasuuntaajan päästä mitattuna se jää hieman alle $-90 \frac{dBm}{Hz}$ käytetyllä taajuudella 13.56 MHz.



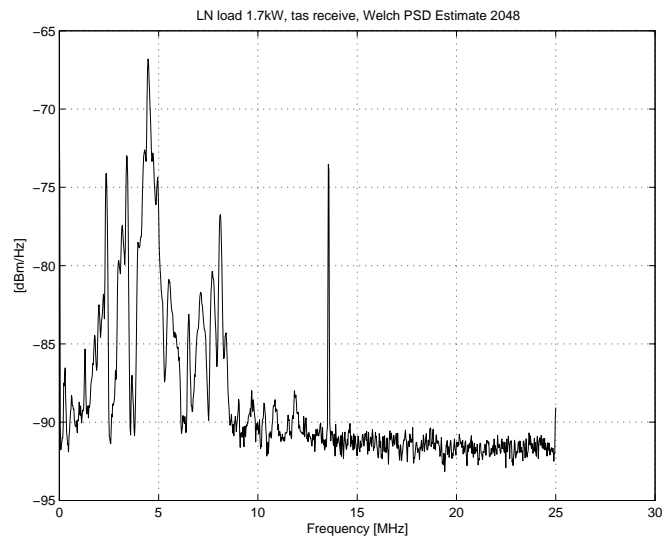
Kuva 5: Invertterin päästä ilman rajapintaa mitattu kohina.



Kuva 6: Tasasuuntaajan päästä ilman rajapintaa mitattu kohina.

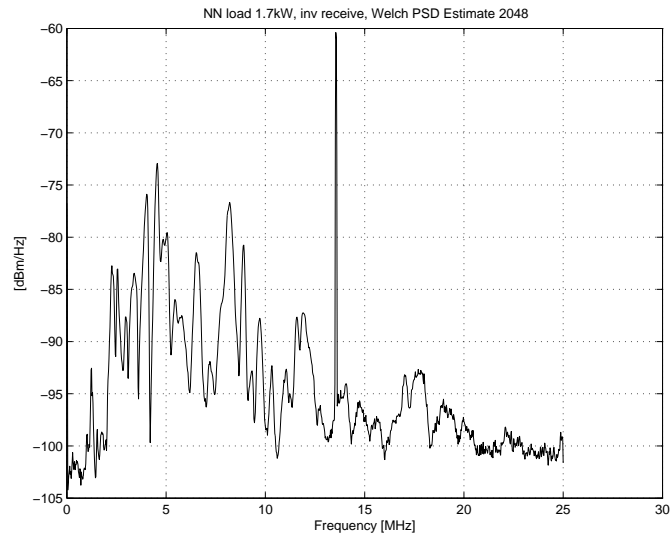
Myös kaapelin eritaajuiset häiriöt mitattiin, kun lähetin lähetti dataa vastaanottimelle 13.56 MHz:n taajuudella, DBPSK-modulaatiolla ja 35.714 kbit/s bittinopeudella 1.7 kW:n kuormaan. Nämäkin mittaukset tehtiin tasa- ja

vaihtosuuntaajan päästä sekä NN- ja LN-kytkennöillä. Vertailemalla kuvia 7 ja 8 sekä 9 ja 10 nähdään, että kohinataso on pienempi NN-kytkennöissä. Tämä johtuu siitä, että plus ja miinus johdoissa oleva jännite aiheuttaa enemmän häiriöitä kaapeliin, kuin jännitteettömät nollajohtimet. Kuvista 7 ja 8

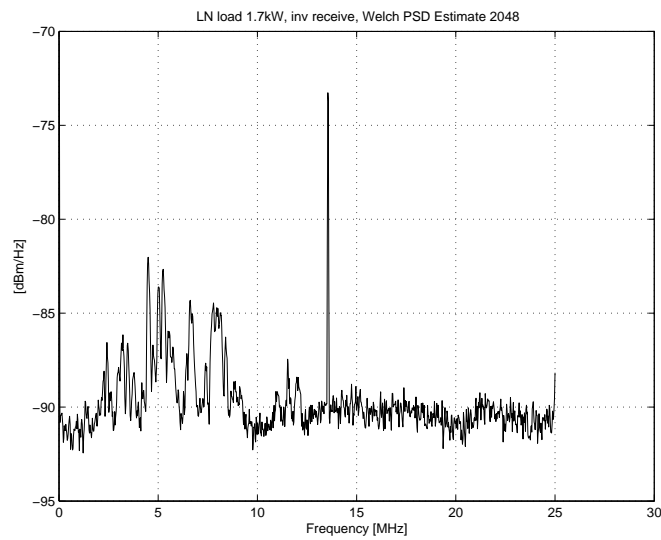


Kuva 7: Lähetyksen ollessa päällä invertterin päässä näkyvä kohinatiheys LN-kytkennällä.

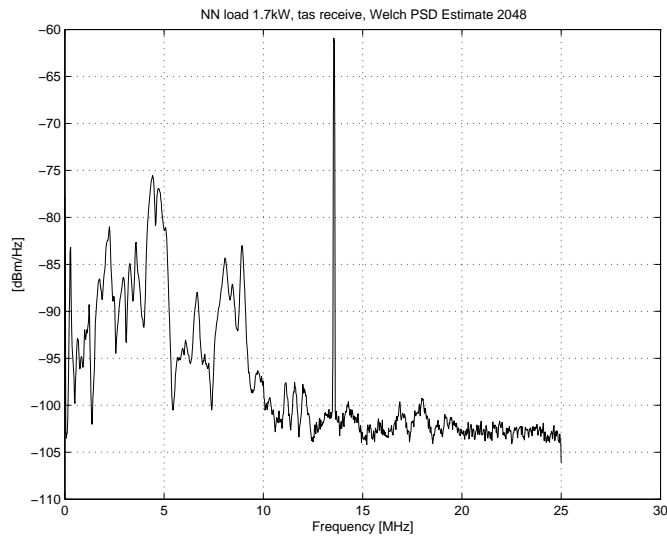
nähdään, että invertteri aiheuttaa suurempia häiriöitä, kuin kuvissa 9 ja 10 oleva tasasuuntaaja. 13.56 MHz:n kohdalla näkyy spektriipiikki, joka on juuri se taajuus, jolla informaatiota lähetetään.



Kuva 8: Lähetyksen ollessa päällä invertterin päässä näkyvä kohinatiheys NN-kytkennällä.



Kuva 9: Lähetyksen ollessa päällä tasasuuntaajan päässä näkyvä kohinatiheys LN-kytkennällä.



Kuva 10: Lähetyksen ollessa päällä tasasuuntaajan päässä näkyvä kohinatiheys NN-kytkennällä.

5.2 BER bittinopeuden suhteen

Kuten jo aikaisemmin on mainittu bittinopeuden nosto kasvattaa BER:ä. Ilman sähköjä mitatuista arvoista DQPSK modulaatio näyttäisi taulukossa 1 olevan huomommin erotettavissa, kuin DBPSK modulaatio, joka on odotettua koska neljä tilaa kuvaavasta modulaatiosta informaatio on vaikeammin erotettavissa, kuin kahdella muutoksella kuvaava. Konvoluutiokoodauksesta näyttäisi myös olevan apua tiedonsiirrossa, niin kuin pitäisi olla teoriassakin. Eräs syy DBPSK:n ja DQPSK:n välisiin eroihin saattaa olla se, että amplitudit oli kaikissa näissä mittauksissa DBPSK:lla noin 60 % ja DQPSK:lla noin 92 % maksimi amplitudista. Näin korkea amplitudin voimakkuus DQPSK:lla aiheuttaa todennäköisesti säröytymistä ja huonontaa BER:ä.

Koodamaton

Modulaatio	DBPSK	DQPSK
35.714k	0.0162	
71.428k	0.0102	0.0335
100k	0.0052	0.0352

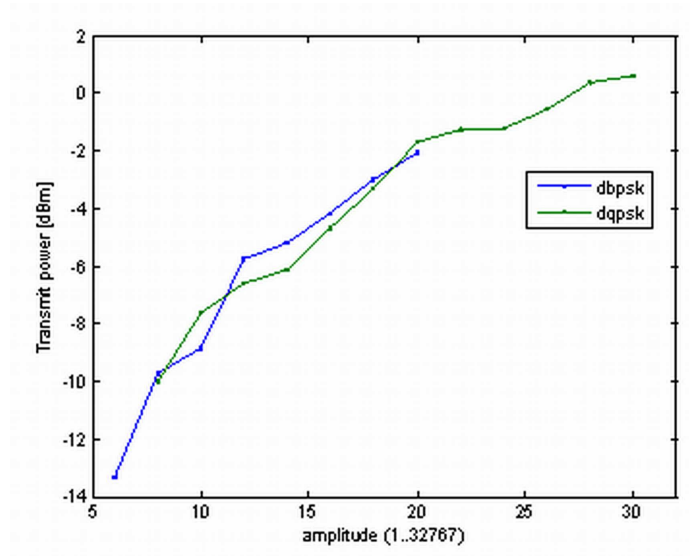
konvoluutiokoodattu

Modulaatio	DBPSK	DQPSK
35.714k	0.0135	
71.428k	0.0051	0.0347
100k	0.0040	0.0449

Taulukko 1: BER-arvot eri bittinopeuksilla ja modulaatioilla

5.3 BER-arvot verrattuna signaalin kohinasuhteeseen.

BER amplitudin funktiona ilmoitetaan siten, että amplitudi on aluksi suurimmalla mahdollisella arvolla, ennen kuin se säröytyy ja sitä lasketaan sopivilla askelmilla niin paljon, että kohina melkein peittää signaalin. Ohjelmistoradiossa amplitudin voimakkuus on määritelty lähetyksessä 0 ja 32768 välille. Normaali asetuksena on puolet amplitudin maksimista, mutta tässä työssä DBPSK:lla käytettiin suurimpana arvona 20000, koska se oli aiemmissa mittauksissa havaittu suurimmaksi amplitudiksi, ennen kuin signaali alkoi säröytyä. Kuvasta 11 nähdään miten amplitudin nosto kasvattaa lähetyksen voimakkuutta. Mittauksissa amplitudia vähennettiin joka mittauksella 2000 verran aina 6000 asti, jolloin vastaanotettuja paketteja oli alle puolet lähetetyistä. DQPSK:lla kokeellinen amplitudi maksimi oli 30000 ja sitäkin



Kuva 11: Amplitudin vaikutus lähetystehoon.

vähennettiin 2000 välein 6000 asti.

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR \cdot \frac{\text{kaistanleveys}}{\text{datanopeus}} \quad (2)$$

Signaalin kohinasuhde on esitetty yhtälössä 2, jossa E_b on yhtä pakettia kohden lähetetty energia normalisoituna N_0 signaalin kohinasuhteella. Kaapelin tuottama häiriö mitattiin kanta-aallon 13.56 MHz lähetyskaistanleveydelle oskilloskoopilla ja siitä laskettiin häiriöteho yhtälön 3 avulla,

$$P_N = 10 \cdot \log \left(\frac{10^{\frac{-\text{kohina[dB]}}{10}} \cdot \text{kaistanleveys}}{1mW} \right) \quad (3)$$

jossa P_N on häiriöteho desibeleissä, kohina desibeleissä ja lähetyskaistan leveys hertseinä. Lopuksi tulos muutetaan, eli normalisoidaan desibeleiksi mil-

liwattia kohti [dBm].

Signaalin kohinasuhde lähetyskaistan 13.56 MHz:n ympärillä saadaan yhtiöstä 4 vähentämällä lähetystehosta P_{tx} kanavavaimennus P_{att} ja häiriöteho P_N .

$$SNR = P_{tx} - P_{att} - P_N \quad (4)$$

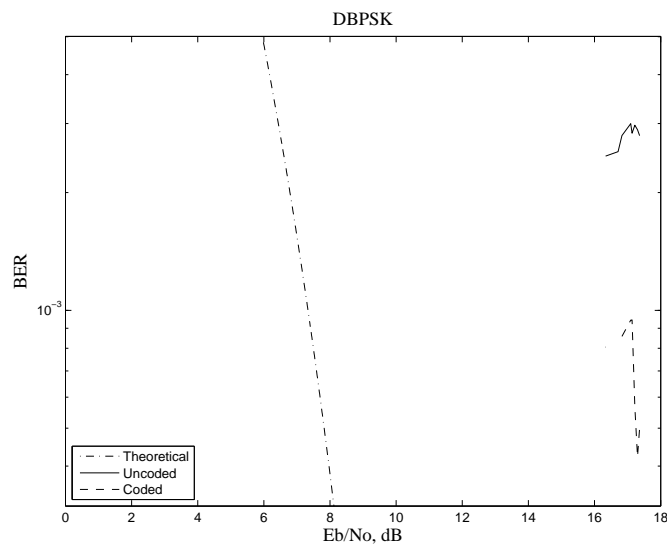
Lähetystehot ohjelmistoradiosta on mitattu aikaisemmin eri amplitudien voimakkuuksilla ja saatuja tuloksia käytettiin myös tässä työssä. Myös kanavavaimennukset mitattiin ja vaimennuksen arvot olivat 13.56 MHz:n kantoaaltoaajuudella LN-kytkennälle -15.7 dB:ä ja NN-kytkennälle -12.5 dB:ä.

Mittauksia tehdessä havaittiin, että invertterin aiheuttamat purskeet kaapeliin ja radioihin saivat vastaanotetun datan pois synkronista verrattuna lähetettyyn dataan. Tämä ongelma näytti alkavan, kun LVDC-laitteisto ja kuorma olivat päällä ja amplitudia pienennettiin. Vastaanotin teki siis tulokintavirheitä ja paketin kooksi tuli muutamia tavuja suurempi, kuin lähetyksessä käytetty 1500- tai 3000 tavun paketti.

Dataa jouduttiin siivoamaan tätä varten tehdyllä ohjelmalla, joka poisti ylimääräiset bitit paketista ja palautti yhtäaikaisuuden lähetetyn ja vastaanotetun paketin välille. Sen ei kuitenkaan ollut tarkoitus poistaa yksittäisiä virhebittejä vastaanotetusta paketista, joten se oli tehty niin, että se löysi sen kohdan, kun joka ikinen tavu, vertaillen lähetettyä ja vastaanotettua pakettia, oli väärä yhtäaikaisuuden hävitessä.

Kun BER ja $\frac{E_b}{N_0}$ tiedetään, voidaan piirtää kuvaajat, joista nähdään amplitudin ja koodauksen merkitys virheitten määrään datan lähetyksessä. Kuvassa

12 on LN kytkennällä, DBPSK:lla mitatut arvot. Lähetin oli tasasuuntaajan ja vastaanotin vaihtosuuntaajan päässä. Vertaamalla sitä kuvaan 13, nähdään, että NN-kytkennällä saadaan pienempiä BER-arvoja koodatulla ja koodaamattomalla datalla. Tästä voidaan päätellä, että signaalin siirto kannattaa tehdä mieluummin nollajohtimissa, kuin ± 750 VDC ja N-johdon välillä. Kuvaaajissa on myös piirrettyä ideaalinen BERin suhde normalisoi-



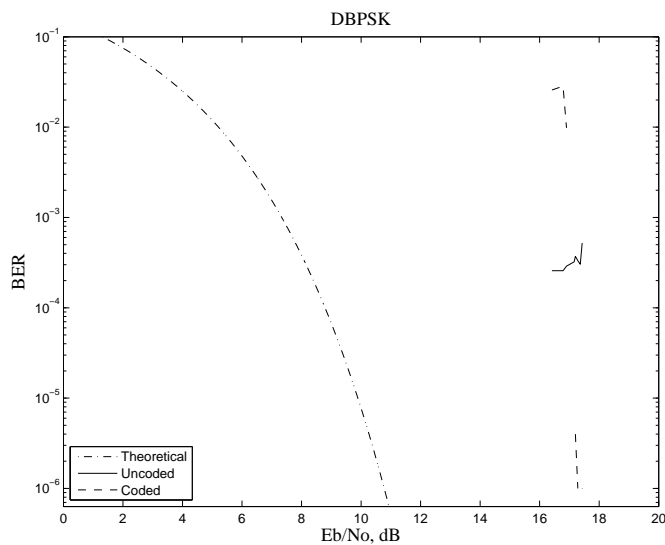
Kuva 12: BER vs. SNR LN DBPSK 35.714k tasasuuntaajalta invertterille.

dun signaalinkohinasuhteen funktiona, joka saadaan yhtälöstä 5, jossa M on modulaatiossa vaihe-eroja kuvaavien tilojen määrä, eli DBPSK:lla 2 ja DQPSK:lla 4.

$$P_b = \frac{1}{\log M} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\sin \frac{\pi}{M} \sqrt{\log_2(M)} (SNR)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (5)$$

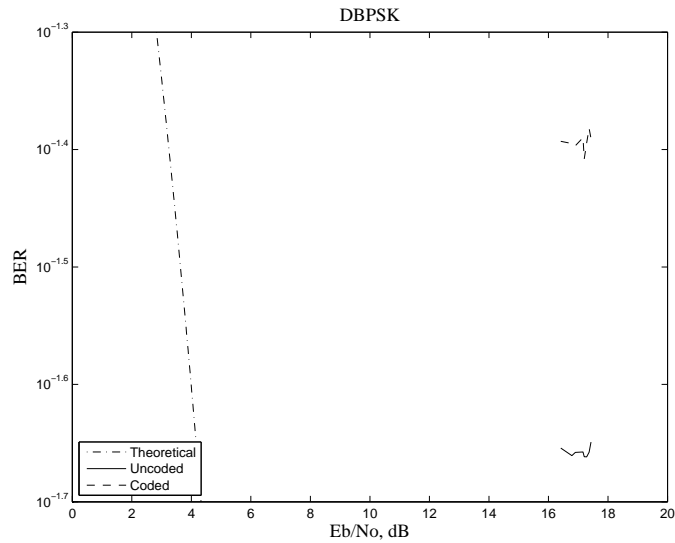
Kuvasta 12 nähdään, että koodaamattoman signaalin BER ei juuri muutu SNR:n vaikutuksesta. Tämä voi johtua siitä, että LVDC-laitteiston aiheuttamat häiriöt summautuvat jollain tietyllä taajuudella signaaliin, joka tu-

hoaa informaation tietyltä ajanhetkeltä signaalin amplitudista riippumatta. Lisäksi pienemmillä amplitudin arvoilla BER on suurempi, kuin 0.5, josta ei voida tehdä johtopäätöksiä. Joka tapauksessa amplitudin laskeminen ei juuri näytä vaikuttavan koodaamattoman signaalin BER-arvoon. Koodatussa signaalissa BER näyttää laskevan amplitudin kasvaessa, joskin vasta melko suurilla amplitudin voimakkuuksilla verrattuna ideaaliseen käyrään. Tämä johtuu todennäköisesti invertterin aiheuttamista häiriöistä. Kuvissa 13 ja 14 on sama tilanne, kun edellisessäkin, mutta tieto siirtyy tällä kertaa nollajoh-
timissa. Koodaamattoman datan BER näyttää olevan tässäkin tapauksessa



Kuva 13: BER vs. SNR NN DBPSK 35.714k tasasuuntaajalta invertterille.

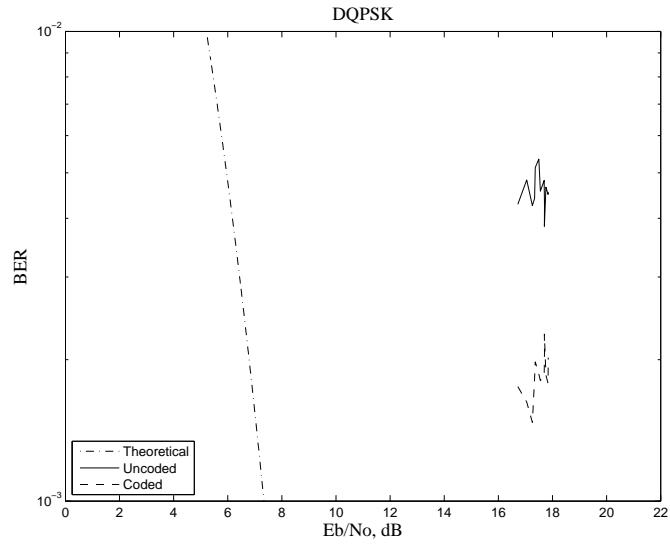
melko pienellä alueella. Koodattu data näyttää noudattavan osin ideaalista käyrää, mutta BER-arvo huononee merkittävästi puolessa välissä mittauksia. Tämä johtuu siitä, ettei koodaus ole tarpeeksi tehokas niin pienillä amplitudin arvoilla. Kuvassa 14 amplitudin nosto ei juuri vaikuta koodatun tai koodaamattoman datan BER:iin. Kuvan 14 mittauksissa vastaanotossa oli



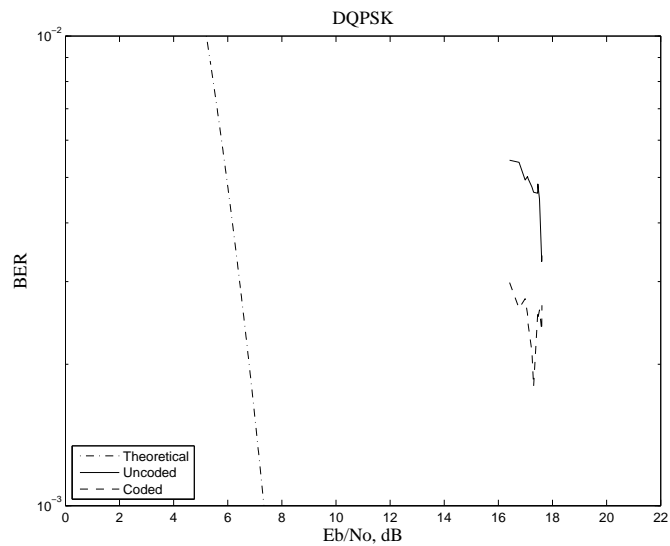
Kuva 14: BER vs. SNR NN DBPSK 35.714k invertteriltä tasasuuntaajalle.

vakio vahvistus päällä, eli puolet maksimista. Tämä saattaa osaltaan selittää kuvaa 14, jonka tulokset eivät ole odotetunlaisia. Tuloksissa on melko pieni hajonta, eikä koodattu datakaan näytä tuottavan amplitudin funktiona laskevaa käyrää. Vastaanoton vahvistuksella on siis merkitystä datan virheitten määrään.

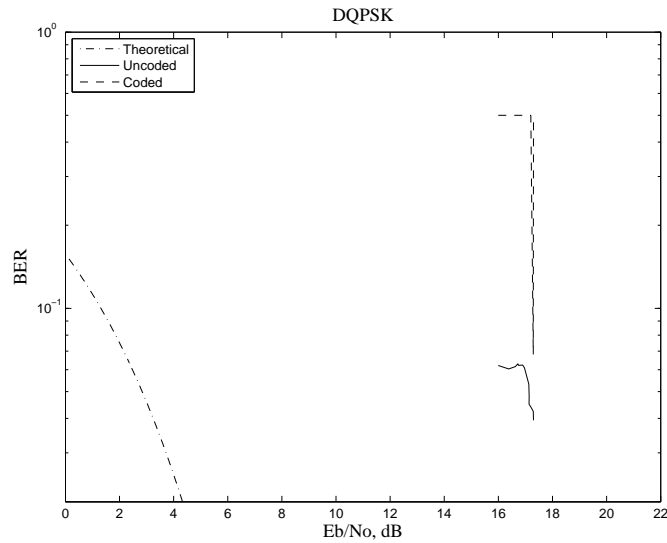
Kuvassa 15 BER-arvot näyttävät olevan melko samalla tasolla amplitudin voimakkuudesta riippumatta. Kuvassa 16 BER näyttää laskevan amplitudin voimakkuuden funktiona ja koodatun datan BER on jälleen pienempi, kuin koodaamattoman. Kuvassa 17 on todennäköisesti mittausvirhe. Vastaanoton voimakkuus oli puolet maksimista ja ilmeisesti hyötyinformaatio katosi lähes täysin, koska koodaamaton ja koodattu BER ovat yli 0.5, eli yli puolet paketeista katoaa matkalla.



Kuva 15: BER vs. SNR LN DQPSK 71.428k tasasuuntaajalta invertterille.



Kuva 16: BER vs. SNR NN DQPSK 71.428k tasasuuntaajalta invertterille.



Kuva 17: BER vs. SNR NN DQPSK 71.428k invertteriltä tasasuuntaajalle.

Tehdyistä testeistä havaittiin, että DBPSK:lla saatiin pienempiä BER-arvoja, kuin DQPSK:lla ja NN-kytkennällä tehdyissä mittauksissa oli pienemmät BER-arvot, kuin LN-kytkennöillä tehdyillä kytkennöillä. Amplitudin voimakkuudella oli merkitystä vastaanottimen virheitten määrään, koska invertterin virhepurskeet matalilla amplitudin arvoilla laskivat signaalin kohinasuhdetta niin paljon, että informaatiota katosi. Käytetty koodaus ei myöskään toiminut enää pienillä amplitudin arvoilla. Tästä voidaan päätellä, että koodauksen tulisi olla parempi, kuin mittauksissa käytössä ollut konvoluutioon koodaus ja lomituss. Näissä testeissä lähetettiin vain raakadataa ilman kehysrakennetta. Protokollan käytöllä olisi suuri merkitys virheitten käsittelyssä näin häiriöllistä tehoelektroniikkaa sisältävässä sovelluksessa.

6 Yhteenveto

Mittauksista saadut tulokset olivat osin ristiriitaisia. Esimerkiksi suuremman datanopeuden pitäisi lisätä häviävien pakettien määrää, mutta niin ei käynyt, kun amplitudi pidettiin samana. Taulukossa 1. BER-arvo pienenee, eli paketteja katoaa vähemmän, kuin siirrettäessä dataa suuremmalla bittinopeudella. Syy parempaan BER-arvoon saattaa olla joku ulkopuolinen häiriölähde, joka tuhoaa vakioaikavälein osan paketeista. Suurempi bittinopeus kasvattaa siten perille päässeitten bittien määrää, koska häiriöttömällä aikavälillä ehtii mennä enemmän bittejä, kuin pienemmällä bittinopeudella.

Toisaalta BER vs. SNR kuvaajat noudattivat osittain ideaalisen käyrän muotoa DBPSK modulaatiolla ja LVDC-laitteiston ollessa käynnissä ja kuormitettuna. DQPSK:lla saaduista tuloksista BER:n suhteen suurin osa oli hie-man suppeammalla alueella ja tulokset eivät noudattaneet ideaalisesti laskevaa käyrää niin hyvin, kuin DBPSK:lla, mutta niissäkin havaittiin koodauksen merkitys. Protokollan puuttuminen siis aiheuttaa virheitä informaatioon eikä lähetys ja vastaanotto ole enää tällä koejärjestelyllä luotettavaa mikäli jotakin virheitä havaitsevaa protokollaa tai kehysrakennetta ei käytetä.

Mittaustuloksissa oli myös normaalien virhebittien lisäksi LVDC-laitteiston purskeista aiheutuvia ylimääräisiä bittejä, jotka tulivat ilmeisesti vastaanottopäässä ohjelmistoradiossa tapahtuneiden virhetulkintojen takia. Ylimääräisiä bittejä alkoi tulla, kun lähetyksen amplitudia laskettiin riittävästi. Virheitä saatiin poistettua osaksi ohjelmalla, joka vertaili lähetettyä ja vastaanotettua pakettia. Ohjelma hyväksyi 10 peräkkäistä virhebittiä ja mikäli virhei-

tä oli enemmän, oli oletettu yhtenäisyyden kadonneen ja ohjelma alkoi etsiä lähetetystä ja vastaanotetusta datasta yhtenäistä dataa. Jotkin paketit tosin pienuivat melko oleellisesti alkuperäisestään, mutta heksadesimaalieditorilla silmämääräisesti katsottuna näissä tiedostoissa alkuperäisen ja vastaanotetun tiedoston yhtäaikaisuus oli melko olematon.

Vastaanoton ollessa invertterin päässä BER on kaikissa kuvaajissa huonompi, kun toiseen suuntaan. Syy siihen on siinä, että invertterin elektroniikka tyristoreineen ja niitten liipaisut aiheuttaa enemmän häiriöitä, kuin tasa-suuntaajassa olevat diodit. Lisäksi invertterin kuormitus vaikuttaa kanavan kohinatasoon merkittävästi. BER-arvoista päätellen pienellä bittinopeudella toimiva DBPSK modulaatio on virheettömämpi, kuin kaksinkertaisella bittinopeudella toimiva DQPSK ja koodaus parantaa tuloksia vielä entisestään.

7 Lähdeluettelo

- [1] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4758028&isnumber=4757911>
- [2] <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/123224888/PDFSTART>
- [3] Kaipia T., Lassila J., Salonen P., Partanen J: Distributed Generation in DC Distribution System. CIRED 2007 Session 5, Paper No 0385, 19th International Conference on Electricity Distribution. Vienna, 21-24 May 2007.
- [4] Kaipia T., Salonen P., Lassila J., Partanen J: Possibilities of the Low Voltage DC Distribution Systems
- [5] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4472763>
- [6] Osmo Bäckman, Veli-Pekka Solonen, Heikki Mattila: Ohjelmistoradio
- [7] http://blog.arsln.org/wp-content/uploads/gnur_01.jpg
- [8] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4481354>
- [9] <http://www.gnu.org/>