



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za elektroničke sustave i obradu informacija

# Diskretni signali, diskretni sustavi i dekonvolucija

## Obrada informacija (FER-2) - Laboratorijska vježba 1.

### 1. Uvod

Laboratorijske vježbe iz Obrade informacija se izvode na računalu, a koristi se programski sustav MATLAB. Osim što posjeduje mogućnost izvođenja raznih jednostavnih i izuzetno složenih matematičkih operacija, MATLAB ima i modul Simulink koji je zamišljen kao alat za brzo i jednostavno simuliranje raznih sustava. S MATLAB-om i Simulink-om ste se upoznali na [LiV-u MATLAB](#).

### 2. Priprema

Prisjetite se kako se pišu MATLAB m-funkcije te kako se koristi Simulink (vježbe [2.](#) i [4.](#) sa [LiV-a MATLAB](#)). Kao podsjetnik vam osim materijala korištenih na [LiV-u MATLAB](#) može poslužiti i priručnik [Kratke upute za korištenje MATLAB-a](#) koji je dostupan na [stranicama predmeta](#).

Prije dolaska na laboratorijske vježbe korisno je pročitati sve zadatke koje ćemo raditi. Primijetite da uz neke od zadatke piše (PRIPREMA). To su zadaci koje morate riješiti prije dolaska na vježbu. Rješenja uredno napišite rukom na papiru. U zaglavlje svakog papira s pripremom napišete vaše ime i prezime te JMBAG.

Pripremni zadaci su: 3.1-1a, 3.1-1b, 3.1-1c, 3.1-2a, 3.2-1a, 3.3-1a, 3.3-2a, 3.3-2b

### 3. Rad u laboratoriju

Prije početka rada uključite dnevnik (naredba diary). Bez obzira na dnevnik također vam preporučamo da rješenje svakog zadatka spremite kao MATLAB m-skriptu ili Simulink model čije ime je redni broj zadatka.

Bodove iz laboratorija stječete tijekom vježbi. Prva laboratorijska vježba nosi tri boda. Točno napisana priprema vam donosi jedan bod. U zadnjem satu laboratorijskih vježbi (ili prije ako ste prije gotovi s vježbom) dežurni asistent će obići studente te svakog od vas zamoliti da demonstrira rješenja zadanih zadataka. Ako uspješno demonstrirate zadatke<sup>1</sup> (jedan bod) i ako točno odgovorite na postavljeno pitanje vezano uz vježbe (još jedan bod) dobivate preostala dva boda.

---

<sup>1</sup> Demonstracija će vam biti jednostavnija ako ste napisali m-skriptu - jednostavno pozovete tu skriptu. Ako niste pisali m-skripte iskoristite dnevnik. Dnevnik otvorite u ugrađenom editoru i odaberete dio koji odgovara rješenju zadatka kojeg tražimo. Pritiskom na desnu tipku miša

Svaki student može samo jednom demonstrirati rješenje zadatka i odgovarati. Dakle ako krivo odgovorite ili ako je demonstrirano rješenje zadatka krivo ne dobivate bodove. NEMA popravkih zadataka!

Dio zadataka označen je kao (PRIPREMA), dok je dio označen kao (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE). Zadatke za pripremu ste riješili prije vježbi, dok zadatke za one koji žele znati više ne trebate rješavati. Predlažemo da ih preskočite te se vratite na njih ako obavezne zadatke završite prije predviđenog vremena.

## 3.1. Frekvencijske karakteristike diskretnih sustava

Prvi dio prve laboratorijske vježbe se bavi diskretnim sustavima i namijenjen je ponavljanju te upoznavanju s MATLAB-om.

### 15 minuta Zadatak 3.1-1 Diskretni sustav s konačnim impulsnim odzivom (FIR)

Diskretni LTI sustav možemo opisati jednačom diferencija

$$a_0 y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_k y[n-k] = b_0 u[n] + b_1 u[n-1] + \dots + b_l u[n-l].$$

Ako su svi koeficijenti  $a_i$  osim  $a_0$  jednaki nuli govorimo o sustavu s konačnim impulsnim odzivom ili FIR sustavu (od eng. *finite impulse response*).

- a) (PRIPREMA) Odredite impulsni odziv diskretnog sustava  $y[n] = u[n+1] - u[n] + u[n-1]$ .
- b) (PRIPREMA) Navedite definiciju kauzalnog i nekauzalnog sustava. Ispitajte je li FIR sustav iz zadatka 3.1-1a kauzalan ili nije. Koji uvjet mora zadovoljiti impulsni odziv diskretnog LTI sustava da bi sustav bio kauzalan?
- c) (PRIPREMA) Je li zadani sustav stabilan? Je li zadani sustav minimalno fazni?
- d) Korištenjem naredbe `pzmap` nacrtajte položaj polova i nula u kompleksnoj ravnini te provjerite rezultat pripreme iz c) podzadatka.

Odziv sustava možemo odrediti računanjem konvolucijske sume impulsnog odziva i pobude korištenjem naredbe `conv`:

```
» h = [1 -1 1]; % definiramo impulsni odziv
» x = sin(pi/3*[0:30]); % definiramo pobudu
» y = conv(x, h); % računamo odziv FIR sustava
» stem([-1:31], y); % crtamo odziv, primijetite da smo morali
% pomaknuti vrijeme jer MATLAB ne zna u
% kojem koraku se nalazi prvi uzorak niza y
```

- e) Korištenjem naredbe `conv` odredite i nacrtajte odziv sustava iz a) dijela zadatka na pobude:

1.  $x_1[n] = \sin\left(\frac{\pi n}{3}\right)$

2.  $x_2[n] = \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right)$

Objasnite odzive koje ste dobili. Kako bi izgledao odziv sustava na signal  $x_1[n] + x_2[n]$ ?

Temeljem poznavanja impulsnog odziva sustava i izlaza možemo odrediti ulaz postupkom koji se naziva dekonvolucija korištenjem naredbe `deconv`. Kako je

---

dobivate izbornik iz kojega je potrebno odabrati Evaluate Selection. MATLAB tada izvršava označeni dio te crta sve slike i prikazuje sve rezultate.

dekonvolucija implementirana kao polinomno dijeljenje postupak ne mora biti numerički stabilan!

```

» h = [1 -1 1];
» x = sin(pi/3*[0:30]);
» y = conv(x, h);
» [xq, xr] = deconv(y, h);
» stem(xq-x)
% definiramo impulsni odziv
% definiramo pobudu
% računamo odziv FIR sustava
% iz y i h računamo pobudu sustava
% crtamo razliku stvarne i rekonstuirane
% pobude, obratite pažnju na veličinu greške

```

- f) Korištenjem naredbe deconv iz rezultata podzadatka d) odredite i nacrtajte ulaz sustava za pobude  $x_1[n]$  i  $x_2[n]$ . Što možete reći o numeričkoj stabilnosti dekonvolucije za dane primjere?

### 35 minuta Zadatak 3.1-2 Diskretni IIR LTI sustav drugog reda

Diskretni kauzalni LTI sustavi drugog reda s beskonačnim impulsnim odzivom (IIR) mogu se opisati ulazno-izlaznom diferencijskom jednačbom

$$a_0 y[n] + a_1 y[n-1] + a_2 y[n-2] = b_0 u[n] + b_1 u[n-1] + b_2 u[n-2].$$

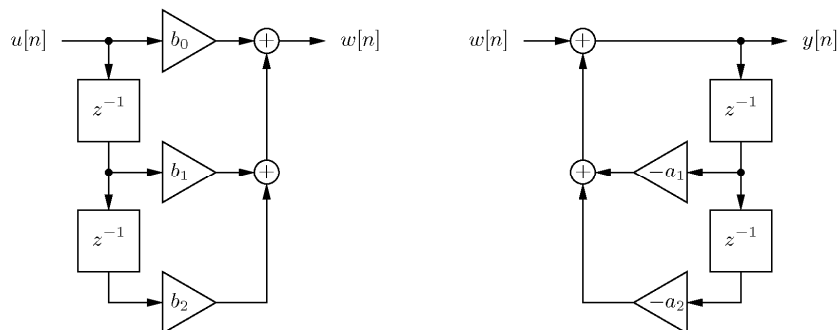
Ne smanjujući općenitost pretpostavimo da je prvi koeficijent  $a_0 = 1$ . Uvedemo li novi signal  $w[n]$  možemo jednostavno realizirati sustave

$$y[n] + a_1 y[n-1] + a_2 y[n-2] + a_3 y[n-3] = w[n]$$

i

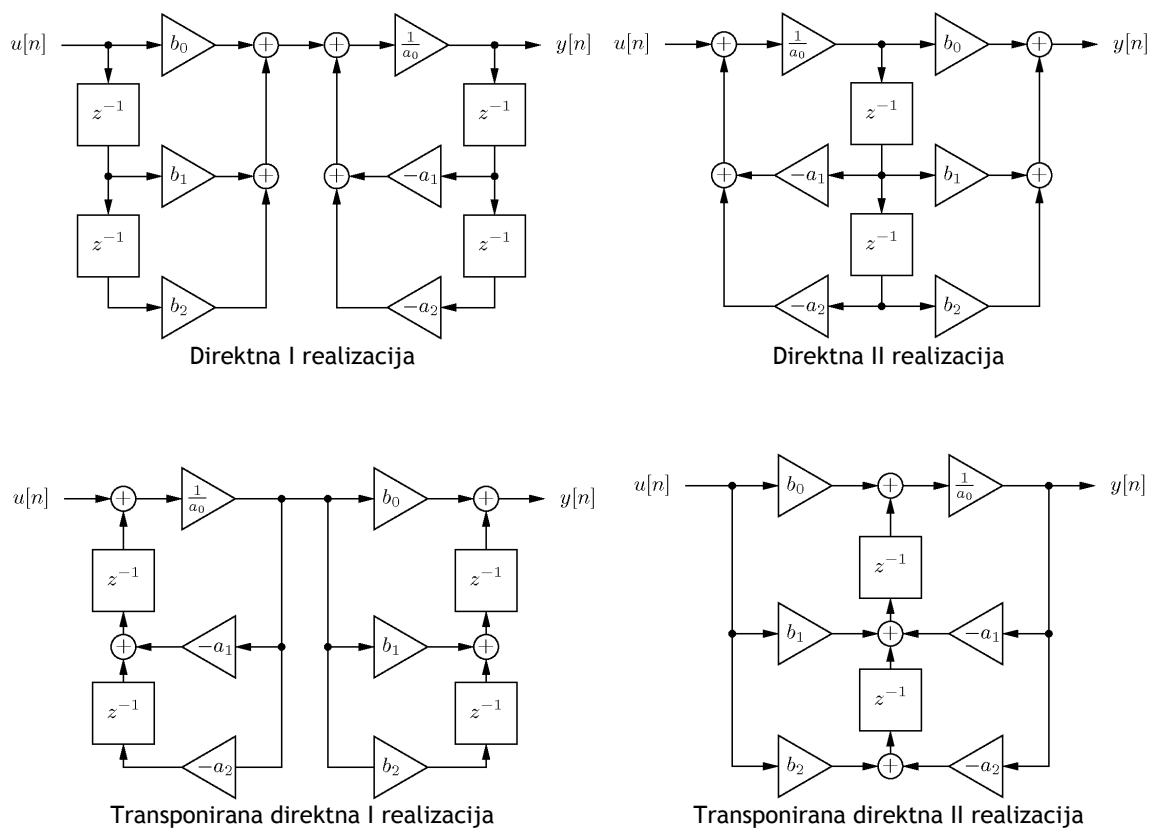
$$w[n] = b_0 u[n] + b_1 u[n-1] + b_2 u[n-2] + b_3 u[n-3].$$

kako je prikazano slikom.



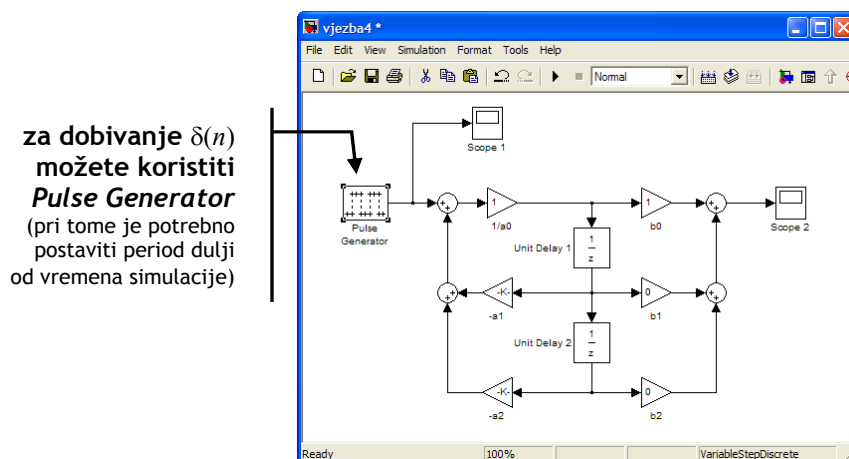
Slika 1. Sastavni elementi direktne realizacije

Spajanjem dobivenih elemenata u kaskadu dobivamo razne oblike direktne realizacije sustava. Sve realizacije u kojima se javljaju upravo koeficijenti ulazno-izlazne jednačbe spadaju u direktne realizacije.



Slika 2. Razne direktne realizacije

Koristimo li Simulink za simuliranje sustava drugog reda obično crtamo direktnu II realizaciju. Pri tome elemente za kašnjenje  $z^{-1}$  zamjenjujemo s Unit Delay blokom iz Discrete skupa blokova.



Slika 3. Simulink model sustava II reda

Sustavi drugog reda se mogu analizirati i bez korištenja Simulinka izravno u MATLAB-u. Za kreiranje sustava koristimo naredbu `tf`, za određivanje impulsnog odziva

koristimo naredbu `impz`, za određivanje odziva na jedinični skok naredbu `step` itd. Pokažimo kako možemo definirati diskretni LTI sustav opisan jednačinom diferencijala  $y[n] - 0.98y[n-1] + 0.91y[n-2] = u[n]$  i odrediti njegov impulzni odziv:

```
» s = tf(1, [1 -0.98 0.91], 1) % definiram sustav opisan jednačinom
                                % y(n) - 0.98y(n-1) + 0.91y(n) = u(n)
                                % treći argument je vrijeme uzorkovanja
                                % i moramo ga zadati kako bi MATLAB znao
                                % da se radi o diskretnom sustavu

Transfer function:
          1
-----
z^2 - 0.98 z + 0.91

Sampling time: 1
» impulse(s) % crtamo impulzni odziv sustava
» step(s) % crtamo odziv na jedinični skok
» pzmap(s) % crtamo korištene karakteristične jednačine
» ss(s) % tražimo reprezentaciju u prostoru stanja
» freqz(s.num{1}, s.den{1}) % crtamo frekvencijsku karakteristiku
» grpdelay(s.num{1}, s.den{1}) % crtamo grupno vrijeme kašnjenja
```

- a) (PRIPREMA) Za svaki od zadanih sustava odredite impulzni odziv sustava.
1.  $y[n] - 0.98y[n-1] + 0.91y[n-2] = u[n]$
  2.  $y[n] - y[n-1] + y[n-2] = u[n]$
  3.  $y[n] - 2y[n-1] + y[n-2] = u[n]$
  4.  $y[n] - 1.38y[n-1] + 1.42y[n-2] = u[n]$
- b) Korištenjem MATLAB-a ili Simulinka odredite impulzne odzive sustava iz a) dijela zadatka.
- c) Korištenjem naredbe `pzmap` nacrtajte položaj polova i nula zadanih sustava. Koji sustavi su stabilni? Koji sustavi su minimalno fazni?
- d) Korištenjem naredbe `freqz` za stabilne sustave nacrtajte amplitudnu i faznu frekvencijsku karakteristiku.
- e) Korištenjem naredbe `grpdelay` za stabilne sustave nacrtajte grupno vrijeme kašnjenja.

## 3.2. Amplitudna modulacija i skrivena poruka

Drugi dio prve laboratorijske vježbe demonstrira jednostavan sustav za AM demodulaciju koji se može iskoristiti i za skrivanje podataka.

### 45 minuta Zadatak 3.2-1 Amplitudna modulacija i skrivena poruka

Označimo sa  $x_1(t)$  neki govorni signal. Amplitudno modulirani signal koji sadrži govorni signal  $x_1(t)$  računamo prema izrazu

$$x_{AM}(t) = (1 + x_1(t)) \cos(\omega_0 t).$$

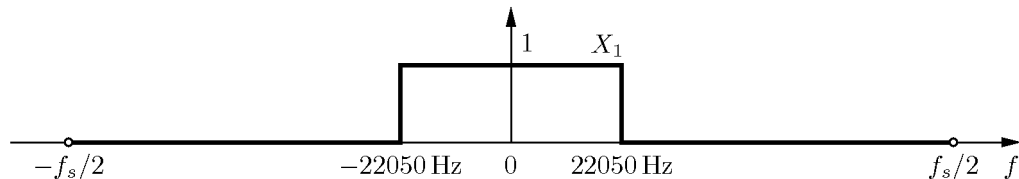
Predstavimo li kosinus pomoću dvije kompleksne eksponencijale korištenjem teorema o pomaku dobivamo da se spektar signala  $x_{AM}(t)$  može predstaviti kao zbroj pomaknutih spektara signala  $x_1(t)$ , odnosno

$$X_{AM}(\omega) = \underbrace{\pi(\delta(\omega + \omega_0) + \delta(\omega - \omega_0))}_{\text{signal nosilac}} + \underbrace{\frac{1}{2}(X_1(\omega + \omega_0) + X_1(\omega - \omega_0))}_{\text{pomaknuti spektar govornog signala}}.$$

Iz AM signala govorni signal možemo povratiti ponovnom primjenom teorema o pomaku, odnosno množenjem  $x_{AM}(t)$  s kosinusom  $\cos(\omega_0 t)$  opet dobivamo pomaknute spektre, no

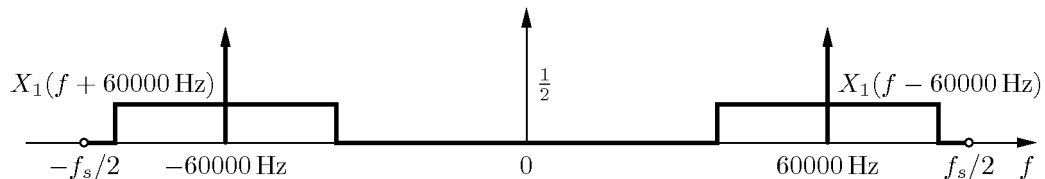
sada će jedan od njih biti na položaju izvornog signala. Propuštanjem takvog signala kroz NP filter uklanjamo višak (spektar na frekvenciji  $\omega + 2\omega_0$ ), odnosno dobivamo govorni signal s kojim smo započeli, dakle  $x_1(t)$ . Slično vrijedi i za diskretne signale ako je zadovoljen teorem o optikanju (nema preklapanja spektra).

U ovoj vježbi raspoložemo s dva govorna signala, označimo ih sa  $x_1[n]$  i  $x_2[n]$ . Neka su oba govorna signala snimljena uz frekvenciju otipkavanja 44100 Hz (odnosno najveća frekvencija koju snimka sadrži je manja od 22050 Hz). U tom slučaju bi spektar govornog signala  $x_1[n]$  mogli skicirati kako je prikazano slikom 4.



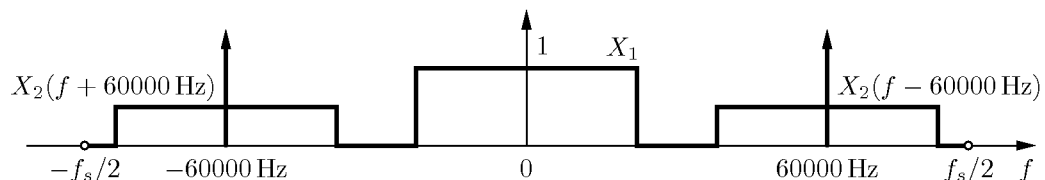
Slika 4. Mogući spektar govornog signala otipkanog frekvencijom 44100 Hz

Trenutno digitalni uređaji za obradu zvuka (npr. govorne informacije) podržavaju i više frekvencije otipkavanja od uobičajenih 44100 Hz. Odaberemo li za frekvenciju otipkavanja  $f_s = 176400$  Hz možemo konstruirati AM modulirani signal tako da ne dođe do preklapanja spektra odabirom frekvencije kosinusa (koji je ujedno i nosilac) od 60000 Hz. Dobiveni spektar možemo predložiti kako je prikazano slikom 5.



Slika 5. Spektar AM signala uz frekvenciju nosioca od 60000 Hz

U ovom zadatku ćete analizirati snimljeni govorni signal otipkan frekvencijom  $f_s = 176400$  Hz. Snimljeni signal će sadržavati dvije govorne poruke  $x_1[n]$  i  $x_2[n]$  pri čemu će prva poruka  $x_1[n]$  biti pohranjena tako da se signal  $x_1[n]$  može izravno slušati (javna poruka), dok je poruka  $x_2[n]$  pohranjena kao amplitudno modulirani signal i nije ju moguće slušati dok se ne dekodira (tajna poruka)! Spektar tako snimljenog govornog signala je prikazan na slici 6.

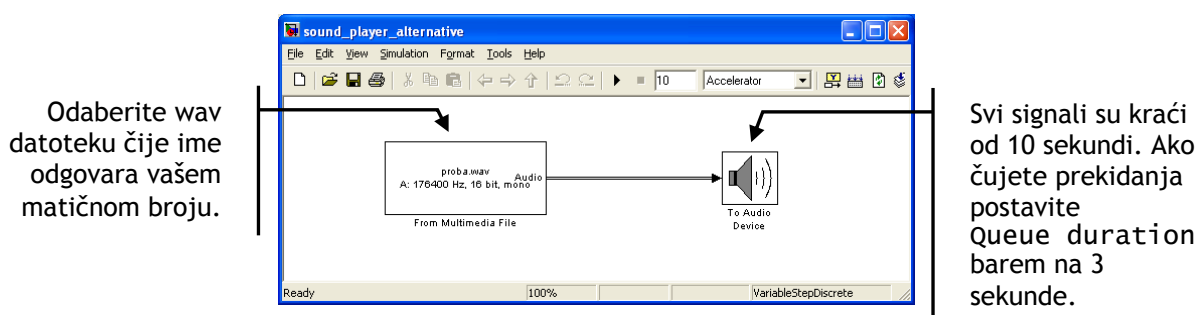


Slika 6. Spektar kombinacije signala  $x_1[n]$  i  $x_2[n]$

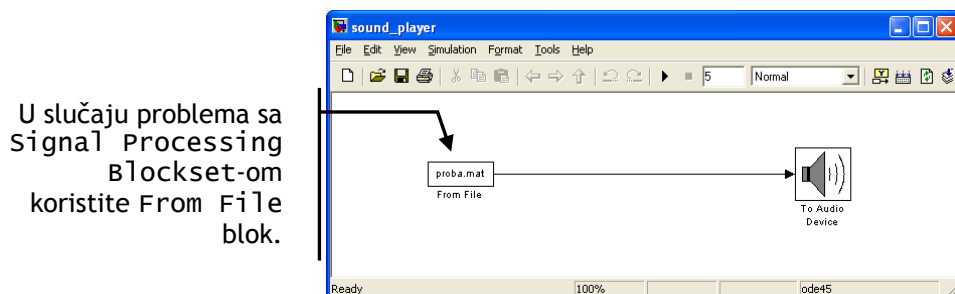
- a) (PRIPREMA) Razmotrite spektar prikazan slikom 6. Je li došlo do gubitka informacija iz govornih poruka  $x_1[n]$  i  $x_2[n]$ ? Ako je najveća frekvencija u oba govorna signala 22050 Hz za koje frekvencije nosioca će doći, a za koje neće doći do gubitka informacija ako je  $f_s = 176400$  Hz (dakle kada se spektri  $X_1$  i  $X_2$  ne preklapaju)?

- b) U Simulinku sastavite jednostavni sustav koji reproducira wav datoteke. Koristite From wave File blok za učitavanje signala i To Audio Device blok za reprodukciju signala. Oba bloka se nalaze u skupini Signal Processing Blockset. U Simulation izborniku odaberite Accelerator način simulacije<sup>2</sup>. Korištenjem unesenog modela poslušajte wav datoteku čije ime odgovara vašem matičnom broju (datoteka sadrži signale  $x_1[n]$  i  $x_2[n]$ , a točnu uputu gdje se datoteka nalazi dobiti ćete od dežurnog asistenta). Što čujete?

Ako vam je simulacija prespora uz Accelerator način simulacije ili ako nemate na raspolaganju ubrzanje simulacije u ovom zadatku (a i u svim ostalim zadacima) blok za reprodukciju zvučnog signala zamijenite s blokom za snimanje signala u datoteku (To Audio Device blok zamijenite s To wave File blokom). Nakon završetka obrade snimljeni signal možete poslušati korištenjem bilo kojeg programa za reprodukciju zvuka, a možete koristiti i naredbe wavread i soundsc unutar MATLAB-a.



Slika 7. Jednostavni sustav za slušanje wav datoteka



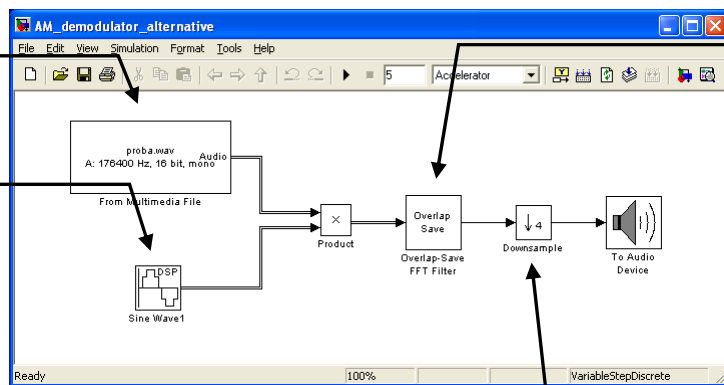
Slika 8. Alternativna izvedba koristi mat umjesto wav datoteke

- c) U Simulinku sastavite sustav koji dekodira AM signal i reproducira ga. Kako je navedeno u uvodu za AM demodulaciju potrebno je signal opet pomnožiti s nosiocem i propustiti ga kroz NP filter. Kao generator sinusnog signala koristite Sine Wave blok, za NP filter odaberite Overlap-Save FFT Filter. Radi ubrzavanja simulacije između NP filtra i bloka za reprodukciju postavite Downsample blok. Svi navedeni blokovi su iz skupine Signal Processing Blockset. Korištenjem unesenog modela opet poslušajte wav datoteku čije ime odgovara vašem matičnom broju. Što čujete? Je li poruka ista kao u a) zadatku?

<sup>2</sup> Accelerator način simulacije temeljem nacrtanog modela generira C kod koji se zatim prevodi. To dovodi do značajnog ubrzanja simulacije, no prilikom svake izmjene modela potrebno je pričekati na prevođenje.

Tip izlaznog podatka neka bude double.

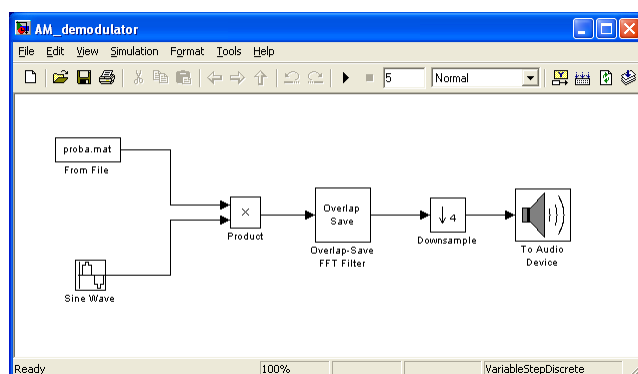
Signal nosilac je kosinus frekvencije 60000 Hz. U blok dakle unosite frekvenciju 60000, fazu  $\pi/2$  i amplitudu 0,5. Obavezno postavite vrijeme uzorkovanja na  $1/176400$  i odaberite 1024 uzorka po bloku. Tip izlaznog podatka neka bude double.



Slika 9. Simulink model AM demodulatora

Odaberite FFT u 2048 točaka, a kao specifikaciju filtra unesite  $4 * f_i r1(64, 1/10)$ . Time ste specificirali NP filter čiju karakteristiku možete provjeriti naredbom freqz.

U bloku za decimaciju odaberite faktor decimacije 4.



Slika 10. Alternativni model AM demodulatora koja ne koristi Signal Processing Blockset

- d) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Sastavite model u Simulinku koji kreira AM signal iz govornog signala snimljenog mikrofonom. Neka signal snimljen mikrofonom bude otipkan frekvencijom 44100 Hz. Snimljeni signal pretvorite u signal otipkan frekvencijom  $f_s = 176400$  Hz, zatim mu pridodajte konstantu te ga pomnožite s kosinusnim signalom frekvencije 60000 Hz. Dobiveni signal snimite u wav datoteku. Preslušajte tako dobiveni signal korištenjem modela iz b) i c) dijela zadatka. Što čujete?

### 3.3. Dekonvolucija

Treći dio prve laboratorijske vježbe bavi se dekonvolucijom. Ako znamo izlaz i impulsni odziv diskretnog sustava ulaz možemo odrediti prema

$$u[n] = \frac{1}{h[0]} \left( y[n] - \sum_{i=1}^n u[n-i]h[i] \right),$$

no samo ako je tako opisan diskretni sustav stabilan. Na predavanjima je pokazano da je dekonvolucija provediva samo za minimalno fazne sustave. U ovom dijelu vježbi ćemo se baviti s dekonvolucijom uz primjere iz obrade audio signala.



### 40 minuta **Zadatak 3.3-1 Dekonvolucija i minimalno fazni sustav**

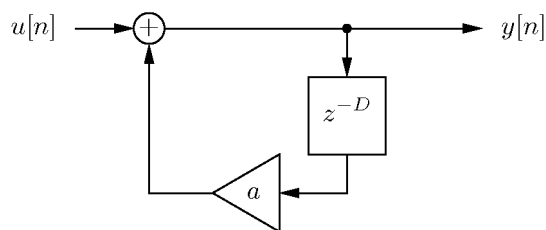
Jedan od jednostavnijih audio-efekata jest reverberacija (eng. *reverb*), odnosno višestruki odjeci signala koji se javljaju kada zvučni signal naiđe na prepreku. U zatvorenim prostorima se tipično radi o zidovima. Najjednostavniji sustav koji modelira reverberaciju može se opisati prijenosnom funkcijom

$$H(z) = \frac{1}{1 - az^{-D}},$$

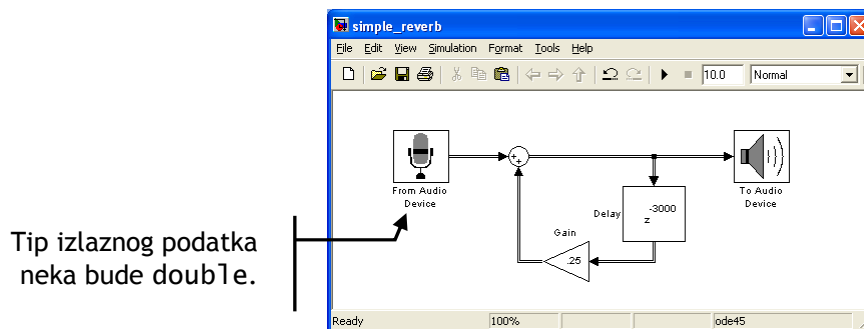
i pripadnom jednadžbom diferencija

$$y[n] = ay[n - D] + u[n],$$

gdje je  $a$  realna konstanta koju odabiremo tako da sustav bude stabilan, a  $D$  je cijeli broj koji određuje vrijeme potrebno da se jeka vrati. Blok-dijagram takvog sustava prikazan je na slici 11., dok je jedan mogući model izveden u Simulinku prikazan na slici 12.



Slika 11. Blok-dijagram jednostavnog sustava za reverberaciju



Slika 12. Simulink model sustava za reverberaciju

- (PRIPREMA)** Za koje vrijednosti parametra  $a$  i  $D$  je zadani sustav za jednostavnu reverberaciju minimalno fazni? Uz pretpostavku da su ti uvjeti zadovoljeni odredite prijenosnu funkciju inverznog sustava!
- Sastavite Simulink model za jednostavnu reverberaciju prema slici 12. Za vrijednosti parametara uzmite  $a = 0,5$  i  $D = 3000$ . Postavite frekvenciju otipkavanja na 44100 Hz. Isprobajte sustav. Što čujete? Snimite izgovor jedne kraće rečenice u datoteku (To Audio Device blok zamijenite s To Wave File blokom).
- Prema rezultatu pripreme sastavite model sustava za uklanjanje reverberacije. Na ulaz sustava dovedite snimljeni signal iz b) dijela zadatka. Što čujete?

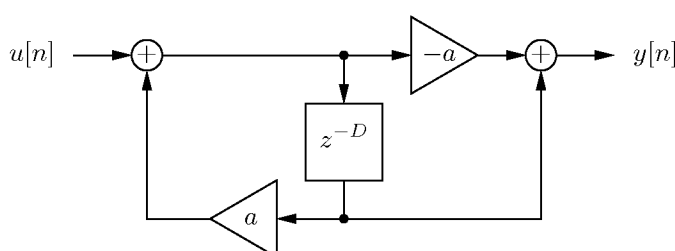
- d) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Isprobajte razne vrijednosti parametra  $a$ , i to barem 0,25, 0,5, 0,75. Komentirajte rezultate!

#### 40 minuta **Zadatak 3.3-2 Dekonvolucija i neminimalno fazni sustav**

Nešto kompliciraniji jest neminimalno fazni model reverberacije (svepropusna reverberacija) koju možemo opisati prijenosnom funkcijom

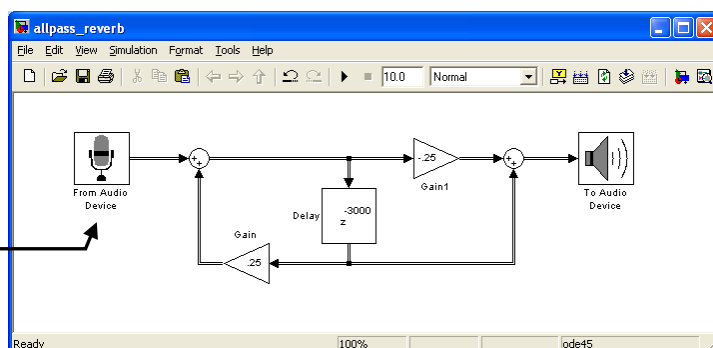
$$H(z) = \frac{-a + z^{-D}}{1 - az^{-D}},$$

gdje je  $a$  realna konstanta koju odabiremo tako da sustav bude stabilan, a  $D$  je cijeli broj koji određuje vrijeme potrebno da se jeka vrati. Blok-dijagram takvog sustava prikazan je na slici 13., dok je jedan mogući model izveden u Simulinku prikazan na slici 14.



Slika 13. Blok-dijagram svepropusnog sustava za reverberaciju

Tip izlaznog podatka neka bude double.



Slika 14. Simulink model svepropusnog sustava za reverberaciju

- (PRIPREMA) Za koje vrijednosti parametra  $a$  i  $D$  je zadani sustav za svepropusnu reverberaciju minimalno fazni? Za koje vrijednosti je stabilan? Može li zadani sustav biti minimalno-fazni i stabilan?
- (PRIPREMA) Odredite prijenosnu funkciju minimalno faznog sustava kojemu je amplitudna karakteristika jednaka sustavu za svepropusnu reverberaciju? Što možete reći o inverzu dobivenog sustava? Možemo li ga koristiti za uklanjanje svepropusne reverberacije.
- Sastavite Simulink model za svepropusnu reverberaciju prema slici 14. Za vrijednosti parametara uzmite  $a = 0,5$  i  $D = 3000$ . Postavite frekvenciju otipkavanja na 44100 Hz. Isprobajte sustav. Što čujete? Snimite izgovor jedne kraće rečenice u datoteku (To Audio Device blok zamijenite s To Wave File blokom).

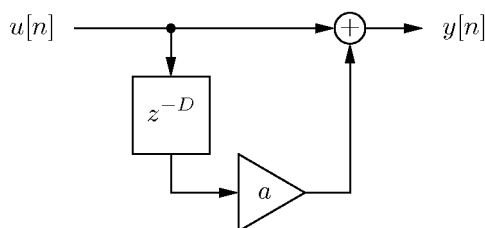
- d) Prema rezultatu pripreme sastavite model sustava za uklanjanje reverberacije. Na ulaz sustava dovedite snimljeni signal iz c) dijela zadatka. Što čujete? Isprobajte i inverzni sustav koji ste sastavili u zadatku 3.3-1c. Što čujete? Koji sustav bolje uklanja jeku?
- e) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Isprobajte razne vrijednosti parametra  $a$ , i to barem 0,25, 0,5, 0,75. Komentirajte rezultate!
- f) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI JOŠ VIŠE) Kako u svakoj prostoriji očekujemo četiri zida najjednostavniji komercijalni sustavi za reverberaciju se sastoje od paralelne kombinacije četiri reverberacijska sustava. Izlazi tih sustava se zbrajaju i zatim propuštaju kroz svepropusni filter koji djeluje samo na faznu karakteristiku (Schroederova reverberacija). Ponovite podzadatke a)-e) za Schroederovu reverberaciju u kojoj je ispušten svepropusni filter, dakle sustav kojeg promatramo se sastoji od paralele četiri svepropusne reverberacije.

#### 40 minuta **Zadatak 3.3-3 Dekonvolucija jeke**

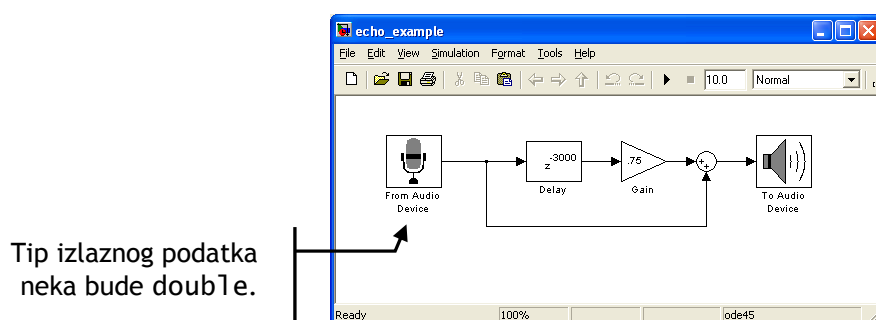
Osim reverberacije još jednostavnije jest dodati jedan odjek. U signal se dodaje zakašnjela prigušena kopija signala. Prijenosna funkcija takvog sustava je

$$H(z) = 1 + az^{-D},$$

gdje je  $a$  realna konstanta, a  $D$  je cijeli broj. Blok-dijagram takvog sustava prikazan je na slici 15., dok je jedan mogući model izveden u Simulinku prikazan na slici 16.



Slika 15. Blok-dijagram jednostavnog sustava za dodavanje jeke



Slika 16. Simulink model jednostavnog sustava za dodavanje jeke

- a) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Za koje vrijednosti parametra  $a$  i  $D$  je zadani sustav minimalno fazni? Uz pretpostavku da je sustav minimalno-fazni odredite prijenosnu funkciju inverznog sustava.

- b) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Za vrijednosti parametara  $a$  i  $D$  za koje polazni sustav nije minimalno-fazni odredite prijenosnu funkciju minimalno faznog sustava kojemu je amplitudna karakteristika jednaka polaznom sustavu? Odredite i inverzni sustav tog sustava!
- c) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Sastavite Simulink model prema slici 16. Za vrijednosti parametara uzmite  $a = 0,25$  i  $D = 3000$ . Postavite frekvenciju otipkavanja na 44100 Hz. Isprobajte sustav. Što čujete? Snimite izgovor jedne kraće rečenice u datoteku (To Audio Device blok zamijenite s To Wave File blokom).
- d) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Prema rezultatu pripreme sastavite model sustava za uklanjanje jeke. Na ulaz sustava dovedite snimljeni signal iz c) dijela zadatka. Što čujete?
- e) (ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE) Isprobajte razne vrijednosti parametra  $a$ , i to barem 0,25, 0,5, 0,75. Komentirajte rezultate!

## 4. Literatura

1. Sophocles J. Orfanidis, ADSP-2181 Experiments, Rutgers University, 2003.,  
<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ezkitl/ezkitl.html>
2. H. Babić, *Signali i sustavi (zavodska skripta)*, FER, Zagreb 1996.,  
[http://sis.zesoi.fer.hr/predavanja/pdf/sis\\_2001\\_skripta.pdf](http://sis.zesoi.fer.hr/predavanja/pdf/sis_2001_skripta.pdf)
3. Ž. Ban, *Osnove MATLAB-a*, FER, Zagreb, 2006.  
[http://www.fer.hr/\\_download/repository/Osnove\\_matlaba.pdf](http://www.fer.hr/_download/repository/Osnove_matlaba.pdf)
4. *Laboratorij i vještine - MATLAB: Uvod u Simulink*, FER, Zagreb, 2006.  
[http://www.fer.hr/\\_download/repository/simulinkskripta.pdf](http://www.fer.hr/_download/repository/simulinkskripta.pdf)
5. T. Petković, *Kratke upute za korištenje MATLAB-a*, FER, Zagreb, travanj 2005.  
[http://www.fer.hr/\\_download/repository/matlab\\_upute.pdf](http://www.fer.hr/_download/repository/matlab_upute.pdf)