

# Generiranje pseudoslučajnih i moduliranih signala te njihova analiza u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

---

**Marković, Mijo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:100965>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**GENERIRANJE PSEUDOSLUČAJNIH I MODULIRANIH  
SIGNALA TE NJIHOVA ANALIZA U VREMENSKOJ I  
FREKVENCIJSKOJ DOMENI**

**Završni rad**

**Mijo Marković**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Mijo Marković
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4988, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165089798
<b>Mentor:</b>	doc. dr. sc. Denis Vranješ
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Generiranje pseudoslučajnih i moduliranih signala te njihova analiza u vremenskoj i frekvencijskoj domeni
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U okviru rada potrebno je pomoću računala generirati zadane pseudoslučajne i modulirane signale te ih potom analizirati u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Sumentor s FERIT-a: Mario Vranješ
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	18.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Dobar (3)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	25.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Dobar (3)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	30.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 30.09.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Mijo Marković
<b>Studij:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4988, 27.07.2021.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Generiranje pseudoslučajnih i moduliranih signala te njihova analiza u vremenskoj i frekvencijskoj domeni**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Denis Vranješ

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
1.1.	Zadatak završnog rada.....	1
2.	MODULACIJSKI POSTUPCI .....	2
2.1.	Parametri koji opisuju učinkovitost modulacijskog postupka.....	2
2.2.	Modulacija faze (PSK) .....	3
2.3.	Modulacija amplitude (ASK) .....	5
2.4.	Modulacija frekvencije (FSK) .....	5
2.5.	Modulacija amplitude i faze (QAM) .....	6
2.6.	Generiranje moduliranih signala .....	8
2.7.	Prijenos generiranih signala na funkcijski generator .....	10
3.	ANALIZA MODULIRANIH SIGNALA U VREMENSKOJ DOMENI.....	13
3.1.	Analiza fazno moduliranih signala u vremenskoj domeni .....	14
3.2.	Analiza amplitudno moduliranih signala u vremenskoj domeni .....	18
3.3.	Analiza frekvencijski moduliranih signala u vremenskoj domeni .....	20
3.4.	Analiza kvadraturno amplitudno moduliranih signala u vremenskoj domeni.....	22
4.	ANALIZA MODULIRANIH SIGNALA U FREKVENCIJSKOJ DOMENI.....	24
4.1.	Analiza fazno moduliranih signala u frekvencijskoj domeni.....	25
4.2.	Analiza amplitudno moduliranih signala u frekvencijskoj domeni.....	28
4.3.	Analiza frekvencijski moduliranih signala u frekvencijskoj domeni.....	30
4.4.	Analiza kvadraturno amplitudno moduliranih signala u frekvencijskoj domeni.....	32
5.	ZAKLJUČAK .....	34
	LITERATURA .....	35
	SAŽETAK.....	36
	ABSTRACT.....	37
	ŽIVOTOPIS .....	38

# 1. UVOD

Modulacija je jedan od temeljnih postupaka u procesu prijenosa signala. Tim postupkom mijenja se neki od parametara signala (frekvencija, amplituda i/ili faza). Osnovna podjela modulacijskih postupaka je na analogne i digitalne postupke. Budući da se u digitalnim komunikacijskim sustavima koriste digitalni modulacijski postupci oni će ujedno biti i predmet analize u ovom završnom radu. Ovisno o parametru koji se mijenja u digitalnom modulacijskom postupku tako postoji modulacija faze (engl. *Phase Shift Keying* – PSK), modulacija frekvencije (engl. *Frequency Shift Keying* – FSK), modulacija amplitude (engl. *Amplitude Shift Keying* – ASK) te kvadraturno amplitudna modulacija (engl. *Quadrature Amplitude Modulation* – QAM). Postoje analogni i digitalni modulacijski postupci. Cilj svakog modulacijskog postupka je povećati učinkovitost komunikacijskog sustava. Budući da svaki od postupaka ima svoje prednosti i nedostatke potrebno je napraviti analizu moduliranih signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni kako bi se mogli izvesti zaključci o učinkovitosti pojedinog postupka. Analiza moduliranih signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni predmet je ovog završnog rada. Korištenjem programskog paketa MATLAB generirani su signali modulirani različitim postupcima, a zatim su isti signali pomoću software-a Rigol Ultra Station poslani na funkcijski generator. Za mjerenja u vremenskoj domeni korišten je osciloskop (Rigol DS1000Z), a za mjerenja u frekvencijskoj domeni korišten je analizator spektra (Rigol DSA700). Drugo poglavlje donosi opis pojedinih modulacijskih postupaka i programa koji se koriste za generiranje i prijenos signala na funkcijski generator. Treće poglavlje prikazuje rezultate analize moduliranih signala u vremenskoj domeni, a četvrto u frekvencijskoj domeni. U petom poglavlju izneseni su zaključci rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak rada bila je analiza signala moduliranih korištenjem pseudoslučajnih signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. U modulacijama se često koriste pseudoslučajni signali jer se na taj način povećava otpornost moduliranog signala na šum. U okviru rada korištenjem pseudoslučajnih signala modulirat će se faza, frekvencija i amplituda prijenosnog signala te će modulirani signali biti analizirani u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Rezultati prikaza signala u frekvencijskoj domeni bit će uspoređeni s rezultatima dobivenim analizom razina signala po frekvencijama računskim putem.

## 2. MODULACIJSKI POSTUPCI

U okviru ovog rada generirani su signali koji su modulirani različitim modulacijskim postupcima. Svaki od postupaka bit će detaljnije objašnjen u nastavku. U svim postupcima prijenosni sinusni signal moduliran je pomoću modulacijskog pravokutnog pseudoslučajnog signala. Razlog korištenja pseudoslučajnog signala je njegova bolja otpornost na šum u odnosu na periodičke signale. U postupku modulacije signala prilikom korištenja modulacijskog signala mijenja se neki od parametara prijenosnog signala i time nastaje modulirani signal. Prijenosni signal najčešće je sinusnog valnog oblika a za modulacijski signal koriste se neki od baznih signala. Najčešće korišteni modulacijski signali su pravokutni niz i pseudoslučajni pravokutni signal. U okviru rada analizirat će se PSK, ASK, FSK i QAM modulirani signali, a svaki od postupaka bit će u nastavku pobliže objašnjen.

### 2.1. Parametri koji opisuju učinkovitost modulacijskog postupka

Kao što je već navedeno, svaki modulacijski postupak ima svoje prednosti i nedostatke. Važno je analizirati pojedine postupke kako bi se na temelju dobivenih rezultata moglo odrediti koji je postupak učinkovitiji u kojem slučaju. Opći parametri koji su važni za svaki modulacijski postupak su vjerojatnost pogreške (engl. Bit Error Rate – BER), širina spektra i potreban odnos signal šum.

BER je vjerojatnost pogreške koja prikazuje omjer broja pogrešno primljenih bitova i broja ukupno poslanih bitova [1]

$$BER = \frac{N_e}{N_\Sigma} \quad (2 - 1)$$

- $N_e$  - broj pogrešno primljenih bitova
- $N_\Sigma$  - broj ukupno poslanih bitova

Cilj je da u svakom sustavu vjerojatnost pogreške bude što manja. Ipak postoje sustavi koji toleriraju veću pogrešku (primjerice prijenos tekstualne informacije) i sustavi koji ne bi smjeli imati pogrešku (vojne ili medicinske namjene). Jedan od parametara koji može pomoći u smanjenju vjerojatnosti pogreške je snaga signala, a često je opisujemo odnosom snage signala i snage šuma (S/N) i on se daje u decibelima.

Odnos signal-šum (S/N) predstavlja kvalitetu signala koja je matematički opisana omjerom snage korisnog signala i snage šuma.

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{P_{signal}}{P_{sum}} \right) \quad (2-2)$$

- $P_{signal}$  - snaga signala
- $P_{sum}$  - snaga šuma

Iz navedenog izraza jasno je da se odnos S/N može povećati smanjenjem snage šuma ili povećanjem snage signala.

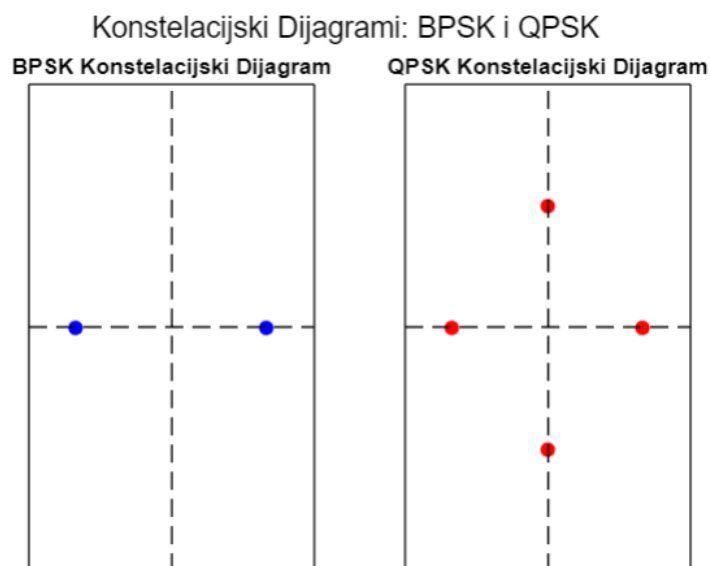
Da bi se osigurala kvaliteta signala pri većem broju stanja potrebno je povećati odnos signal-šum (S/N). Povećanjem odnosa signal-šum (S/N) smanjuje se BER. Stanja u modulacijskim postupcima odnose se na različite diskretne vrijednosti (amplituda, faza ili frekvencija) koje signal nosilac može poprimiti u svrhu prijenosa informacija [2]

Spektralna učinkovitost označava količinu informacija koju je moguće prenijeti po jedinici širine frekvencijskog pojasa. Glavni cilj je što veća brzina prijenosa podataka uz korištenje što užeg frekvencijskog pojasa. Povećanjem broja stanja (M) povećava se ukupan broj prenesenih bitova po simbolu, međutim povećanjem broja stanja (M) povećava se osjetljivost signala na izobličenja i šum [2]

## 2.2. Modulacija faze (PSK)

PSK je modulacijski postupak koji koristi promjenu faze signala nosioca prilikom prenošenja informacija. Svaki modulirani signal može se nalaziti u M različitih stanja gdje je  $M=2^N$ , a N je broj bita kojim je označeno svako stanje. Pri povećanju broja stanja (M) povećava se osjetljivost na šum kao i vjerojatnost pogreške. Na slici 2.1. prikazani su konstelacijski dijagrami PSK moduliranog signala s 2 i 4 moguća stanja. Iz dijagrama je vidljivo da se, ovisno o tome koja 2 stanja promatramo, može promijeniti samo faza. Također je vidljivo da je kod postupka s većim brojem stanja vjerojatnost pogreške veća jer su stanja međusobno „bliže“ te je samim time veća mogućnost pogrešne detekcije na prijemu.





**Slika 2.1.** Konstelacijski dijagram za BPSK i QPSK prikazan u MATLAB-u

Vjerojatnost pogreške MPSK signala dana je izrazom:

$$P_{e_{MPSK}} \approx \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{d^2}{4\eta}} \quad (2-3)$$

- $d_{MPSK}$  – udaljenost MPSK signala u prostoru signala
- $\eta$  – spektralna gustoća snage šuma

Širina frekvencijskog pojasa je dana izrazom:

$$B = 2 \frac{fb}{N} \quad (2-4)$$

- $f_b$  – brzina prijenosa bitova
- $N$  – broj bita kojim je označeno svako stanje

Udaljenost MPSK signala u prostoru signala je dana izrazom:

$$d_{MPSK} = 2\sqrt{P_s T_s} \sin \frac{\pi}{M} \quad (2-5)$$

- $P_s$  - snaga signala
- $T_s$  – trajanje simbola
- $M$  – broj stanja

### 2.3. Modulacija amplitude (ASK)

ASK je modulacijski postupak koji koristi promjenu amplitude signala nosioca prilikom prenošenja informacija. Prilikom promjene amplitude frekvencija i faza signala nosioca ostaju nepromijenjeni. ASK modulacijski postupak ima manju spektralnu efikasnost u odnosu na ostale modulacijske postupke. Osjetljivost na šum je također veća zbog načina prenošenja informacija (promjena amplitude). Najmanja izobličenja u amplitudi mogu uzrokovati pogreške pri prijenosu informacija. Kao i kod PSK modulacijskog postupka, povećanjem broja stanja ( $M$ ) moguće je prenijeti više bitova po simbolu, ali se povećava vjerojatnost pogreške i osjetljivost na šum [4]

Vjerojatnost pogreške MASK signala je dana izrazom:

$$P_{e_{MASK}} = \frac{2(M-1)}{M} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{6 \log M E_s}{(M^2-1)\eta}} \right) \quad (2-6)$$

- $M$  – broj stanja
- $E_s$  – energija signala
- $\eta$  – spektralna gustoća snage šuma

Udaljenost MASK signala u prostoru signala je dana izrazom:

$$d_{MASK} = \frac{\sqrt{3E_s}}{M-1} \quad (2-7)$$

- $E_s$  – energija signala
- $M$  – broj stanja

Širina frekvencijskog pojasa je dana izrazom:

$$B = \frac{f_b}{\log_2 M} \quad (2-8)$$

- $f_b$  – brzina prijenosa bitova
- $M$  – broj stanja

### 2.4. Modulacija frekvencije (FSK)

FSK modulacijski postupak predstavlja mijenjanje frekvencije signala nosioca u ovisnosti o signalu poruke. Karakteristično za FSK modulacijski postupak je da prilikom promjene frekvencije, amplituda i faza signala nosioca ostaju nepromijenjeni. FSK modulacijski postupak

je otporniji na šum u odnosu na ASK modulacijski postupak. To se može zaključiti korištenjem promjene frekvencije za prijenos informacija, za razliku od ASK modulacijskog postupka gdje se koristi promjena amplitude što čini postupak osjetljivijim na promjene u razini signala. FSK modulacijski postupak zahtijeva veću širinu pojasa u odnosu na ASK modulacijski postupak zbog većeg broja frekvencija koje moraju biti dovoljno raspoređene kako bi se izbjegle smetnje [5]

Vjerojatnost pogreške MFSK signala dana je izrazom:

$$P_{e_{MFSK}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_s}{2\eta}} \quad (2-9)$$

- $E_s$  – energija signala
- $\eta$  – spektralna gustoća snage šuma

Širina frekvencijskog pojasa je dana izrazom:

$$B_{MFSK} = 2^{N+1} \frac{f_b}{N} \quad (2-10)$$

- $f_b$  – brzina prijenosa bitova
- $N$  – broj bita kojim je označeno svako stanje

Udaljenost MFSK signala u prostoru signala je dana izrazom:

$$d_{MFSK} = \sqrt{2E_s} \quad (2-11)$$

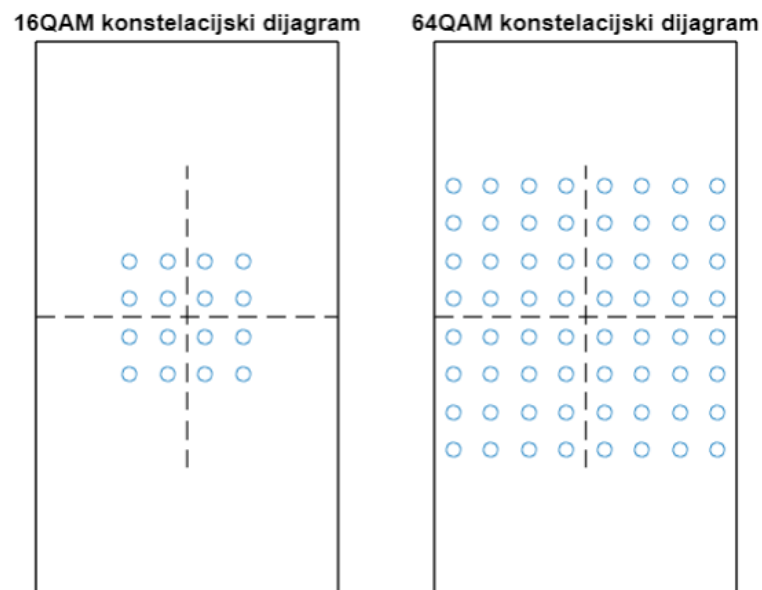
- $E_s$  – energija signala

## 2.5. Modulacija amplitude i faze (QAM)

Poseban oblik modulacijskog postupka je QAM modulacijski postupak koji predstavlja kombinaciju amplitudne modulacije (AM) i fazne modulacije (PM). U QAM modulacijskom postupku prenose se dva signala koja su iste frekvencije ali fazno pomaknuta za  $90^\circ$ .

Na slici 2.2. prikazani su konstelacijski dijagrami QAM moduliranog signala s 16 i 64 moguća stanja. Iz dijagrama je vidljivo da se, ovisno o tome koja 2 stanja promatramo, može promijeniti samo amplituda, samo faza ili oboje istovremeno. Također je vidljivo da je kod

postupka s većim brojem stanja vjerojatnost pogreške veća jer su stanja međusobno „bliže“ te je samim time veća mogućnost pogrešne detekcije na prijemu.



**Slika 2.2.** Konstelacijski dijagram za 16QAM i 64QAM prikazan u MATLAB-u

Vjerojatnost pogreške MQAM signala određena je izrazom:

$$P_{eMQAM} = 4 * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) * \frac{1}{2} * \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3}{2 * (M - 1)} * \frac{E_s}{\eta}} \right) \quad (2-12)$$

- $M$  – broj stanja
- $E_s$  – energija signala
- $\eta$  – spektralna gustoća snage šuma

Širina frekvencijskog pojasa je određena izrazom:

$$B = 2 \frac{f_b}{N} \quad (2-13)$$

- $f_b$  – brzina prijenosa bitova
- $N$  – broj bita kojim je označeno svako stanje

Udaljenost MFSK signala u prostoru signala je određena izrazom:

$$d_{MQAM} = \sqrt{2 * \frac{3}{M - 1} * E_s} \quad (2-14)$$

- $M$  – broj stanja
- $E_s$  – energija signala

## 2.6. Generiranje moduliranih signala

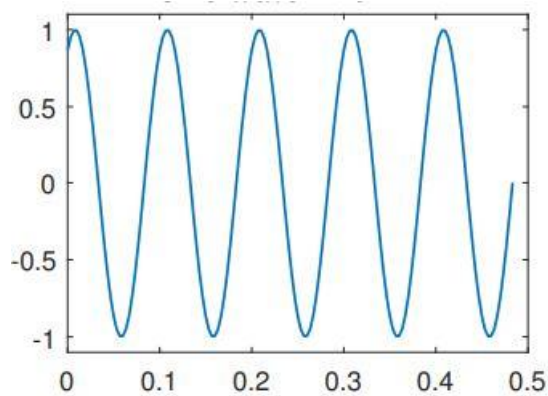
Za generiranje moduliranih signala koji će biti analizirani u ovom radu korišten je programski paket MATLAB. Prednost *Matlaba* u odnosu na druge programe i programske jezike je mogućnost simulacije generiranja signala i spremanja signala u različitim formatima kako bi bilo moguće signal poslati na funkcijski generator. Također, jedna od prednosti *Matlaba* je i mogućnost direktnog generiranja signala za pojedine funkcijske generatore. Treba uzeti u obzir da svaki proizvođač ima određenu sintaksu koju koristi u slučaju da se generiranju signala pristupa pišući programski kod [6]

Da bi se sinusni signal generirao u *Matlabu*, prvo je potrebno odrediti frekvenciju potrebnu za sinusni signal. Kao što će u sljedećim poglavljima biti objašnjeno, uzima se signal frekvencije  $f = 1$  MHz s maksimalnom amplitudom 1 Vpp (*Volt pick to pick*) ili u nekim slučajevima kao što je ASK modulirani signal, 2 Vpp. *Matlab* je obično program koji sve obrađuje u digitalnom obliku. Kako bi se generirao glatki sinusni signal bez nepotrebnih smetnji, potrebno je da brzina uzorkovanja bude najmanje dvostruko veća od propisane brzine uzorkovanja.

U nastavku će biti prikazana skripta pomoću koje je u *Matlabu* generiran sinusni signal frekvencije 10 Hz, amplitude 2 Vpp i faze  $60^\circ$ :

<i>Linija</i>	<i>Kod</i>
1:	<code>frek = 10; /*frekvencija sinusnog signala*/</code>
2:	<code>brojuzoraka = 30;</code>
3:	<code>fs = brojuzoraka+frek; /*frekvencija uzorkovanja*/</code>
4:	<code>faza = 1/3*pi; /*faza signala*/</code>
5:	<code>brojper = 5; /*broj perioda signala*/</code>
6:	<code>t = 0:1/fs:brojper*(1/frek-1/fs); /*vrijeme*/</code>
7:	<code>u=sin(2*pi*frek*t+faza); /*vremenski oblik sinusnog signala</code>

Na slici 2.3. prikazan je vremenski oblik generiranog signala.



**Slika 2.3.** Vremenski oblik generiranog signala u *Matlabu*

Jedan od najlakših načina moduliranja prijenosnog signala pomoću pseudoslučajnog signala u *Matlabu* je preko skripte. Programski način daje slobodu prilagodbe bilo kojeg parametra signala i prijenos signala direktno na funkcijski generator ili njegovo spremanje u bilo kojem formatu koji je prihvaćen za neke funkcijske generatore. Kod PSK modulacije signal nosilac modulirat će se promjenom faze ovisno o pseudoslučajnom nizu bitova generiranih preko naredbe *Randi*. Signal se sprema u obliku Excel dokumenta jer predstavlja format koji je kompatibilan s programom koji će biti korišten za prijenos signala na funkcijski generator.

U nastavku je prikazana skripta pomoću koje je generiran PSK modulirani signal s 2 moguća stanja faze (BPSK) pomoću pseudoslučajnog modulacijskog signala. Signal je generiran velikim brojem uzoraka kako bi bilo moguće predstaviti sve promjene koje se događaju signalu s obzirom na to da se radi o modulaciji faze. *Randi* predstavlja naredbu koja predstavlja srž skripte jer se radi o generiranju pseudoslučajnog moduliranog signala. *Randi* generira pseudoslučajan niz što znači da signal nikad neće biti isti koliko god puta ga se generiralo [7]

Frekvencija prijenosnog sinusnog signala je 1MHz, a amplituda je 1 Vpp.

**Linija**      **Kod**

```
1:      /*Definiranje parametara*/
2:      amplituda = 1.0;
3:      frekvencija = 1e6;    /*1 MHz*/
4:      brojuzoraka = 8192;
5:      uzorakpobitu = floor(dots / 10);
6:      brojbitova = floor(brojuzoraka / uzorakpobitu);
7:      t = linspace(0, brojbitova / frekvencija, brojuzoraka);
8:
9:      /*generiranje pseudoslučajnog niza bitova*/
10:     pseudoniz = randi([0, 1], 1, brojbitova);
11:
12:     /*Generiranje BPSK signala*/
13:     bpsk_signal = zeros(1, brojuzoraka);
14:
15:     for i = 1:num_bits
16:         start_index = (i - 1) * uzorakpobitu + 1;
17:         end_index = i * uzorakpobitu;
18:         faza = 0;
19:         if bit_sequence(i) == 0
20:             faza = pi;    /*promjena faze*/
21:         end
```

## 2.7. Prijenos generiranih signala na funkcijski generator

Modulirane signale koji su prethodno generirani u Matlabu potrebno je prenijeti na funkcijski generator kako bi se kasnije mogla odraditi njihova analiza u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Budući da je u okviru rada korišten RIGOL DG1032Z Funkcijski generator, za prijenos signala korištena je odgovarajuća programska podrška Rigol Ultra Station.

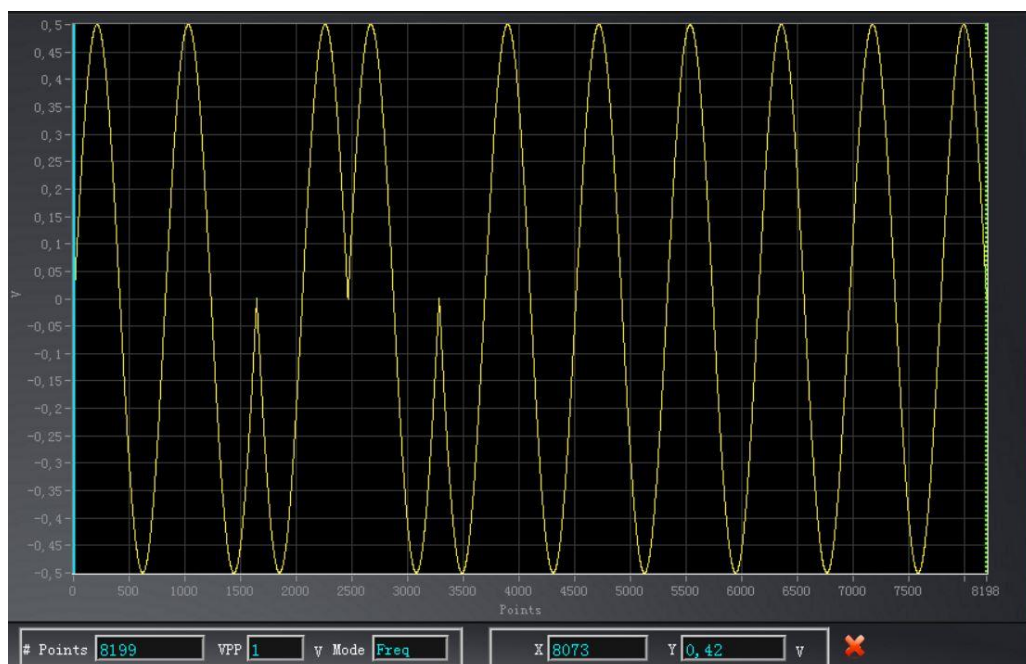
Kao što je prikazano na slici 2.4. *Matlab* skripta generira signal i sprema ga u obliku Excel dokumenta s formatom potrebnim za *Rigol Ultra Station*. Prvi redovi dokumenta

predstavljaju parametre navedenog signala kao što su amplituda, oblik signala, period, broj uzoraka i frekvencija. Broj uzoraka koji su predstavljeni počevši od desetog reda je 8192. Svaki modulirani signal će na ovaj način biti spremljen i poslan na funkcijski generator. Nakon potrebnog uređivanja dokumenta, signal se može bez problema spremiti u memoriju softvera i prikazati u vremenskoj domeni prije nego što se pošalje na funkcijski generator [8]

	A	B	C	D	E
1	RIGOL:DG1:CSV DATA FILE				
2	TYPE:Arb				
3	AMP:1,0000 Vpp				
4	PERIOD:1,00E-6 S				
5	DOTS:8192				
6	MODE:Freq				
7	AFG Frequency:1000000,000000				
8	AWG N:0				
9	x,y[V]				
10	0				
11	,0,003835382547				
12	,0,007670539414				
13	,0,011505244935				
14	,0,015339273471				

**Slika 2.4.** Prikaz BPSK moduliranog signala u obliku Excel dokumenta.

Signal se mogao zabilježiti u *Matlabu*, međutim na ovaj način moguće je provjeriti signal prije nego što se uopće pošalje na funkcijski generator. U obzir se mora uzeti da osciloskop daje puno bolju analizu signala, ali softver je prihvatljiva alternativa (Sl. 2.5. )



**Slika 2.5.** Prikaz prethodno generiranog signala u Rigol Ultra Station.



Uz napredan rast mogućnosti današnjih funkcijskih generatora analiza signala i odrađivanje raznih pokusa postala je uobičajen postupak. *DG1032Z* kao arbitrarni funkcijski generator ima prednosti u odnosu na obične funkcijske generatore (Sl. 2.6. )



**Slika 2.6.** *Rigol DG1032Z funkcijski generator.*

Iako nije moguće samo pomoću funkcijskog generatora generirati signale s većim stupnjem modulacije, *DG1032Z* funkcijski generator daje mogućnost odabira predefiniраниh signala od mogućih 160 ugrađenih signala. U navedene se ugrađene signale također ubrajaju i modulirani signali PSK, ASK, FSK i QAM. (Sl. 2.7. ) [9]



**Slika 2.7.** *Prikaz ugrađenih modulacijskih postupaka funkcijskog generatora.*

Na *DG1032Z* funkcijskom generatoru korišteno je 8192 uzorka za prikaz signala što predstavlja standardnu veličinu, međutim moguće je povećati broj uzoraka do 16000 što nije bilo potrebno za generiranje moduliranih signala. Također, 8192 uzorka dovoljna su da se prikažu promjene za svaki modulirani signal koji se analizira.

### 3. ANALIZA MODULIRANIH SIGNALA U VREMENSKOJ DOMENI

Signali koji su modulirani i poslani na funkcijski generator prema postupku iz prethodnog poglavlja bit će analizirani u vremenskoj domeni. Za prikaz signala u vremenskoj domeni korišten je osciloskop Rigol DS1000Z koji je prikazan na slici 3.1. Na ulaz osciloskopa pomoću BNC kabla doveden je signal s funkcijskog generatora.



**Slika 3.1.** Rigol DS1000Z osciloskop.

Iako je signal moguće prikazati u Rigol Ultra Stationu za detaljniju analizu bolje je koristiti osciloskop jer se pomoću njega mogu preciznije izmjeriti traženi parametri. Dva važna parametra koja se analiziraju su frekvencija i amplituda. Korištenjem vertikalnih markera lako se može odrediti period ili frekvencija signala, a korištenjem horizontalnih markera određuje se amplituda signala.

**Napomena:** Signal koji se šalje na funkcijski generator može imati frekvenciju drukčiju od frekvencije prikazane na osciloskopu. Razlog je u tome što cijeli signal u programu ima frekvenciju 1 MHz. Kada se pošalje signal na funkcijski generator, frekvencija cijelog signala je 1 MHz. Međutim, s obzirom da je potrebno prikazati više perioda gdje dolazi do određene promjene amplitude, frekvencije i faze bit će potrebno više perioda. Ako se pošalje signal s 10 perioda koji ima frekvenciju 1 MHz, svaka perioda unutar signala imat će 10 puta veću frekvenciju. Stoga je potrebno na funkcijskom generatoru namjestiti određenu frekvenciju kako bi na osciloskopu bila prikazana ista frekvencija kao što je i trebala biti prilikom generiranja signala.

U nastavku slijedi analiza PSK, ASK, FSK i QAM moduliranih signala s različitim brojem stanja u vremenskoj domeni.

### 3.1. Analiza fazno moduliranih signala u vremenskoj domeni

Kod PSK modulacija koriste se dva signala. Jedan signal predstavlja signal nosilac, a drugi je signal u obliku niza bitova. Za modulaciju se u *Matlab* skripti koristi *Randi* naredba pomoću koje se generira pseudoslučajan niz bitova. U ovisnosti o bitovima dolazi do određene promjene faze u signalu. Signal nosilac mijenja fazu signala ovisno o kombinaciji kod modulacijskog signala.

Teorijski bi vremenski oblik za PSK modulirani signal s M mogućih stanja u ovisnosti o broju stanja M i uz zadane parametre trebao biti predstavljen izrazom:

$$u_{MPSK} = A * \cos(2\pi f_c t + \varphi_m) \quad (3-1)$$

- A – amplituda signala
- $f_c$  – frekvencija signala nosioca
- t – vrijeme ( mijenja se kroz niz točaka kroz skriptu )
- $\varphi_M$  – fazni pomak koji se mijenja u ovisnosti o kombinaciji bitova pseudoslučajnog niza

Uz zadane parametre koji su korišteni za modulirane signale izraz bi bio sljedeći:

$$u_{MPSK} = \cos(2\pi * 1 * 10^6 * t + \varphi_M) \quad (3-2)$$

Kod BPSK modulacije postoje 2 moguća stanja faze i ona su međusobno pomaknuta za 180 stupnjeva. U nastavku slijedi skripta koja je korištena za generiranje BPSK moduliranog signala.

<i>Linija</i>	<i>Kod</i>
1:	<code>/*Definiranje parametara*/</code>
2:	<code>amplituda = 1.0;</code>
3:	<code>frek = 1e6;</code>
4:	<code>bruzoraka = 8192;</code>
5:	<code>uzorakpobitu = floor(dots / 10);</code>
6:	<code>brojbitova = floor(bruzoraka / uzorakpobitu);</code>
7:	<code>t = linspace(0, brojbitova / frek, bruzoraka);</code>
8:	<code>/*Generiranje pseudoslučajnog niza*/</code>
9:	<code>bit_sequence = randi([0, 1], 1, brojbitova);</code>
10:	
11:	<code>/*Generiranje BPSK moduliranog signala*/</code>
12:	<code>bpsk_signal = zeros(1, bruzoraka);</code>
13:	
14:	<code>for i = 1:brojbitova</code>
15:	<code>start_index = (i - 1) * uzorakpobitu + 1;</code>
16:	<code>end_index = i * uzorakpobitu;</code>
17:	<code>faza = 0;</code>
18:	<code>if bit_sequence(i) == 0</code>
19:	<code>faza = pi; /*promjena faze*/</code>
20:	<code>end</code>

Pojašnjenje koda:

- *amplituda*: predstavlja maksimalnu vrijednost signala
- *frek*: predstavlja frekvenciju signala koji se generira
- *bruzoraka*: predstavlja broj uzoraka signala
- *uzorakpobitu*: broj uzoraka po bitu
- *brojbitova*: broj bitova od kojih će se sastojati pseudoslučajan niz

U nastavku slijedi dio skripte korišten za generiranje pseudoslučajnog niza.

**Linija    Kod**

```
1:    /*generiranje pseudoslučajnog niza bitova*/  
2:    bit_sekv=randi([0,1],1, brojbit); /*pseudoslučajni niz bitova*/
```

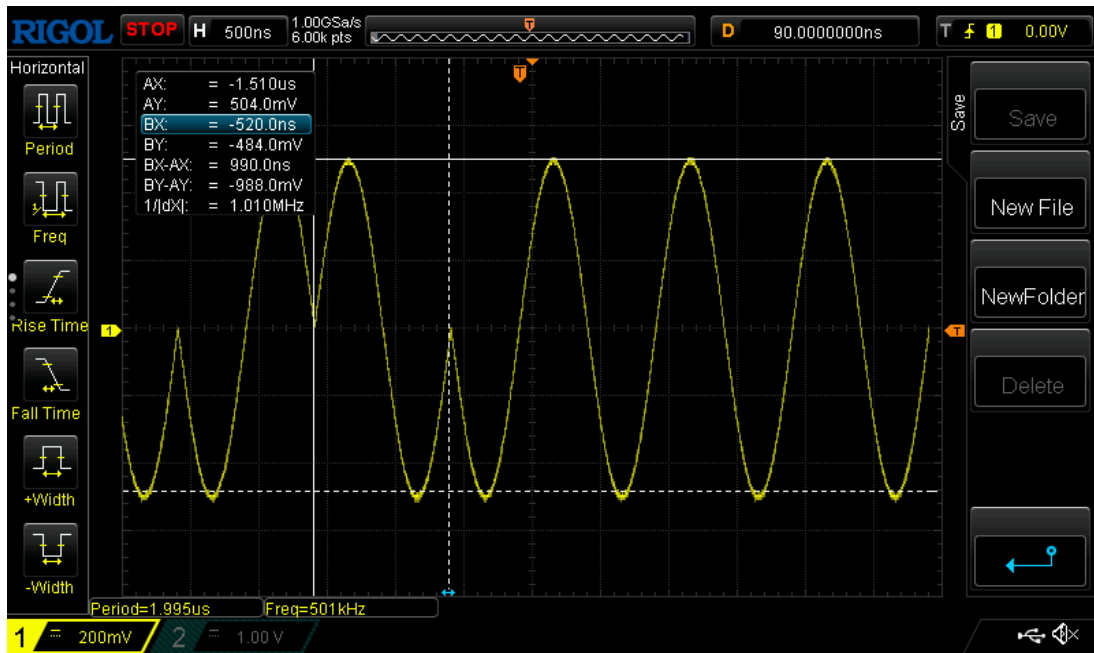
Varijabla *bit-sequence* predstavlja pseudoslučajan niz bitova kombinacije 0 i 1. Kao parametre prima 0 i 1 što znači da se samo 0 ili 1 mogu pojaviti u nizu. Na osnovu niza signal će mijenjati fazu.

U nastavku slijedi dio skripte korišten za modulaciju signala.

**Linija    Kod**

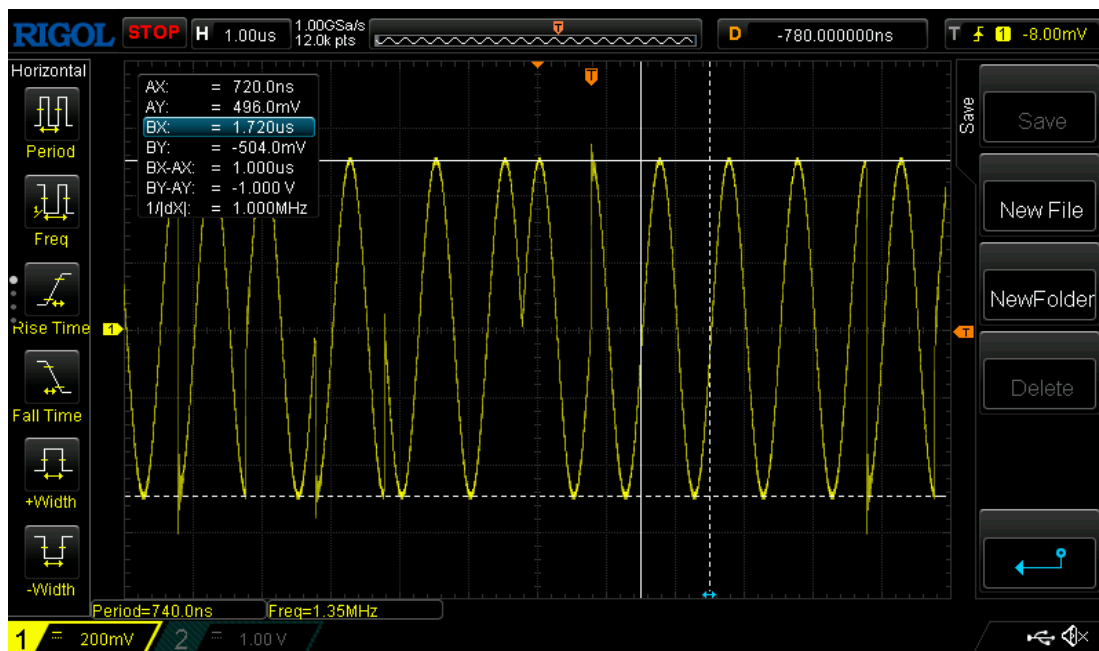
```
1:    for i = 1:brojbitova  
2:        start_index = (i - 1) * uzorakpobitu + 1;  
3:        end_index = i * uzorakpobitu;  
4:        faza = 0;  
5:        if bit_sekv(i) == 0  
6:            faza = pi; /*promjena faze*/  
7:        end  
8:        bpsk_signal(start_index:end_index) = (amplituda / 2) * sin(2  
9:            * pi * frek * t(start_index:end_index) + faza);  
10:        end
```

Signal je generiran sa frekvencijom signala nosioca koja iznosi 1MHz i amplitudom 1Vpp. Na slici 3.2. prikazan je vremenski oblik BPSK moduliranog signala. U skladu s očekivanjima vidljiva je promjena faze signala u određenim trenutcima i ta promjena je za 180 stupnjeva. Budući da se radi o BPSK signalu s dva moguća stanja faze, ovo je očekivan rezultat. Frekvencija moduliranog signala je 1MHz, a amplituda je 1 Vpp što je u skladu sa očekivanjem.



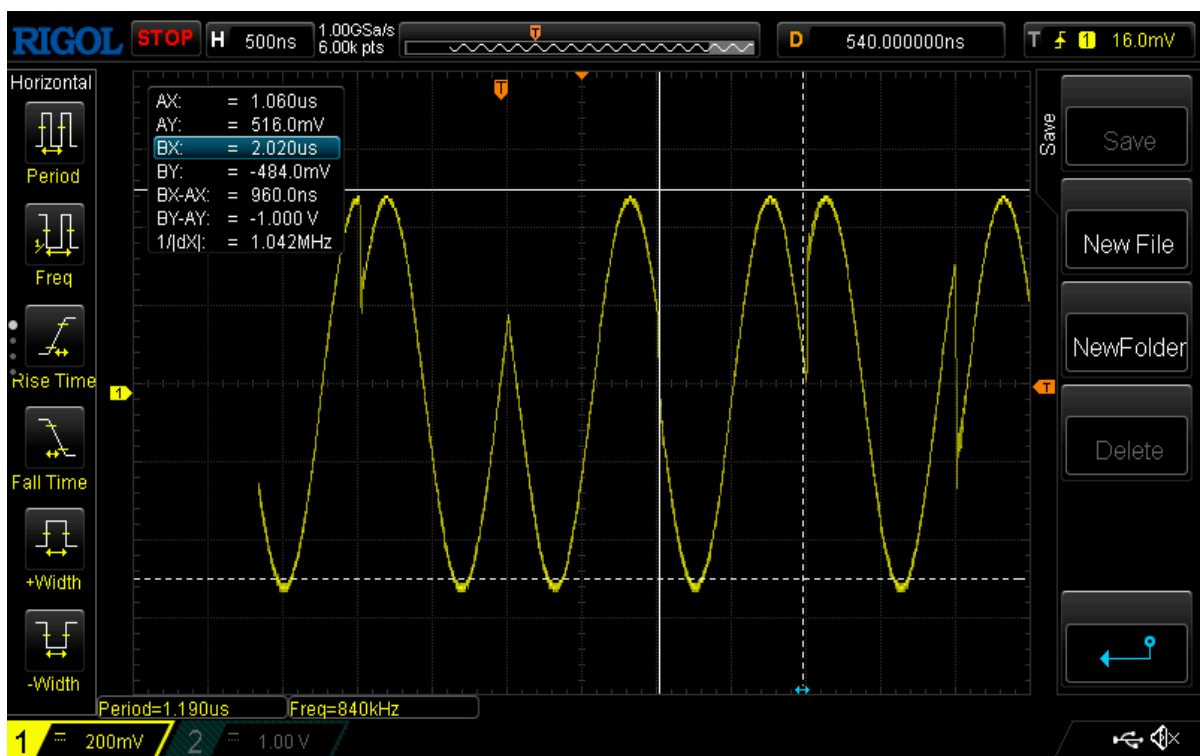
Slika 3.2. Vremenski prikaz BPSK moduliranog signala na osciloskopu.

U nastavku slijedi prikaz QPSK moduliranog signala kod kojega su moguća 4 različita stanja faze. Svako stanje je u odnosu na susjedno pomaknuto za  $90^\circ$  tako da su moguće promjene faze od  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  i  $270^\circ$ . Kao što se može vidjeti na slici 3.3. koja prikazuje vremenski oblik QPSK moduliranog signala, frekvencija i amplituda signala su cijelo vrijeme iste. To je u PSK očekivano. Što se tiče promjene faze, vidi se da kada ona nastupi promjena nije uvijek za  $180$  stupnjeva kao kod BPSK nego može biti  $90$  i  $270$  stupnjeva. Frekvencija je  $1\text{MHz}$ , a amplituda je  $1\text{Vpp}$ .



Slika 3.3. Vremenski prikaz QPSK moduliranog signala na osciloskopu.

U nastavku slijedi prikaz 16PSK moduliranog signala kod kojega su moguća 16 različita stanja faze. Svako stanje je u odnosu na susjedno pomaknuto za  $22,5^\circ$ . Moguće su promjene faze od  $22,5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67,5^\circ$ ,  $90^\circ$ , sve do  $337,5^\circ$ . Kao što se može vidjeti na slici 3.4. koja prikazuje vremenski oblik 16PSK moduliranog signala, frekvencija i amplituda signala su cijelo vrijeme iste, što je i očekivano u PSK. Može se uočiti da nisu promjene faze uvijek za  $180^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $270^\circ$ . Promjene faze mogu biti male, poput  $22,5^\circ$  i  $45^\circ$ . Frekvencija je 1MHz, a amplituda 1Vpp. Broj perioda je povećan na 40 kako bi bilo moguće prikazati što više promjena faza u signalu. Dakle, frekvencija na funkcijskom generatoru se postavlja na 25kHz kako bi dobili 1 MHz na osciloskopu.



Slika 3.4. Vremenski prikaz 16PSK moduliranog signala na osciloskopu.

### 3.2. Analiza amplitudno moduliranih signala u vremenskoj domeni

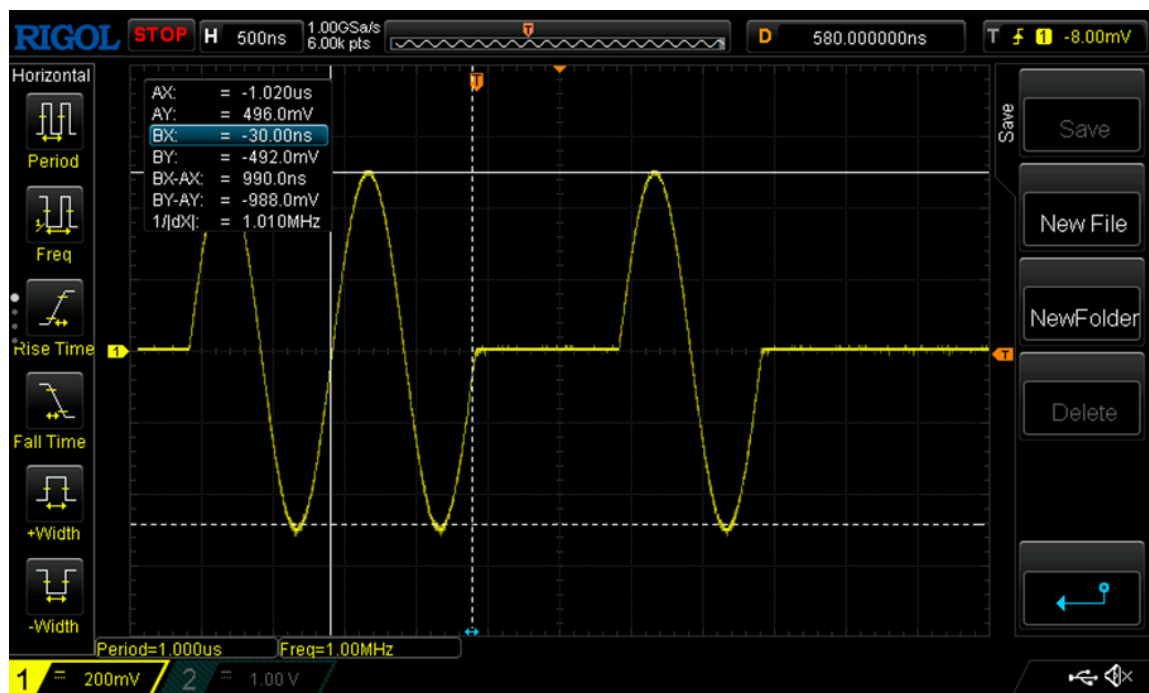
Kod ASK modulacija koriste se dva signala. Jedan signal predstavlja signal nosilac, a drugi je signal u obliku niza bitova. Za modulaciju se u *Matlab* skripti koristi *Randi* naredba pomoću koje se generira pseudoslučajan niz bitova. U ovisnosti o bitovima dolazi do određene promjene amplitude u signalu. Signal nosilac mijenja amplitudu signala ovisno o kombinaciji kod

modulacijskog signala. Teorijski bi vremenski oblik za ASK modulirani signal s M mogućih stanja u ovisnosti o broju stanja M i uz zadane parametre trebao biti predstavljen izrazom:

$$u_{MASK} = A_M * \cos(2\pi * 1 * 10^6 * t) \quad (3-3)$$

- $A_M$  – amplituda signala koja se mijenja u ovisnosti o kombinaciji bitova pseudoslučajnog niza

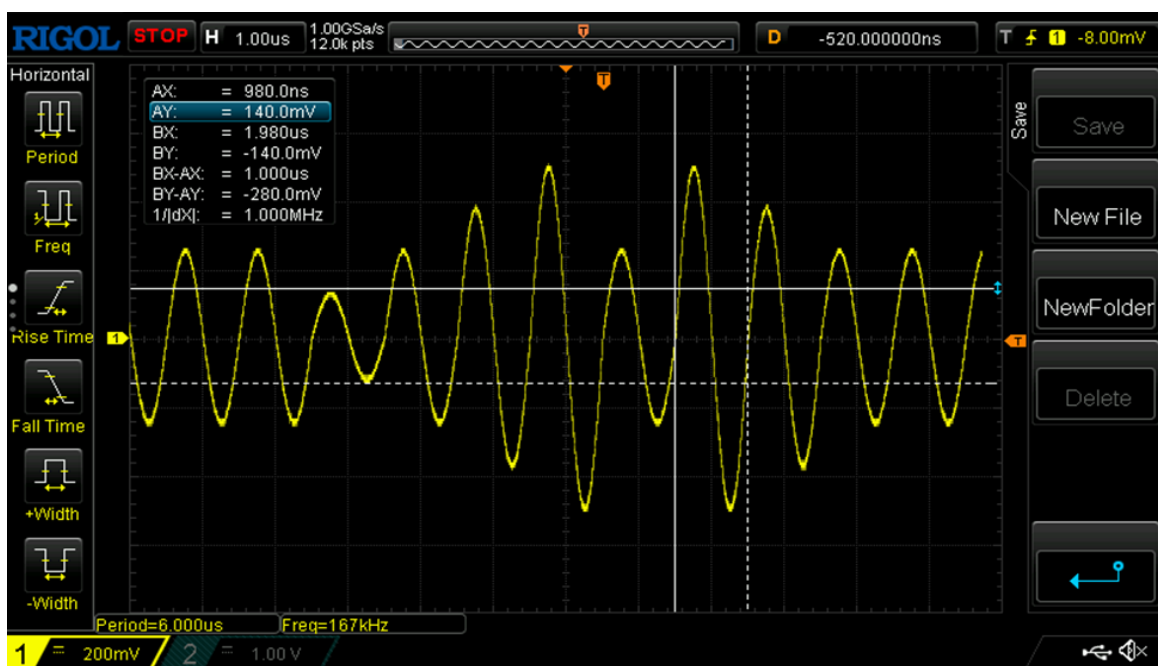
Na slici 3.5. prikazan je vremenski oblik BASK moduliranog signala. U skladu s očekivanjima vidljiva je promjena amplitude signala u određenim trenutcima i ta promjena je za 1Vpp. Budući da se radi o BASK signalu sa dva moguća stanja amplitude (0 Vpp i 1 Vpp), ovo je očekivan rezultat. Frekvencija je 1MHz, a faza 0°, što je u skladu sa očekivanjem za ASK.



Slika 3.5. Vremenski prikaz BASK moduliranog signala na osciloskopu.

U nastavku slijedi prikaz QASK moduliranog signala kod kojega su moguća 4 različita stanja amplitude. Moguće su promjene amplitude od 0,28, 0,56, i 0,84 Vpp. Kao što se može vidjeti na slici 3.6. koja prikazuje vremenski oblik QASK moduliranog signala, frekvencija i faza signala su cijelo vrijeme iste. To je u ASK očekivano. Što se tiče promjene amplitude, vidi se da kada ona nastupi promjena, nije za 1 Vpp kao kod BASK. Frekvencija je 1 MHz, a faza 0° i ne mijenja se.





Slika 3.6. Vremenski prikaz QASK moduliranog signala na osciloskopu.

### 3.3. Analiza frekvencijski moduliranih signala u vremenskoj domeni

Kod FSK modulacija koriste se dva signala. Jedan signal predstavlja signal nosilac, a drugi je signal u obliku niza bitova. Za modulaciju se u *Matlab* skripti koristi *Randi* naredba pomoću koje se generira pseudoslučajan niz bitova. Signal nosilac mijenja frekvenciju signala ovisno o kombinaciji kod modulacijskog signala.

Teorijski bi vremenski oblik za FSK modulirani signal s  $M$  mogućih stanja u ovisnosti o broju stanja  $M$  i uz zadane parametre trebao biti predstavljen izrazom:

$$u_{MFSK} = \cos(2\pi * f_M * t) \quad (3 - 4)$$

- $f_M$  – frekvencija signala koja se mijenja u ovisnosti o kombinaciji bitova pseudoslučajnog niza

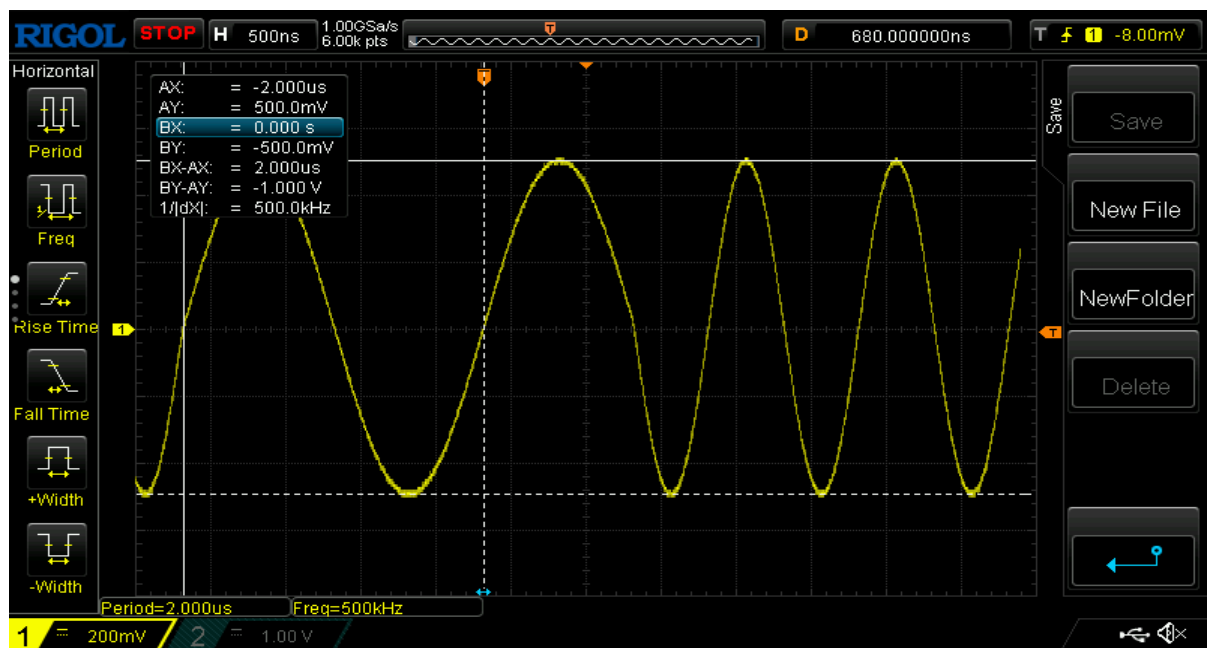
U nastavku slijedi dio skripte za definiranje parametara kod BFSK modulacije.

## Linija Kod

```
1: amplituda = 1.0;  
2: frekv1 = 1e6; /* 1MHz */  
3: frekv2 = 0.5e6: /* 0.5MHz */
```

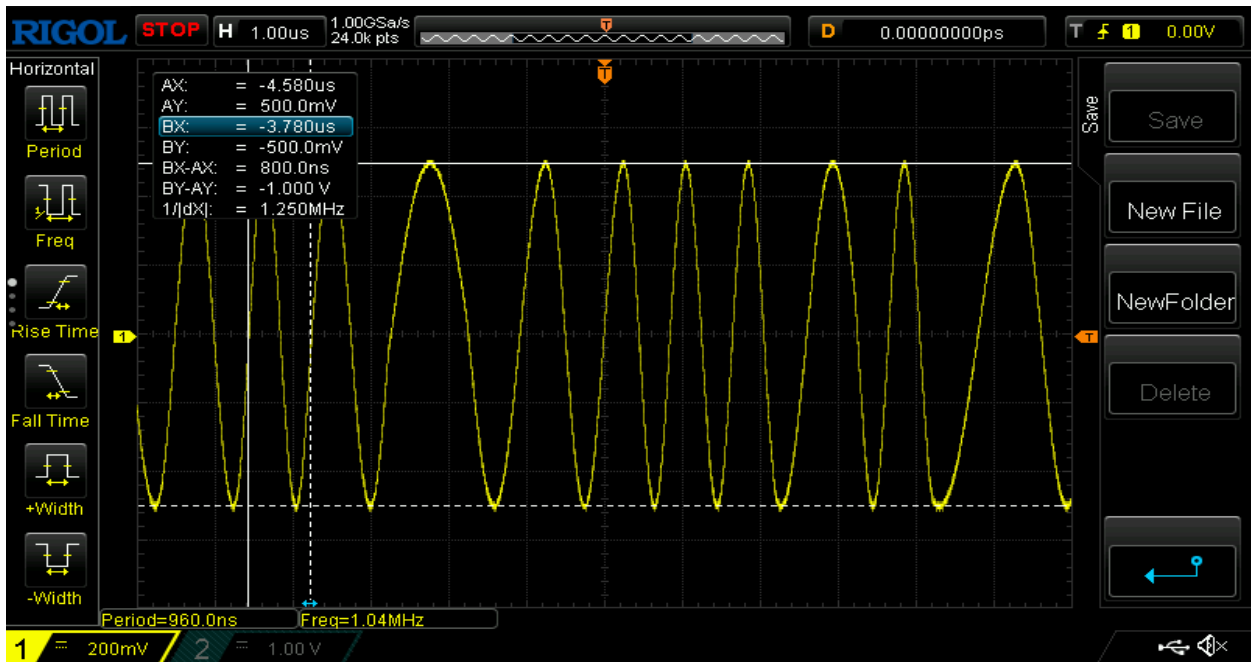
Kod generiranja signala određuju se parametri kao što su amplituda, frekvencija i broj uzoraka. Potrebno je odrediti dvije različite frekvencije prilikom samog generiranja signala kako bi signal nosilac poprimio jednu od određene dvije frekvencije [9].

Na slici 3.7. prikazan je vremenski oblik BFSK moduliranog signala. U skladu s očekivanjima vidljiva je promjena frekvencije signala u određenim trenutcima i ta promjena je za 0,5 MHz. Budući da se radi o BFSK signalu s dva moguća stanja frekvencije, ovo je očekivan rezultat. Faza se ne mijenja, a amplituda je 1 Vpp, što je u skladu sa očekivanjem.



Slika 3.7. Vremenski prikaz BFSK moduliranog signala na osciloskopu.

U nastavku slijedi prikaz QFSK moduliranog signala kod kojega su moguća 4 različita stanja frekvencije. Moguće su promjene frekvencije od 0,25, 0,5 i 0,75 MHz. Kao što se može vidjeti na slici 3.8. koja prikazuje vremenski oblik QFSK moduliranog signala, amplituda i faza signala su cijelo vrijeme iste. To je u FSK očekivano. Što se tiče promjene frekvencije, vidi se da kada ona nastupi, promjena nije uvijek za 0,5 MHz kao kod BFSK, nego može biti i 0,25 i 0,75 MHz. Amplituda je 1 Vpp, a faza se ne mijenja, što je u skladu sa očekivanjem.



Slika 3.8. Vremenski prikaz QFSK moduliranog signala na osciloskopu.

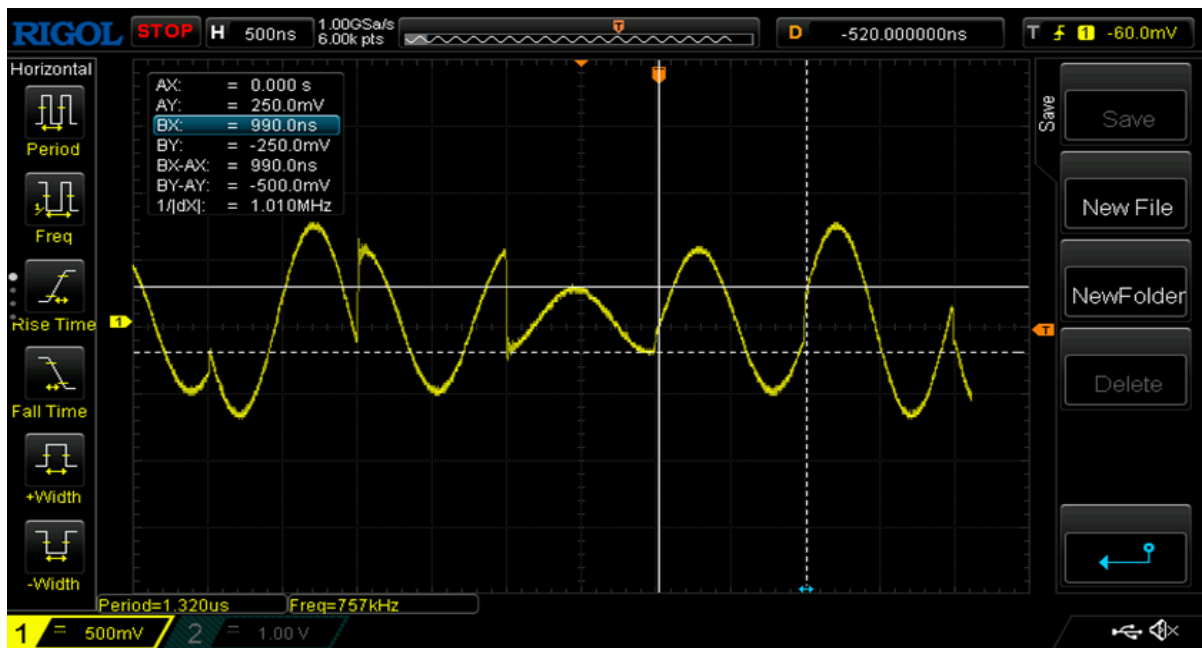
### 3.4. Analiza kvadratno amplitudno moduliranih signala u vremenskoj domeni

Kod 16QAM modulacije signal prenosi 4 bita po simbolu i signal nosilac može imati 16 različitih kombinacija faze i amplitude. Signal nosilac mijenja amplitudu i fazu signala ovisno o kombinaciji kod modulacijskog signala. Amplituda je povećana na 2 Vpp kako bi lakše bilo raspoznati različite amplitude signala. Teorijski bi vremenski oblik za FSK modulirani signal s M mogućih stanja u ovisnosti o broju stanja M i uz zadane parametre trebao biti predstavljen izrazom:

$$u_{MQAM} = A_{IM} \cos(2\pi f_c t) + A_{QM} \sin(2\pi f_c t) \quad (3-5)$$

- $A_{IM}$  – amplituda na (I) komponenti
- $A_{QM}$  – amplituda na (Q) komponenti

Na slici 3.9. prikazan je vremenski oblik 16QAM moduliranog signala. U skladu s očekivanjima, vidljiva je promjena faze i amplitude signala u određenim trenucima. Moguća su 16 različita stanja kombinacije faze i amplitude. Svako stanje može biti u odnosu na susjedno pomaknuto za određenu fazu i amplitudu. Međutim, promjena može biti i samo u jednom parametru. Moguće su promjene faze od 90°, 180° i 270°. Promjene amplitude mogu biti od 0,25 Vpp, 0,5 Vpp, i 0,75Vpp. Frekvencija je 1MHz i cijelo vrijeme je ista, što je očekivano u 16QAM.



Slika 3.9. Vremenski prikaz 16QAM moduliranog signala na osciloskopu.

## 4. ANALIZA MODULIRANIH SIGNALA U FREKVENCIJSKOJ DOMENI

U ovom poglavlju bit će uspoređeni rezultati koji se dobiju računskim putem i mjerenjima. Vrijednosti se određuju na dva načina (mjerenjem u laboratoriju koristeći spektralni analizator i proračun). Za proračun se koristi *Matlab* zbog jednostavnosti prikaza signala u frekvencijskoj domeni. Za mjerenje je korišten analizator spektra Rigol DSA700 koji je prikazan na slici 4.1.



Slika 4.1. Spektralni analizator Rigol DSA700.

Za analizu signala u frekvencijskoj domeni preko spektralnog analizatora potrebno je nekoliko koraka. Način spajanja funkcijskog generatora i spektralnog analizatora isti je kao s osciloskopom (BNC kabel). Analiziraju se isti signali koji su analizirani u vremenskoj domeni. *Matlab* skripta razlikuje se odnosu na skripte korištene za generiranje signala zbog dodavanja Fourierove transformacije za prikaz signala u frekvencijskoj domeni i računanje amplituda frekvencijskih komponenti na određenim frekvencijama. U nastavku slijedi dio skripte korišten za fourierovu transformaciju i prikaz u frekvencijskoj domeni.

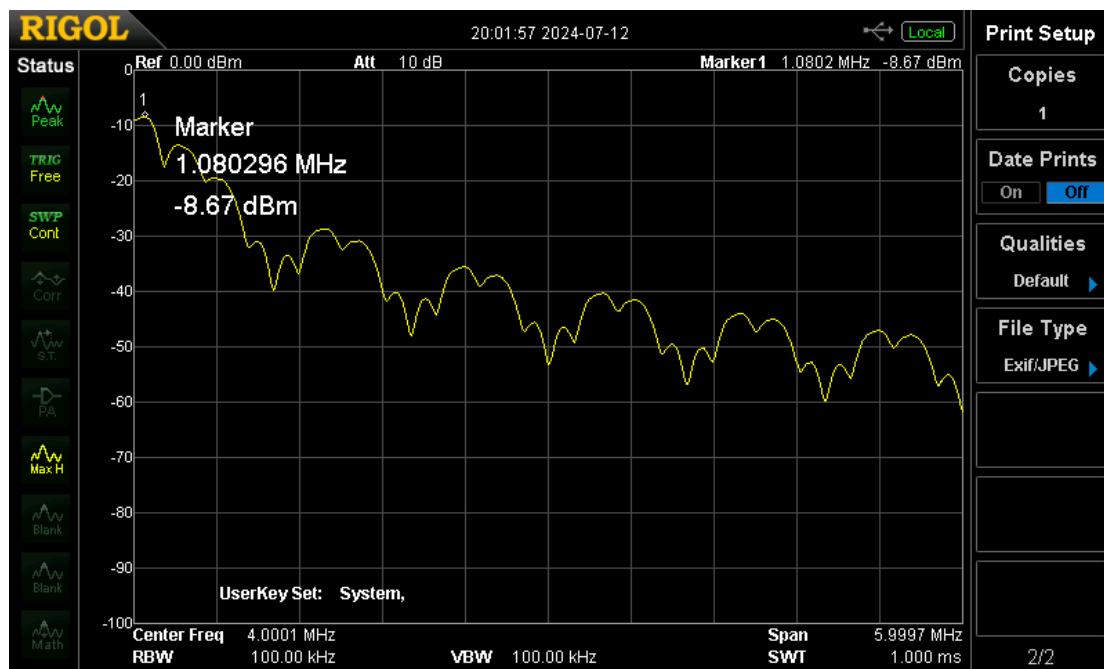
### *Linija    Kod*

```
1:    /* Fourierova transformacija signala*/
2:    frekdom = fft(qpsk_signal);
3:    frekdom = frekdom(1:brojuzoraka/2);
4:    freqs = linspace(0, frekv, brojuzoraka/2);
5:    /*Pretvorba amplitude u dBm*/
6:    Sig_dbm = 10*log10(abs(fft_signal)^2 / (50*1e-3)) + 30;
```

- Korištenjem *fft (Fast Fourier transform)* moguće je pretvoriti signal iz vremenske domene u frekvencijsku.
- Primjenom *fft* naredbe dobiju se kompleksni brojevi koji predstavljaju amplitudu i fazu frekvencijskih komponenti signala.
- Preko kompleksnih brojeva moguće je izračunati snagu.
- Snagu frekvencijskih komponenti moguće je izraziti u decibelima u odnosu na 1 miliwatt (dBm).
- Vrijednosti se računaju na svakih 500kHz u frekvencijskom opsegu od 1MHz - 7MHz.

#### 4.1. Analiza fazno moduliranih signala u frekvencijskoj domeni

Na slici 4.2. prikazan je frekvencijski spektar BPSK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.1. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Iako postoje malena odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti može se vidjeti da se promjene vrijednosti po frekvencijama zapravo jako lijepo poklapaju. Razlog odstupanja rezultata proračuna i mjerenja na svakoj pojedinoj frekvenciji je taj što kod mjerenja postoji određena razina šuma (kablovi i sami instrument) koji u proračunu ne postoje. Moguće je uočiti nagli pad vrijednosti na frekvencijama koje su višekratnici od 1 MHz. Ovi padovi su prisutni i kod analize frekvencijskog spektra QAM i ASK moduliranih signala. Na frekvenciji 1,080296 MHz je najveća vrijednost i iznosi -8,67 dBm.



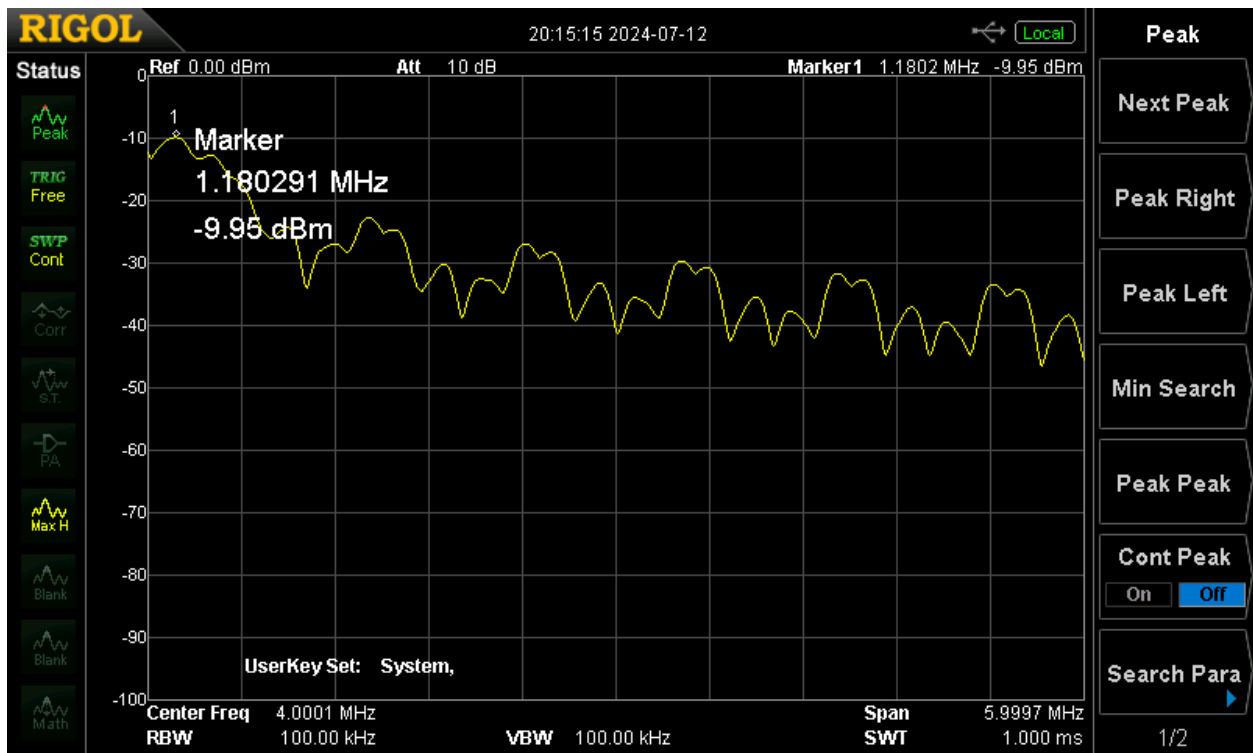
Slika 4.2. Prikaz frekvencijskog spektra BPSK moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

**Tablica 4.1.** Rezultati analize BPSK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-9,11	-8,51
1,5	-19,56	-18,29
2	-39,34	-38,52
2,5	-32,55	-33
3	-48,13	-47,11
3,5	-39,2	-38,88
4	-53,41	-52,55
4,5	-43,85	-44,2
5	-57,37	-56,65
5,5	-47,56	-48,01
6	-60,39	-61
6,5	-50,43	-49,55
7	-62,39	-61,25
MHz	dBm	

Na slici 4.3. prikazan je frekvencijski spektar QPSK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.2. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Kao i kod BPSK moduliranog signala, postoje malena odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti.

Na frekvenciji 1,180291 MHz je najveća vrijednost i iznosi -9,95 dBm.

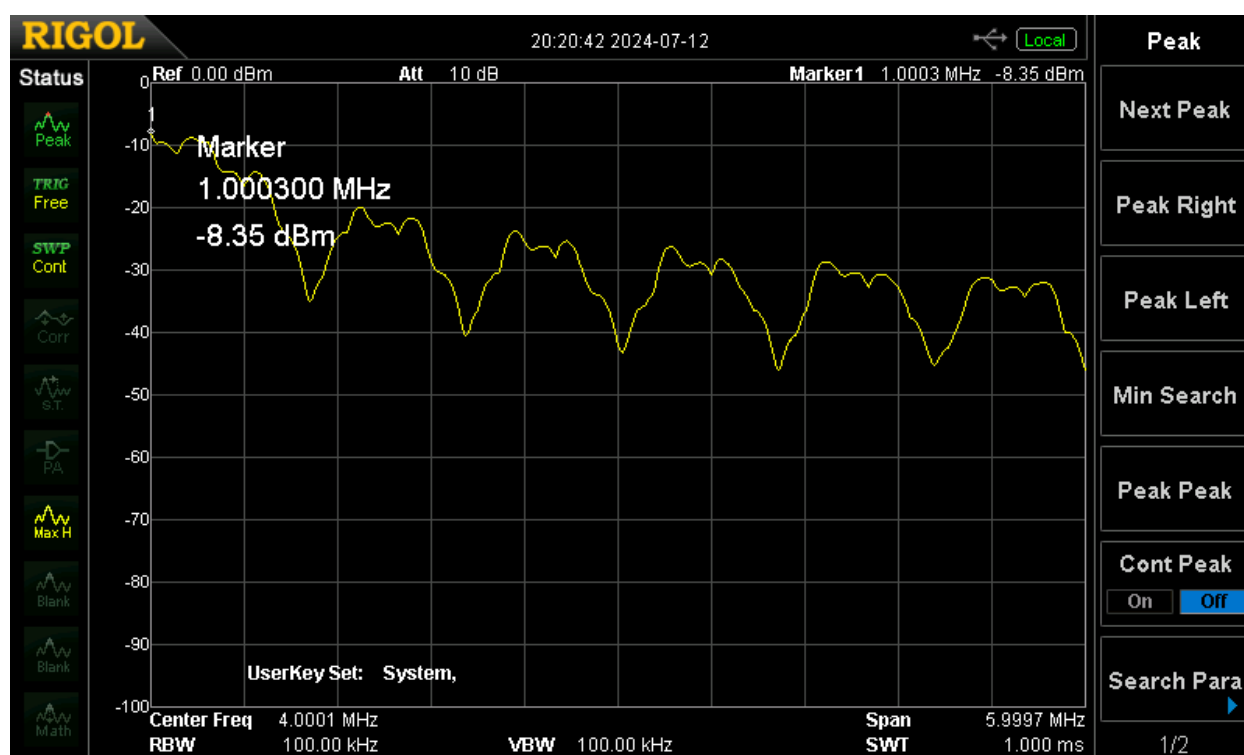


**Slika 4.3.** Prikaz frekvencijskog spektra QPSK moduliranog signala na spektralnom analizatoru

**Tablica 4.2.** Rezultati analize QPSK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-12,4	-11,5
1,5	-15,5	-13,28
2	-32,89	-33,1
2,5	-24,9	-23,45
3	-38,1	-37,34
3,5	-29,03	-28
4	-40,86	-41,78
4,5	-31,65	-30,9
5	-42,78	-41,5
5,5	-33,68	-34,67
6	-44,27	-43,11
6,5	-35,31	34,33
7	-45,48	-46,11
MHz	dBm	

Na slici 4.4. prikazan je frekvencijski spektar 16PSK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.3. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti su malena. Na frekvenciji 1,000300 MHz je najveća vrijednost i iznosi -8,35 dBm.



**Slika 4.4.** Prikaz frekvencijskog spektra 16PSK moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

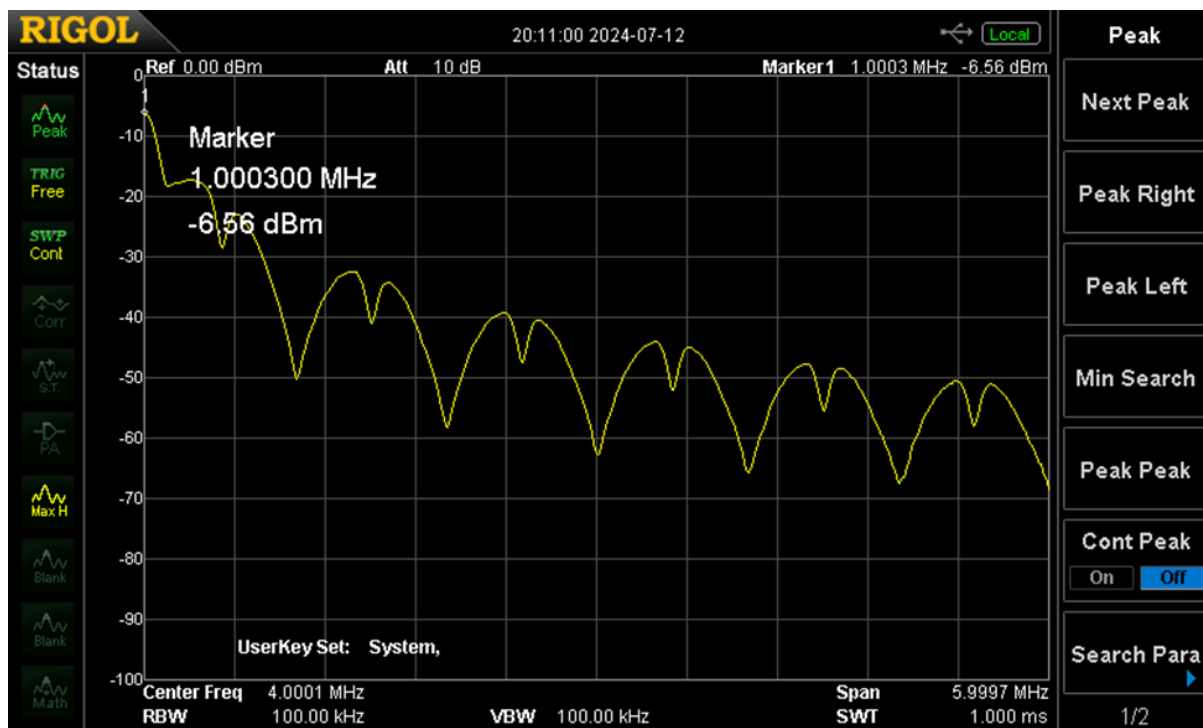


**Tablica 4.3.** Rezultati analize 16PSK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	- 8,43	-9,05
1,5	-14,35	-13,24
2	-33,93	32,48
2,5	-22,66	-21,5
3	-39,24	-40,15
3,5	-26,39	-27,94
4	-42,06	-41,05
4,5	-29,13	-28,76
5	-43,99	-42,34
5,5	-30,7	-31,15
6	-44,13	-43,52
6,5	-33,12	-34
7	-46,2	-46,11
MHz	dBm	

## 4.2. Analiza amplitudno moduliranih signala u frekvencijskoj domeni

Na slici 4.5. prikazan je frekvencijski spektar BASK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.4. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti su malena. Na frekvenciji 1,000300 MHz je najveća vrijednost i iznosi -6,56 dBm.



**Slika 4.5.** Prikaz frekvencijskog spektra BASK moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

**Tablica 4.4.** Rezultati analize BASK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-6,77	-7,31
1,5	-27,52	-26,42
2	-49,8	-48
2,5	-40,9	-39,54
3	-58,06	-59,49
3,5	-47,51	-45,51
4	-62,41	-61,01
4,5	-52,09	-53,25
5	-65,49	-66,38
5,5	-55,57	-54,26
6	-67,64	-68,23
6,5	-57,96	-58,45
7	-66,48	-67,65
MHz	dBm	

Na slici 4.6. prikazan je frekvencijski spektar QASK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.5. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti su malena. Na frekvenciji 1,000300 MHz je najveća vrijednost i iznosi -6,21 dBm.



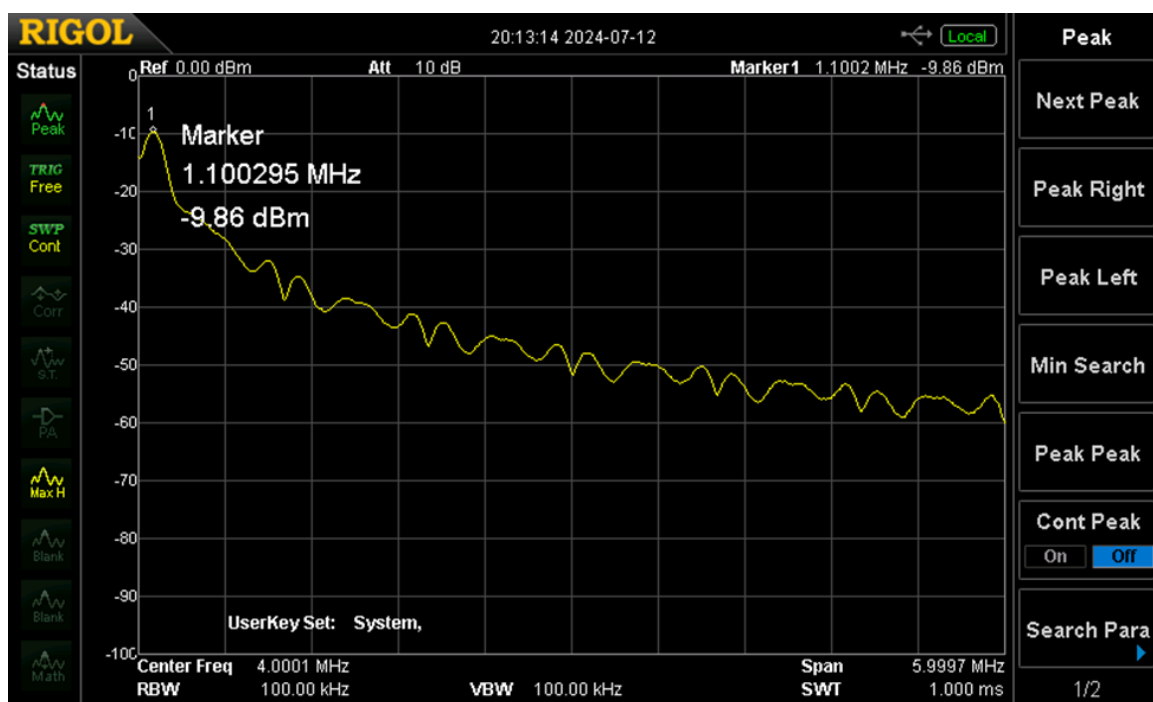
**Slika 4.6.** Prikaz frekvencijskog spektra QASK moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

**Tablica 4.5.** Rezultati analize QASK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-6,25	-6,9
1,5	-29,73	-27,75
2	-50,16	-49,21
2,5	-42,39	-43,55
3	-58,56	-59,11
3,5	-48,79	-47,49
4	-62,92	-61,85
4,5	-53,35	-54,52
5	-65,2	-66,31
5,5	-56,62	-57,08
6	-67,19	-67
6,5	-59	-57,45
7	-67,77	-68,27
MHz	dBm	

### 4.3. Analiza frekvencijski moduliranih signala u frekvencijskoj domeni

Na slici 4.7. prikazan je frekvencijski spektar BFSK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.6. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti su malena. Naglih padova vrijednosti na određenim frekvencijama nema.



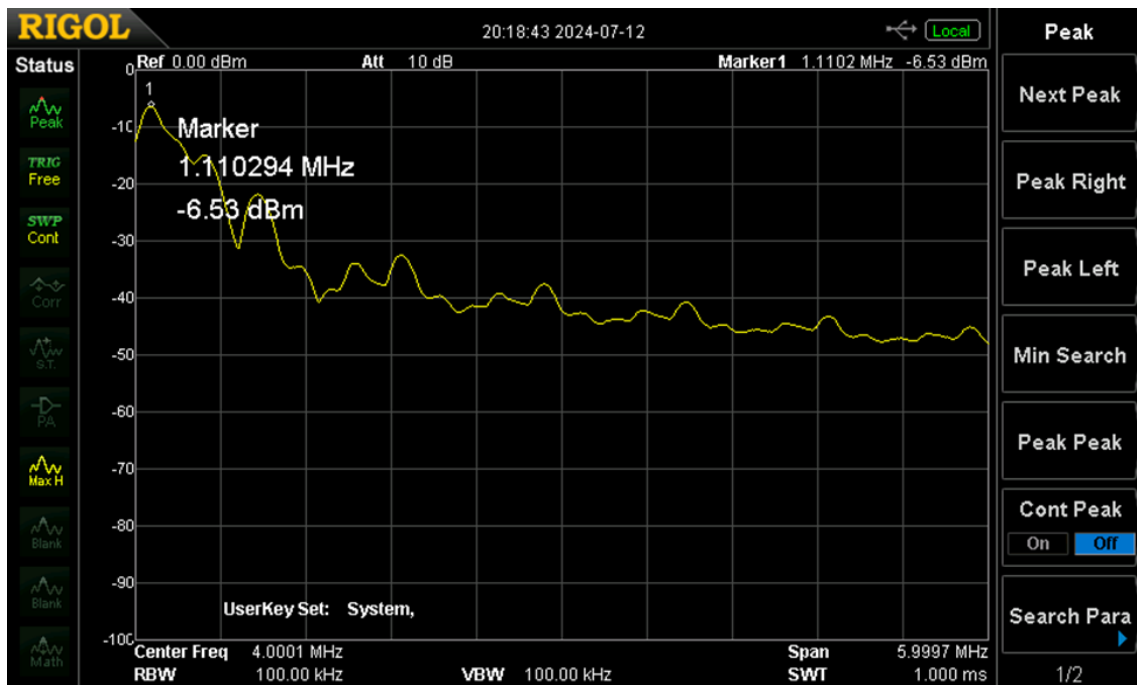
**Slika 4.7.** Prikaz frekvencijskog spektra BFSK moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

**Tablica 4.6.** Rezultati analize BFSK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-14,1	-13,34
1,5	-26,65	-25,04
2	-38,25	-37,36
2,5	-39,32	-38,23
3	-46,47	-45,58
3,5	-45,69	-44,25
4	-51,28	-50,4
4,5	-49,93	-47,81
5	-55,02	-56,47
5,5	-53,3	-52,47
6	-57,83	-58,24
6,5	-55,84	-56
7	-59,7	-57,91
MHz	dBm	

Na slici 4.8. prikazan je frekvencijski spektar QFSK moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.7. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti su malena.

Na frekvenciji 1,110294 MHz je najveća vrijednost i iznosi -6,53 dBm.



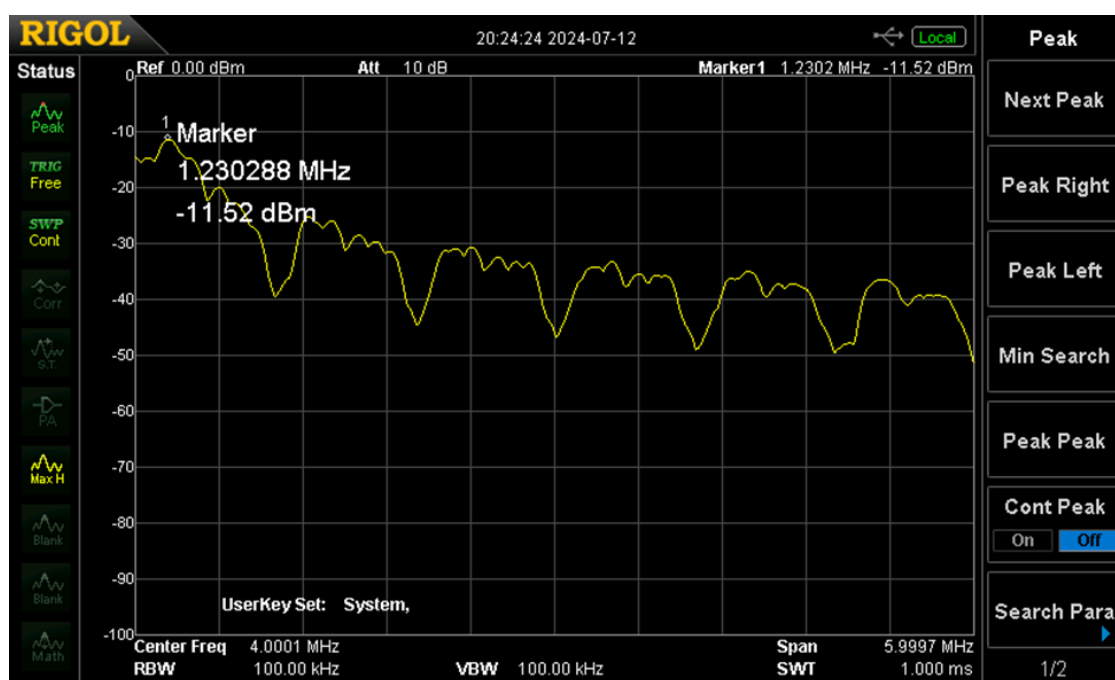
**Slika 4.8.** Prikaz frekvencijskog spektra QFSK moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

**Tablica 4.7.** Rezultati analize QFSK moduliranog signala mjerenjem i proračunom.

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-12,56	-11,21
1,5	-15,25	-17,02
2	-30,45	-29,44
2,5	35,08	-33,56
3	-38,54	-36,88
3,5	-40,6	-42,39
4	-42,15	-41,51
4,5	-43,59	-44,85
5	-44,66	-45,25
5,5	-45,66	-43,89
6	-46,55	-48
6,5	-47,44	-46,19
7	-48,07	-49,68
MHz	dBm	

#### 4.4. Analiza kvadraturno amplitudno moduliranih signala u frekvencijskoj domeni

Na slici 4.9. prikazan je frekvencijski spektar 16QAM moduliranog signala. Izmjerene su vrijednosti signala na frekvencijama prikazanim u tablici 4.8. i uspoređene s vrijednostima koje se dobiju računskim putem. Odstupanja izračunatih i izmjerenih vrijednosti su malena. Na frekvenciji 1,230288 MHz je najveća vrijednost i iznosi -11,52 dBm



**Slika 4.9.** Prikaz frekvencijskog spektra 16QAM moduliranog signala na spektralnom analizatoru.

**Slika 4.8.** Rezultati analize 16QAM moduliranog signala mjerenjem i proračunom

frekvencija	mjerenje	Matlab
1	-8,55	-9,22
1,5	-15,06	-14,31
2	-33,47	-34,62
2,5	-24,64	-25,05
3	-37,67	-38,86
3,5	-28,61	-27,54
4	-40,5	-41,73
4,5	-31,62	-30,26
5	-42,19	-41,44
5,5	-33,35	-34,58
6	-43,59	-42,35
6,5	-34,54	-33,57
7	-45,45	-43,9
MHz	dBm	

Najčešće ovakva odstupanja mogu nastati zbog kalibracije instrumenta ili utjecaja vanjskih čimbenika na mjerenje. Odstupanja u rezultatima mogu nastati i zbog premještanja signala s jednog programa na drugi. Moguće je da dođe do promjene vrijednosti uzoraka nakon spremanja signala generiranih u *Matlabu* na program *Ultra Station*. Jedan od čimbenika odstupanja također može biti nespretnost mjerenja. *Matlab* kao program generira i računa frekvencijske komponente signala u idealnim uvjetima. Nema utjecaja vanjskih čimbenika na računanje amplituda frekvencijskih komponenti kao što je na spektralnom analizatoru.

FFT(*Fast Fourier Transform*) idealizirana je metoda računanja amplituda frekvencijskih komponenti u *Matlabu* bez utjecaja fizičkih komponenti koje uzrokuju šum. Spektralni analizator, međutim, ima određen prag osjetljivosti, ograničenu širinu pojasa. Prilikom proračuna pomoću MATLAB-a korišteni su isti parametri signala kao i kod generiranja signala [10]

## 5. ZAKLJUČAK

Kod modulacije signala pseudoslučajan niz bita koristi se zajedno sa signalom nosiocem. Pri tome signal mijenja određene parametre u ovisnosti o kombinaciji bita kroz pseudoslučajan niz. Većim brojem kombinacija bitova može se prenijeti veća količina informacije, ali mogućnost pogreške je veća.

Signali se moduliraju po fazi (PSK), amplitudi (ASK), frekvenciji (FSK) i kombinaciji amplitude i faze (QAM). Za svaki modulacijski postupak potreban je određen način generiranja signala u *Matlabu* pri čemu je uvijek važan pseudoslučajan niz o kojem ovisi signal nosilac. Generiranje signala radi se u programu *Matlab* pri čemu se signali u obliku Excel dokumenta spremaju na program *Ultra Station* i šalju na funkcijski generator pri određenim parametrima. Za analizu signala u vremenskoj domeni koristi se osciloskop preko kojega se mogu precizno analizirati svi modulacijski postupci. Za generiranje signala koristi se slična *Matlab* skripta za sve signale. Signali se analiziraju na način da se mjere frekvencija i amplituda pojedinog signala.

Kod analize signala u frekvencijskoj domeni koristi se spektralni analizator. Signali se pomoću Fourierove transformacije pretvaraju u frekvencijski spektar. Na spektralnom analizatoru za svaki signal određenom se metodom očitavaju vrijednosti na različitim frekvencijama. Vrijednosti se određuju na svakih 500 kHz frekvencije u opsegu 1 – 7 MHz. Uz mjerenje spektralnim analizatorom vrijednosti se računaju i preko *Matlaba* tako što se uz postojeće skripte doda metoda FFT (*Fast Fourier Transform*). Prilikom uspoređivanja rezultata uočava se da vanjski čimbenici i šum te nepreciznost mogu utjecati na odstupanje rezultata.

## LITERATURA

- [1] M. Rice, Digital Communications: A Discrete-time Approach, Prentice Hall, 2009.
- [2] Peterson, Roger L, Spread spectrum communication, Simon & Schuster, Asia, 1995.
- [3] F. Xiong, Digital Modulation Technique, Artech House, Boston, 2006.
- [4] Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.
- [5] S. Haykin, Communication systems, fourth edition, Wiley, India, 2006.
- [6] M. Viswanathan, Digital Modulations using Matlab, Mathuranathan Viswanathan, India, 2017.
- [7] Chapra, Steven C, Numerical methods for engineers: with programming and software applications, WCB, Boston, 1998.
- [8] W. Jue, Test & Measurement, Product Catalog, Rigol, Japan, 2021.
- [9] J. Proakis, Fundamentals of Communication Systems, 2nd edition, Pearson, Northeastern University, 2022.
- [10] J. Proakis, Digital Communications, 5th edition, McGraw-Hill, New York, 2007.



## SAŽETAK

Ovim se završnim radom proučava modulacija signala preko *Matlaba* i analiza mjerenjem u laboratoriju. Signali se generiraju programski i šalju u obliku Excel dokumenta na program *Ultra Station*. Nakon postavljanja određenih parametara signali se šalju na funkcijski generator i analiziraju preko osciloskopa u vremenskoj domeni i spektralnog analizatora u frekvencijskoj domeni. Glavni problem je način na koji se signali generiraju i mogu analizirati bez problema. U ovom je slučaju korišten programski paket *Matlab* zbog mogućnosti generiranja složenih signala na jednostavan način. Svaki modulirani signal dijeli sličnu *Matlab* skriptu uz malu promjenu. Signali se analiziraju na način da se za pojedini signal odredi frekvencija i amplituda. Potrebno je dokazati tvrdnju da parametri odgovaraju onima koji su korišteni prilikom generiranja signala u *Matlabu*. Kod frekvencijske domene frekvencijski spektri signala prikazuju se na spektralnom analizatoru. Rezultati mjerenja vrijednosti na različitim frekvencijama uspoređuju se s onima koji se dobiju u idealnim uvjetima preko *Matlaba* (proračun). Na taj se način može prikazati da vanjski čimbenici i šum mogu utjecati na rezultate analize signala u laboratoriju.

**Ključne riječi:** frekvencijska domena, modulacija, Matlab, pseudoslučajni signali, vremenska domena.

## ABSTRACT

*Generating pseudo-random modulated signals and their analysis in frequency and time domain*

This paper focuses on generating pseudo-random modulated signals with Matlab and their analysis in a laboratory. Signals are generated with software and are sent as an Excel type document to Ultra Station. By setting adequate parameters, signals are sent to the function generator and analyzed with an oscilloscope in time domain and spectral analyzer in frequency domain. The main problem is how the signal is generated and analyzed without a problem. In this case Matlab is used by generating the signals with a Matlab script because of the efficiency in making complex signals much easier. All the modulated signals share quite the same Matlab script considering some slight changes how the modulation is executed in some signals. Signal are analyzed by measuring their frequency and Amplitude in time domain. It is important to see that the parameters on the Oscilloscope are identical to the ones used for generating the signals in the Matlab script. In frequency domain frequency spectrums of signals are shown on the spectrum analyzer. Results by measuring amplitudes of frequency components are compared to results obtained by using the Matlab software in ideal conditions. It is possible that noise and other outside factors can have an effect on results obtained by measuring in a laboratory.

**Keywords:** frequency domain, Matlab, modulation, pseudo-random signals, time domain.

## ŽIVOTOPIS

Mijo Marković rođen je 26. 11. 2001. godine u Orašju u Bosni i Hercegovini. Osnovnu školu Braće Radića pohađa u Grebnicama do sedmog razreda. Zbog poplave 2014. g nastavlja školovanje u Domaljevcu u Osnovnoj školi Braće Radića. Upisuje elektrotehničku školu u Srednjoj strukovnoj školi Orašje. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku upisuje 2021.g. U drugoj godini studija upisuje smjer Komunikacije i informatika.

---

Potpis autora