

Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu

# Projektni zadatak broj 5 iz Osnova telekomunikacija

Milomir Stefanović  
2018/0144, OS

Beograd  
maj 2020.

## 1. Uvod

Cilj ovog projekta jeste modelovanje prenosa signala pomoću FM modulacije i posmatranje odnosa signal – šum kao i analiza neidealne sinhronizacije frekvencije lokalnog nosioca sa greškom sinhronizacije od  $\pm 1\text{kHz}$ .

## 2. Metod

### 2.1 Generisanje signala

Svi pomenuti postupci analizirani su sa 4 vrste signala sa frekvencijom odabiranja od  $F_s = 256\text{ kHz}$  i vremenskim trajanjem od  $\tau = 0.128\text{ s}$  što znači da je vršena analiza prvih  $N = F_s \tau = 65536$  odbiraka. Posmatrani signali su:

- a) **Prostoperiodičan signal** amplitude  $A = 1$  i frekvencije  $f_0 = 1\text{kHz}$ .
- b) **Složenoperiodičan signal**, amplituda  $A_0 = 0.5, A_1 = 0.25, A_2 = 0.15$  i  $A_3 = 0.1$  redom i frekvencija  $f_0 = 500\text{Hz}, f_1 = 1\text{kHz}, f_2 = 1.5\text{kHz}$  i  $f_3 = 2\text{kHz}$ .
- c) **Dvostrano ispravljeni prostoperiodični signal**, je zapravo apsolutna vrednost signala pod a) tj.  $x(t) = |A \cos(2\pi f_0 t)|$ .
- d) **Aperiodični signal**, u ovom primeru je zapravo složeno periodičan signal pomnožen funkcijom  $f(t) = h(t - 0.056) - h(t - 0.072)$ , gde je  $h(t)$  Hevisajdova funkcija vremena. Množenje sa  $f(t)$  zapravo pravi da je signal različit od nule samo na intervalu  $\left[\frac{7}{16}, \frac{9}{16}\right] \tau$  kao što je traženo u projektnom zahtevu.

### 2.2 Dodavanje aditivnog belog Gausovog šuma na signal

Na gore navedene signale dodavan je aditivni beli Gausov šum različitog odnosa signal – šum. Posmatrani su signali pri odnosu signal-šum od 5dB, 8dB, 11dB, 14dB, 17dB, 20dB, 23dB i 26dB koji su prosleđeni na modulator.

### 2.3 Modulator

Ugaona modulacija je modulacioni proces kod kog se za razliku od amplitudke modulacije u signal nosilac utiskuje faza signala a amplitudska nosioca ostaje nepromenjena. Ako imamo signal nosilac  $U_0 \cos(\omega_0 t)$  a normalizovani modulišući signal  $U_m m(t)$  tada će frekvencijski modulisan signal  $u_{FM}(t)$  biti definisan izrazom  $u_{FM}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + 2\pi k_{FM} U_m \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$  a proizvod  $2U_m \pi k_{FM}$  možemo zameniti sa  $\Delta f_0$  i ovaj koeficijent naziva se maksimalna devijacija frekvencije i u ovom projektu je ona  $10\text{kHz}$ . Učestanost signala nosioca je  $60\text{kHz}$ . Ovako modulisan signal prosleđuje se na ulaz demodulatora

### 2.4 Demodulator

Na ulazu demodulatora signal se u jednoj grani množi sa  $\cos(\omega_0 t)$  a u jednoj grani sa  $\sin(\omega_0 t)$  gde je  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , gde je  $f_0$  frekvencija lokalno generisanog nosioce iste frekvencije kao u modulatoru tj.  $f_0 = 64\text{kHz}$ . Zatim signali iz grana se filtriraju lowpass filterom frekvencije  $51\text{kHz}$ .

Ako signal koji je dobijen množenjem sa kosinusom označimo kao I a signal pomnožen sa sinusom označimo kao Q i tada formiramo kompleksan signal čija je vrednost  $I + iQ$  i koji se naziva kompleksna anelopa čijom obradom kroz nekoherentni demodulator se dobija željeni signal.

Nekoherentni demodulator se takođe sastoji od 2 grane. U prvoj grani je sistem sa jediničnim kašnjenjem a u drugoj inverter faze koji se dobija prostim konjugovanjem kompleksne anelope. Nakon toga takva dva kompleksna signala se može i demodulisani signal je argument signala dobijenim množenjem. Cela blok šema sistema nalazi se na slici 1.

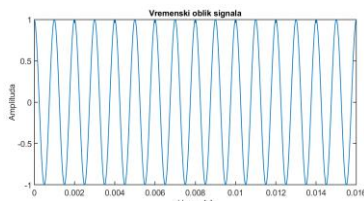
## 2.5 Poređenje odnosa signal-šum i greška sinhronizacije frekvencije

Na izlazu demodulatora možemo odrediti odnos signal-šum za primeljeni signal i uporediti sa istim odnosom na ulazu u modulator. Odnos signal – šum računat je pomoću funkcije `snr` implementisane u MatLabu. Takođe vršeno je i posmatranje uticaja na demodulisani signal ako usled greške sinhronizacije frekvencije od  $\pm 1\text{kHz}$  i potpuno pogrešnoj detekciji signala nosioca kao ekstremnog slučaja ovog problema.

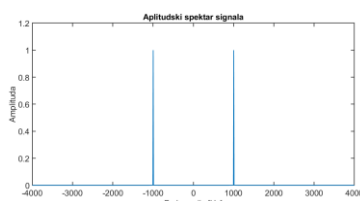
## 3. Rezultati

### 3.1 Ulazni signali

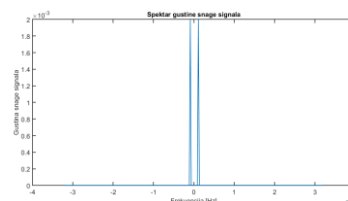
#### Prostoperiodični signal



a) Vremenski oblik

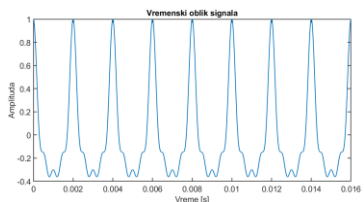


b) Spektar signala

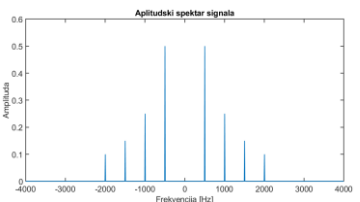


c) Spektar gustine snage signala

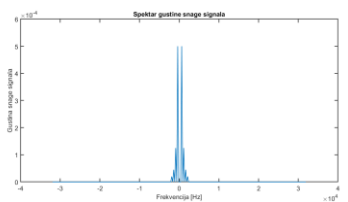
#### Složenoperiodični signal



a) Vremenski oblik

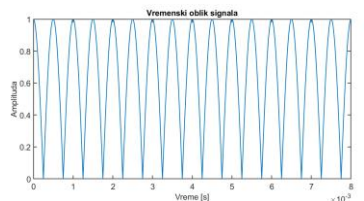


b) Spektar signala

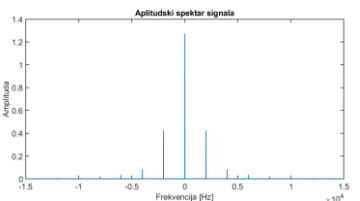


c) Spektar gustine snage signala

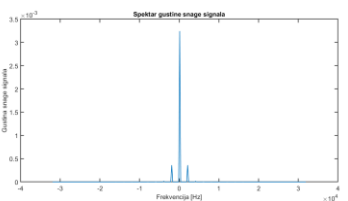
#### Prostoperiodični signal koji je propušten kroz ispravljač



a) Vremenski oblik

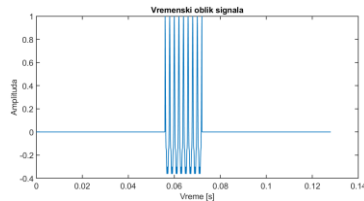


b) Spektar signala

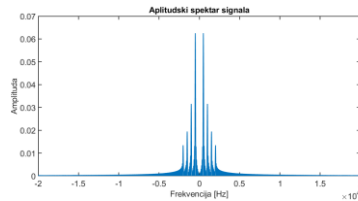


c) Spektar gustine snage signala

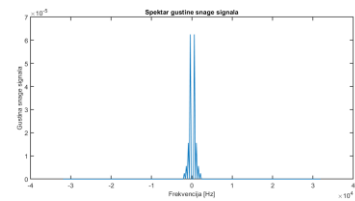
## Aperiodični signal



a) Vremenski oblik



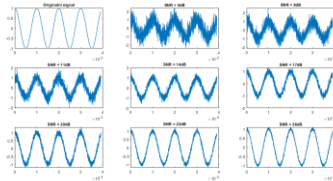
b) Spektar signala



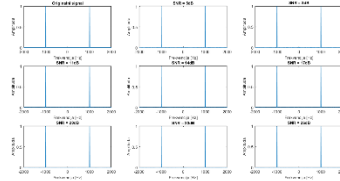
c) Spektar gustine snage signala

## 3.2 Zašumljeni signali

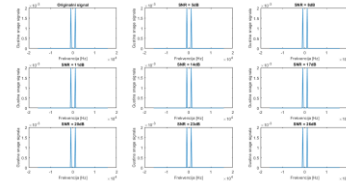
### Prostoperiodični signal



a) Vremenski oblik

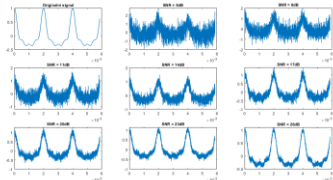


b) Spektar signala

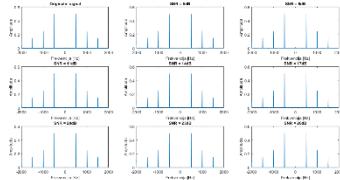


c) Spektar gustine snage signala

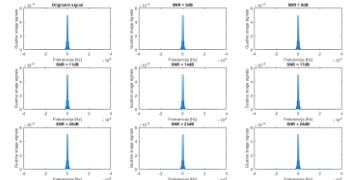
### Složenoperiodični signal



a) Vremenski oblik

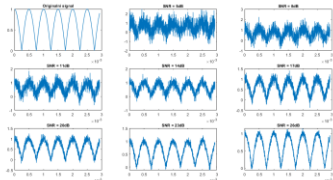


b) Spektar signala

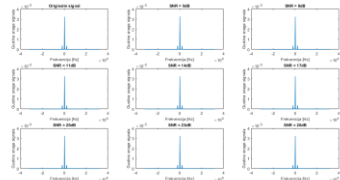


c) Spektar gustine snage signala

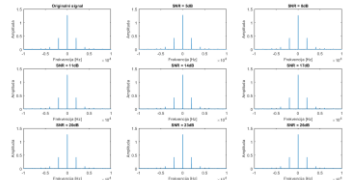
### Prostoperiodični signal koji je propušten kroz ispravljač



a) Vremenski oblik

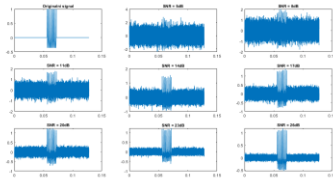


b) Spektar signala

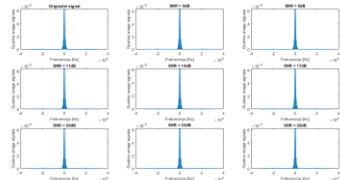


c) Spektar gustine snage signala

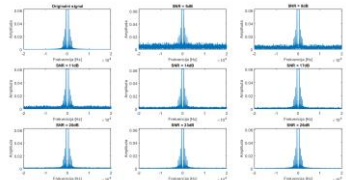
### Aperiodični signal



a) Vremenski oblik



b) Spektar signala



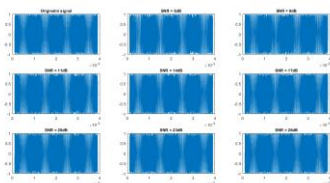
c) Spektar gustine snage signala

Na osnovu prethodnih grafika možemo primetiti da kako povećavamo odnos SNR da se tako signal izgleda sve približnije originalnom signalu što u potpunosti odgovara teoriji. Takođe se može primetiti da za iste vrednosti SNRa za različite vrste signala šum negde proizvodi veće a

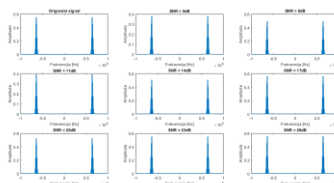
negde manje deformitete u izgledu signala. Npr. kod prostoperiodičnog i ispravljenog signala iako je SNR 5dB može se jasno utvrditi izgled originalnog signala, kod složenoperiodičnog sistema blagi prevoji signala pri njegovom minimumu koji postoje u originalnom signalu šum izbacuje za male vrednosti SNRa ali kod aperiodičnog signala koristan signal koji se nalazi na sredini posmatranog perioda upada u šum te se tu gubi dosta informacija. Najbolji pokazatelj toga koliko na signal utiče šum možemo videti na spektru spektralne gustine snage signala jer u prva tri slučaja za sve vrednosti SNRa vrlo slabo se vide komponente šuma u spektru dok se to kod aperiodičnog signala dosta vidi za male vrednosti SNRa.

### 3.3 Modulisani signali

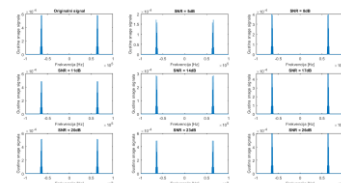
#### Prostoperiodični signal



a) Vremenski oblik

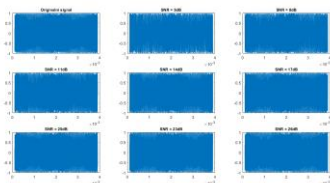


b)Spektar signala

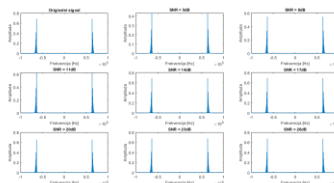


c)Spektar gustine snage signala

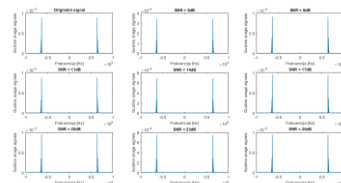
#### Složenoperiodični signal



a) Vremenski oblik

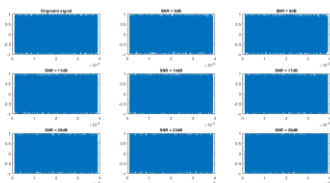


b)Spektar signala

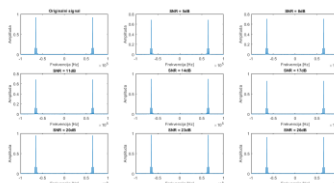


c)Spektar gustine snage signala

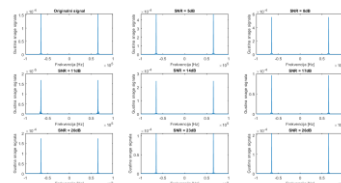
#### Prostoperiodični signal koji je propušten kroz ispravljač



a) Vremenski oblik

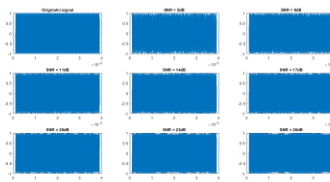


b)Spektar signala

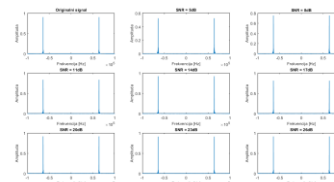


c)Spektar gustine snage signala

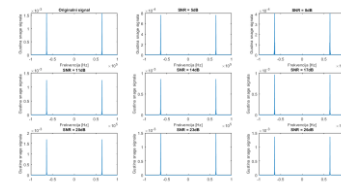
#### Aperiodični signal



a) Vremenski oblik



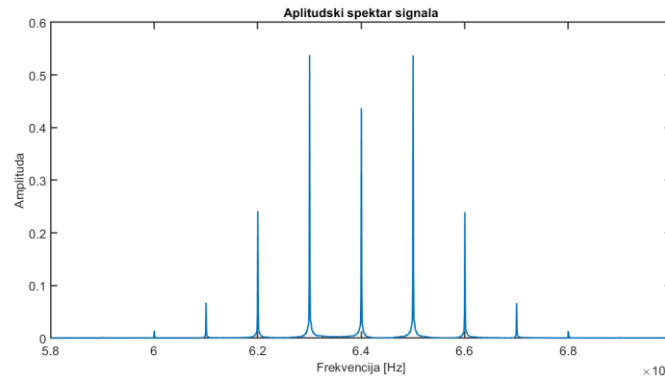
b)Spektar signala



c)Spektar gustine snage signala

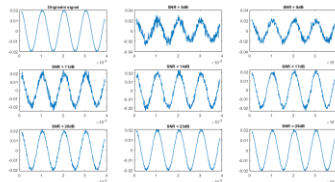
U modulisanom signalu u svim primerima može se primetiti da su modulišući signali uticali na promenu oblika modulisanog signala u poređenju sa signalom nosiocem čiji oblik je dominantan u obliku modulisanog signala što je

jedan od glavnih razloga zašto je FM modulacija najkorišćenija modulacija u modernim sistemima. Oblike spektara modulisanog signala složenoperiodičnog, ispravljenog i aperiodičnog signala je jako teško porediti sa teorijskim vrednostima ali se rezultati mogu porediti za prostoperiodični signal. Kada se izvrši FM modulacija za prostoperiodični signal spektar modulisanog signala je teorijski beskonačne širina, diskretan i simetričan u odnosu na signal nosilac. Kako je  $\Delta f_0 = 10\text{kHz}$  i  $f_m = 1\text{kHz}$  tj.  $w_m = 2\pi f_m \approx 6.28\text{ kHz}$  te je  $m \approx 3.2$  pa je širina korisnog dela spektra  $B = 6.4\text{kHz}$  što znači da su korisni delovi spektra u delu između  $[60.8, 67.2]\text{kHz}$ . Na ovom grafiku vidi se je spektar diskretan, simetričan u odnosu na signal nosilac i da su vidljivi delovi spektra između  $61\text{kHz}$  i  $67\text{kHz}$  te se zaključuje da se dobijeni modulisani signal slaže sa teorijskim proračunom, a kako je istim algoritmom izvršena modulacija svih ostalih signala može se zaključiti da je proces modulacije izvršen ispravno.

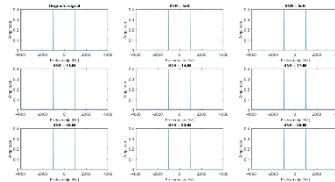


### 3.4 Demodulisani signali

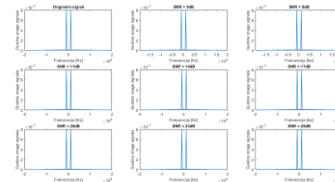
#### Prostoperiodični signal



a) Vremenski oblik

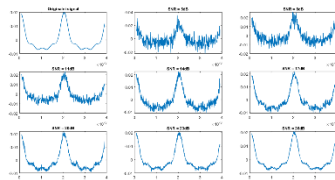


b) Spektar signala

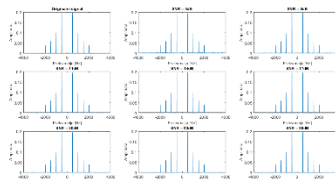


c) Spektar gustine snage signala

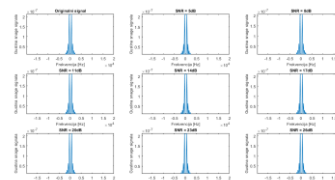
#### Složenoperiodični signal



a) Vremenski oblik

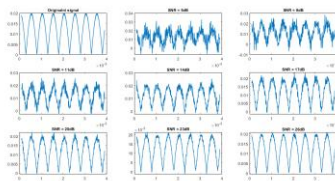


b) Spektar signala

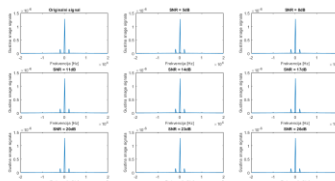


c) Spektar gustine snage signala

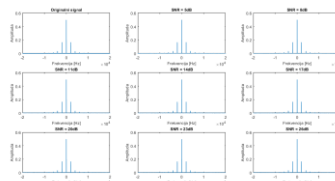
#### Prostoperiodični signal koji je propušten kroz ispravljač



a) Vremenski oblik

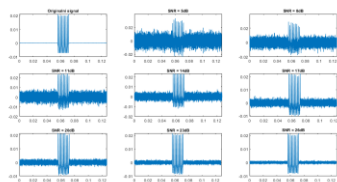


b) Spektar signala

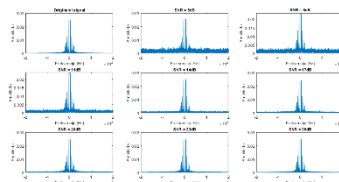


c) Spektar gustine snage signala

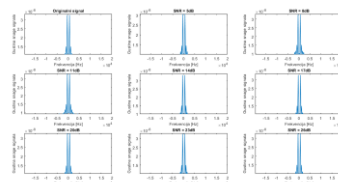
## Aperiodični signal



a) Vremenski oblik



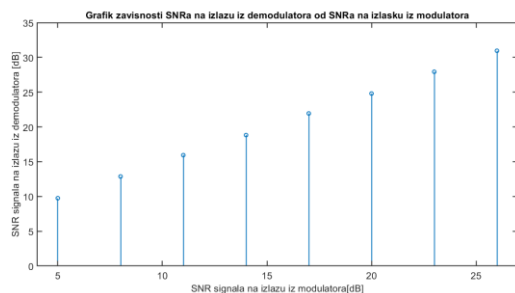
b) Spektar signala



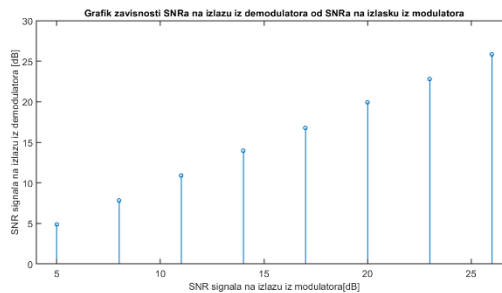
c) Spektar gustine snage signala

Primenom nekoherente demodulacije FM signala za ispravnu usklađenost lokalno generisanog nosioca možemo primetiti da je demodulacija ispravno implementirana jer su dobijeni ispravni oblici signala. Takođe u slučaju periodični signala vidimo da je signal na izlazu iz demodulatora čak boljeg kvaliteta nego signal na ulazu u modulator što objašnjavamo time što je primenjen lowpass filter koji je poboljšao odnos signal – šum i ovaj proces posmatramo u podpoglavlju 3.5.

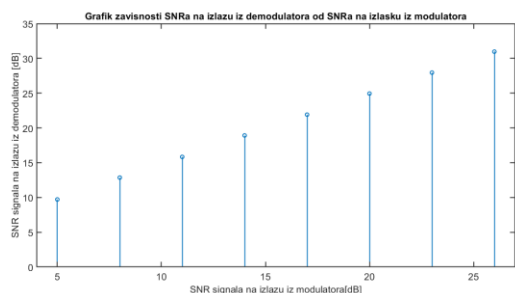
## 3.5 SNR



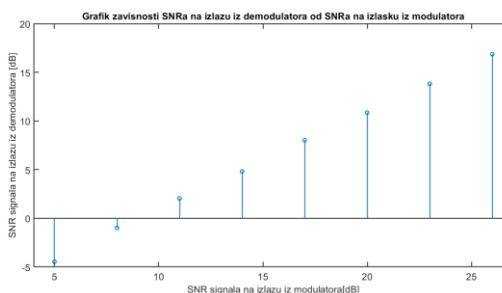
a) Periodični signal



b) Složenoperiodični signal



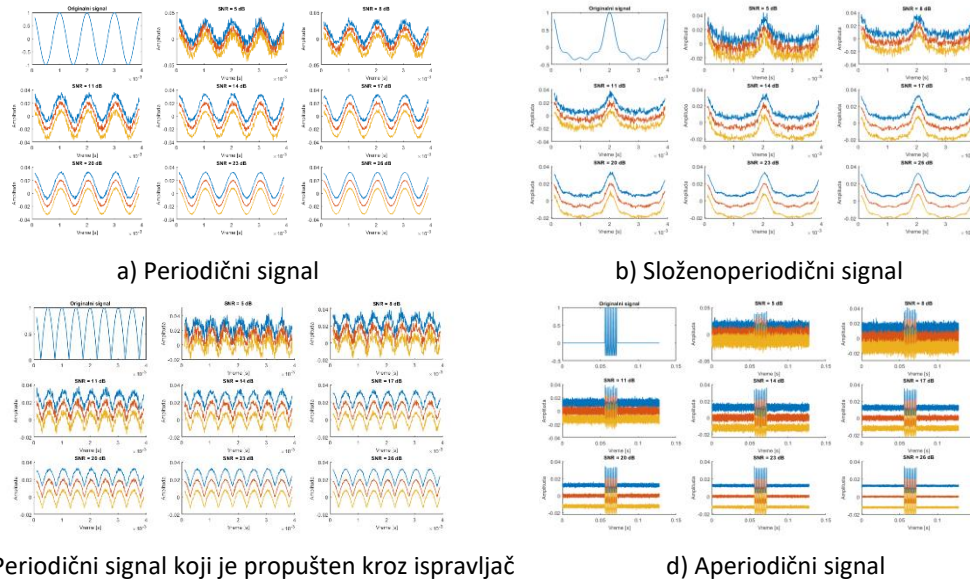
c) Periodični signal koji je propušten kroz ispravljač



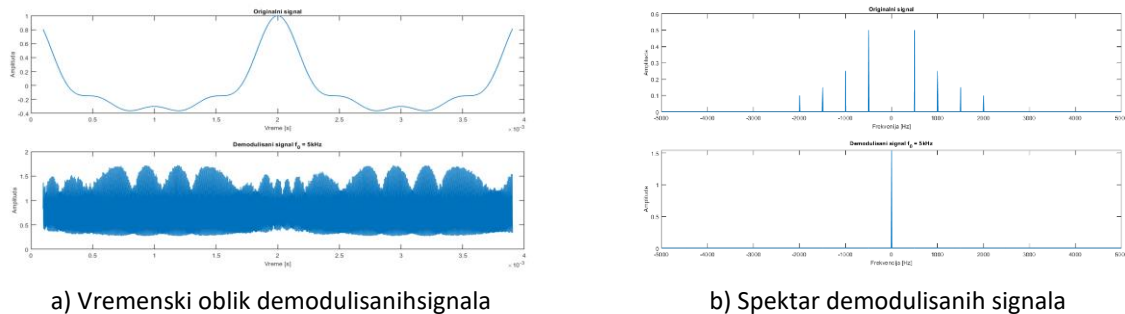
d) Aperiodični signal

Sa ovih grafika se može zaključiti da izlazni signal iz demodulatora ima veći odnos signal-šum nego signal na ulazu u modulator kod slučajeva prostoperiodičnih signala (grafici a) i c)). Kod složenoperiodičnog signala primećuje se da je izlazni signal iz demodulatora ima nešto manji SNR nego njegov ulazni signal što znači da se kod njega primećuje da je demodulisani signal najslabiji originalnom signalu u svim slučajevima. Kod aperiodičnog signala za male vrednosti SNRa modulisanog signala primećuje se da je snaga šuma jača od snage signala a tek za SNR koji je veći od 12dB imamo slučaj da je signal jači od šuma. Od 12dB do posmatranih 26dB primećuje se da je SNR na izlazu demodulatora manji nego na ulazu u demodulator čime se zaključuje da je i u ovom slučaju demodulacija moguća.

### 3.6 Neuskladenost lokalno generisanog nosioca u demodulatoru



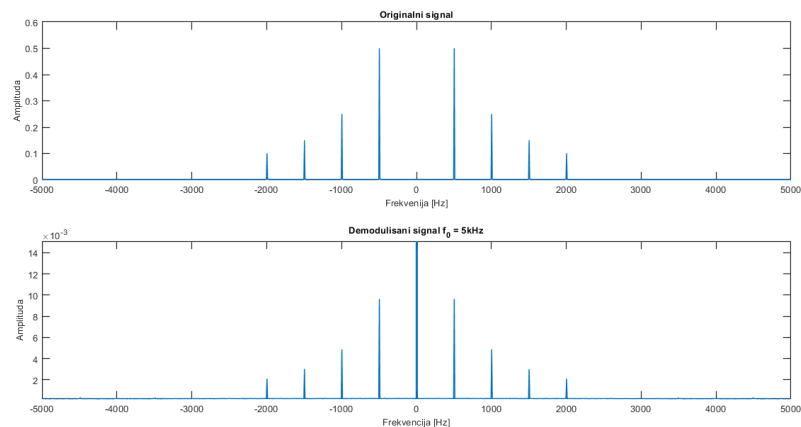
Na prethodnim graphicima prikazan je vremenski oblik demodulisanog signala čija je frekvencija lokalno generisano nosioca 59kHz (narandžasto) , 60kHz (crveno) i 61kHz (plavo). Na ovim graphicima jasno se vidi da u slučaju kada dolazi do neidealne sinhronizacije da se u signalu pojavljuje DC komponenta koja remeti tačan oblik demodulisanog signala. Na osnovu ovih posmatranih frekvencija ne možemo jasno zaključiti šta će se desiti sa signalom ako se napravi veća greška sinhronizacije sem što će se pojaviti još veća DC komponenta postavlja se pitanje šta će se desiti sa samim komponentama signala. Na sledećem grafiku posmatraćemo spektre signala za slučaj da je  $f_0 = 60\text{kHz}$  i  $f_0 = 5\text{kHz}$ .



Na osnovu ovih grafika jasno se vidi da će za svako odstupanje frekvencije lokalno generisanog signala nosioca u demodulatoru uticati dvojako na oblik demodulisanog signala. Kao prvo pojaviće se DC komponenta a kao drugo će sve komponente će oslabiti što će dovesti do potpunog uništenja demodulisanog signala. Na prethodnom grafiku pob b) izgleda kao da signal ima samo DC komponentu te prikazujemo i uvećan prikaz grafika za ove komponente sa koga primećujemo da komponente originalnog signala zaista nisu nestale već su samo jako puno oslabljene što dovodi gubljenja podatka iz demodulisanog signala.

Na grafiku se vidi da su komponente sa amplitudom 0.5 oslabile na amplitudu oko 0.01 što je slavljenje od čak 50 puta.

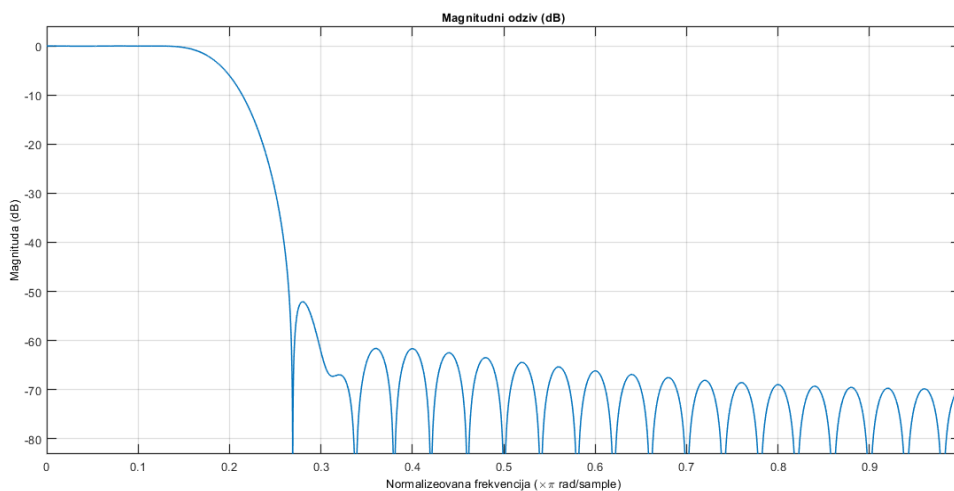




Uvećan prikaz spektra signala

### 3.7 Frekvencijski odziv implementiranog filtera

Frekvencijski odziv implementiranog filtera prikazan je na sledećem grafiku.



Na ovom grafiku jasno se vidi da će frekvencije na intervalu  $[0, 0.2] \frac{F_s}{2}$  signal slabi manje od 10% dok na delu  $[0.2, 1] \frac{F_s}{2}$  signali bitno slabi čime je implementirano filter zadovoljio željene uslove.

### 4. Diskusija i zaključak

Na osnovu priloženih rezultata zaključujemo da je proces modulacije kao i proces demodulacije ispravno izvršen. Primećeno je da periodični signali bolje čuvaj svoj odnos signal – šum na izlazu demodulatora u odnosu na aperiodične signale. Zaključeno je da kod aperiodičnih signala odnos signal – šum mora biti veći od 10dB kako ne bi došlo do negativnog SNRa pri nekoherentnoj demodulaciji. Takođe zaključeno je da odstupanjem od tačne frekvencije nosioca u demodulatoru da se u signalu pojavljuju DC komponente i da signal slabi u zavisnost od greške sinhronizacije frekvencija. Pretpostavlja se da odnos signal-šum bi bio još veći ako bi na izlazu demodulatora postojao neki band-pass filter čime bi SNR u svim slučajevima bio još veći.