

Ryhmä 19

Enna Augustin 050235634

Laboratorio-osuuden työselostus

COMM.100

Tietoliikennetekniikan perusteet

Syksy 2021

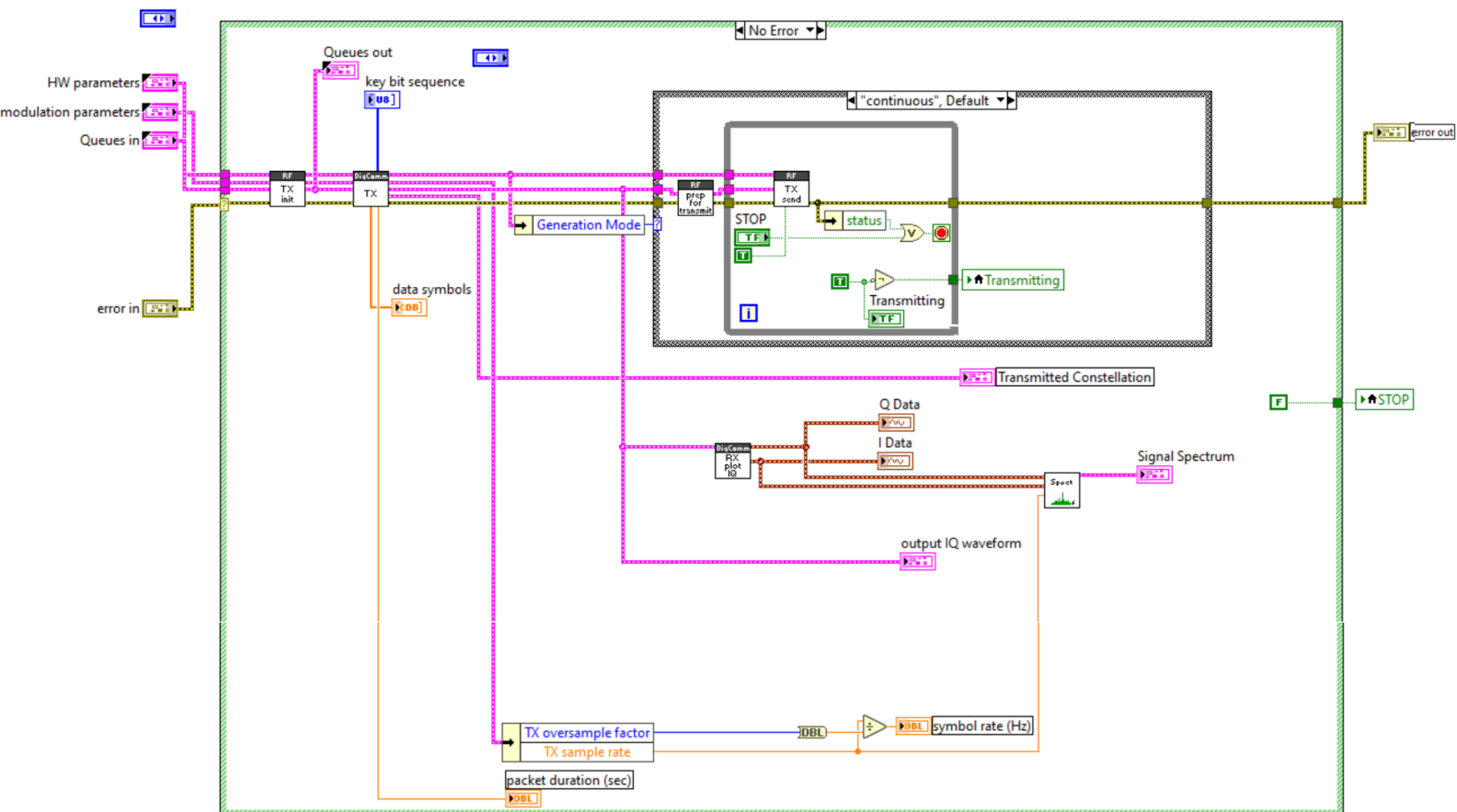
1 Sisällys

2	Tiedonsiirtojärjestelmän ohjelmiston toiminta.....	1
2.1	Tehtävä 2.1	1
2.2	Tehtävä 2.2	2
2.3	Tehtävä 2.3	3
3	Tiedonsiirtojärjestelmän parametrit ja suorituskyky	5
3.1	Tehtävä 3.1	5
3.2	Tehtävä 3.2	5
3.3	Tehtävä 3.3	6
3.4	Tehtävä 3.4	6
3.5	Tehtävä 3.5	6
4	Kohina.....	7
4.1	Tehtävä 3.6	7
4.2	Tehtävä 3.7	7
4.3	Tehtävä 3.8	9
5	Signaali-kohinasuhteen vaikutus bittivirheiden määrään	11
5.1	Tehtävä 3.9	11
5.2	Tehtävä 3.10	11
5.3	Tehtävä 3.11	12
6	Tiedonsiirtojärjestelmän linkkibudjetti	13
6.1	Tehtävä 4.1	13
	Lähteet.....	14

2 Tiedonsiirtojärjestelmän ohjelmiston toiminta

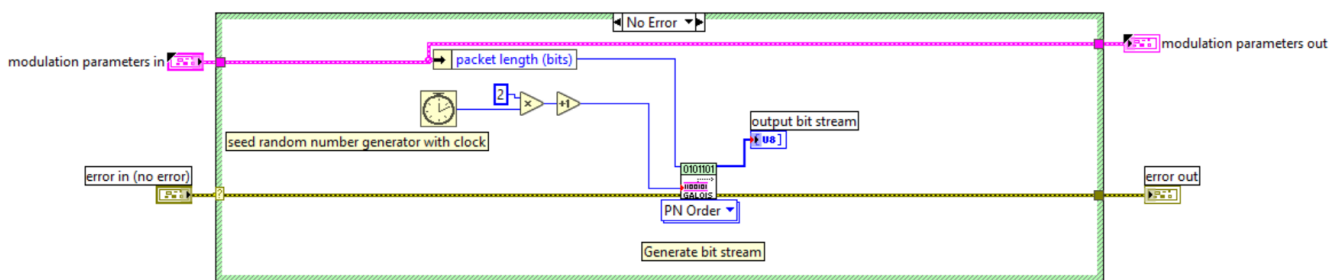
2.1 Tehtävä 2.1

Kuvassa 1 on esitettyä tutkittavan USRP-radiolaitteiston lähetinlohkon lohkokaavio.



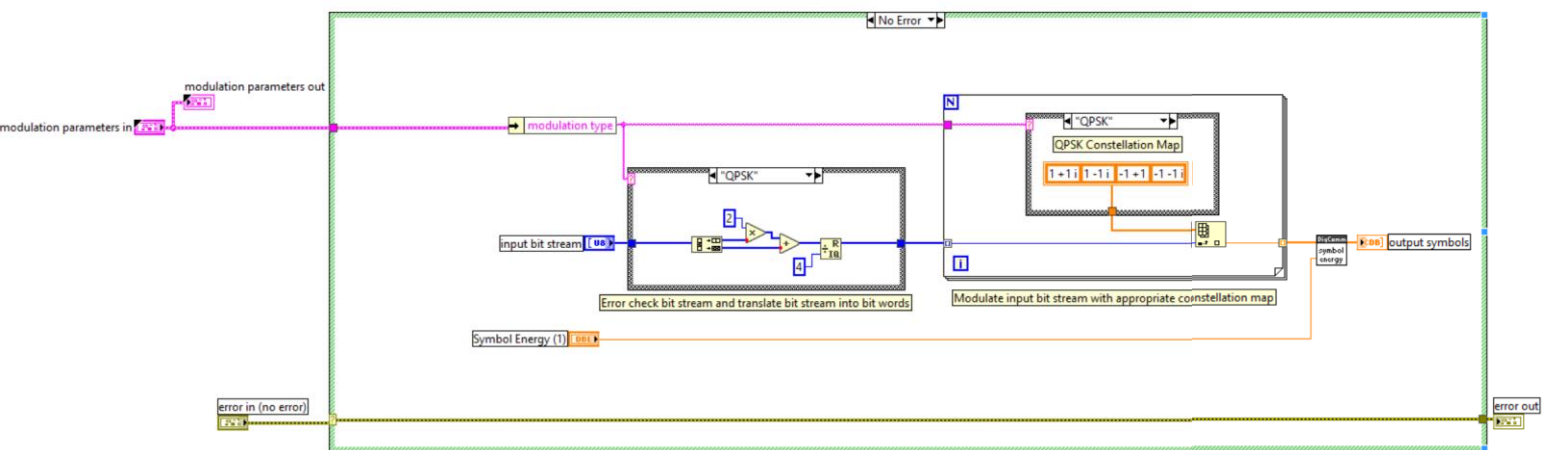
Kuva 1 Lähetinlohkon lohkokaavio

Tutkittavan järjestelmän lähetinlohkon lohkokaaviosta informaatiolähde ja modulaatiolohko löytyvät alilohkosta "transmitter" (TX). Informaatiolähteen lohkokaavio on esitettyä kuvassa 2.



Kuva 2 Informaatiolohkon lohkokaavio

Modulaatiolohkon lohkokaavio on esitetty kuvassa 3.

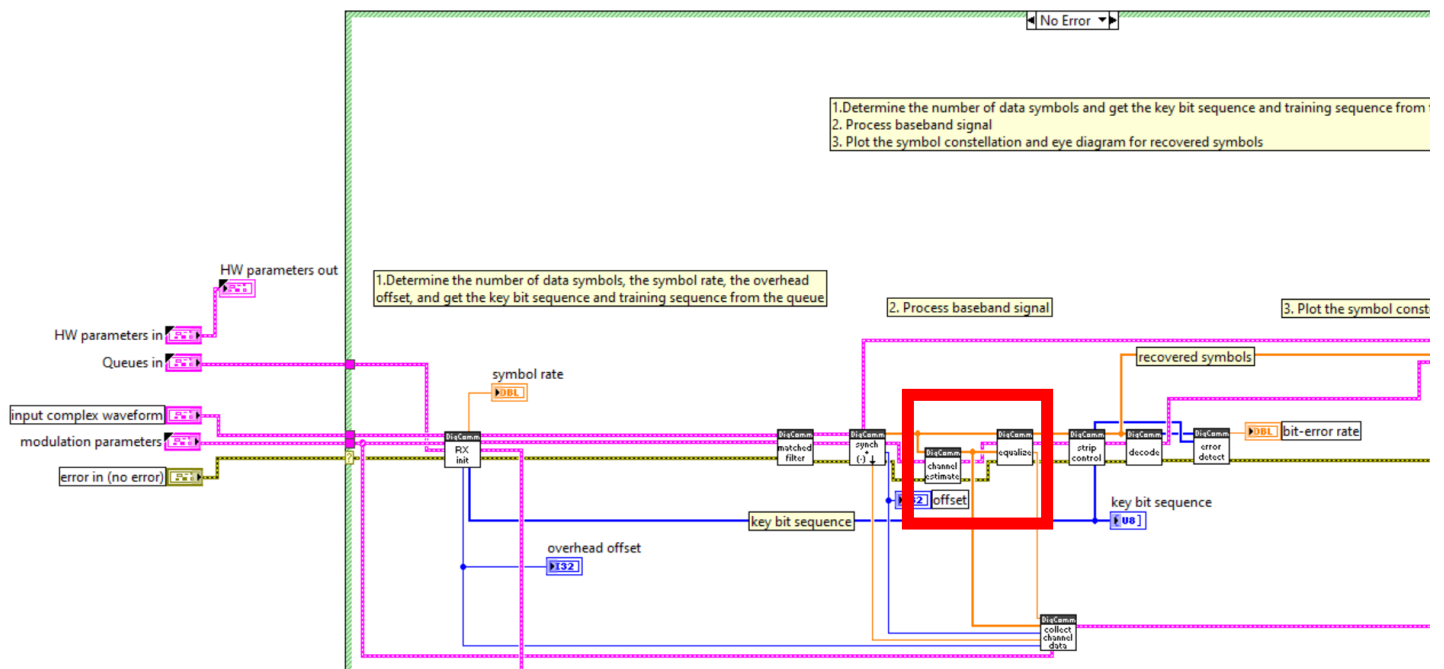


Kuva 3 Modulaatiolohkon lohkokaavio

Modulaatiossa bitit kuvataan symboleiksi ja lähetettävä data saatetaan analogiseen aaltomuotoon radiotaajuuksille.

2.2 Tehtävä 2.2

Lähetetty signaali kulkee ensimmäisen laitteen lähettimen ja toiseen laitteen vastaanottimen välisen matkan siirtotietä pitkin [1]. Siirtotietä kutsutaan myös kanavaksi [2]. Tutkittavassa ohjelmassa kanavaa on kuvattu lohkona ” apply_channel.v”. Tosielämässä jos USRP-laitteiden antenniliittimiin liitettäisiin antennit voisi tiedonsiirtojärjestelmän kanava olla radiotie (ilma, avaruus) [1]. Toisaalta kaksi laitetta voitaisiin yhdistää myös koaksiaalisella antennijohdolla, jolloin kyseinen johto toimisi kanavana [2].



Kuva 5 Estimaattorin ja ekvalisaattorin sijainti receiver-alilohkossa

Kuvassa sijaintia on korostettu ympyröimällä kyseiset lohkot.

3 Tiedonsiirtojärjestelmän parametrit ja suorituskyky

3.1 Tehtävä 3.1

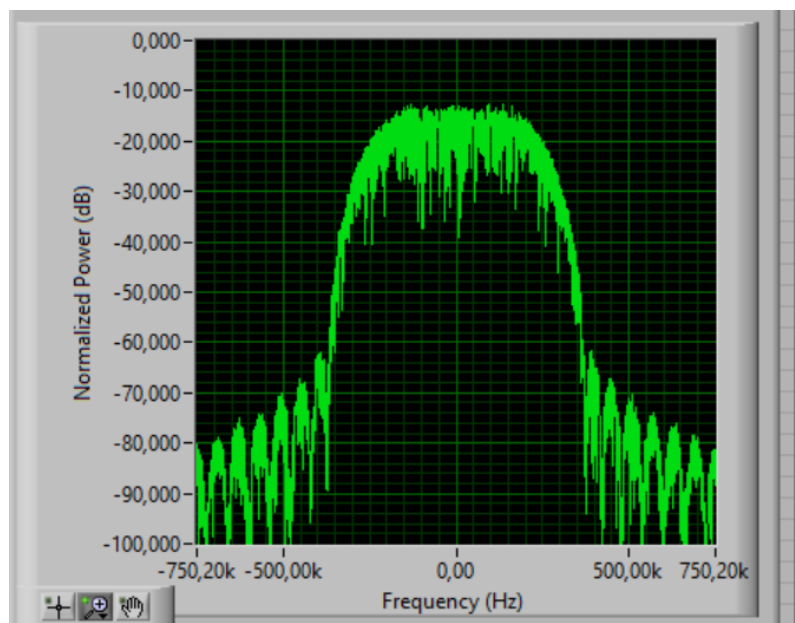
Tutkittavan signaalin voidaan simulator.vi:n tietojen perusteella nähdä olevan kohotettu kosinipulssi (kohdasta "pulse shaping parameters"). Kohotetun kosinipulssin kaistanleveys voidaan laskea kaavalla [4]

$$B = (1 + \alpha) \frac{1}{2T}, \quad (1)$$

missä α on lisäkaistakerroin ja $1/T$ on symbolinopeus. Simulator.vi:n tietojen perusteella nähdään, että lisäkaistakerroin $\alpha=0,5$ ja symbolinopeus $1/T=500$ kHz. Laskettuna kaavalla 1 saadaan vakioasetuksilla lähetetyn signaalin kaistanleveydeksi $B=375$ kHz.

3.2 Tehtävä 3.2

Kuvassa 6 on esitetty lähetetyn signaalin spektrikuva.



Kuva 6 Vakioasetuksilla lähetetyn signaalin spektrikuva

Spektrikuvasta nähdään, että laskemamme kaistaleveys on likimain oikein.

3.3 Tehtävä 3.3

Lähetettävien hyötydatabittien määräksi (Packet length (bits)) on asetettu 1000. QPSK-modulaatiossa lähettimen ilmoittama paketin pituus (packet duration) on tällöin 1,136 ms. Todellinen hyötydatansiirtonopeus voidaan laskea jakamalla hyötydatabittien määrä paketin pituudella. Tällöin järjestelmän todelliseksi hyötydatansiirtonopeudeksi QPSK-modulaatiolla saadaan

$$\frac{1000b}{1,136 \cdot 10^{-3}s} = 880\,281,6901 \frac{b}{s} \approx 880,3 \frac{kb}{s}.$$

BPSK-modulaatiolla tuhannen hyötydatabitin tuottaman paketin pituudeksi saadaan 2,136 ms. Tällöin todellinen hyötydatansiirtonopeus on

$$\frac{1000b}{2,136 \cdot 10^{-3}} = 468\,164,794 \frac{b}{s} \approx 468,2 \frac{kb}{s}.$$

3.4 Tehtävä 3.4

BPSK-modulaatiossa yksi symboli sisältää yhden bitin [5]. Kun lähetetään 1000 bittiä, niin tällöin täytyy BPSK-moduloituna lähettää 1000 symbolia.

QPSK-modulaatiossa sen sijaan yksi symboli sisältää kaksi bittiä [1]. Eli lähetettäessä 1000 bittiä, niin QPSK-moduloituna tulee lähettää 500 symbolia.

3.5 Tehtävä 3.5

Symbolinopeudella 500 ksym/s QPSK-modulaation 500 symbolin lähettämiseen kuluu aikaa 1 ms. Kun asetetaan hyötydatabittien määräksi 100 bittiä, lähetetään tällöin 50 symbolia. Näiden symbolien lähettämiseen kuluu aikaa 50/500 ms = 0,1 ms.

Lähetettäessä sata bittiä on lähettimen kertoma lukema paketin kestoksi 236 µs. Tällöin hyötydatan osuus on 0,1 ms/0,236 ms ≈ 42,4 % eli osuus on huomattavasti heikompi kuin mitä pidempiä paketteja lähetettäessä se olisi.

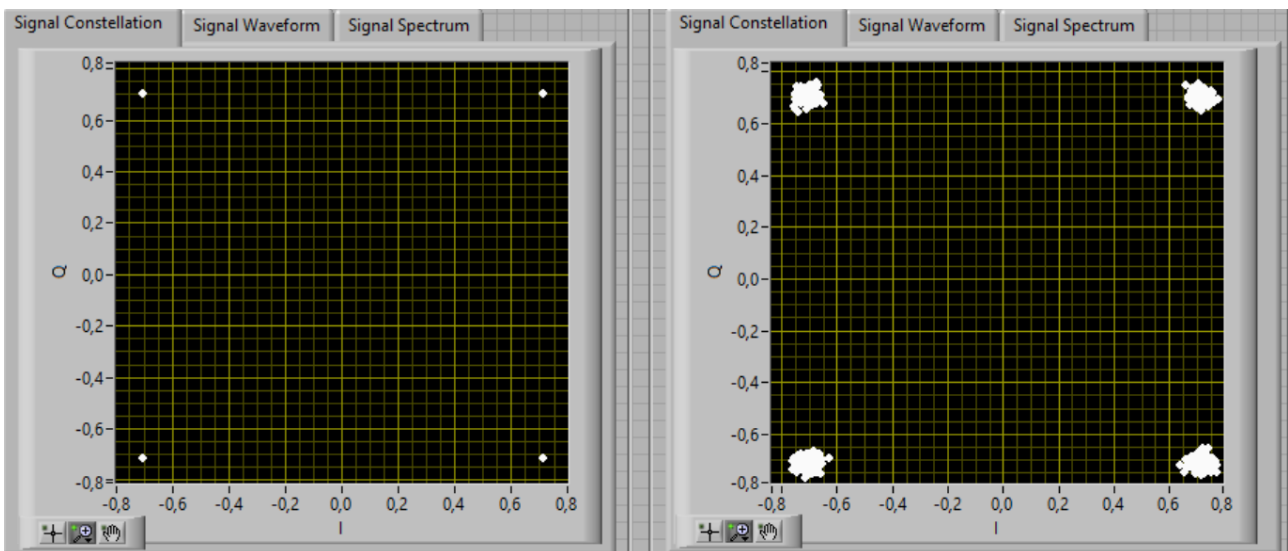
4 Kohina

4.1 Tehtävä 3.6

Signaaliin summautuu kanavassa kohinaa. Lisäksi signaaliin summautuu häiriöitä ja tapahtuu vääristymisiä. Nämä signaalin vastaanottamista vaikeuttavat tekijät aiheutuva ympäristön muista signaaleista sekä sähköisistä ilmiöistä. Itse kohina voidaan jakaa lämpö- ja impulssikohinaan. Lämpökohinaa aiheutuu elektronien satunnaisliikkeestä. Impulssikohina sen sijaan johtuu ympäristön sähkömagneettisista ilmiöistä ja siirtojärjestelmän omista vioista, ja se sisältää satunnaisia, voimakkaita, pulssimaisia häiriöitä. [1]

4.2 Tehtävä 3.7

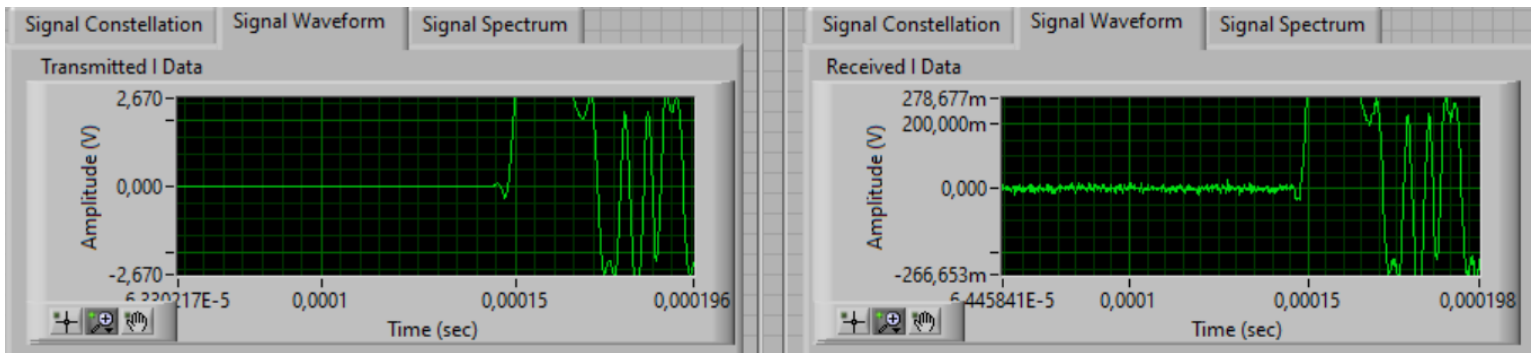
- a) Kuvassa 7 on esitettyä lähetetyn ja vastaanotetun signaalin konstellaatiokuvat. Kuvissa vasemmanpuoleinen kuva on lähetetyn signaalin kuvaaja ja oikeanpuoleinen taas vastaanotetun signaalin kuvaaja.



Kuva 7 Lähetetyn ja vastaanotetun signaalin konstellaatiokuvat

Lähetetyn signaalin kuvassa ei luonnollisesti vielä kohinaa esiinny. Vastaanotetun signaalin kuvaajassa on havaittavissa, kuinka symboliparvet hajoavat, ja kuvasta voi nähdä amplitudi- ja vaihe-eroja.

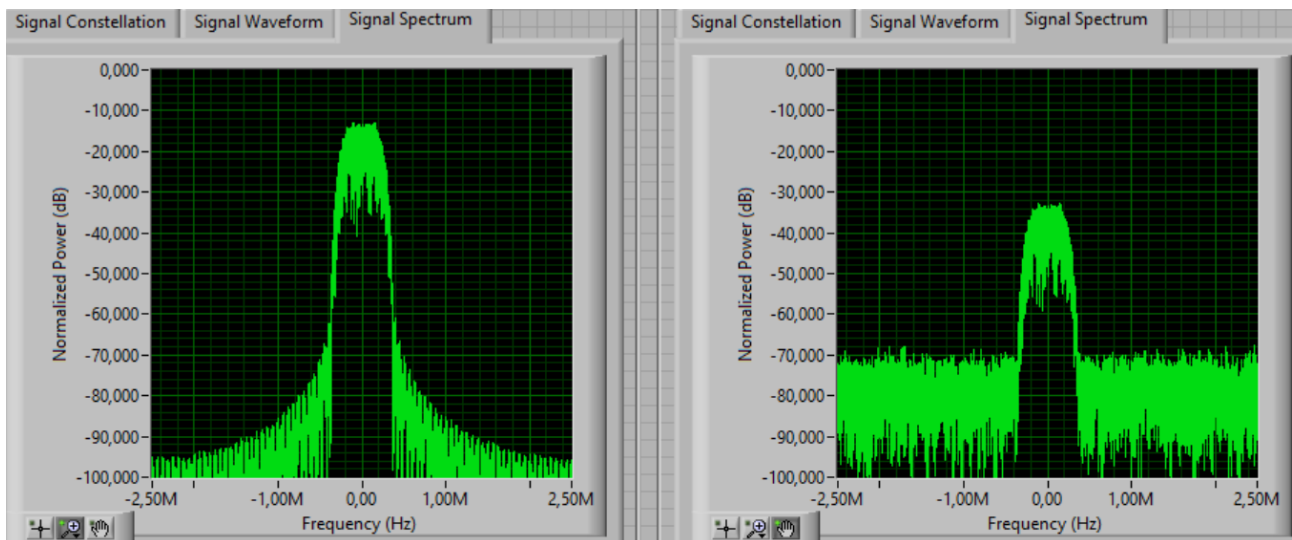
b) Kuvassa 8 on esitettyä signaalien I-datan aikatason kuvaajat.



Kuva 8 Lähetetyn ja vastaanotetun signaalin aikatason kuvat

Kohina voidaan havaita vastaanotetun signaalin kuvasta kuvaajan sahalaitaisuutena. Sahalaitaisuus on nähtävissä läpi kuvaajan. Kohinaa on havaittavissa jo ennen kuin itse varsinaista signaalia on vastaanotettu, sillä vastaanotin havaitsee kanavasta kuuluvan kohinan.

c) Kuvassa 9 on esitettyä signaalien spektrikuvat.

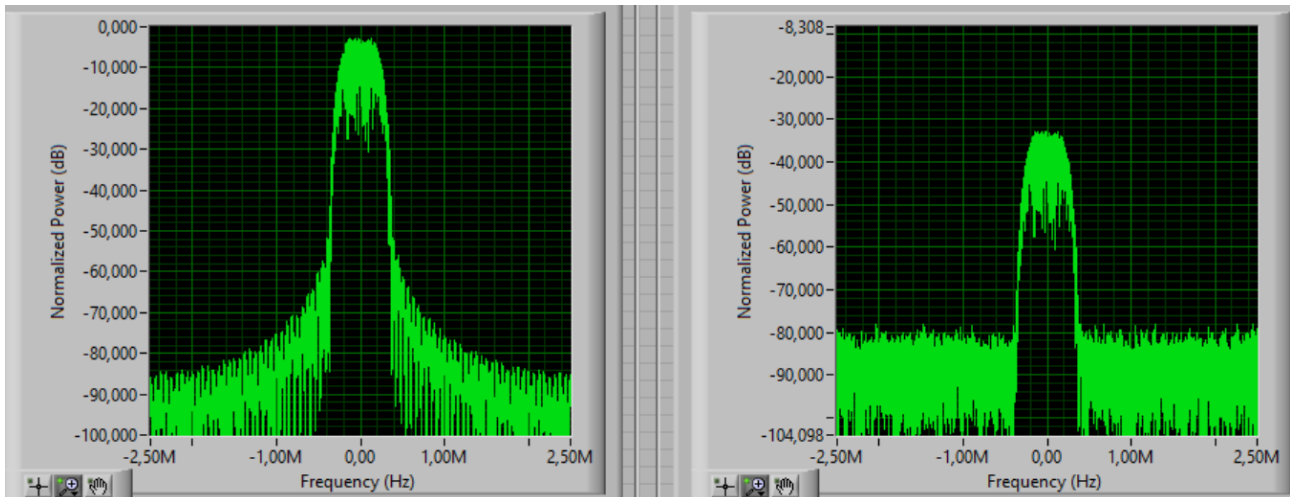


Kuva 9 Lähetetyn ja vastaanotetun signaalin spektrikuvat

Vastaanotetun signaalin kuvassa kohina huomataan, kun vertaillaan kuvaajien häntiä. Kyseisen kuvaajan hännät ovat levinneet ”kohinalattioiksi” kuvaajan molemmille puolille. Lähetetyn signaalin tapauksessa vastaavaa ilmiötä ei esiinny.

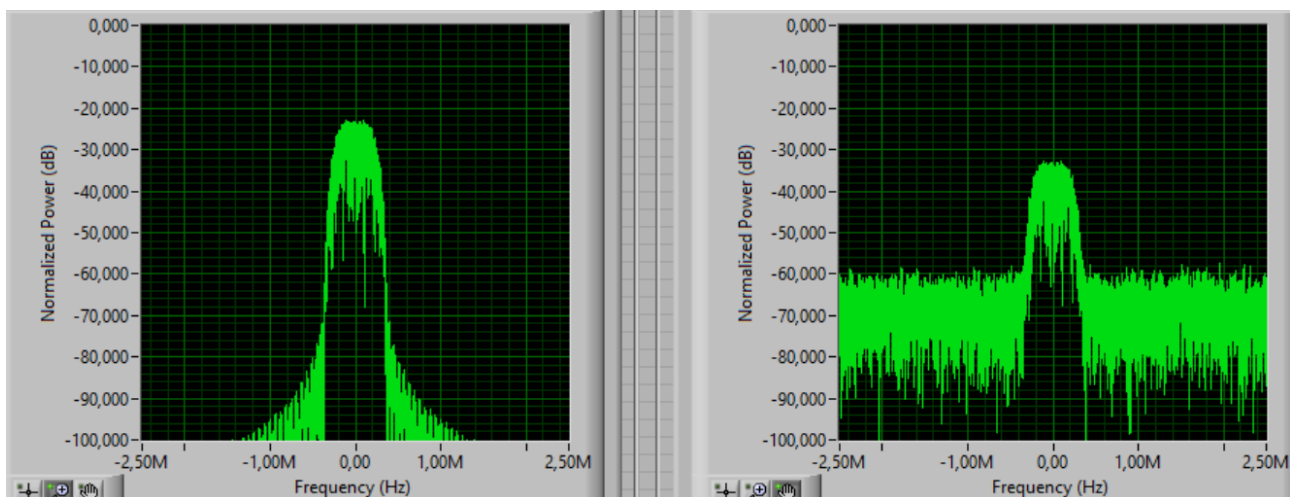
4.3 Tehtävä 3.8

Kun lähettimen vahvistukseksi asetettiin 20 dB ja vastaanottimen vahvistukseksi 0 dB, saatiin kuvassa 10 näkyvät spektrikuvat.



Kuva 10 Signaalien spektrikuvat, kun lähettimen vahvistus oli 20 dB ja vastaanottimen vahvistus oli 0 dB

Sen sijaan, kun lähettimen vahvistus oli 0 dB ja vastaanottimen vahvistus oli 20 dB saatiin kuvan 11 mukaiset spektrikuvat lähetetylle ja vastaanotetulle signaalille.



Kuva 11 Signaalien spektrikuvat, kun lähettimen vahvistus oli 0 dB ja vastaanottimen vahvistus 20 dB

Kuvaajista on havaittavissa, kuinka molemmissa tapauksissa lähetetyn signaalin teho on suurempi kuin vastaanotetun. Ensimmäisen tapauksen lähetetyn signaalin teho on suurempi kuin mikään muu

kuvaaja, sillä kyseistä signaalia on vahvistettu eikä siihen ole vielä summutunut kohinaa. Toisen tapauksen lähetetyn signaalin teho on pienempi kuin ensimmäisen tapauksen, koska sitä ei vahvistettu. Tällöin myöskään kyseisen signaalin hännät eivät ole selvästi näkyvillä. Molempien tapauksien vastaanotettujen signaalien tehot ovat likimain samansuuruiset.

Toisen tapauksen vastaanotetun signaalin kohinateho on suurempi kuin ensimmäisen tapauksen, mikä näkyy pienempänä pulssin huipun ja häntien välisenä erona. Tämä ero kohinatehoissa johtuu pähkinäkuoressa siitä, että ensimmäisessä tapauksessa lähetettävää signaalia vahvistetaan, jolloin se selviää paremmin kanavan läpi kulkiessaan. Kun kyseinen signaali vastaanotetaan, ei sitä enää vahvisteta, jolloin sen kohina ei myöskään vahvistu. Kohina on kuitenkin nähtävissä vastaanotetun signaalin kuvaajassa, vaikka häntien ja pulssin huipun välimatka säilyykin melko suurena verrattuna toiseen tapaukseen. Toisessa tapauksessa lähetettävää signaalia ei vahvisteta, jolloin se on alttiimpi kanavassa siihen kohdistuvalle kohinalle ja muille vaurioille. Kun kyseinen signaali vastaanotetaan ja vahvistetaan, myös sen kohina vahvistuu eli se saa helpommin suuremman kohinatehon ensimmäiseen tapaukseen verrattuna. Tämän tapauksen kuvaajassa kohina on helposti havaittavissa kuvaajan häntien paksuudessa, josta seuraa myös häntien ja huipun pienempi välimatka.

5 Signaali-kohinasuhteen vaikutus bittivirheiden määrään

5.1 Tehtävä 3.9

Lähettimen ja vastaanottimen asetuksiin asetettiin tehtävänannon mukaiset arvot. Näillä asetuksilla simulator.vi:n avulla saatiin laskettua QPSK- ja BPSK-modulaatioiden bittivirhesuhteita eri signaali-kohinasuhteilla ohjelmiston kohinatehoa (noise power) muuttamalla. Tällöin halutut arvot näkyivät ohjelmiston "Average bit error rate" -kohdassa. Saadut tulokset ovat esitettynä taulukossa 1.

Taulukko 1 Keskimääräiset bittivirhesuhteet

SNR (dB)	BER (QPSK)	BER (BPSK)
0	0,178840	0,103320
2	0,122390	0,053290
4	0,068880	0,018960
6	0,030960	0,004410
8	0,009380	0,000680
10	0,001940	0,000080

Bittivirhesuhde (BER, bit error rate) kertoo, kuinka paljon signaalin vastaanotossa tapahtuu bittivirheitä keskimäärin. BER-arvo lasketaan siis virheellisten bittien määrän ja lähetettyjen bittien määrän välisenä suhteena. Signaali-kohinasuhde mittaa signaalissa olevan kohinan määrää. Se on signaalin tehon ja kohinatehon välinen suhde ja kuvaa saapuneen signaalin laatua. [1][3]

5.2 Tehtävä 3.10

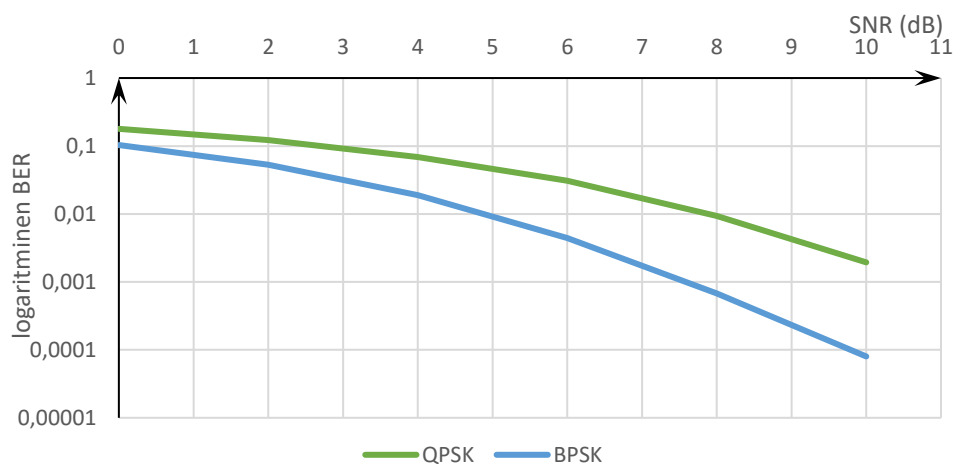
- Mitä suurempi SNR-arvo on, sitä vähemmän saapuneessa signaalissa on kohinaa [1]. Taulukosta 1 voidaan huomata, että kohinan määrän vähentyessä BER-arvot myös pienentyvät eli virheellisiä bittejä saapuu vähemmän suhteessa lähetettyihin bitteihin. Sen sijaan, kun SNR-arvo on pienempi eli kohinaa on signaalissa enemmän, niin sitä enemmän tapahtuu lähetyksessä myös bittivirheitä ja BER-arvo on suurempi.
- Kun verrataan eri modulaatioiden BER-arvoja keskenään, huomataan kuinka BPSK:n arvot ovat alhaisempia kuin QPSK:n riippumatta SNR-arvosta. Tästä voidaan päätellä, että BPSK-

moduloiduilla signaaleilla tapahtuu keskimäärin vähemmän bittivirheitä kuin QPSK-moduloiduilla signaaleilla.

- c) BPSK-modulaatiolla tapahtuu vähemmän bittivirheitä, koska kyseisessä modulaatiossa yksi lähetetty symboli vastaa yhtä bittiä. QPSK-modulaatiossa sen sijaan yksi symboli vastaa kahta bittiä, mikä altistaa sen kohinan aiheuttamille bittivirheille, sillä mitä enemmän bittejä yhdellä symbolilla lähetetään, sitä herkempi signaali on kohinalle ja sitä kautta bittivirheille [5].
- d) Kanavaolosuhteiden ollessa hyvät kannattaa käyttää suurempaa symboliaakkostoa, sillä tällöin saadaan samoilla aika- ja taajuusresursseilla siirrettyä enemmän dataa kuin mitä pienemmällä aakkostolla pystyttäisiin [6]. Täten, vaikka BPSK-modulaatiolla tapahtuu keskimäärin vähemmän bittivirheitä kuin mitä QPSK:lla, on joissakin tapauksissa QPSK:n käyttö järkevämpää.

5.3 Tehtävä 3.11

Taulukon 1 arvoilla saadaan kuvan 12 mukaiset kuvaajat QPSK- ja BPSK-modulaatioiden logaritmiselle bittivirhesuhteille signaali-kohinasuhteen funktiona.



Kuva 12 QPSK- ja BPSK-modulaatioiden logaritmiset BER-arvot SNR:n funktiona

Kuvaajasta nähdä, kuinka BPSK-käyrä kulkee alempana kuin QPSK-käyrä. Tämä havainnollistaa hyvin, kuinka BPSK-modulaatiolla tapahtuu vähemmän bittivirheitä verrattuna QPSK-modulaatioon.

6 Tiedonsiirtojärjestelmän linkkibudjetti

6.1 Tehtävä 4.1

Selvittääksemme tiedonsiirtojärjestelmän linkkibudjetin täytyy ensin laskea, kuinka paljon vaimennusta järjestelmän koaksiaalijohdossa aiheutuu. Koaksiaalijohdossa signaali vaimenee aina tietyn määrän desibelejä metriä kohden. Lähteen 7 perusteella 100 metriä pitkä johto aiheuttaa vaimennusta 62,4 dB, signaalin taajuuden ollessa 2,5 GHz. Käyttämämme johdon pituus on yhden metrin eli metriä kohden johdon vaimennus on $62,4 \text{ dB}/100 = 0,624 \text{ dB}$.

Lisäksi tarvitsemme käytetyn vaimentimen vaimennuksen. Lähteen 8 mukaan 2,5 GHz:n alueella kyseisen vaimentimen vaimennus on noin 28,9 dB. Vaimennus on luettu lähteen punaisesta kuvaajasta.

Tiedonsiirtojärjestelmän linkkibudjetti, ja täten vastaanotetun signaalin teho, voidaan laskea Friisin kaavan avulla

$$P_r[\text{dBm}] = P_t[\text{dBm}] + G_t[\text{dB}] + G_r[\text{dB}] - L_p, \quad (2)$$

missä P_t on lähetysteho, G_t on lähetysantennin vahvistus, G_r vastaanottoantennin vahvistus ja L_p etenemisvaimennus. Yleensä kaavaa tulee vielä tarkentaa huomioimalla esimerkiksi maanpinnan heijastukset, ilmaston vaikutukset ja antennikaapeleiden ynnä muiden vaimennukset. [1]

Lasketaan vastaanotetun signaalin teho kaavan 2 avulla, jolloin saadaan $P_r[\text{dBm}] = -50\text{dBm} + 20\text{dB} - 0,624\text{dB} - 28,9\text{dB} + 14\text{dB} + 20\text{dB} - 2\text{dB} = -27,524\text{dBm} \approx -28\text{dBm}$. Tulokset ovat esitettyinä taulukossa 2.

Taulukko 2 Tiedonsiirtojärjestelmän linkkibudjetin yhteenlaskettavat ja tulos

Signaalin teho ennen Transmit Amplifier -vahvistinta	- 50 dBm
Transmit Amplifier -vahvistus	20 dB
Koaksiaalijohdon vaimennus	-0,624 dB
30 dB:n vaimentimen vaimennus	-28,9
Low Noise Amplifier -vahvistus	14 dB
Drive Amplifier -vahvistus	20 dB
Muut vaimennukset (RF-kytkimet, liittimet yms.)	-2 dB
Vastaanotetun signaalin teho	-28 dBm

Vastaanotetun signaalin teho on siis korkeampi kuin signaalin alkuperäinen teho.

Lähteet

- [1] Tietoliikennetekniikan perusteet opintomoniste (Moodle-oppimisalusta) Päivitetty 19.10.2021 [12.12.2021] Saatavissa: [https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-\(Suomenkielinen-toteutus\)>COMM100_opintomoniste_2021.pdf](https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-(Suomenkielinen-toteutus)>COMM100_opintomoniste_2021.pdf)

- [2] Allén, M. Tietoliikennetekniikan perusteet -luento 2. Luentodiat. Luento Tampereen yliopistossa 28.10.2021 [12.12.2021] Saatavissa: [https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-\(Suomenkielinen-toteutus\)>Viikko 43 \(25.-31.10.\)>COMM100_luento2.pdf](https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-(Suomenkielinen-toteutus)>Viikko_43_(25.-31.10.)>COMM100_luento2.pdf)

- [3] Tietoliikennetekniikan perusteet laboriotyöohje (Moodle-oppimisalusta). Syksy 2021. [12.12.2021] Saatavissa: [https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-\(Suomenkielinen-toteutus\)>Harjoitustyö>COMM100_laboriotyöohje_2021.pdf](https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-(Suomenkielinen-toteutus)>Harjoitustyö>COMM100_laboriotyöohje_2021.pdf)

- [4] Allén, M. Tietoliikennetekniikan perusteet -luento 7. Luentodiat. Luento Tampereen yliopistossa 17.11.2021 [12.12.2021] Saatavissa: [https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-\(Suomenkielinen-toteutus\)>Viikko 46 \(15.-21.11.\)>COMM100_luento7.pdf](https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-(Suomenkielinen-toteutus)>Viikko_46_(15.-21.11.)>COMM100_luento7.pdf)

- [5] Allén, M. Tietoliikennetekniikan perusteet -luento 6. Luentodiat. Luento Tampereen yliopistossa 11.11.2021 [12.12.2021] Saatavissa: [https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-\(Suomenkielinen-toteutus\)>Viikko 45 \(8.-14.11.\)>COMM100_luento6.pdf](https://moodle.tuni.fi/COMM.100-2021-2022-1-Tietoliikennetekniikan-perusteet-(Suomenkielinen-toteutus)>Viikko_45_(8.-14.11.)>COMM100_luento6.pdf)

- [6] Järveläinen J. Suunta-antennin vaikutus LTE-verkossa haja-asutusalueella. 2017. Tampereen teknillinen yliopisto.

- [7] Times Microwave Systems, LMR-195 Flexible Low Loss Communications Coax Datasheet. Saatavissa: <https://www.timesmicrowave.com/documents/resources/LMR-195.pdf>

- [8] Mini-Circuits, VAT-30+ SMA Fixed Attenuator Datasheet. Saatavissa: <http://www.minicircuits.com/pdfs/VAT-30.pdf>