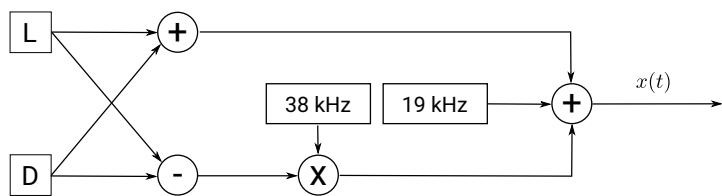
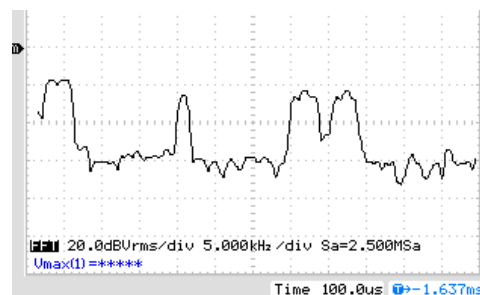


# ODDAJNI SISTEMI

## Laboratorijske vaje



$$x(t) = \left( 0,9 \cdot \frac{L(t)+D(t)}{2} + 0,9 \cdot \frac{L(t)-D(t)}{2} \cdot \sin(2\pi 2f_p t) + 0,1 \cdot \sin(2\pi f_p t) \right)$$







Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

# ODDAJNI SISTEMI

Laboratorijske vaje

Avtorja  
**Gregor Donaj**  
**Iztok Kramberger**

Maribor, maj 2019

<b>Naslov</b>	Oddajni sistemi		
<b>Podnaslov</b>	Laboratorijske vaje		
<b>Title</b>	Broadcast systems		
<b>Subtitle</b>	Laboratory Excercises		
<b>Avtorja</b> <i>Authors</i>	asist. dr. Gregor Donaj (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)		
	doc. dr. Iztok Kramberger (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)		
<b>Jezikovni pregled</b> <i>Editing in Slovenian</i>	izr. prof. dr. Darinka Verdonik		
<b>Tehnična urednika</b> <i>Technical editors</i>	asist. dr. Gregor Donaj (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)		
	Jan Perša, mag. inž. prom. (Univerzitetna založba Univerze v Mariboru)		
<b>Oblikovanje ovitka</b> <i>Cover designer</i>	asist. dr. Gregor Donaj (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)		
	Jan Perša, mag. inž. prom. (Univerzitetna založba Univerze v Mariboru)		
<b>Grafika na ovitku</b> <i>Cover graphics</i>	Avtorja	<b>Grafične priloge</b> <i>Graphics material</i>	Avtorja
<b>Založnik / Published by</b>	<b>Izdajatelj / Co-published by</b>		
Univerzitetna založba Univerze v Mariboru Sloškovo trg 15, 2000 Maribor, Slovenija <a href="http://press.um.si">http://press.um.si</a> , <a href="mailto:zalozba@um.si">zalozba@um.si</a>	Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://feri.um.si">https://feri.um.si</a> , <a href="mailto:feri@um.si">feri@um.si</a>		
<b>Izdaja</b> <i>Edition</i>	Prva izdaja	<b>Vrsta publikacije</b> <i>Publication type</i>	Elektronska knjiga
<b>Dostopno na</b> <i>Availabe at</i>	<a href="http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/412">http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/412</a>		
<b>Izid</b> <i>Published</i>	Maribor, maj 2019		

CIP - Kataloški zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

621.39(076)

DONAJ, Gregor  
Oddajni sistemi [Elektronski vir] :  
laboratorijske vaje / avtorja Gregor Donaj in Iztok  
Kramberger. - 1. izd. - El. publikacija. -  
Maribor : Univerzitetna založba Univerze, 2019

Način dostopa (URL):  
<http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/412>.  
- Nasl. v kolofonu: Broadcast systems

ISBN 978-961-286-268-8

doi: 10.18690/978-961-286-268-8  
1. Dr. vzp. stv. nasl. 2. Kramberger, Iztok  
COBISS.SI-ID 96658433



**Tekst / Text** © Gregor Donaj, Iztok Kramberger 2019

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna. Opis licence je na volji na spletni strani <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>. Licenca dovoljuje reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javno priobčitev in predelavo avtorskega dela, pod pogojem navedbe avtorja in širjenja avtorskega dela/predelave naprej pod istimi pogoji. *This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>. This license allows the downloading and sharing of the work, providing author attribution is clearly stated. The work cannot be changed in any way and cannot be used for commercial purposes.*

**ISBN** 978-961-286-268-8 (PDF)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/978-961-286-268-8>

**Cena**  
*Price* Brezplačen izvod

**Odgovorna oseba založnika**  
*For publisher* prof. dr. Zdravko Kačič, rektor Univerze v Mariboru

# Oddajni sistemi

## Laboratorijske vaje

GREGOR DONAJ IN IZTOK KRAMBERGER

**Povzetek** Gradivo vsebuje navodila za laboratorijske vaje pri predmetu Oddajni sistemi za študente univerzitetnega študijskega programa prve stopnje Telekomunikacije. V navodilih je 10 laboratorijskih vaj. Prvi dve obravnavata laboratorijsko merilno opremo in študentom dajeta osnovno znanje za izvedbo preostalih vaj. Naslednje 4 vaje obravnavajo analogno amplitudno in frekvenčno modulacijo ter uporabo teh modulacij pri prenosu radijskih signalov. Zadnje 4 naloge obravnavajo digitalne modulacije in multipleksiranje ter uporabo teh tehnologij v sistemih prizemne televizije DVB-T in podatkovne vsebine v digitalni televiziji.

**Ključne besede:** telekomunikacije • laboratorijske vaje • merilna oprema • analogne modulacije • digitalne modulacije • digitalna televizija

---

NASLOVA AVTORJEV: dr. Gregor Donaj, asistent, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija, e-pošta: gregor.donaj@um.si. dr. Iztok Kramberger, docent, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija, e-pošta: iztok.kramberger@um.si.



# Kazalo

Uvod	1
Naloga 1: Opazovanje signalov z osciloskopom	3
Naloga 2: Opazovanje signalov s spektralnim analizatorjem	7
Naloga 3: Amplitudna modulacija – princip delovanja	11
Naloga 4: Amplitudna modulacija – pasovna širina in oddajanje	15
Naloga 5: Frekvenčna modulacija – princip delovanja	19
Naloga 6: Frekvenčna modulacija – prenos stereo signala	23
Naloga 7: Modulacija QAM in multipleksiranje OFDM	27
Naloga 8: Oddajanje in opazovanje signalov DVB-T	31
Naloga 9: Analiza signalov DVB-T in kvaliteta sprejema	35
Naloga 10: Transportne vsebine DVB-T	39
Ocena	43





## Uvod

V okviru laboratorijskih vaj pri predmetu Oddajni sistemi boste v praksi spoznali tehnologije in sisteme, ki se uporabljajo v analognih in digitalnih oddajnih sistemih – radiu in televiziji. Da boste lahko opazovali in analizirali signale, ki se pri tem uporabljajo, boste najprej spoznali uporabo ustrezne laboratorijske opreme.

Prvi dve nalogi obravnavata uporabo funkcijskega generatorja, osciloskopa in spektralnega analizatorja. Vsebina teh vaj je namenjena predvsem pravilni uporabi merilne opreme za opazovanje signalov, saj je to znanje potrebno pri kasnejših vajah.

Naslednje štiri naloge obravnavajo analogne sisteme: amplitudno modulacijo, frekvenčno modulacijo, pasovne širine teh modulacij, prenos signalov preko anten in uporabo podnosilcev v frekvenčni modulaciji za prenos stereo signalov. Amplitudna in frekvenčna modulacija se danes uporabljata še vedno za oddajanje programov radijskih postaj.

Zadnje štiri naloge obravnavajo digitalne modulacije in vsebine, ki jih prenašamo s temi modulacijami. Vsebina najprej vključuje digitalne modulacije, njihove osnovne principe delovanja in pasovne širine. Preostanek vsebin se navezuje na tehnologije, uporabljene v prizemni digitalni televiziji DVB-T. Tukaj so zajeti še kvaliteta sprejema, popravljanje napak in digitalne vsebine, ki jih prenašamo v sistemu DVB-T.

## Navodila za opravljanje laboratorijskih vaj

Na laboratorijske vaje prihajajte pripravljeni, kar pomeni, da si pred začetkom vaj preberite nalogo. Pri reševanju nalog boste morali vpisovati odgovore na posamezna vprašanja in vpisovati merilne rezultate v tabele ter iz podatkov v tabelah risati grafe. Spodaj imate navedenih nekaj splošnih navodil za pravilno reševanje. Pri večini nalog sledi zadnji del z izračuni in dodatnimi vprašanji. Te izpolnjujete po končanem terminu laboratorijskih vaj.

### Tabele

- Preden začnete zapisovati vrednosti, se prepričajte, ali vezje pravilno deluje in ali meritev opravljate pravilno.
- Bodite pozorni na enote v tabeli. Te so vpisane v prvi vrstici tabele.
- Podatke vpišite s primernim številom decimalnih mest. Zaokroževanje na premajhno število mest vnese dodatno napako, zaokroževanje na preveliko število mest pa je neprimerno, če je merska napaka bistveno večja od natančnosti vpisa vrednosti.

### Grafi

- Na obeh oseh zapišite veličine in merilo. Označite več enakomerno oddaljenih točk na oseh z vrednostmi.
- Uporabite vse izmerjene vrednosti iz ustrezne tabele in za vsako vrednost narišite dobro vidno točko na grafu.
- Graf lahko rišete prostoročno ali pa z ravnilom, kadar podatki nakazujejo dovolj linearen potek. V primeru (deloma) nelinearnega poteka ne rišite lomljenke med merilnimi točkami, ampak primerno narišite potek grafa med merilnimi točkami.
- Kadar imate na eni sliki več grafov, morajo biti vsi grafi nedvoumno označeni.

## Skice meritev z osciloskopom

- Opazujte signal na primernem napetostnem in časovnem merilu, da bodo jasno vidni signal in njegove lastnosti. Vedno preverite, ali opazovani signal ustreza pričakovanemu.
- Slike na osciloskopu prerišite v navodila. Alternativno jih lahko shranite na prenosni medij ter kasneje natisnete in prilepite v navodila. V obeh primerih upoštevajte spodnje točke.
- Pri prerisovanju bodite pozorni na značilnosti poteka, ki so pomembne za nalogo oz. za meritev, ki jo trenutno opravljate.
- Zraven predlog imate prostor za vpisovanje parametrov merjenja. Zapišite merilo za napetostno os oz. za obe napetostni osi, kadar opazujete dva signala. Zapišite tudi način merjenja (DC ali AC), položaj ničelne napetosti ter časovno merilo. Ne pozabite zapisati vseh enot.
- Kadar imate na eni sliki dva poteka napetosti, morata biti nedvoumno označena.

## Skice meritev z osciloskopom – FFT-način

- Nastavite primerno časovno os, da boste v izračunanem spektru FFT s čim boljšo ločljivostjo videli frekvence, ki vas zanimajo.
- Opazujte signal na primernem frekvenčnem in napetostnem merilu, da bodo jasno vidni frekvenčni potek signala in njegove lastnosti. Vedno preverite, ali opazovani potek ustreza pričakovanemu.
- Slike na osciloskopu prerišite v navodila. Alternativno jih lahko shranite na prenosni medij ter kasneje natisnete in prilepite v navodila. V obeh primerih upoštevajte spodnje točke.
- Pri prerisovanju bodite pozorni na značilnosti poteka, ki so pomembne za nalogo oz. za meritev, ki jo trenutno opravljate.
- Zraven predlog imate prostor za vpisovanje parametrov merjenja: zapišite frekvenco na sredini prikaza, frekvenčno skalo, napetost na sredini prikaza (POS), napetostno skalo z enoto (V ali dBV). Zapišite tudi časovno skalo, pri kateri je bila opravljena meritev. Ne pozabite zapisati vseh enot.

## Skice meritev s spektralnim analizatorjem

- Nastavite primerno frekvenčno in močnostno merilo, da bodo jasno vidni frekvenčni potek signala in njegove lastnosti. Vedno preverite, ali opazovani potek ustreza pričakovanemu.
- Slike na spektralnem analizatorju prerišite v navodila. Alternativno jih lahko shranite na prenosni medij ter kasneje natisnete in prilepite v navodila. V obeh primerih upoštevajte spodnje točke.
- Pri prerisovanju bodite pozorni na značilnosti poteka, ki so pomembne za nalogo oz. za meritev, ki jo trenutno opravljate.
- Zraven predlog imate prostor za vpisovanje parametrov merjenja: zapišite frekvenčne podatke, močnostne podatke in nastavitve resolucije prikaza. Ne pozabite zapisati vseh enot.

## Naloga 1: Opazovanje signalov z osciloskopom

---

**Navodilo naloge:** S funkcijskim generatorjem tvorite električne signale različnih oblik, amplitud in frekvenc. Te signale opazujte z osciloskopom ter se pri tem seznanite z njegovim delovanjem in nastavitvami.

---

### Uvod

Funkcijski generator je naprava, s katero tvorimo periodične električne signale. Najpomembnejše nastavitve na funkcijskem generatorju so:

- oblika signala,
- frekvenca in
- amplituda.

Nekateri funkcijski generatorji imajo možnost tvorjenja dveh neodvisnih signalov. Večina sodobnih funkcijskih generatorjev ima tudi možnost modulacije (spreminjanje neke lastnosti) signalov, ki jo bomo uporabljali pri kasnejših vajah.

Osciloskop je naprava, ki jo uporabljamo za opazovanje časovnega poteka signalov. Večina sodobnih osciloskopov ima vsaj dva vhodna kanala, kar pomeni, da lahko istočasno opazujemo dva električna signala. Osciloskopi imajo tudi vhod za sprožitelj (trigger). Signal, ki ga pripeljemo na sprožitelj, osciloskopu sporoča, v katerem trenutku naj zabeleži signal in ga prikaže na zaslonu. Dodatno pa imajo osciloskopi še notranji sprožitelj, ki se odziva na opazovane signale. Najpomembnejši nastavitvi za opazovanje signalov sta:

- amplitudno merilo (vertikalna skala), ki je ločeno za vsak kanal osciloskopa – to nastavitev uporabljamo za povečanje ali pomanjšanje signalov na zaslonu na primerno velikost, kar nam omogoča opazovanje signalov različnih amplitud;
- časovna baza (horizontalna skala) – to nastavitev uporabljamo za nastavljanje dolžine časovnega intervala, ki se prikaže na zaslonu, na primerno velikost, kar nam omogoča opazovanje signalov različnih frekvenc.

Sodobni digitalni spominski osciloskopi (digital storage oscilloscope – DSO) imajo možnost merjenja raznih lastnosti opazovanega signala (npr. amplituda in frekvenca). Ti osciloskopi velikokrat omogočajo tudi analizo signalov s hitro Fourierevo transformacijo (FFT), kar omogoča opazovanje signalov v frekvenčnem prostoru. Pri opazovanju signalov z FFT so glavne nastavitve:

- osrednja frekvenca na zaslonu – izbiramo, okoli katere frekvence bomo opazovali spekter signala;
- frekvenčno (horizontalno) merilo – izbiramo obseg frekvenc, ki ga v danem trenutku vidimo na zaslonu;
- amplitudno (vertikalno) merilo – izbiramo, kakšna možna razmerja med velikostmi oz. močmi signalov hočemo prikazati na zaslonu, in tip merila: linearno ali logaritemsko.

## Meritve in rezultati

Na funkcijskem generatorju tvorite signal sinusne oblike s frekvenco 2 MHz in amplitudo  $2 V_{pp}$  ( $pp = \text{peak-to-peak}$ ). Povežite izhod funkcijskega generatorja z osciloskopom. Uporabite koaksialni kabel s karakteristično impedanco  $50 \Omega$ . Nastavite amplitudno merilo in časovno bazo na primerni vrednosti, tako da boste na zaslonu videli dve do tri periode vhodnega signala in da bo slika signala na zaslonu čim večja, vendar ne bo presegala roba zaslona.

S pomočjo vgrajenih merilnih funkcij osciloskopa izmerite lastnosti signala. Koliko je izmerjena frekvenca signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je izmerjena amplituda signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Spremenite lastnosti signala, tako da bo le-ta imel amplitudo  $150 \text{ mV}_{pp}$  in frekvenco 250 kHz. Nastavite osciloskop, tako da boste videli dve do tri periode signala.

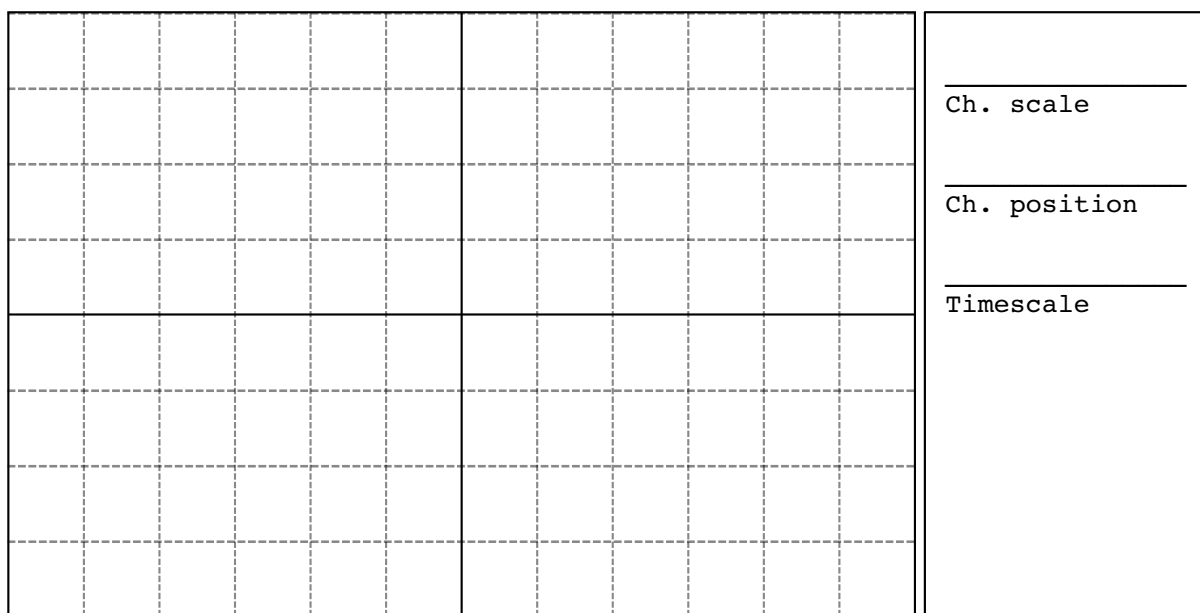
Koliko je nastavitvev amplitudnega merila?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je nastavitvev časovne baze?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Skicirajte signal in zraven zapišite nastavitve na osciloskopu.



Slika 1: Skica signala na osciloskopu.

Na funkcijskem generatorju nastavite sinusni signal s frekvenco 900 kHz in amplitudo 500 mV<sub>RMS</sub> (*RMS* = root mean square = efektivna vrednost signala). Na osciloskopu nastavite primerno nastavitvev amplitudnega merila. Časovno bazo nastavite tako, da boste videli približno 20 do 25 period vhodnega signala.

Koliko je nastavitvev časovne baze?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Na osciloskopu vklopite Fourierovo analizo vhodnega signala. Poiščite največji vrh v spektru. Pri kateri frekvenci nastopi ta vrh?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

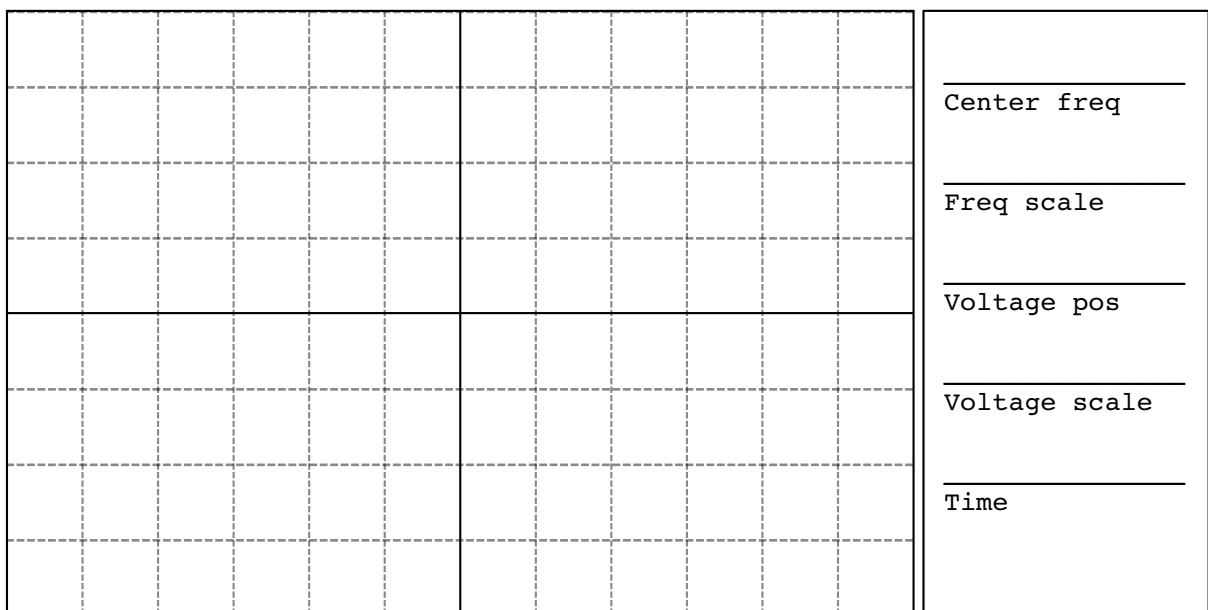
Koliko je amplituda tega vrha (enota naj bo dBV<sub>RMS</sub>)?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Na funkcijskem generatorju spremenite obliko signala v pravokotno. Pri katerih večkratnikih osnovne frekvence (900 kHz) nastopajo nadaljnji vrhovi v frekvenčni sliki signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Primerno nastavite centralno frekvenco, frekvenčno merilo ter položaj slike na zaslonu, tako da boste videli analizo signala od frekvence 0 Hz naprej in da bo viden vrh pri frekvenci 900 kHz ter še vsaj dva nadaljnja vrha. Skicirajte signal v frekvenčnem prostoru na spodnji sliki. Zraven zapišite nastavitve osciloskopa (vključno z nastavitvijo časovne baze).



Slika 2: Analiza vhodnega signala z FFT.

### Izračuni in dodatna vprašanja

- Opišite povezavo med efektivno vrednostjo signala sinusne oblike, amplitudo signala (amplituda v običajnem smislu je razlika napetosti med srednjo vrednostjo in vrhom signala) in amplitudo od vrha do vrha (peak-to-peak). Ali velja ista povezava za signale drugih oblik (npr. pravokotna ali trikotna)?
- Opišite povezavo med meritvijo amplitude napetosti v voltih in v  $\text{dBV}_{RMS}$ . Preračunajte izmerjen vrh (drugo vprašanje na prejšnji strani) v frekvenčnem spektru v amplitudo, izraženo v voltih. Pokažite postopek izračuna.

---

Odgovori:

## Naloga 2: Opazovanje signalov s spektralnim analizatorjem

---

**Navodilo naloge:** S spektralnim analizatorjem opazujte signale, ki jih tvorite s funkcijskim generatorjem, in signale, ki jih sprejemate z UHF-anteno.

---

### Uvod

Spektralni analizator je naprava, ki jo uporabljamo za opazovanje spektralnih (frekvenčnih) lastnosti signalov. To pomeni, da lahko neposredno na zaslonu opazujemo moč signala v različnih (običajno ozkih) frekvenčnih pasovih. Pri opazovanju signalov s spektralnim analizatorjem so najpomembnejše nastavitve:

- frekvenčno območje opazovanja – nastaviti moramo, v katerem frekvenčnem območju hočemo opazovati signale, kar lahko običajno storimo na dva načina: (1) nastavimo centralno frekvenco in frekvenčni obseg (razlika med največjo in najmanjšo opazovano frekvenco); (2) nastavimo začetno oz. spodnjo mejo (najmanjšo frekvenco) in končno oz. zgornjo mejo (največjo frekvenco) obsega, ki ga hočemo opazovati;
- referenčni položaj in močnostno merilo – vertikalni položaj običajno nastavimo z vrednostjo moči signala na zgornjem robu zaslona, z močnostnim merilom pa nastavimo, v kakšnem obsegu moči bomo lahko opazovali signale;
- vhodno slabljenje signala – spektralni analizator je namenjen merjenju signalov, kjer je sprejeta moč signalov običajno majhna, zato moramo vhodne signale večjih moči včasih oslabiti za določeno vrednost, da lahko zagotovimo pravilno meritev;
- frekvenčna ločljivost (RBW = resolution bandwidth) – glede na medsebojno oddaljenost komponent, ki jih želimo opazovati v signalu, nastavljammo širino frekvenčnih pasov, v katerih opazujemo signal;
- video pasovna širina (VBW = video bandwidth) – v primeru spremenljive moči signalov pri določeni frekvenci lahko uporabimo še dodaten nizkoprepustni filter na izmerjeni moči signala in s tem dosežemo “povprečenje” moči po času, preden prikažemo sliko na zaslonu.

Spektralni analizatorji se uporabljajo za ugotavljanje lastnosti signalov, ki jih ne moremo zaznati z drugimi merilnimi napravami (npr. osciloskopi) zaradi frekvence ali pa dinamičnega razpona signalov. Primera teh lastnosti sta pasovna širina in razmerje signal – šum. Obe lastnosti bomo merili v tej vaji.

## Meritve in rezultati

Na funkcijskem generatorju nastavite sinusni signal frekvence 900 kHz in amplitude  $10 \text{ mV}_{RMS}$ . Na spektralnem analizatorju poiščite signal in ga izmerite. Koliko je izmerjena frekvenca signala (pri kateri frekvenci nastopi vrh)?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je energija vrha (enota naj bo dBm)?

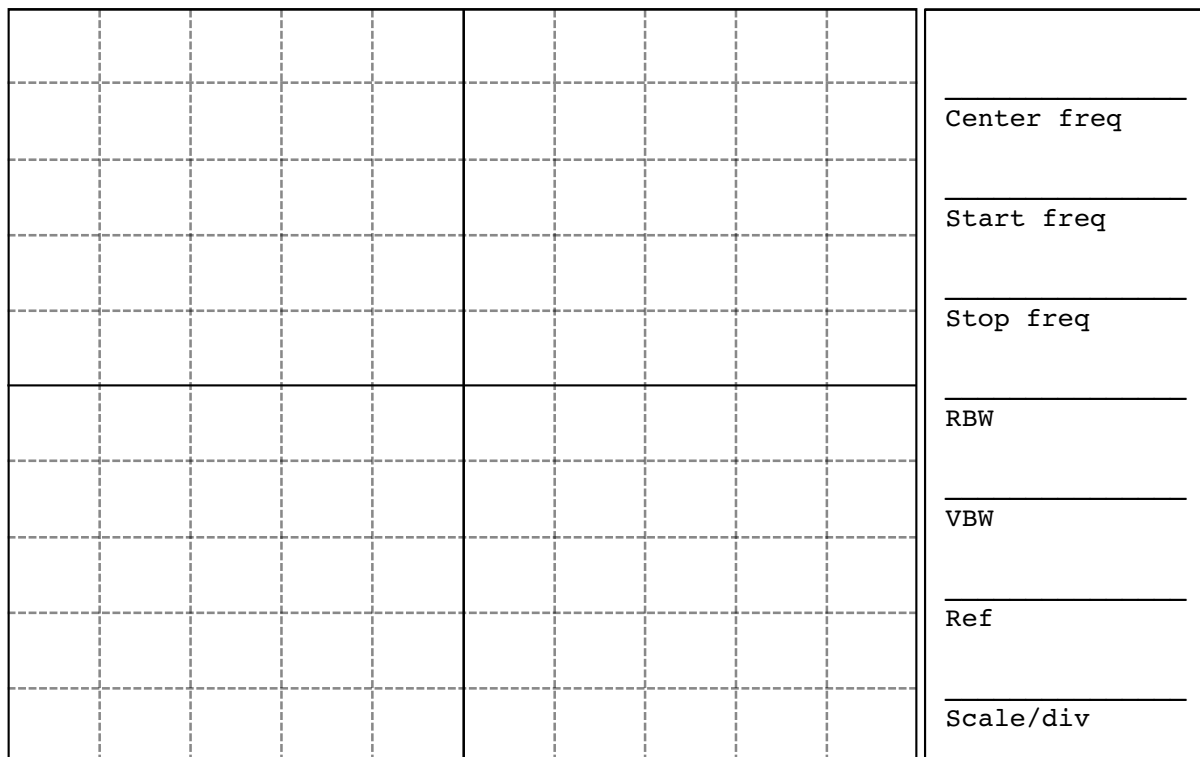
**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Na spektralni analizator priključite UHF-anteno ter nastavite spodnjo frekvenčno mejo na 88,5 MHz in zgornjo mejo na 108 MHz. Resolucija naj bo 30 kHz. Koliko vrhov opazite v tem frekvenčnem območju?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Povečajte enega izmed vrhov (nastavite novo centralno frekvenco in zmanjšajte frekvenčni obseg). Skicirajte sliko, ki jo pri tem vidite na spektralnem analizatorju. Zapišite tudi nastavitve spektralnega analizatorja pri merjenju. Koliko je pasovna širina signala, ki ga vidite?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_



Slika 3: Frekvenčna slika prejetega signala iz antene.



Nastavite centralno frekvenco 522 MHz in frekvenčni obseg 20 MHz. Koliko je pasovna širina signala, ki ga vidite?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Pri različnih nastavitvah frekvenčne ločljivosti, video pasovne širine in vhodnega slabljenja (input attenuation) izmerite moč signala, moč šuma ter izračunajte razmerje signal – šum (angl. signal-to-noise ratio – SNR). Vrednosti vpišite v spodnjo tabelo.

Tabela 1: Merjeni moči signala in šuma.

RBW	VBW	Input att. [dB]	Signal [dBm]	Šum [dBm]	SNR [dB]
300 kHz	3 kHz	0			
300 kHz	300 Hz	0			
300 kHz	30 Hz	0			
300 kHz	3 kHz	0			
30 kHz	3 kHz	0			
3 kHz	3 kHz	0			
300 kHz	3 kHz	0			
300 kHz	3 kHz	10			
300 kHz	3 kHz	20			

Skicirajte sliko na spektralnem analizatorju pri ločljivosti 30 kHz, video pasovni širini 300 Hz in vhodnemu slabljenju 0 dB. Zapišite tudi nastavitve spektralnega analizatorja pri merjenju.

	_____
	Center freq
	_____
	Start freq
	_____
	Stop freq
	_____
	RBW
	_____
	VBW
_____	
Ref	
_____	
Scale/div	

Slika 4: Frekvenčna slika prejetih signalov okoli frekvence 522 MHz.

### Izračuni in komentarji

- Kako vpliva nastavitvev frekvenčne resolucije na meritev moči in šuma širokopasovnega signala (takšnega, kot ste ga videli pri 522 MHz)?
- Iz skice na sliki 4 izračunajte celotno moč signala. Upoštevajte frekvenčno ločljivost, pasovno širino in nivo moči signala. Namig: podatek, ki ga vidite na spektralnem analizatorju, je moč v danem pasu. Celotno moč dobite tako, da množite moč v pasu s številom pasov (ob predpostavki, da so moči v posameznih pasovnih enake); vendar morate pri tem upoštevati enote – ali so to mW ali dBm.

---

Odgovori:

## Naloga 3: Amplitudna modulacija – princip delovanja

---

**Navodilo naloge:** S pomočjo laboratorijske opreme tvorite in opazujte amplitudno modulirane signale. Seznanite se z obnašanjem modulacije in lastnostmi signalov.

---

### Uvod

Modulacije so postopki spreminjanja neke lastnosti signalu, ki ga imenujemo nosilec ali nosilni signal. Signal, ki narekuje, kako se bo lastnost nosilca spreminjala, nosi informacijo (zvok, slika ipd.) in se imenuje modulatorski signal. V primeru, da je modulatorski signal analogen, govorimo o analognih modulacijah. Amplitudna modulacija je vrsta analogne modulacije, kjer spreminjamo amplitudo nosilca.

Osnovni nosilec signala  $c(t)$  naj ima sinusno obliko

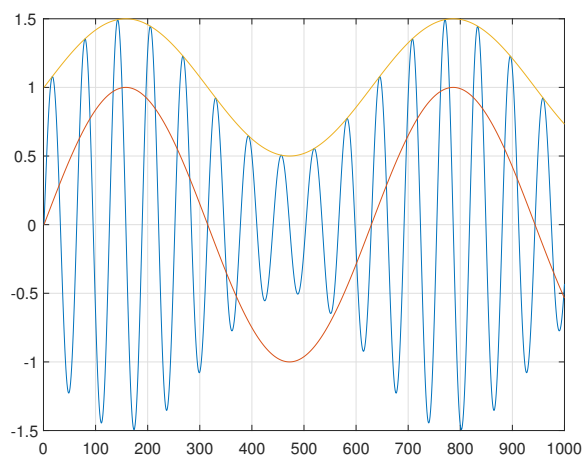
$$c(t) = A \cdot \sin(2\pi f_c t),$$

kjer je  $A$  amplituda nosilca in  $f_c$  njegova frekvenca. Naj bo potem  $x(t)$  modulatorski signal, katerega vrednosti se gibljejo med  $-1$  in  $+1$  (njegova največja možna amplituda je 1). Potem amplitudno modulacijo izrazimo z enačbo:

$$y(t) = c(t) \cdot (m \cdot x(t) + 1) = A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot (m \cdot x(t) + 1),$$

kjer konstanto  $m$  imenujemo modulatorski indeks, ki naj ima vrednost med 0 in 1. Če se držimo omejitev glede vrednosti signala  $x(t)$  in indeksa  $m$ , potem bo izraz  $(m \cdot x(t) + 1)$  vedno pozitiven.

Primer amplitudne modulacije s sinusnim modulatorskim signalom je prikazan na sliki 5. Z rdečo je označen modulatorski signal  $x(t)$ , z rumeno pa signal  $(m \cdot x(t) + 1)$ , ki predstavlja ovojnico moduliranega signala  $y(t)$ . Modra predstavlja moduliran signal, ki se uporablja za prenos informacije v signalu  $x(t)$ . Naloga sprejemnika (demodulatorja) je rekonstrukcija ovojnice in nato modulatorskega signala  $x(t)$  iz prejetega moduliranega signala.

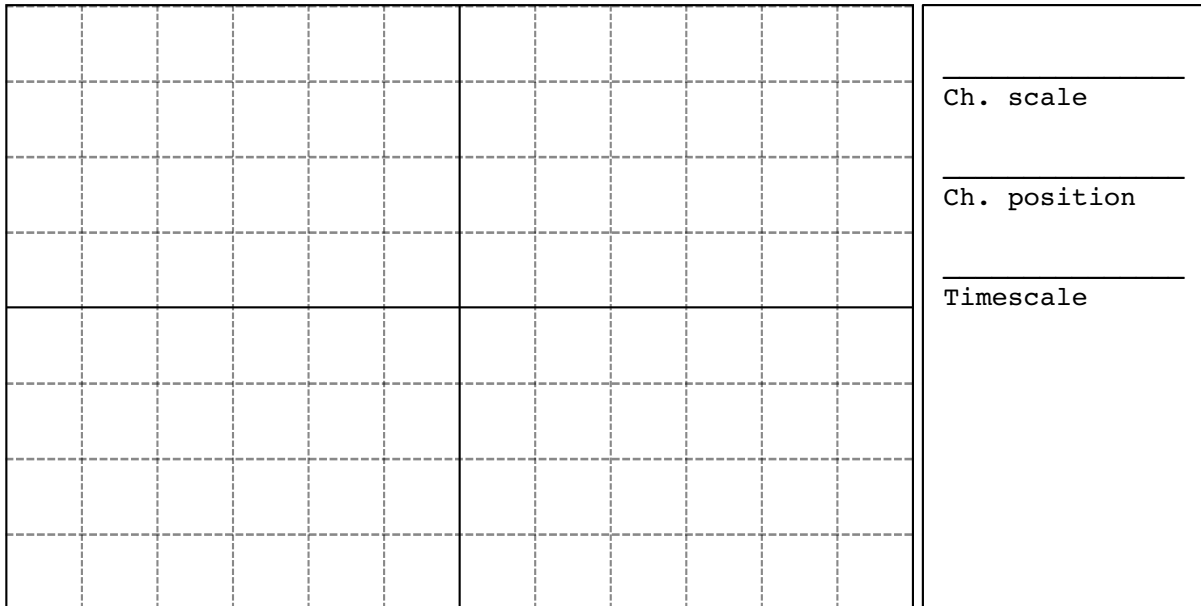


Slika 5: Primer amplitudne modulacije z modulatorskim indeksom  $m = 0,5$ .

## Meritve in rezultati

Povežite funkcijski generator in osciloskop. Na funkcijskem generatorju tvorite nosilni signal sinusne oblike s frekvenco 90 kHz in amplitudo  $1 V_{RMS}$ . Vključite modulacijo signala. Nastavite analogno modulacijo, globino modulacije 50 % in frekvenco modulatorskega signala 20 kHz.

Nastavite primerno časovno bazo za opazovanje modulacije v časovnem prostoru in skicirajte signal na spodnjo sliko.



Slika 6: Časovna slika amplitudno moduliranega vhodnega signala.

Koliko sta največja in najmanjša amplituda signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Spremenite modulatorsko globino na 100 %. Nastavite časovno bazo osciloskopa na  $50 \mu s$  in vključite analizo signala FFT. Koliko je višina osrednjega vrha pri frekvenci 90 kHz?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko sta višini stranskih vrhov?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko so razdalje med vrhovi (razlike frekvenc)?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_ .

Signal opazujte s spektralnim analizatorjem. Najprej ohranite dosedanje nastavitve na funkcijem generatorju. Nato spremenite modulatorsko frekvenco na 10 kHz. Kako se spremeni slika v frekvenčnem prostoru?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Spremenite globino modulacije na 50 % in nato še na 30 %. Kako se spremeni slika v frekvenčnem prostoru?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

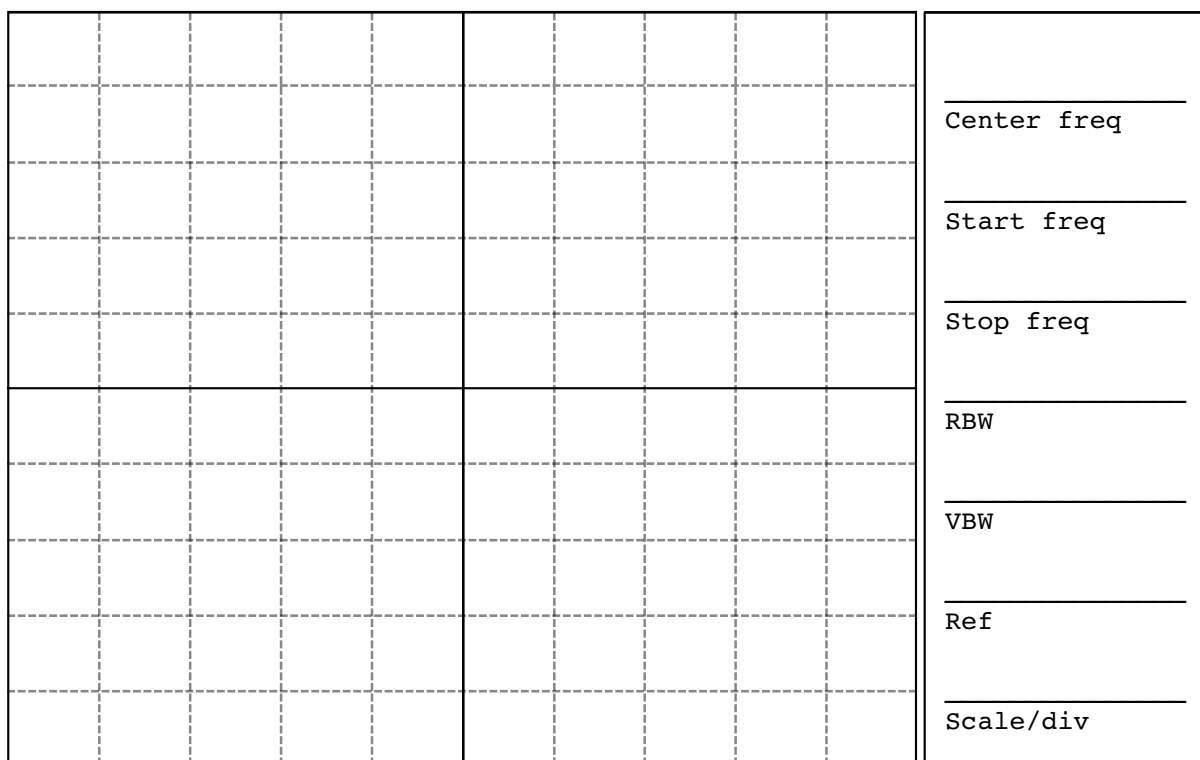
Spremenite obliko modulatorskega signala v trikotno. Kako se spremeni slika v frekvenčnem prostoru?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Spremenite obliko modulatorskega signala v pravokotno. Kako se spremeni slika v frekvenčnem prostoru?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Skicirajte sliko v frekvenčnem prostoru, ki ste jo izmerili s spektralnim analizatorjem pri trikotni obliki modulatorskega signala.



Slika 7: Frekvenčna slika amplitudno moduliranega signala.

**Izračuni in komentarji**

- Izmerjene vrhove v spektru FFT (2. in 3. vprašanje) pretvorite iz  $\text{dBV}_{RMS}$  v  $V$ . Pokažite postopek izračuna.
- Opišite vpliv lastnosti modulatorskega signala (frekvenca, oblika in globina modulacije) na spektralno sliko moduliranega signala?

---

Odgovori:

## Naloga 4: Amplitudna modulacija – pasovna širina in oddajanje

---

**Navodilo naloge:** Preučite povezavo med frekvenčno sliko modulatorskega in frekvenčno sliko moduliranega signala ter pasovno širino moduliranega signala. Preverite še delovanje prenosa signalov z amplitudno modulacijo.

---

### Uvod

Amplitudno moduliran signal izrazimo z  $y(t) = c(t) \cdot (m \cdot x(t) + 1) = A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot (m \cdot x(t) + 1)$ . Kadar je modulatorski signal prav tako sinusne oblike in ima frekvenco  $f_m$ , ga lahko opišemo z izrazom  $x(t) = \cos(2\pi f_m t)$ . Moduliran signal ima potem obliko:

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot (m \cdot \cos(2\pi f_m t) + 1).$$

Zgornji izraz je zapisan v obliki produkta dveh sinusnih signalov. Če upoštevamo enakost

$$\sin(a \cdot t) \cdot \cos(b \cdot t) = \frac{\cos((a+b)t)}{2} + \frac{\cos((a-b)t)}{2},$$

lahko zgornji izraz preoblikujemo v vsoto treh signalov sinusne oblike:

$$y(t) = A \left( \cos(2\pi f_c t) + \frac{m \cdot \cos(2\pi(f_c - f_m)t)}{2} + \frac{m \cdot \cos(2\pi(f_c + f_m)t)}{2} \right).$$

Ta zapis je bolj ugoden, kadar nas zanimajo lastnosti signala v frekvenčnem prostoru. Največjo amplitudo v vsoti ima signal, katerega frekvenca je enaka frekvenci nosilca. Preostala dva signala, t.i. bočna signala, imata manjšo amplitudo, njuni frekvenci pa sta od nosilnega signala oddaljeni za frekvenco modulatorskega signala:  $f_c + f_m$  in  $f_c - f_m$ . Vidimo tudi, da sta amplitudi bočnih signalov odvisni od modulatorskega indeksa.

Vsak periodični (tudi nesinusni) modulatorski signal lahko predstavimo kot vsoto sinusnih signalov različnih frekvenc (Fourierjeva vrsta). Če tak signal množimo z nosilcem, dobimo ponovno vsoto sinusnega signala s frekvenco nosilca in pare sinusnih signalov, ki so od nosilca oddaljeni navzgor in navzdol za frekvence sinusov v modulatorskem signalu.

Pasovna širina modulatorskega signala je frekvenca najvišje komponente v njem. Če upoštevamo, da se pri modulatorju pojavijo komponente, ki so za to frekvenco oddaljene v dve smeri od frekvence nosilca, ugotovimo, da potrebuje moduliran signal dvakrat večjo pasovno širino, kot pa je najvišja frekvenca v modulatorskem signalu. Pišemo

$$B_m = 2 \cdot B,$$

kjer je  $B$  pasovna širina modulatorskega signala,  $B_m$  pa pasovna širina moduliranega signala.

## Meritve in rezultati

Signale bomo oddajali s pomočjo anten, ki jih priključimo neposredno na izhod funkcijskega generatorja. Ker bomo delali z majhnimi oddajnimi močmi in hočemo jasen sprejem signalov, morajo oddajne antene biti v neposredni bližini sprejemnika oz. sprejemne antene, ki jo priključimo na spektralni analizator.

Na funkcijskih generatorjih izberite različne nosilne frekvence. Modulacija naj bo trenutno še izklopljena. Z radijskim sprejemnikom poiščite ustrezne frekvence oddajanja. Kaj slišite na sprejemniku pri frekvenci, na kateri oddajate?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Na funkcijskih generatorjih izberite modulacijske signale različnih frekvenc. Modulacijski signali naj bodo vsi sinusne oblike. Preverite delovanje prenosa signalov – na radijskem sprejemniku morate slišati modulacijski signal.

Povežite izhod zvočne kartice osebnega računalnika na modulacijski vhod, na računalniku pa predvajajte audio posnetke. Poslušajte vse kanale na radijskem sprejemniku. Povečujte razdaljo med oddajno anteno in radijskim sprejemnikom. Koliko je največja razdalja, pri kateri še lahko sprejemate signal?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Nastavite sinusni modulacijski signal frekvence 5 kHz. Spreminjajte nosilne frekvence na funkcijskih generatorjih, tako da se bodo frekvence približevale. Pri kakšnih nosilnih frekvencah se pojavijo medsebojne motnje?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Opazujte signal, ki ga sprejmete na anteni na spektralnem analizatorju. Izmerite sprejemno moč na srednjem vrhu. Podvojite razdaljo med antenama in ponovno izmerite sprejemno moč. Koliko je razlika med sprejetimi močmi signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

S pripravljenim vezjem FPGA in pretvornikom DAC tvorite modulacijski signal (signal v osnovnem pasu). Signal vsebuje več frekvenčnih komponent. Vklopite vse komponente, priključite signal na vhod osciloskopa in opravite FFT-analizo. Koliko je pasovna širina signala v osnovnem pasu?

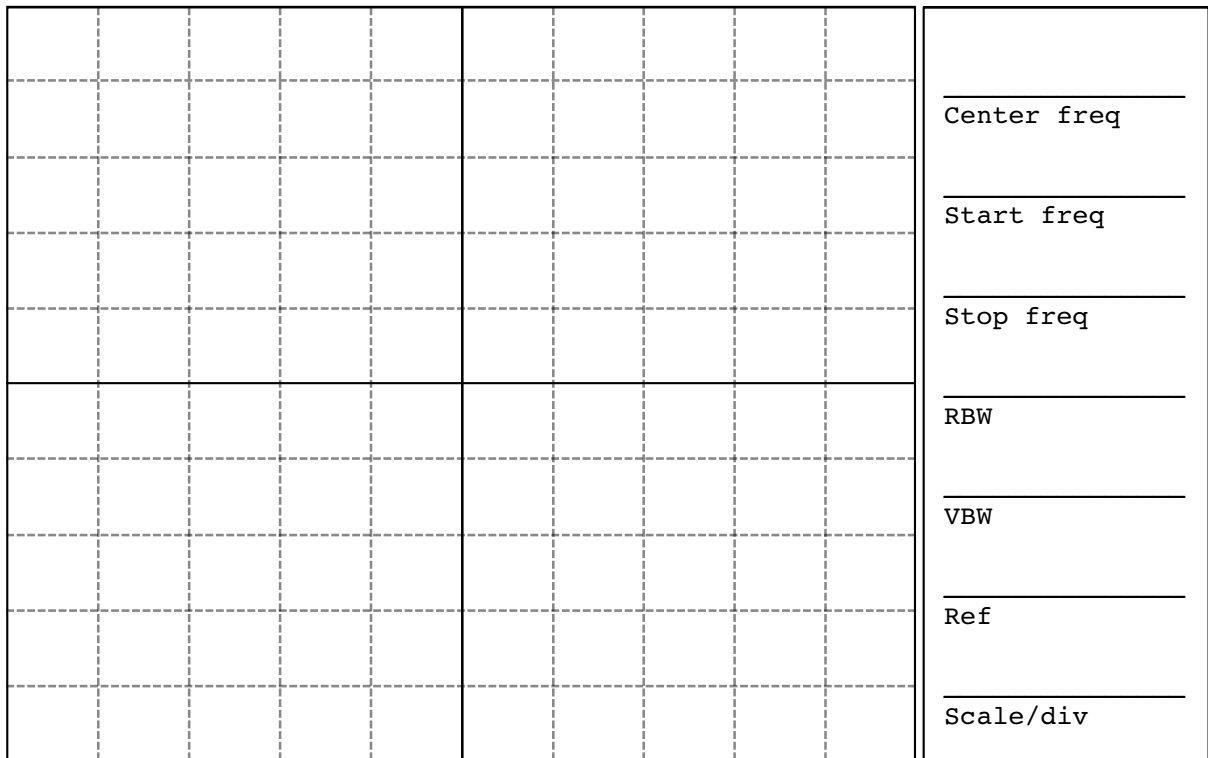
**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Priključite signal na modulacijski vhod funkcijskega generatorja. Nastavite nosilni signal z amplitudo  $20 V_{pp}$  in frekvenco 1 MHz. Vklopite analogno modulacijo in izberite zunanji vir modulacije. Koliko je pasovna širina signala v prenosnem pasu?

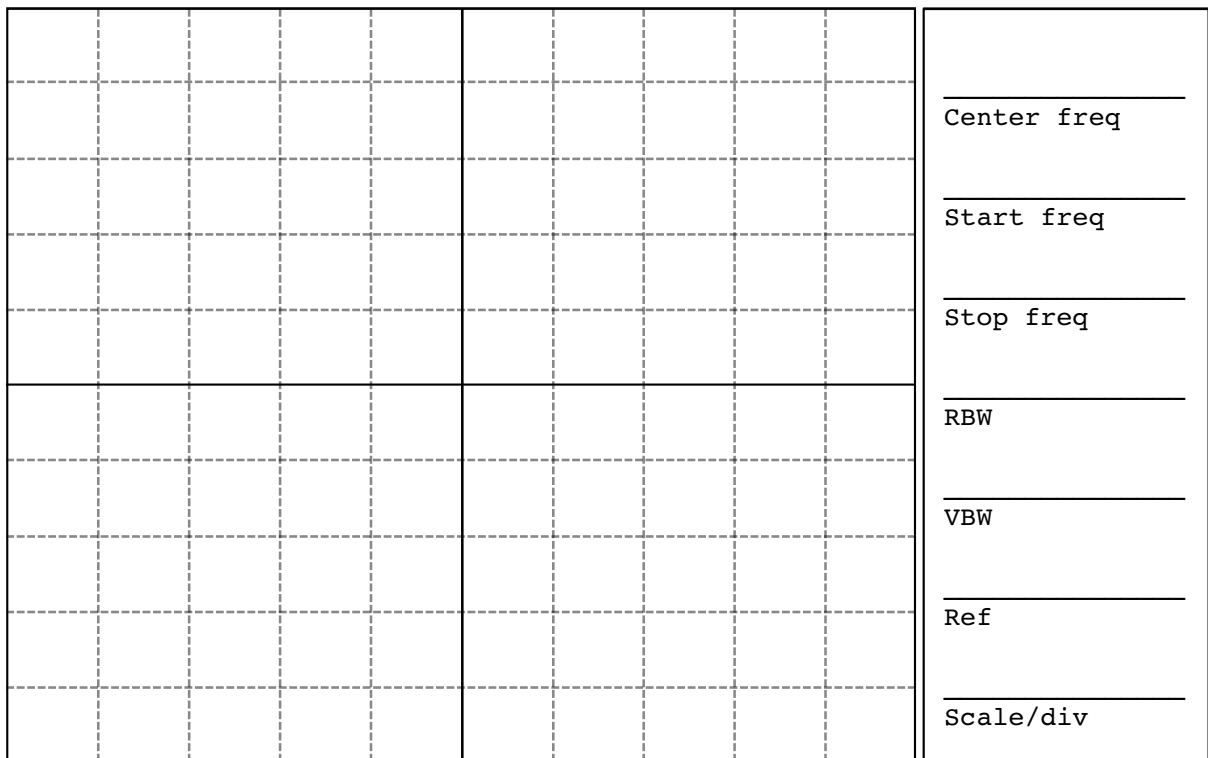
**Odgovor:** \_\_\_\_\_



Skicirajte frekvenčno sliko modulatorskega signala v osnovnem in moduliranega signala v prenosnem pasu, ki ju vidite s spektralnim analizatorjem.



Slika 8: Frekvenčna slika modulatorskega signala v osnovnem pasu.



Slika 9: Frekvenčna slika amplitudno moduliranega signala v prenosnem pasu.

### Izračuni in komentarji

- Naj bo modulatorski signal v osnovnem pasu sestavljen iz dveh sinusnih signalov s frekvencama  $f_1$  in  $f_2$  ter amplitudama  $A_1$  in  $A_2$ . Z njim moduliramo nosilec s frekvenco  $f_c$ . Modulacijski indeks je pri tem 1. Predstavite končni signal kot vsoto sinusnih signalov. Pomagajte si z enačbami v uvodu naloge.
- Imamo oddajni sistem z analogno modulacijo, ki vsebuje več kanalov (nosilnih frekvenc). Prenašamo signale z določeno pasovno širino. Opišite povezavo med to pasovno širino v osnovnem pasu in minimalno razliko med nosilnimi frekvencami kanalov.

---

Odgovori:

## Naloga 5: Frekvenčna modulacija – princip delovanja

---

**Navodilo naloge:** Preučite princip delovanja frekvenčne modulacije in lastnosti frekvenčno moduliranega signala.

---

### Uvod

Frekvenčna modulacija je vrsta analogne modulacije, kjer glede na modulatorski signal spreminjamo frekvenco nosilca okoli neke srednje vrednosti. Naj ima osnovni (nemoduliran) nosilec obliko

$$c(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t),$$

kjer je  $A$  amplituda,  $f_c$  pa centralna frekvenca nosilca. Naj bo potem  $x(t)$  modulatorski signal. Pri frekvenčni modulaciji govorimo o trenutni frekvenci nosilca, ki je odvisna od centralne frekvence, modulatorskega signala in dogovorjenega največjega odmika. Če se modulatorski signal  $x(t)$  giblje med vrednostma  $-1$  in  $+1$ , potem lahko trenutno frekvenco zapišemo kot

$$f(t) = f_c + f_\Delta \cdot x(t),$$

kjer je  $f_c$  centralna frekvenca,  $f_\Delta$  pa maksimalni frekvenčni odmik. Ta odmik imenujemo frekvenčna deviacija.

Frekvenco sinusnega signala lahko tudi definiramo kot hitrost spreminjanja faznega kota:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt}.$$

Fazni kot v danem trenutku je potem integral frekvence od neke začetne točke do tega trenutka, pri tem pa lahko frekvenco izrazimo z modulatorskim signalom

$$\varphi(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^t (f_c + m(\tau) \cdot f_\Delta) d\tau.$$

Izraz za trenutno vrednost nosilca tako postane:

$$c(t) = A \cos(\varphi(t)) = A \cos\left(\int_0^t (f_c + m(\tau) \cdot f_\Delta) d\tau\right).$$

Modulatorski indeks v frekvenčni modulaciji definiramo kot razmerje med največjim odkikom frekvence nosilca od centralne frekvence in največjo frekvenčno komponento v modulatorskem signalu:

$$m = \frac{f_\Delta}{f_m}.$$

Kadar je modulatorski indeks  $m \ll 1$ , ocenjujemo pasovno širino signala z  $2f_m$ , kadar pa je indeks  $m \gg 1$ , ocenjujemo pasovno širino z  $2f_\Delta$ .

Sicer pa lahko uporabljamo Carsonovo pravilo, ki ocenjuje, da se 98 % energije signala nahaja v pasovni širini

$$B = 2 \cdot (f_\Delta + f_m),$$

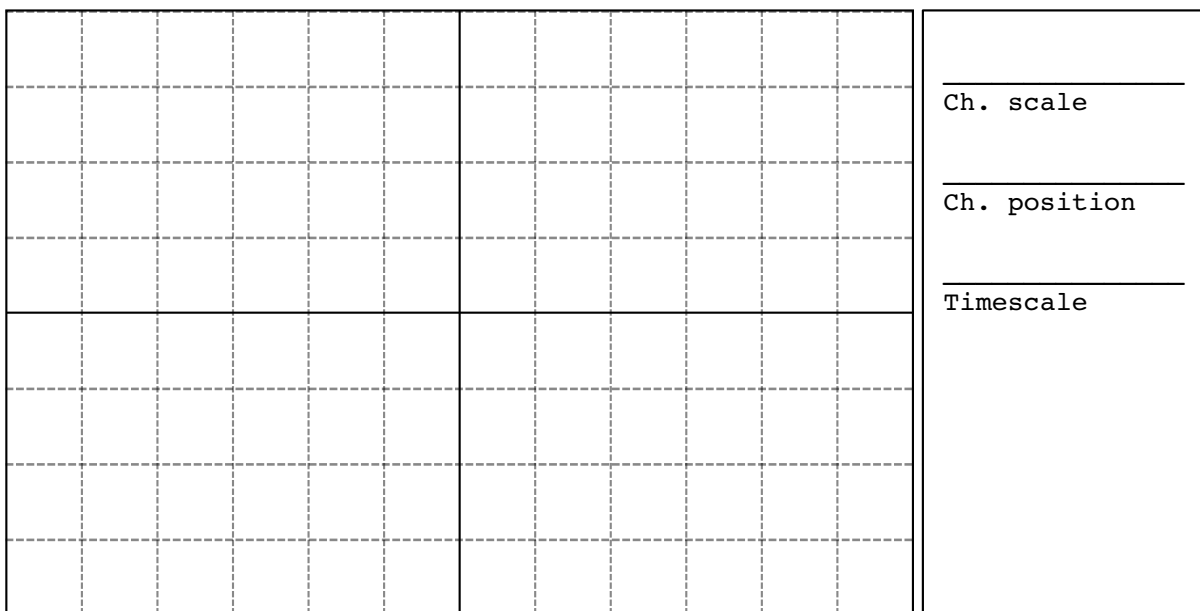
kjer je  $f_m$  največja frekvenca v modulatorskem signalu.

## Meritve in rezultati

Povežite funkcijski generator in osciloskop ter nastavite nosilni signal z amplitudo  $20 V_{pp}$  in frekvenco 200 kHz. Vključite frekvenčno modulacijo in nastavite sinusno obliko modulatorskega signala, frekvenčni odmik 100 kHz ter frekvenco modulatorskega signala 1 Hz. Signal opazujte z osciloskopom v časovnem prostoru in s spektralnim analizatorjem. Postopoma povečujte modulatorsko frekvenco, dokler ne boste na osciloskopu v eni sliki lahko jasno videli delovanja frekvenčne modulacije. Koliko je nastavljena modulatorska frekvenca?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Skicirajte sliko na osciloskopu v časovnem prostoru, tako da bo jasno vidno delovanje frekvenčne modulacije.



Slika 10: Časovna slika frekvenčno moduliranega signala.

Nastavite modulatorsko frekvenco 20 kHz in opazujte signal s spektralnim analizatorjem ali pa z analizo FFT na osciloskopu. Koliko je pasovna širina signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je ocena pasovne širine po Carsonovem pravilu?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

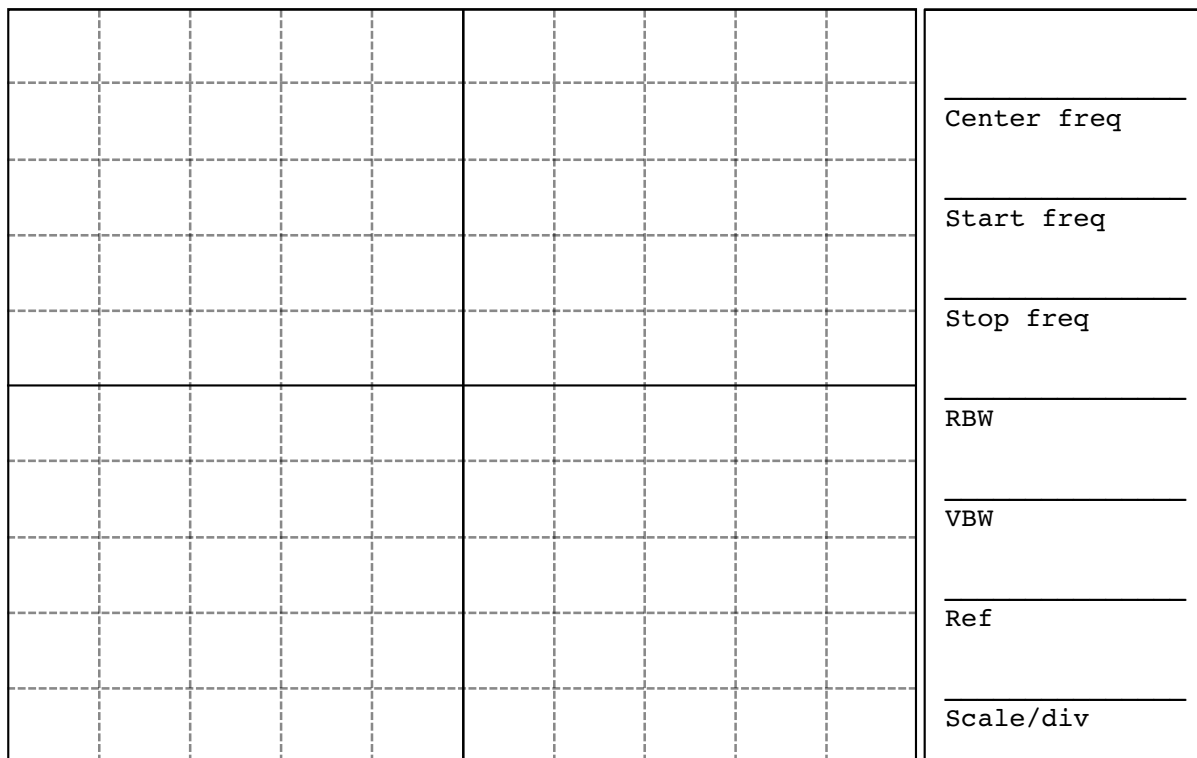
Spreminjajte frekvenco nosilca, frekvenčno deviacijo in frekvenco modulatorskega signala. Oblika modulatorskega signala naj bo v vseh primerih sinusna. Nastavitve katerih parametrov vidno vpliva na izmerjeno pasovno širino signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Nastavite frekvenčno deviacijo 100 kHz, pravokotno obliko modulatorskega signala in modulatorsko frekvenco 10 kHz. Izhodni signal opazujte s spektralnim analizatorjem. Koliko je izmerjena pasovna širina signala?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Skicirajte signal, ki ste ga izmerili s spektralnim analizatorjem.



Slika 11: Frekvenčna slika signala v prenosnem pasu.

### Izračuni in komentarji

- Če upoštevate Carsonovo pravilo, zakaj lahko za modulatorske indekse, veliko večje ali pa veliko manjše od 1, poenostavimo oceno pasovne širine?
- Načrtujemo oddajni sistem s frekvenčno modulacijo, kjer je frekvenčna deviacija 75 kHz, modulatorski signali pa vsebujejo frekvence do 16 kHz. Koliko je pasovna širina oddajanih signalov v prenosnem pasu?

---

Odgovori:

## Naloga 6: Frekvenčna modulacija – prenos stereo signala

---

**Navodilo naloge:** S signalnim generatorjem testirajte oddajanje mono in stereo signalov z modulacijo FM. Preučite lastnosti signala v osnovnem in prenosnem pasu.

---

### Uvod

Prenos zvoka s frekvenčno modulacijo v stereo načinu – prenos dveh signalov istočasno, kjer en signal predstavlja zvok na levem kanalu oz. zvočniku in drugi na desnem kanalu oz. zvočniku – dosežemo z uporabo podnosilcev v osnovnem pasu. Pri tem postopku imamo osnovni signal, ki mu najprej dodamo amplitudno modulirane dodatne informacije. Skupni signal nato služi kot modulacijski signal v končni modulaciji. V našem primeru je to frekvenčna modulacija.

Signal osnovnega pasu v običajnem stereo prenosu preko FM vsebuje osnovni mono signal, pilotni ton in enega ali več podnosilcev. Osnovni signal je vsota levega in desnega kanala, pilotni ton pa je sinusni signal s frekvenco 19 kHz.

Prvi podnosilec vsebuje razliko med levim in desnim kanalom, amplitudno modulirano na frekvenci 38 kHz (dvakratnik pilotnega tona). Način modulacije je DSB-SC (double-sideband suppressed-carrier). Pri tem načinu modulacije množimo nosilec z modulacijskim signalom brez dodatka enosmerne komponente. Tako v spektru več ne vidimo nosilca, še vedno pa vidimo oba bočna pasova.

Skupni signal v osnovnem pasu lahko zapišemo z:

$$x(t) = \left( 0,9 \cdot \frac{L(t) + D(t)}{2} + 0,9 \cdot \frac{L(t) - D(t)}{2} \cdot \sin(2\pi 2f_p t) + 0,1 \cdot \sin(2\pi f_p t) \right),$$

kjer sta  $L(t)$  in  $D(t)$  signala levega in desnega kanala,  $f_p$  pa je frekvenca pilotnega tona.

Signala levega in desnega kanala vsebujeta frekvence od 30 Hz do 15 kHz (slišni zvok). Posledično imata tudi vsota in razlika teh kanalov enak frekvenčni obseg. V končnem spektru bo prisoten mono signal v frekvencah do 15 kHz, pilotni ton pri 19 kHz in podnosilec pri frekvencah  $38 \pm 15$  kHz. Najvišja frekvenčna komponenta je tako pri frekvenci 53 kHz, kar v tem primeru predstavlja pasovno širino signala v osnovnem pasu.

Osnovni signal v frekvenčni modulaciji lahko vsebuje še nadaljnje podnosilce, ki prenašajo dodatne informacije (ime radijske postaje, alternativne frekvence, prometne informacije ipd). V tem primeru bo tudi pasovna širina ustrezno večja.

Signal osnovnega pasu se nato na oddajni strani uporabi za frekvenčno modulacijo nosilca, ki se preko radijskih valov prenaša do sprejemnikov. Ti potem prejet signal frekvenčno demodulirajo in s tem rekonstruirajo signal v osnovnem pasu.

Mono sprejemniki signal filtrirajo (odrežejo pilotni ton in podnosilec) ter filtrirani signal predvajajo. Stereo sprejemniki morajo dodatno še demodulirati podnosilec. Ker je uporabljena modulacija DSB-SC, potrebujejo ti sprejemniki še pilotni ton v demodulaciji, saj ni mogoče uporabiti enostavnih analognih demodulatorjev kot pri amplitudni modulaciji iz prejšnjih nalog. S seštevanjem oz. odštevanjem mono signala in demoduliranega podnosilca lahko sprejemnik nato rekonstruira signal za levi oz. desni kanal.

## Meritve in rezultati

S signalnim generatorjem tvorite nosilni signal s frekvenco 98 MHz. Oddajna moč naj bo  $-10$  dBm. Testirajte sprejem zvoka z radijskim sprejemnikom. Kaj slišite s sprejemnikom pri izklopljeni modulaciji?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Na signalnem generatorju nastavite frekvenčno modulacijo z deviacijo frekvence 50 kHz. Modulacijska frekvenca naj bo 0,2 Hz. Opazujte signal s spektralnim analizatorjem in istočasno še testirajte sprejem zvoka na radijskem sprejemniku v mono načinu oz. sprejemniku z le enim zvočnikom. Postopoma povečujte modulacijsko frekvenco do 10 kHz. Koliko je pasovna širina moduliranega signala pri modulacijski frekvenci 10 kHz?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

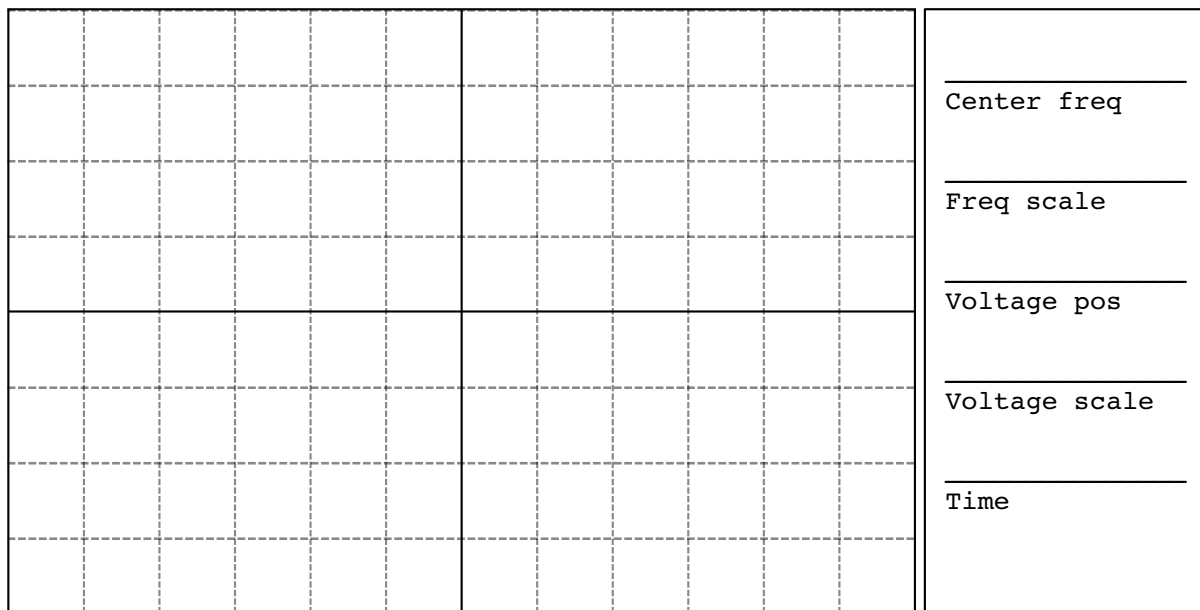
Zmanjšujte oddajno moč na signalnem generatorju. Koliko je najmanjša moč, pri kateri še jasno dobite zvok na radijskem sprejemniku?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

S pripravljenim vezjem FPGA tvorite modulacijski signal (signal v osnovnem pasu). Z vhodi v vezje lahko nastavljate prisotnost signala za levi kanal in desni kanal ter prisotnost pilotnega tona in podnosilca. Vključite vse signale in priključite signal na osciloskop, kjer ga opazujete v načinu FFT. Koliko je pasovna širina signala v osnovnem pasu?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Skicirajte signal v osnovnem pasu.



Slika 12: Frekvenčna slika signala v osnovnem pasu.



Signal osnovnega pasu priključite na modulacijski vhod signalnega generatorja, na katerem nastavite frekvenčno modulacijo z nosilno frekvenco 100 MHz, deviacijo frekvence 75 kHz in zunanji modulacijski vhod.

Testirajte sprejem zvoka na radijskem sprejemniku v stereo načinu z dvema zvočnikoma. Testirajte sprejem pri različnih kombinacijah prisotnosti mono signala, pilotnega tona in podnosilca.

V signalu naj bosta prisotna mono signal in pilotni ton. Kakšen vpliv ima (ne)prisotnost podnosilca?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

V signalu naj bosta prisotna mono signal in podnosilec. Kakšen vpliv ima (ne)prisotnost pilotnega tona?

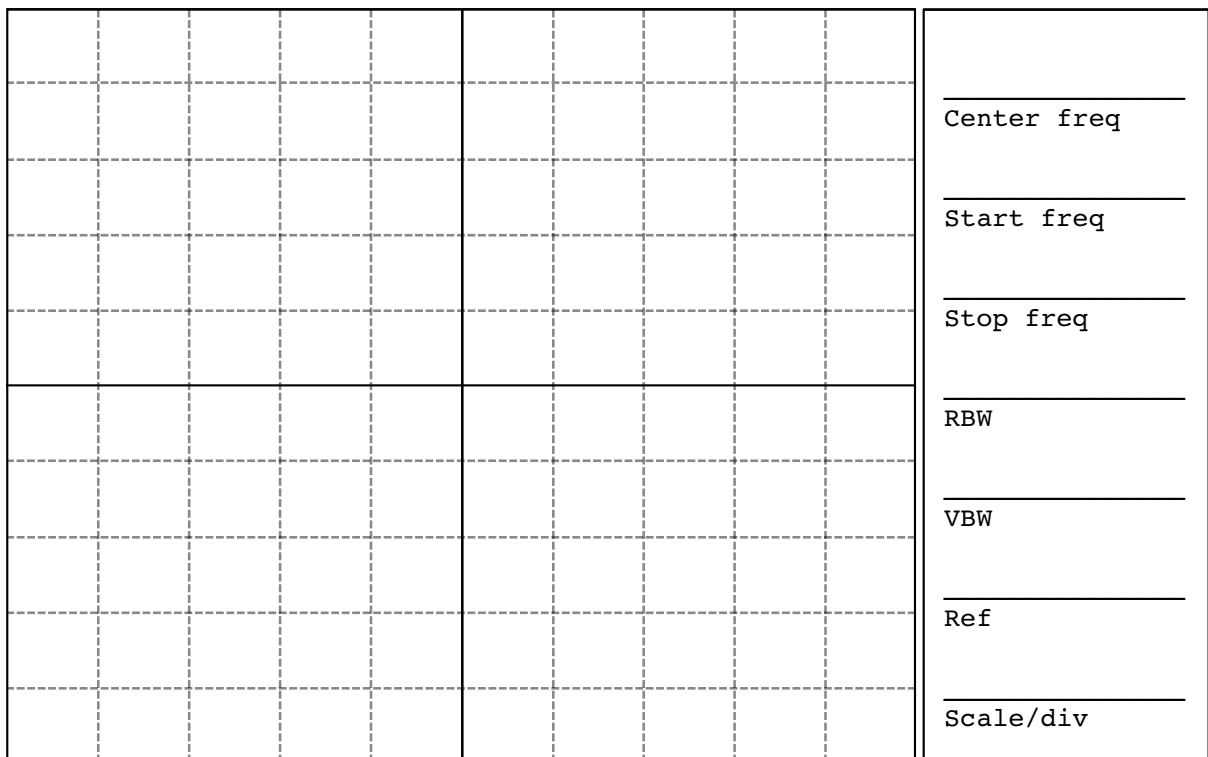
**Odgovor:** \_\_\_\_\_

V signalu naj bosta prisotna pilotni ton in podnosilec. Kakšen vpliv ima (ne)prisotnost mono signala na končni zvok?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Signal opazujte s spektralnim analizatorjem. Koliko je pasovna širina signala v prenosnem pasu?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_



Slika 13: Frekvenčna slika signala v prenosnem pasu.

### Izračuni in komentarji

- Pojasnite, zakaj je prišlo na stereo sprejemniku do rezultatov, ki ste jih opazili, ob (ne)prisotnosti mono signala, pilotnega tona in podnosilca.
- Imamo oddajni sistem s frekvenčno modulacijo, kjer so v osnovnem signalu prisotni mono signal s frekvencami do 15 kHz, pilotni ton pri 19 kHz, prvi podnosilec pri frekvenci 38 kHz, ki nosi signale s frekvencami do 15 kHz, ter drugi podnosilec pri frekvenci 57 kHz, ki nosi signale s frekvencami do 2,2 kHz. Signal frekvenčno moduliramo s frekvenčno deviacijo 75 kHz. Izračunajte (pokažite celoten postopek) zahtevano pasovno širino v prenosnem pasu. Uporabite Carsonovo pravilo (glej prejšnjo nalogo).

---

Odgovori:

## Naloga 7: Modulacija QAM in multipleksiranje OFDM

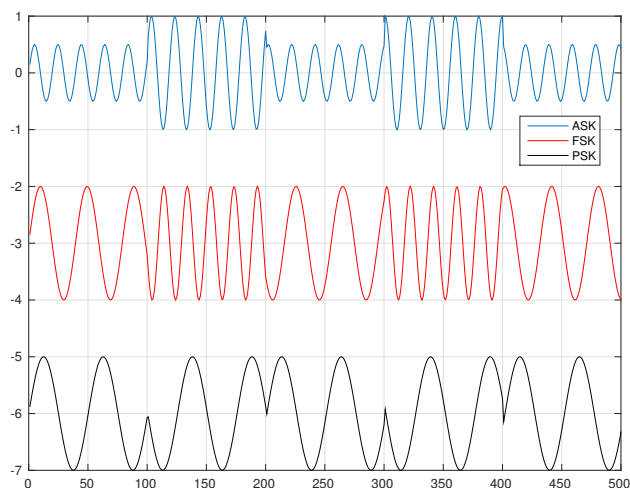
---

**Navodilo naloge:** Z osciloskopom in spektralnim analizatorjem opazujte signale, ki so modulirani z modulacijama 4-QAM in 16-QAM, ter multipleksirane signale OFDM.

---

### Uvod

V dosedanjih nalogah smo obravnavali analogne modulacije, kjer je modulatorski signal, ki nosi informacijo, analogen. Poznamo pa tudi več vrst digitalnih modulacij. Primeri so modulacija ASK (Amplitude-shift keying), kjer glede na vhodni podatek nosilcu spreminjamo amplitudo, modulacija FSK (Frequency-shift keying), kjer spreminjamo frekvenco, in modulacija PSK (Phase-shift keying), kjer spreminjamo fazni zamik signala, medtem pa v vseh treh primerih ostali dve lastnosti signala ostajata konstantni.



Slika 14: Preproste binarne digitalne modulacije.

Na sliki 14 so prikazane binarne modulacije ASK, FSK in PSK, kjer imamo v vsaki modulaciji dve možni vrednosti parametra, ki ga spreminjamo. To pomeni tudi, da v vsakem trenutku prenašamo le 1 bit informacij.

Poznamo tudi kompleksnejše modulacije, kjer prenašamo več kot en bit informacij. Primer je modulacija QAM, kjer se končni signal tvori kot vsota dveh sinusnih signalov, ki sta zamaknjena za fazni kot  $90^\circ$ :

$$y(t) = I \cdot \cos(2\pi ft) - Q \cdot \sin(2\pi ft),$$

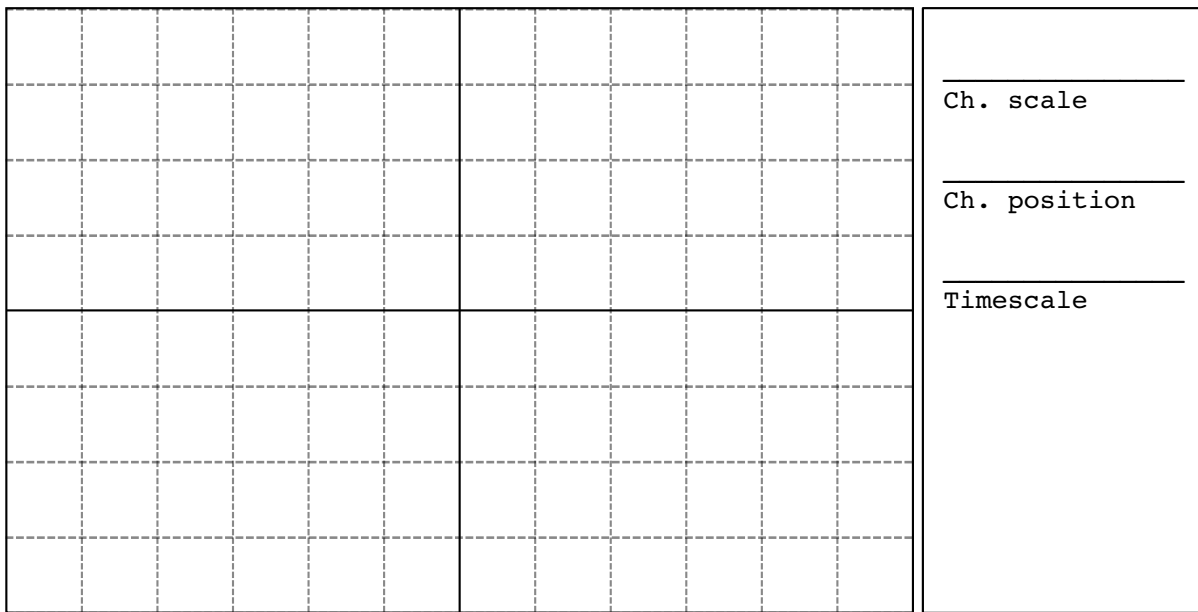
kjer sta  $I$  (In-phase component) in  $Q$  (Quadrature component) določena na podlagi vhodnih digitalnih podatkov. Primer je modulacija 16-QAM, kjer v nekem trenutku končni signal nosi 4 bite informacije ( $2^4 = 16$ ) – te 4 bite imenujemo simbol. 16 možnih signalov dobimo s kombinacijo 4 možnih vrednosti za  $I$  in 4 možnih vrednosti za  $Q$ .

V tej vaji si bomo pogledali signale, modulirane z modulacijo QAM, nato pa še postopek multipleksiranja OFDM.

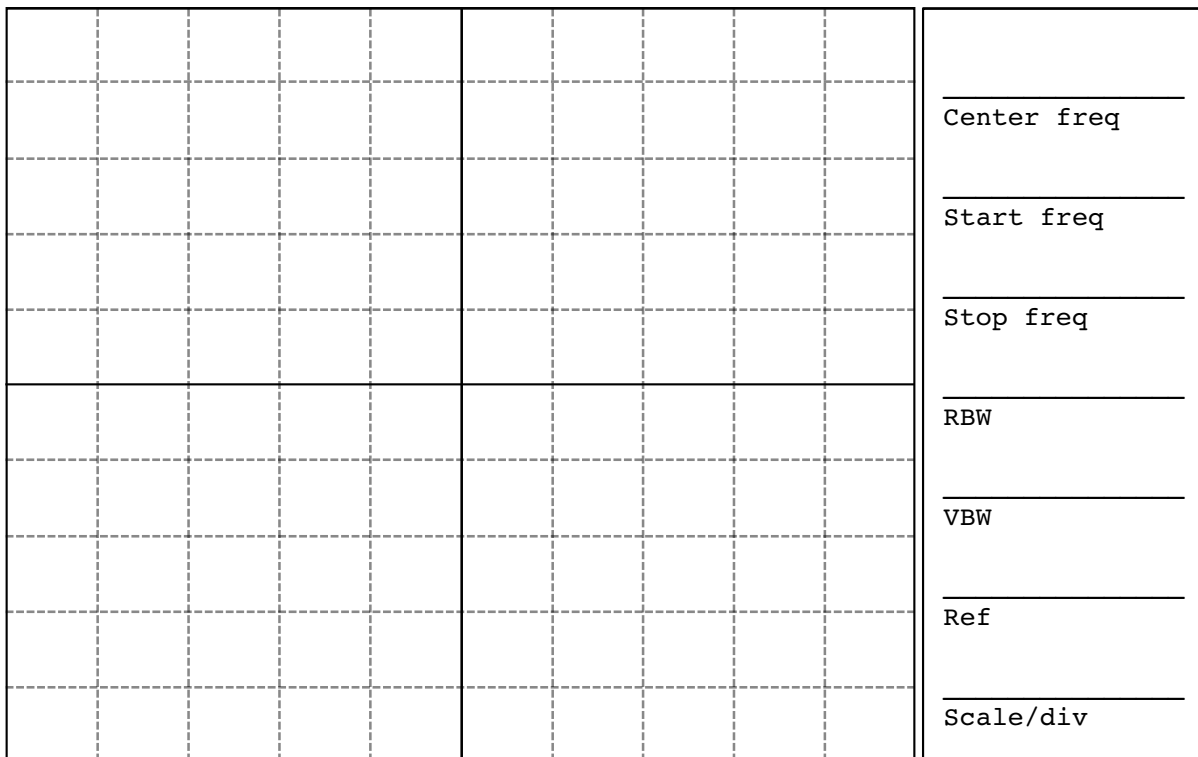
## Meritve in rezultati

S pripravljenim vezjem FPGA tvorite signale v modulacijah 4-QAM in 16-QAM ter oboje opazujte na osciloskopu in spektralnem analizatorju. Skicirajte signal 4-QAM v časovnem in 16-QAM v frekvenčnem prostoru. Koliko sta frekvenca nosilca in hitrost simbolov?

Odgovor: \_\_\_\_\_



Slika 15: Časovna slika signala v modulaciji 4-QAM.



Slika 16: Frekvenčna slika signala v modulaciji 16-QAM.

OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) je metoda za frekvenčno multipleksiranje podatkov na ortogonalnih podnosilcih, kjer je na vseh podnosilcih uporabljena neka modulacija, npr. QAM.

Tukaj se vhodni podatki razdelijo na več vzporednih podatkovnih tokov, od katerih vsak modulira enega izmed podnosilcev. V vsakem trenutku nosi vsak podnosilec določeno število bitov glede na uporabljeno modulacijo. Posledično moramo upoštevati, da je skupna hitrost prenosa podatkov enaka hitrosti prenosa podatkov na enem podnosilcu, pomnožena s številom podnosilcev.

S pripravljenim vezjem FPGA tvorite signale v modulaciji 4-QAM z multipleksiranjem OFDM ter jih opazujte z osciloskopom in spektralnim analizatorjem.

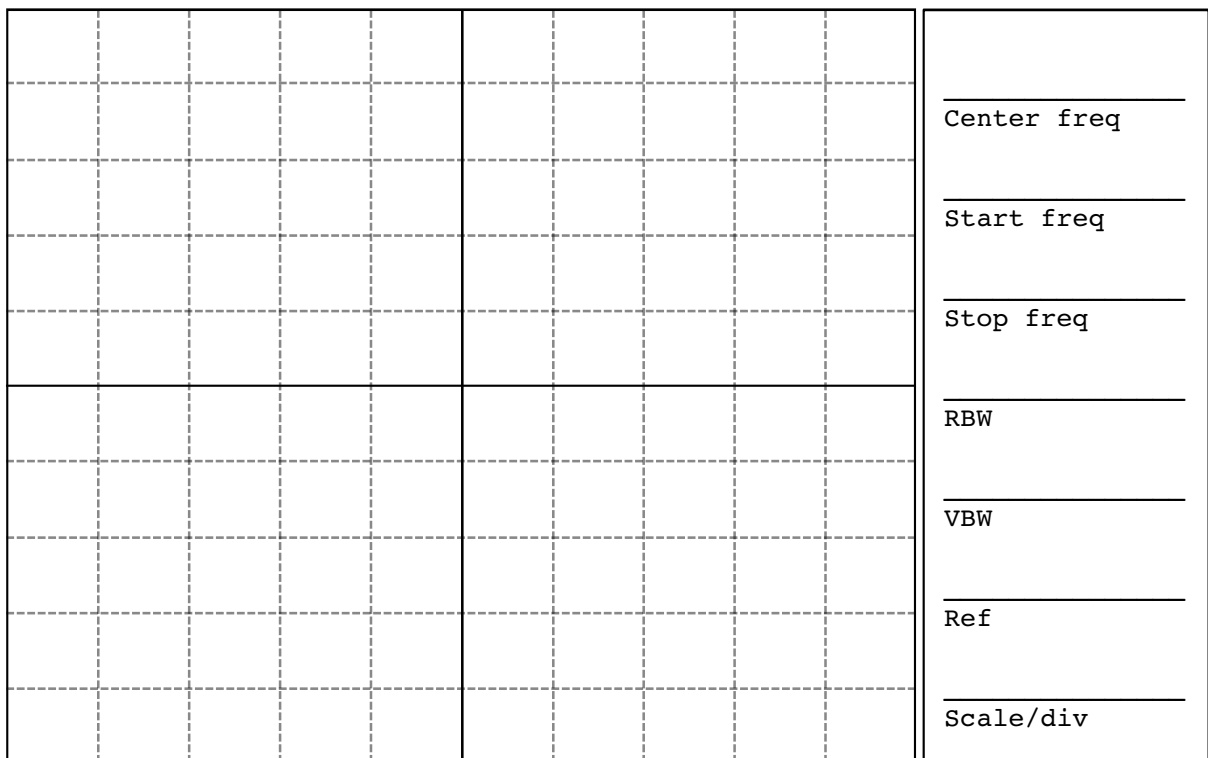
Koliko različnih podnosilcev vsebuje signal?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Kako so podnosilci frekvenčno razporejeni?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Opazujte signal s frekvenčnim analizatorjem in skicirajte sliko.



Slika 17: Frekvenčna slika signala z multipleksiranjem OFDM.

### Izračuni in komentarji

- Opišite, kako ste lahko na podlagi izmerjenega signala prepoznali frekvenco nosilca in hitrost simbolov v modulaciji QAM ter število podnosilcev v OFDM.
- Imamo sistem, ki oddaja simbole s trajanjem  $800 \mu\text{s}$  in pavzo med simboli  $200 \mu\text{s}$  ter uporablja modulacijo 16-QAM in multipleksiranje OFDM z 256 frekvencami. Izračunajte hitrost prenosa podatkov v bitih na sekundo (pokažite celoten postopek izračuna).

---

Odgovori:

## Naloga 8: Oddajanje in opazovanje signalov DVB-T

---

**Navodilo naloge:** Opazujte signale DVB-T iz bližnjega javnega oddajnika s spektralnim analizatorjem. Nato na osebni računalnik priključite oddajnike DVB-T in prav tako opazujte signale s spektralnim analizatorjem.

---

### Uvod

Sistem digitalne televizije DVB-T uporablja multipleksiranje OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) za deljenje vhodnega digitalnega podatkovnega toka podatkov na večje število počasnejših podatkovnih tokov, ki nato modulirajo signale na različnih podnosilcih.

Sistem DVB-T lahko uporablja 2 K podnosilcev v razmiku 4 kHz ali pa 8 K nosilcev v razmiku 1 kHz. Ta signal se nato preslika v prenosni pas z uporabo modulacije SSB-SC (single-sideband suppressed-carrier), ki je različica amplitudne modulacije, kjer najbolje izkoristimo moč signala in pasovno širino. Rezultat uporabe OFDM in SSB-SC je značilna oblika spektra, ki ga bomo opazovali v tej nalogi.

Sama modulacija podnosilcev je lahko QPSK ali QAM in bo opisana v naslednji nalogi.

Vhodni podatkovni tok za prenos signalov digitalne televizije DVB-T vsebuje več televizijskih kanalov in dodatne informacije. Imenujemo ga multipleks. Tako lahko s spektralnim analizatorjem opazujemo posamezne multiplekse, ne pa posameznih TV-kanalov, kot je to bilo običajno pri analogni televiziji. Multipleksi se navajajo po srednji (centralni) frekvenci njihovega spektra.

Za lažje opazovanje signalov DVB-T bomo v nalogi uporabili module HiDes UT-100A, ki jih lahko priključimo na osebni računalnik preko vodila USB. S temi moduli in ustrezno programsko opremo lahko tudi sami oddajamo signale DVB-T majhnih moči.

## Meritve in rezultati

Priključite anteno na spektralni analizator in opazujte signale DVB-T iz bližnjega oddajnika. Zabeležite št. kanala, centralno frekvenco in pasovno širino. Skicirajte tudi spektralno sliko signala.

Št. kanala.

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Naziv multipleksa, ki ga opazujete.

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je centralna frekvenca signala?

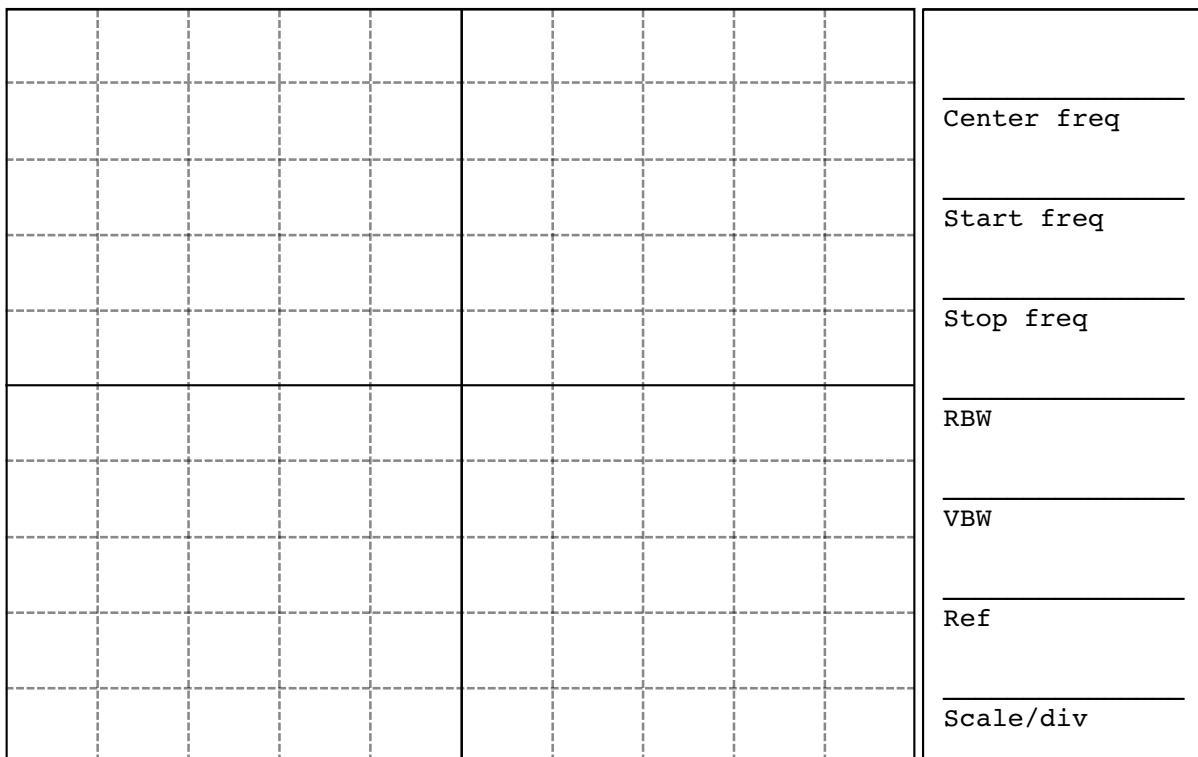
**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Ocenite pasovno širino signala.

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Ocenite razmerje signal – šum.

**Odgovor:** \_\_\_\_\_



Slika 18: Frekvenčna slika realnega signala DVB-T.



Na PC povežite oddajni modul UT-100A, izberite datoteko s TV-vsebino in jo začnite oddajati – vsaka skupina na ločenem, vendar bližnjem kanalu. Na spektralnem analizatorju preverite ali uspešno oddajate signale. Za vsak oddajnik ponovite meritve iz prve točke in dodatno še zapišite približno razdaljo od oddajne do sprejemne antene. Katera je številka vaše skupine?

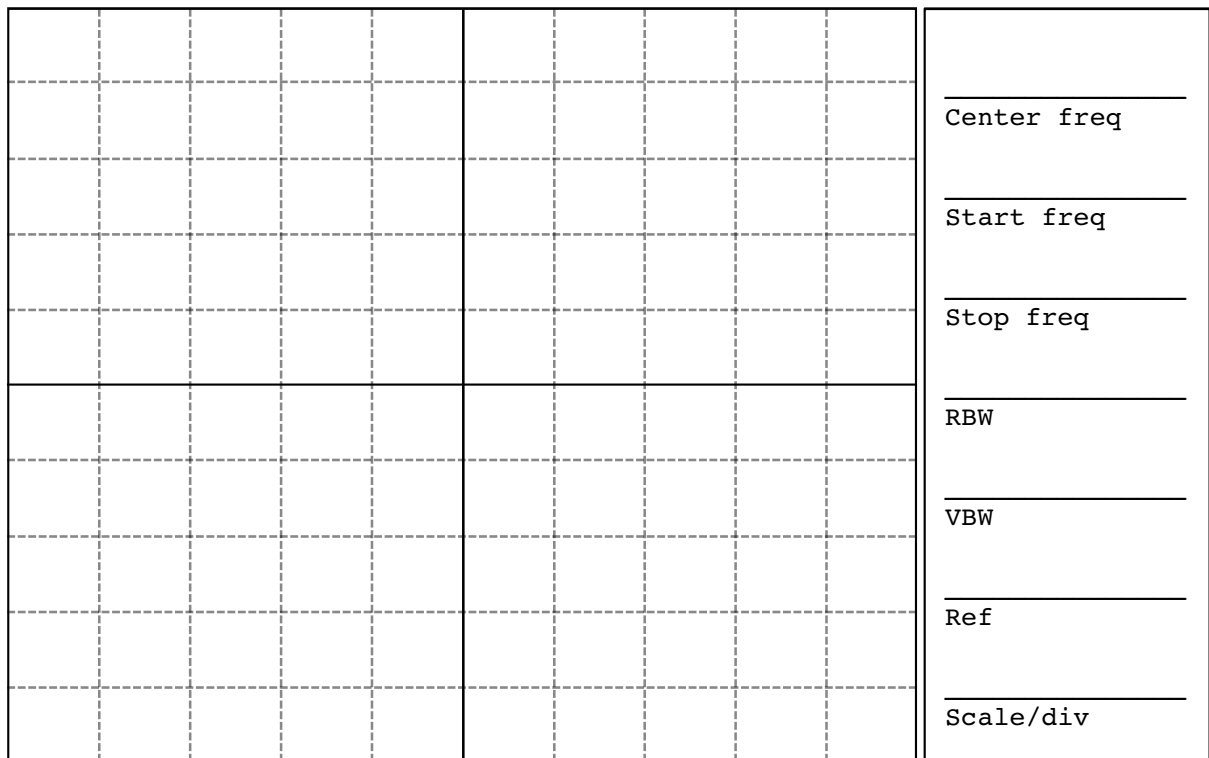
**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Tabela 2: Izmerjeni parametri oddajanih signalov DVB-T.

Skupina	Razdalja [m]	Št. kanala	Frekvenca [MHz]	Pasovna širina [MHz]	SNR [dB]
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Preverite, ali lahko signale sprejemate na TV-sprejemniku. Ali prihaja do kakšnih motenj pri sprejemu?

Skicirajte frekvenčno sliko, tako da bodo vidni vsaj trije signali (kanali oz. multipleksi).



Slika 19: Frekvenčna slika oddajanih signalov DVB-T.

**Izračuni in komentarji**

- Izračunajte prejeto moč signala za vašo skupino.
  - Opišite, kako vpliva razdalja od oddajnika do sprejemne antene spektralnega analizatorja na moč signala in moč šuma.
- 

Odgovori:

## Naloga 9: Analiza signalov DVB-T in kvaliteta sprejema

---

**Navodilo naloge:** Na osebnih računalnikih oddajajte signale DVB-T z različnimi oddajnimi močmi ter preverjajte njihov uspešni sprejem na digitalnem televizijskem sprejemniku. Signale sprejemajte tudi z namensko strojno opremo za analizo signalov ter odčitajte parametre sprejema in opazujte konstelacijski diagram.

---

### Uvod

Digitalna televizija uporablja modulacijo QAM. Pri tej modulaciji se končni signal tvori kot vsota dveh sinusnih signalov, ki sta zamaknjena za fazni kot  $90^\circ$ :

$$y(t) = I \cdot \cos(2\pi ft) - Q \cdot \sin(2\pi ft),$$

kjer sta  $I$  (In-phase component) in  $Q$  (Quadrature component) določena na podlagi vhodnih digitalnih podatkov. Primer modulacije je 64-QAM, kjer v nekem trenutku končni signal nosi 6 bitov informacije ( $2^6 = 64$ ) – teh 6 bitov imenujemo simbol. 64 možnih signalov dobimo s kombinacijo 8 možnih vrednosti za  $I$  in 8 možnih vrednosti za  $Q$ .

Sestavljen signal je možno nato na sprejemni strani demodulirati, določiti vrednosti  $I$  in  $Q$  ter tako pridobiti prvotno digitalno informacijo. Pri tem pa na sprejemni strani nimamo le uporabnega signala, ampak je v njem prisoten tudi šum. Zaradi šuma prihaja do sprememb izmerjenih vrednosti  $I$  in  $Q$  na sprejemni strani.

Kadar imamo relativno majhen šum in so spremembe vrednosti  $I$  in  $Q$  majhne, je sprejemnik še vedno zmožen prepoznati pravilne vrednosti, saj jih je končno mnogo. Ob večanju šuma pa lahko napaka v meritvi  $I$  in  $Q$  doseže polovico razlike med sosednjima vrednostima. V tem primeru pride do napake v prepoznavi simbola.

Sistem DVB-T ima vgrajene mehanizme za prepoznavo in odpravljanje napak. V primeru, da je število napak v prepoznavi simbolov dovolj majhno, lahko še vedno pravilno rekonstruiramo izvirno digitalno informacijo in tako pravilno predstavimo sliko in zvok na sprejemniku. Pri povečanem številu napak (npr. pri zelo velikem šumu) pa se pojavijo napake tudi po uporabi vseh mehanizmov za njihovo odpravljanje. To običajno opazimo kot "kocke" na prikazani sliki.

Značilnost digitalnih prenosnih sistemov je njihova odvisnost kvalitete od šuma. Pri manjših vrednostih šuma je sprejeta informacija brez napak, v neki točki pa začne kvaliteta prejema strmo padati z večanjem nivoja šuma. Medtem pa v analognih sistemih kvaliteta sprejema začne padati že pri majhnih vrednostih šuma, vendar je to padanje počasno.

Signale, ki so modulirani z modulacijo QAM, predstavljamo s t.i. konstelacijskim diagramom. Signal, ki je zajet v trenutku vzorčenja, predstavimo kot točko v dvodimenzionalni ravnini. Pri tem je x-koordinata točke vrednost  $I$ , y-koordinata pa je vrednost  $Q$ . Konstelacijski diagrami se uporabljajo za ugotavljanje različnih tipov motenj pri sprejemu signala. Opazovali ga bomo tekom vaje.

Razen modulacije 64-QAM lahko DVB-T uporablja tudi modulacijo 16-QAM ali pa modulacijo QPSK (Quadrature phase-shift keying), kjer moduliramo signal s spreminjanjem faznega zamika v štirih možnih vrednostih.

## Meritve in rezultati

Opazujte sliko na televizijskem sprejemniku in pri tem spreminjajte oddajno moč. Na sprejemniku bodite pozorni na kvaliteto slike. Ocenite, koliko je razdalja od oddajne do sprejemne antene.

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je najmanjša oddajna moč, pri kateri imate na sprejemniku še sliko brez kakršnih koli motenj?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Koliko je oddajna moč, pri kateri popolnoma izgubite sprejem slike?

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

Na anteno povežite DVB-T sondo DekTec DTU-238. Zaženite programsko opremo, s katero lahko analizirate sprejete signale (RFXpert), in nato sondo povežite na PC. V programski opremi nastavite kanale, na katerih oddajate. Ocenite, koliko je razdalja med vašo oddajno in sprejemno anteno.

**Odgovor:** \_\_\_\_\_

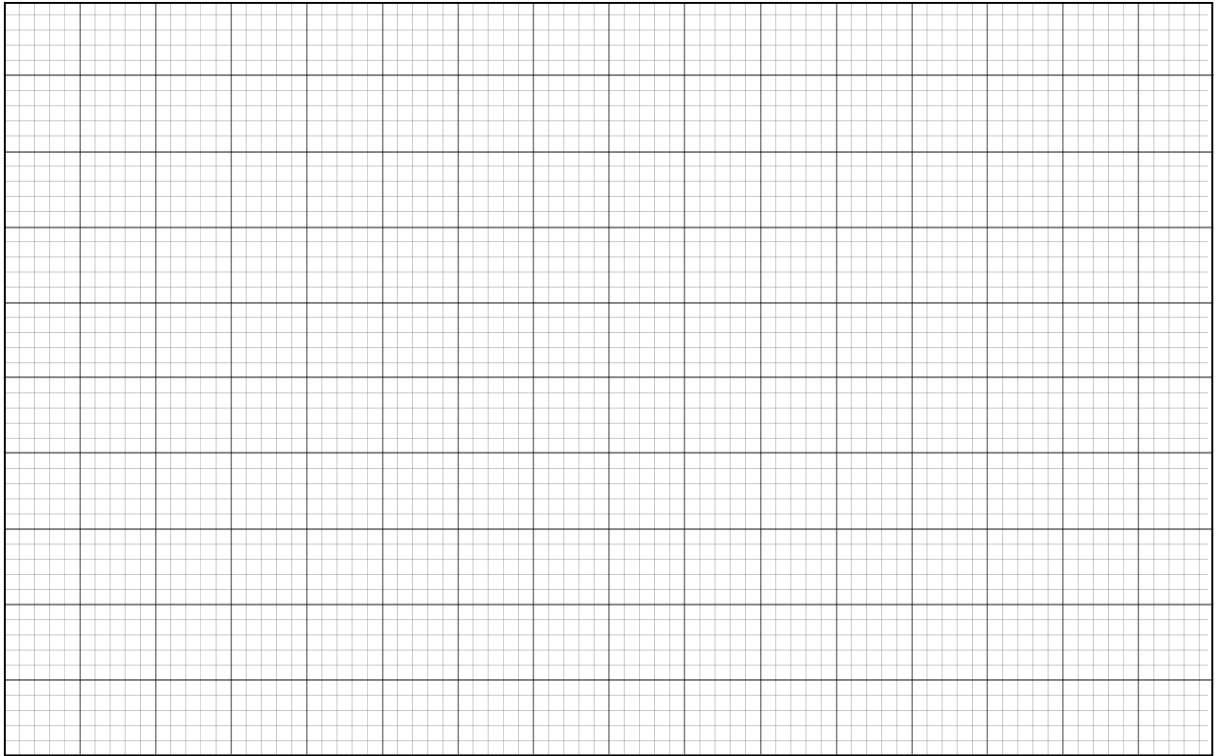
Sprejemna antena naj bo vsakokrat obrnjena proti oddajni. Spreminjajte oddajno moč in za vašo skupino zabeležite podatke, ki jih lahko preberete iz programske opreme.

Tabela 3: Meritve analiziranih parametrov signalov DVB-T.

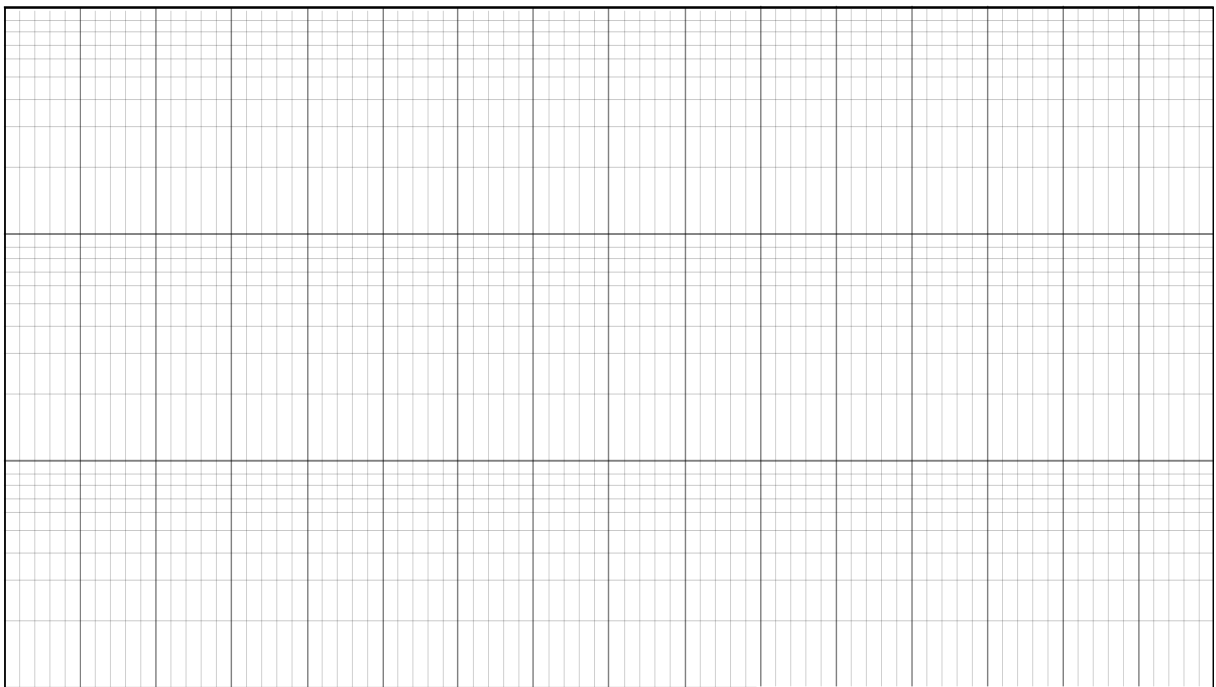
Oddajna moč [dBm]	MER	EVM	BER PreVIT	BER PreRS	Error sec.
+6					
+3					
0					
-3					
-6					
-9					
-12					
-15					
-18					

Kako se konstelacijski diagram spreminja s spreminjanjem oddajne moči?

Narišite graf odvisnosti MER od oddajne moči ter graf odvisnosti BER (PreVIT) od oddajne moči. V obeh primerih uporabite kot enoto za moč dBm. Pri grafu števila napak bodite pozorni na logaritemsko merilo.



Slika 20: Odvisnost MER od oddajne moči signala.



Slika 21: Odvisnost števila napak (preVit) od oddajne moči signala.

### Izračuni in komentarji

- Pojasnite pomen parametrov MER, EVM in BER v tabelah (poglejte pojasnila v navodilih za programsko opremo).
- Pojasnite, kako v konstelacijskem diagramu vidimo šum, in vzroke, da ga tako vidimo, ter kako vpliva šum na sprejetje podatkov.

---

Odgovori:

## Naloga 10: Transportne vsebine DVB-T

---

**Navodilo naloge:** S primerno programsko opremo analizirajte količino in vrsto podatkov v transportnih vsebinah DVB-T. V drugem delu naloge tvorite transportne vsebine DVB-T in preverite njihov sprejem na televizijskem sprejemniku.

---

### Uvod

Transportne vsebine (transport stream) DVB-T vsebujejo vse informacije, ki so potrebne za sprejem televizijskih programov na sprejemnikih in prikaz dodatnih informacij. To so zraven zvoka in slike še teletext, programski vodič, morebitni podnapisi ipd.

### Meritve in rezultati

Izberite datoteko s transportno vsebino. V programu lahko preberete RF-parametre. Zapišite vrednosti in pomen sledečih parametrov: frekvenca, pasovna širina, dolžina trajanja impulza, vmesni interval, modulacija in skupna bitna hitrost.

V nekem trenutku vsebine si oglejte vse servise (kanale), ki se prenašajo. Kateri servisi so v vsebini? Koliko je njihov skupna bitna hitrost in kateri servis ima največjo oz. najmanjšo bitno hitrost?

Kakšni podatki se nahajajo znotraj posameznih servisov in kakšne po PID-številke paketov, v katerih se ti podatki prenašajo? Zapišite podatke za vsaj 3 različne servise. Zapišite tudi, katere servise ste izbrali.

Izberite en servis v transportnih vsebinah, ki vsebuje 4 različne vrste paketov (PID). Kakšni so podatkovni deleži posameznih vrst paketov in kako se spreminjajo? Katera vrsta paketov zasede največji delež?



Opišite postopek, kako ste tvorili transportne vsebine. Naštejte potrebne korake, uporabljena orodja, nastavitve orodij in katere vsebine ste vključili v končno datoteko. Opišete lahko tudi še, katere posnetke ste vključili v vsebino, kakšni so bili izvorni formati, kvaliteta ipd.

Pravilnost vaše datoteke s transportnimi vsebinami preverite tako, da jo oddajte in pri tem ponovno uporabite oddajne module HiDes UT-100A. Signal sprejemajte na televizijskem sprejemniku. Komentirajte sprejete signale in vsebine – predvsem opišite, ali uspešno sprejemate vse podatke, ki ste jih vključili v transportne vsebine.

Točke:	/ 10
--------	------

## Ocena

Dosežene točke pri nalogah:

Naloga 1: _____ / (10)	Naloga 6: _____ / (10)
Naloga 2: _____ / (10)	Naloga 7: _____ / (10)
Naloga 3: _____ / (10)	Naloga 8: _____ / (10)
Naloga 4: _____ / (10)	Naloga 9: _____ / (10)
Naloga 5: _____ / (10)	Naloga 10: _____ / (10)

**Študent:** Ime in priimek: \_\_\_\_\_

Vpisna številka: \_\_\_\_\_

Študijsko leto: \_\_\_\_\_

**Ocenjevalec:** Datum: \_\_\_\_\_

Končna ocena (%): \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

