

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet



Katedra za elektroniku

Digitalna obrada signala (13E043DOS)

Drugi domaći zadatak 2018/19.

Cilj drugog domaćeg zadatka je da studenti samostalno probaju osnovne metode projektovanja IIR filtara i da projektovane filtre iskoriste za filtriranje signala u određenim primerima.

Domaći zadatak se sastoji iz dva dela. Prvi deo domaćeg zadatka se sastoji od projektovanja banke IIR filtara nepropusnika opsega koji služe za poboljšanje kvaliteta pokvarenog zvučnog signala. Cilj ovog dela je i da studenti primene znanja iz prvog domaćeg zadatka kako bi znali sami da procene koje gabarite filtara je potrebno odabrati. Drugi deo domaćeg zadatka je implementacija IIR filtara koji služe za ekvalizaciju zvuka.

Deo 1: Filtriranje zvučnog signala

(8 poena)

Tokom snimanja jedne pesme, jedno dete se igralo sa gitarom i stalno okidalo jednu žicu. Zbog toga se preko originalne pesme u snimljenom signalu čuje ton A odsviran na gitari. Fajl *allplusA.wav* se sastoji od jedne sekvence pesme „*All the things you are*“ (<https://www.youtube.com/watch?v=XeFZEpswoQ0>) i na nju dodate note A čiji je segment dat u fajlu *noteA.wav*.

1. Učitati signale iz fajla *allplusA.wav* i *noteA.wav* korišćenjem naredbe **audioread**. Prikazati vremenski oblik dela signala. Vremenska osa treba da bude u sekundama.
2. Napisati funkciju **[b, a] = bandstop_filter_Cheb2(fs, fa, fp, Aa, Ap)** kojom se projektuje IIR filtar nepropusnik opsega učestanosti korišćenjem inverznog Čebiševljevog filtra za analogni prototip. Funkcija kao argumente prima učestanost odabiranja f_s , granične učestanosti nepropusnog opsega f_a kao vektor dve vrednosti, granične učestanosti propusnog opsega f_p kao vektor dve vrednosti i odgovarajuća slabljenja u nepropusnom (α_a) i

propusnom (α_p) opsegu. Kao povratnu vrednost, funkcija vraća koeficijente polinoma u imeniocu i brojiocu funkcije prenosa dobijenog filtra. Ukoliko gabariti digitalnog filtra nisu zadovoljeni, funkcija treba da podešava parametre analognog prototipa dok oni ne postanu zadovoljeni. Računati frekvencijske karakteristike u dovoljno velikom broju tačaka prilikom provere, npr. više od 10000. Obratiti pažnju na način zadavanja parametara kod transformacije učestanosti za Čebiševljevi inverzni filter (vidi u materijalima).

3. Na istoj slici, jedan pored druge, nacrtati spektrograme signala iz fajlova *allplusA.wav* i *noteA.wav*. Spektrograme crtati u razumnom opsegu učestanosti.
4. Na osnovu dobijenih spektrograma korišćenjem funkcije **bandstop_filter_Cheb2** projektovati filtre kojima se filtrira originalni signal tako da on bude očišćen od dodate note A. Nacrtati spektrogram izlaznog signala i filtrirani signal sačuvati u fajl *all.wav*.
5. Nacrtati amplitudske karakteristike filtera iz tačke 4 i crtanjem odgovarajućih linija za gabarite pokazati da filteri zadovoljavaju zadate specifikacije. Amplitudske karakteristike crtati tako da se jasno vidi nepropusni opseg, tj. zumirati frekvencijsku osu na razumne učestanosti. Takođe, crtati više karakteristika na jednoj slici, na više podslika korišćenjem naredbe **subplot**.

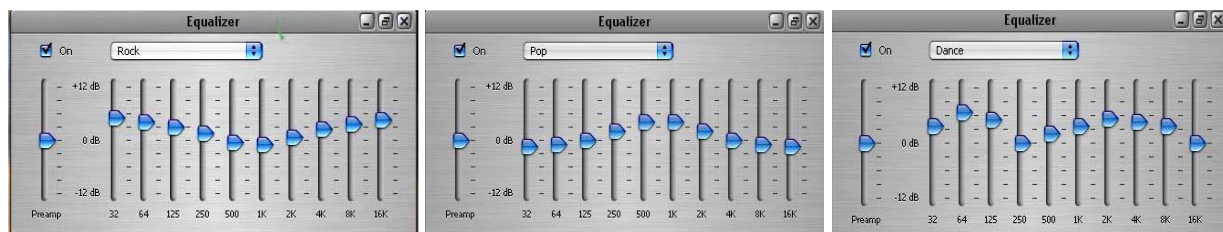
MATLAB skriptu nazvati *comb_godinaupisa_brojindeksa.m*. U kodu komentarima jasno naznačiti koji deo koda se odnosi na koji deo zadatka.

Sve vremenske ose u ovoj tački treba da budu u sekundama. Neophodno je obeležiti sve ose odgovarajućim oznakama/tekstom.

Deo 2: Ekvalizacija zvučnog signala

(7 poena)

Ekvalizacija zvučnog signala predstavlja podešavanje pojačanja različitih frekvencijskih komponenti u spektru sa ciljem postizanja prijatnijeg efekta na slušaoca. Tako, za različite vrste muzike (pop, rok, klasična, dance, ...) treba različito pojačati ili oslabiti određene delove spektra kako bi se postigao željeni kvalitet. Na slici 1 je prikazan profil ekvalizacije za rok, pop i dance muziku iz aplikacije iTunes. Može se primetiti da se različiti frekvencijski opsezi pojačavaju za maksimalno 12 dB ili se oslabljuju za maksimalno 12 dB. Ovo se realizuje bankom filtera propusnika opsega koji se dodatno množe odgovarajućim pojačanjem. Signal se filtrira svakim od filtera iz banke, a rezultati se na kraju sabiraju kako bi se dobio ekvalizovani signal.



Slika 1 – Različiti profili ekvalizacije iz aplikacije iTunes

Idealno, filtri imaju sledeće popusne opsege:

- Filtar 1: 31.25 Hz – 62.5 Hz
- Filtar 2: 62.5 Hz – 125 Hz
- Filtar 3: 125 Hz – 250 Hz
- Filtar 4: 250 Hz – 500 Hz
- Filtar 5: 500 Hz – 1000 Hz
- Filtar 6: 1000 Hz – 2000 Hz
- Filtar 7: 2000 Hz – 4000 Hz
- Filtar 8: 4000 Hz – 8000 Hz
- Filtar 9: 8000 Hz – 16000 Hz
- Filtar 10: > 16000 Hz

Profili pojačanja u dB za pop, rok i dance sa slike 1 su sledeći:

- Rok: 5, 3.75, 3, 1.5, -0.5, -1.5, 1, 2.5, 3.75, 4.5
- Pop: -1.5, -1, 0, 1.5, 4, 4, 2, 0, -1, -1.5
- Dance: 4, 7, 5, 0, 2, 4, 5, 4.5, 3.5, 0

Kako bi se izbeglo projektovanje filtara sa uskim prelaznim zonama, npr, svega 1 Hz pri učestanosti odabiranja od 44.1 kHz, ekvalizator se najvećim delom pravi korišćenjem jednog digitalnog filtra, ali na koji se dovode signali različitih učestanosti odabiranja. Tako će se u ovom zadatku projektovati samo filter propusnik visokih učestanosti (filter 10) i jedan filter propusnik opsega (filter 9), a zatim će se na isti filter propusnik opsega dovoditi signali različite učestanosti odabiranja.

Kao što je poznato, digitalni filter propusnik opsega graničnih relativnih učestanosti F_{p1} i F_{p2} projektovan za učestanost odabiranja f_s propušta frekvencijske komponente između $F_{p1} * f_s$ i $F_{p2} * f_s$. Ako bi se isti taj filter koristio u sistemu u kome je učestanost odabiranja $f_s/2$, rezultujući sistem bi propuštao komponente između $F_{p1} * f_s/2$ i $F_{p2} * f_s/2$. To znači da je moguće koristiti isti digitalni filter za filtriranje različitih frekvencijskih komponenti, ako je moguće smanjiti učestanost odabiranja ulaznog signala. Kako se u našem sistemu izlazi svih filtara sabiraju, potrebno je vratiti učestanost odabiranja svih izlaznih signala na originalnu pre sabiranja. Postupak promene učestanosti odabiranja je opisan u dodatku na kraju teksta ovog domaćeg zadatka. Tokom rada na domaćem zadatku, koristiti gotove MATLAB-ove funkcije **decimate** i **interp** koje rade redom smanjenje i povećanje učestanosti odabiranja za određeni faktor (vidi *help* ili dokumentaciju na sajtu *Mathworks-a*).

1. Napisati funkciju **[b, a] = bandpass_filter(fs, fa, fp, Aa, Ap)** kojom se projektuje IIR filter propusnik opsega učestanosti. Odabrati odgovarajuću funkciju za analogni prototip. Funkcija kao argumente prima učestanost odabiranja f_s , granične učestanosti nepropusnog opsega f_a kao vektor dve vrednosti, granične učestanosti propusnog opsega f_p kao vektor dve vrednosti i odgovarajuća slabljenja u nepropusnom (α_a) i propusnom (α_p) opsegu. Kao povratnu vrednost, funkcija vraća koeficijente polinoma u imeniocu i brojiocu funkcije prenosa dobijenog filtra. Ukoliko gabariti digitalnog filtra nisu zadovoljeni, funkcija treba da podešava parametre analognog prototipa dok oni ne postanu zadovoljeni. Računati frekvencijske karakteristike u dovoljno velikom broju tačaka prilikom provere, npr. više od 10000.
2. Napisati funkciju **[b, a] = highpass_filter(fs, fa, fp, Aa, Ap)** kojom se projektuje IIR filter propusnik visokih učestanosti. Odabrati istu funkciju za analogni prototip kao u prethodnoj tački. Funkcija kao argumente prima učestanost odabiranja f_s , graničnu učestanost nepropusnog opsega f_a , graničnu učestanost propusnog opsega f_p i odgovarajuća slabljenja u

nepropusnom (α_s) i propusnom (α_p) opsegu. Kao povratnu vrednost, funkcija vraća koeficijente polinoma u imeniocu i brojiocu funkcije prenosa dobijenog filtra. Ukoliko gabariti digitalnog filtra nisu zadovoljeni, funkcija treba da podešava parametre analognog prototipa dok oni ne postanu zadovoljeni. Računati frekvencijske karakteristike u dovoljno velikom broju tačaka prilikom provere, npr. više od 10000.

3. Projektovati filter 9 i filter 10 korišćenjem funkcija iz prethodnog zadatka. Prelazne zone treba da budu širine manje od 200 Hz, dok slabljenja u nepropusnom i propusnom opsegu treba da budu $\alpha_s = 0,05$ dB i $\alpha_p = 60$ dB. Ove filtre projektovati tako da im je pojačanje u propusnom opsegu jednako 1. Nacrtati njihove amplitudske i fazne karakteristike i crtanjem odgovarajućih linija za gabarite pokazati da filteri zadovoljavaju zadate specifikacije
4. Napisati funkciju **[y] = IIR_equalizer(x, fs, style)** kojom se radi zvučna ekvalizacija. Funkcija kao argumente prima odbirke ulaznog signala x , učestanost odabiranja f_s i tip ekvalizacije koja se zadaje kao string 'POP', 'ROCK', 'DANCE' ili 'CUSTOM' na osnovu koga se biraju pojačanja u različitim propusnim opsezima. 'CUSTOM' je profil koji treba zadati prema sopstvenom nahođenju. U okviru ove funkcije, korišćenjem funkcije **decimate**, kreirati 9 različitih ulaznih signala koji imaju različite učestanosti odabiranja, svaki duplo manju od prethodnog (npr. $x_1, x_2, x_4, x_8, \dots, x_{256}$). Ove signale koristiti kao ulaze u digitalne filtre pomnožene odgovarajućim pojačanjem i korišćenjem naredbe **filter**, kreirati 10 različitih izlaza koje treba vratiti na osnovnu učestanost odabiranja korišćenjem funkcije **interp**. Zbir svih signala je ekvalizovani signal.
5. Dovođenjem impulsa za ulaz, nacrtati impulsni odziv ekvalizatora.
6. DFT-om impulsnog odziva nacrtati približnu frekvencijsku karakteristiku ekvalizatora.
7. Snimiti nekoliko sekundi proizvoljne pesme i uraditi ekvalizaciju tog signala proizvoljnim stilom ('POP', 'ROCK', 'DANCE' ili 'CUSTOM'), a rezultat snimiti u fajl *equalized_sound.wav*. Ulazni signal poslati uz izveštaj. Učestanost odabiranja podesiti na 44100 Hz.
8. U izveštaju prikazati sve amplitudske karakteristike projektovanih filtera i crtanjem odgovarajućih linija za gabarite pokazati da filteri zadovoljavaju zadate specifikacije, kao i sve druge relevantne dijagrame.

Glavnu MATLAB skriptu nazvati *equalization_godinaupisa_brojindeksa.m*. U kodu komentarima jasno naznačiti koji deo koda se odnosi na koji deo zadatka. Obeležiti sve ose odgovarajućim oznakama/tekstom.

Uputstvo za slanje rešenja domaćeg zadatka

Fajlovi koje je potrebno dostaviti su:

1. Za oba dela domaćeg zadatka, korišćene *MATLAB* skripte i funkcijske fajlove.
2. Izveštaj po uzoru na prvi domaći zadatak u kome će biti prezentovani svi relevantni rezultati (frekvencijske karakteristike filtera, reprezentativni ulazni i izlazni signali, impulsni odzivi i drugi značajni grafici) kao i objašnjenja načina projektovanja i komentari rezultata.
3. **NE slati fajlove koji su dati kao prilog zadatku jer oni samo povećavaju veličinu fajla i postoji mogućnost da će u tom slučaju mejl biti isfiltriran.**

Smatrati da su svi ulazni signali na putanji “..\dz2_signali”, tako da ako pozovete naredbu `[x,fs] = audioread('..\dz2_signali\noteA.wav');` možete smatrati da će signal biti ispravno učitano prilikom pregledanja domaćeg zadatka.

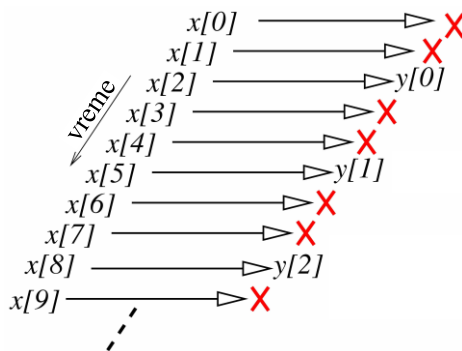
Sve fajlove upakovati u jednu ZIP, RAR ili 7z arhivu pod nazivom *13e043dos_dz2_godinaupisa_bojindeksa.zip/.rar/.7z*. Tako upakovano rešenje zadatka poslati asistentu na mejl petrovicv@etf.rs najkasnije **do petka 04.01.2019. u 23:59**. Naslov mejla treba da bude **13E043DOS – Drugi domaci zadatak GGGG/BBBB**, gde je GGGG godina upisa, a BBBB broj indeksa. Vrlo je važno da mejl bude naslovljen kako je napisano, u suprotnom će biti isfiltriran. Ukoliko slanje fajlova mejlom nije omogućeno, okačiti arhivu na OneDrive dostupan pri studentskom mejl nalogu i poslati deljeni link ka fajlu. Kašnjenje povlači negativnih 2 poena po započetom danu kašnjenja.

Opšte: Trudite se da napisani kod bude pregledan i detaljno komentaran. To će vam uštedeti vreme. Nemojte pisati komentare samo da biste zadovoljili zahtev domaćeg zadatka, pokušajte da izvučete prednosti iz preglednog i lepo komentaranog koda. **Domaći zadaci se rade samostalno.**

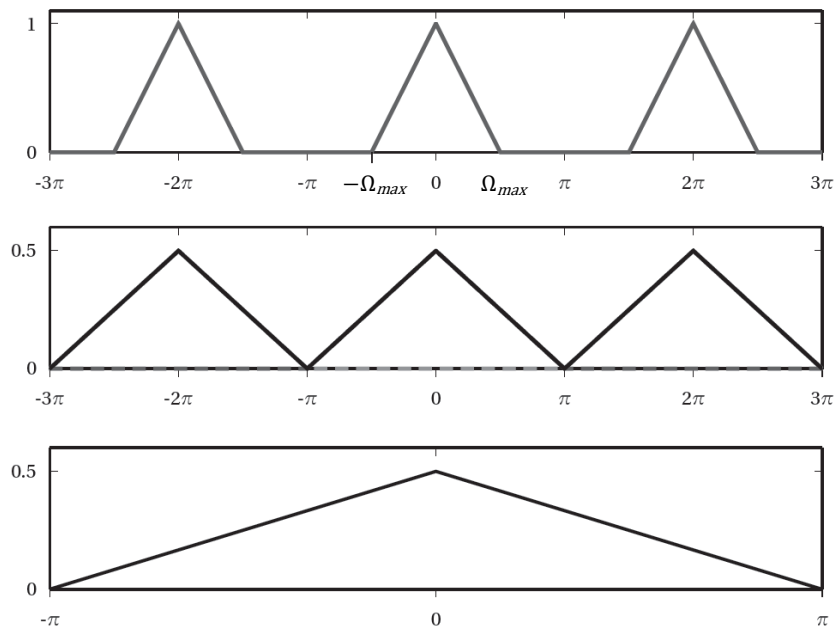
Dodatak: Promena učestanosti odabiranja signala

U sistemima za digitalnu obradu signala često se ukazuje potreba da se promeni učestanost odabiranja. Sistem u kome se koristi više učestanosti odabiranja naziva se višebrzinski (engl. *multirate*) sistem za digitalnu obradu signala. Postupak pri kome se smanjuje učestanost odabiranja signala najčešće se naziva decimacija (engl. *decimation* ili *downsampling*), dok se postupak pri kome se povećava učestanost odabiranja naziva interpolacija (engl. *interpolation* ili *upsampling*).

Decimacija se najlakše radi odbacivanjem odbiraka (slika 2). Na primer, ako se želi smanjiti učestanost odabiranja 2 puta, potrebno je uzeti svaki drugi odbirak iz originalnog signala. S obzirom na to da se menja učestanost odabiranja a originalni analogni signal je isti, spektar decimiranog signala je duplo širi jer sada relativnoj kružnoj učestanosti π odgovara relativna kružna učestanost $\pi/2$ u originalnom signalu (slika 3).

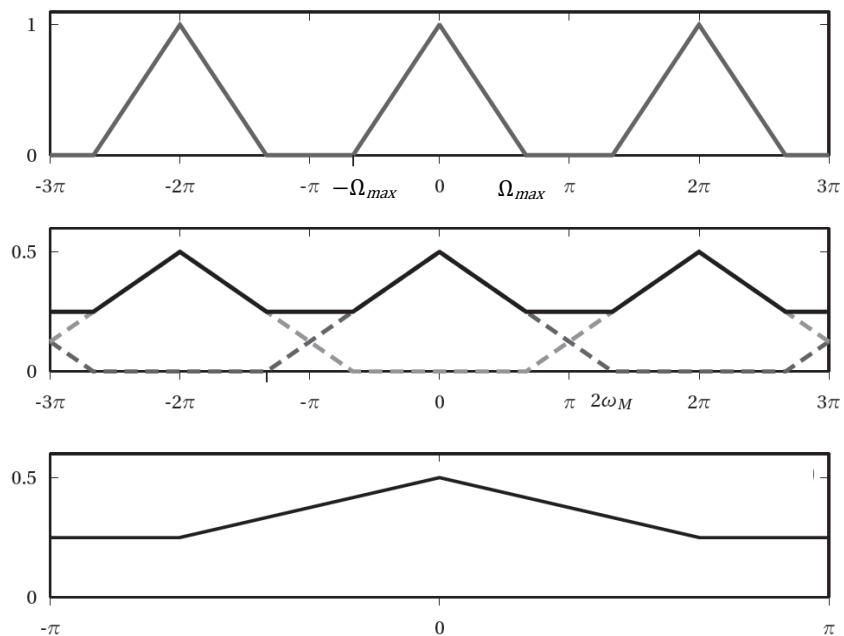


Slika 2 – Ilustracija decimacije



Slika 3 – Spektar originalnog signala koji nema spektralne komponente na učestanostima većim od $\Omega_{max} = \pi/2$ i spektar decimiranog signala kod koga je uzet svaki drugi odbirak iz originalnog signala.

Već naslućujete da se ovde može pojaviti ozbiljan problem. Ako je faktor decimacije veliki, može se pojaviti preklapanje u spektru novoformiranog signala što će izazvati neželjene efekte koji nastaju i prilikom neispravnog odabiranja analognih signala. Primer je na slici 4.



Slika 4 - Spektar originalnog signala koji nema spektralne komponente na učestanostima većim od $\Omega_{max} = 2\pi/3$ i spektar decimiranog signala kod koga je uzet svaki drugi odbirak iz originalnog signala. Primetno je preklapanje u spektru.

Zbog toga je nužno pre odbacivanja odbiraka uraditi niskofrekventno filtriranje (*antialiasing filter*) koje će sprečiti preklapanje u spektru. Jasno je, niskofrekventno filtriranje će uticati na gubitak informacija, ali je svakako mnogo manje štetno od preklapanja u spektru do kog dolazi ako se niskofrekventno filtriranje ne primenjuje.

Na slici 5 je prikazan primer 3 tipa interpolacije. Najjednostavniji način je dodavanjem nula između dva susedna odbiraka. Ovaj način neće dati dobre rezultate, a videćemo i zašto. Bolji rezultati se dobijaju ponavljanjem odbiraka što predstavlja konvoluciju signala kome su dodate nule sa signalom [1 1 1 1]. Navedeni signal ima dejstvo niskofrekventnog filtra jer je pravouga-oni signal u vremenu *sinc* u frekvencij-skom domenu. Bolji NF filter je linearni interpolator čiji je impulsni odziv signal [0,25 0,5 0,75 1 0,75 0,5 0,25] i rezultat linearne interpolacije je dat na četvrtom grafiku sa slike 4.

Kako bismo detaljnije razumeli postupak interpolacije, posmatrajmo spektar signala kome su dodate nule između svaka dva odbirka, tj. signala

$$y[n] = \begin{cases} x[n/U], & n \bmod U = 0 \\ 0, & n \bmod U \neq 0 \end{cases}$$

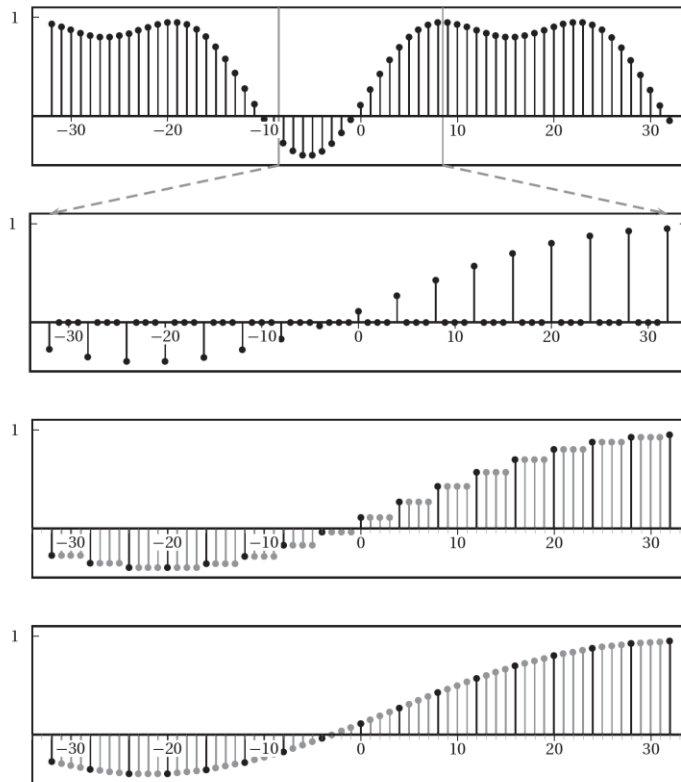
gde je $x[n]$ originalni signal, a $U = 4$ u primeru sa slike 2. Z transformacija signala $y[n]$ je

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y[n] z^{-n} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] z^{-mU} = X(z^U).$$

Na osnovu veze između Furijeove i Z transformacije gde je $z = e^{j\Omega}$, zaključujemo da je spektar signala $y[n]$ isti spektar kao i spektar signala $x[n]$, samo što mu je frekvencijska osa sabijena U puta.

Na slici 6 je prikazan spektar nekog signala i signala kod koga je $U = 3$. Periodično ponovljeni spektri na visokim učestanostima formiraju nagle promene signala. Interpolacija se dobija poništavanjem ovih periodično ponovljenih delova spektra i zadržavanjem samo osnovnog opsega. Kako bi se ovo uradilo, potrebno je projektovati filter kojim se izdvaja samo osnovni spektar signala.

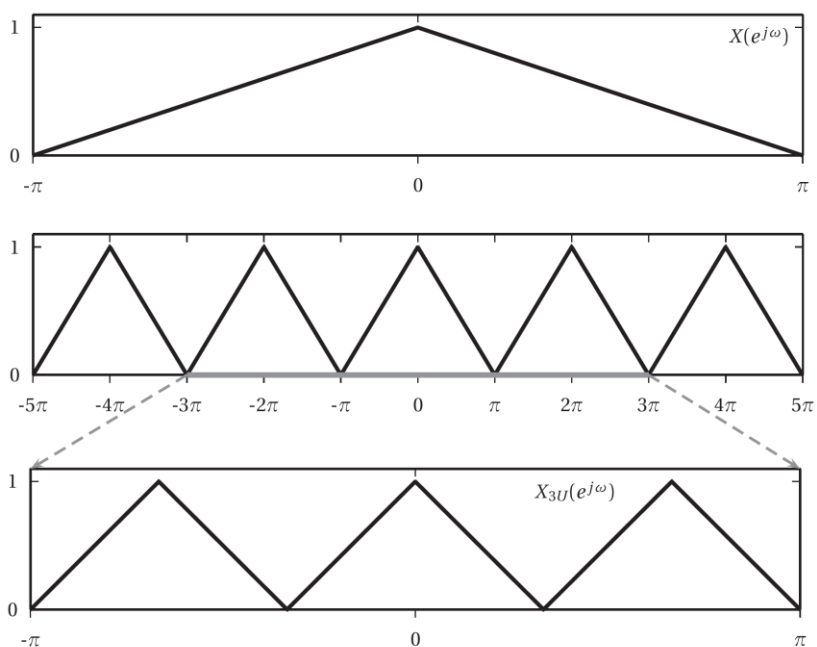
Gorepomenuti načini za decimaciju i interpolaciju mogu da smanje odnosno povećaju učestanost odabiranja signala isključivo celobrojan broj puta. Međutim, u mnogim primenama je potrebno promeniti učestanost odabiranja necelobrojan broj puta $U = P/Q$. U ovakvim situacijama, pogodno je najpre povećati učestanost odabiranja P puta, a zatim interpoliranim signalu smanjiti učestanost odabiranja Q puta. Postupak necelobrojne promene učestanosti odabiranja je prikazan na slici 7. Dakle, najpre se uradi dopunjavanje nulama, zatim niskofrekventno filtriranje koje daje interpolirani signal.



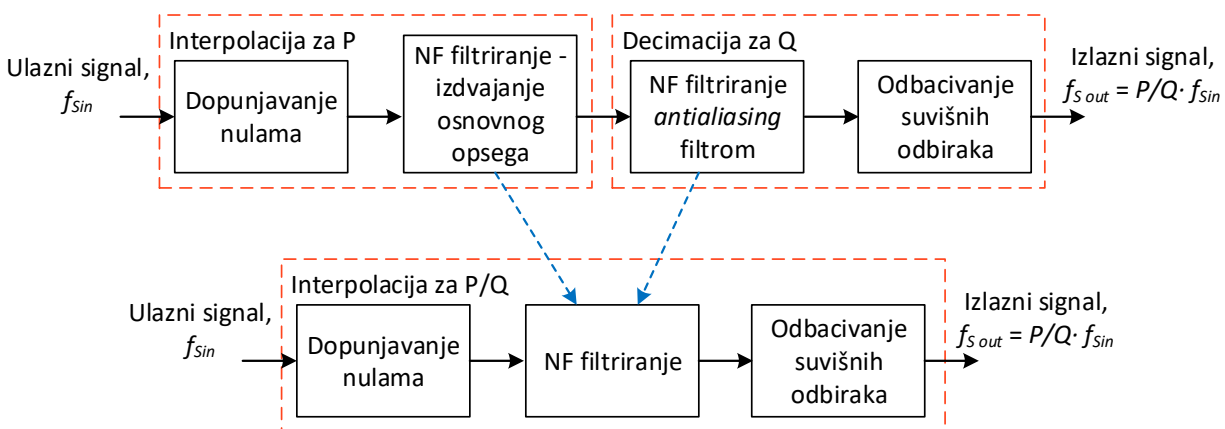
Slika 5 – Primeri interpolacije dodavanjem nula, ponavljanjem odbiraka i linearnom interpolacijom.

Nakon toga, je potrebno filtrirati signal kako ne bi došlo da preklapanja u spektru i na kraju uraditi decimaciju.

Primetićete da u sistemu postoje dva NF filtra jedan iza drugog. Sistem se može pojednostaviti postavljanjem samo jednog NF filtra kod koga je granična učestanost manja od dve granične učestanosti prvobitnih NF filtara. Na taj način je omogućeno da je potrebno projektovati samo jedan NF filter i za necelobrojne promene učestanosti odabiranja.



Slika 6 - Spektar originalnog signala i signala kome su dodate nule tako da je dužina signala 3 puta veća



Slika 7 – Blok šema sistema za necelobrojnu interpolaciju signala

Audio sistemi su vrlo često višebnzinski sistemi. Postoji dosta različitih kvaliteta audio fajlova i oni se razlikuju prema učestanosti odabiranja i prema broju bita za predstavu odbiraka. Tako na primer, signal

govora je dovoljno odabirati sa 8 kHz, dok je za muzički signal neophodno 44,1 kHz. Audio signali na CD-ovima su signali kod kojih je učestanost odabiranja baš 44,1 kHz. Ova učestanost je neophodna jer je opseg zvučnih signala koje čovek može da čuje između 20 Hz i 20 kHz. Međutim, danas se sve češće koriste veće učestanosti odabiranja (88,2 kHz, 96 kHz, 192 kHz...) kako bi se postigao što kvalitetniji snimak.