Univerzitet u Banjaluci
Elektrotehnički fakultet
Katedra za opštu elektrotehniku
Multimedijalni sistemi

Vježba 4.
Sinteza digitalnog zvuka

Dvije osnovne tehnike za sintezu digitalnog zvuka su aditivna i subtraktivna sinteza. Pored ove dvije tehnike u sintesajzerima se često koriste i wavetable sinteza, sinteza zasnovana na frekventnoj modulaciji, sinteza zasnovana na semplovima, te sinteza zasnovana na fizičkom modeliranju.

Aditivna sinteza

Helmholtz je 1859. godine pokazao da je moguće sintetizovati zvukove pomoću elektromagnetno pobuđenih muzičkih viljušaka čiju je glasnoću kontrolisao pomoću pokrivača. Najefektnija demonstracija ove ideje je bila sintetizovanje zvukova samoglasnika. Pošto je talasni oblik zvuka koji proizvodi zvučna viljuška približno sinusoida to znači da se sintetizovani signal iz Helmholtzovih eksperimenata može prikazati kao superpozicija sinusoida različitih frekvencija i amplituda. Ovo je osnova aditivne sinteze zvuka. Frekvencije sinusoidalnih komponenata mogu, ali ne moraju, biti harmonijski vezane, tj. biti cjelobrojni umnošci osnovne frekvencije. U slučaju da su frekvencije komponenata harmonijski vezane, sinusoidalne komponente se zovu *harmonici*. Za datu osnovnu frekvenciju f_1 i amplitude harmonika p_n, sintetizovani signal je dat sa:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N} p_n \cos 2\pi n f_1 t \,.$$

Za realne signale signale vrijednosti amplituda harmonika opadaju sa porastom frekvencije, zato što tonovi više frekvencije ljudskom uhu zvuče glasnije od tonova nižih frekvencija sa istom amplitudom.

Subtraktivna sinteza

Za razliku od aditivne sinteze gdje se tonovi formiraju sabiranjem komponenata određenih frekvencija i amplituda, kod subtraktivne sinteze polazna tačka je signal koji ima bogat spektar (npr. bijeli šum ili trougaoni signal). Ovaj signal se zatim filtrira kako bi se prigušile visokofrekventne komponente i dobio prirodniji zvuk.
U ovoj vježbi koristićemo bijeli šum i IIR comb filtar. U MATLAB-u se bijeli šum može generisati pomoću funkcije `rand`. Ova funkcija generiše niz slučajnih brojeva uzetih iz uniformne raspodjele na intervalu [0, 1].
Za filtriranje ćemo iskoristiti IIR comb filtar. Jednačina diferencija koja opisuje ovaj filtar je data sa:

$$y(n) = x(n) - y(n-M)\,. \tag{1}$$

Amplitudna karakteristika ovog filtra ima vrhove (lokalne maksimume) na frekvencijama datim sa:

$$f_n = \frac{(2n+1)F_S}{2M}, \tag{2}$$

gdje je F_s frekvencija odmjeravanja, a n cijeli broj. Na položaj vrhova moguće je uticati promjenom parametra M. Ako comb filtar pobuđujemo bijelim šumom na izlazu dobijamo signal čija je osnovna frekvencija f_1. Za datu osnovnu frekvenciju pobudnog signala, korištenjem jednačine (2) moguće je izračunati vrijednost kašnjenja M. Problemi mogu nastati kada je dobijena vrijednost M nije cijeli broj. U tom slučaju se vrijednost $y(n\text{-}M)$ iz jednačine (1) može aproksimirati kao:

$$y(n-M) = (1-\delta)\, y(n-\lfloor M \rfloor) + \delta y(n-(\lfloor M \rfloor + 1)), \tag{3}$$

gdje je $M = \lfloor M \rfloor + \delta$. Sa $\lfloor M \rfloor$ je označen najveći cijeli broj koji nije veći od M, a $\delta \in [0,1)$.

Zvuk koji proizvode muzički instrumenti obično nema istu glasnoću tokom cijelog trajanja. Iako ne odgovara u potpunosti modelu koji se koristi u sintesajzerima, ovu pojavu je, npr. za žičane instrumente, moguće opisati pomoću fade-out efekata. Kao što je pomenuto u prvoj vježbi fade-out efekat se postiže množenjem signala sa anvelopom oblika $e(t) = e^{-t/T}$.

Zadaci

Aditivna sinteza

1. Napisati fukciju synthesize.m koja će generisati signal koji se sastoji od superpozicije sinusoida čije su frekvencije u harmonijskom odnosu (cjelobrojni umnošci osnovne frekvencije). Zaglavlje funkcije treba da ima oblik:

```
function x = synthesize(f, d, p, fs)
% x = synthesize(f, d, p, fs)
%
% Generise zvucni signal cija je osnovna frekvencija f, trajanje
% u sekundama d, amplitude pojedinih sinusoida su u vektoru p, a
% fs je frekvencija odmjeravanja.
%
% Na primjer, synthesize(440, 3, [1 .8 .1 .04], 22050)
% generise signal frekvencije 440Hz, trajanja 3 sekunde sa
% zadatim amplitudama komponenata.
```

2. Pomoću funkcije iz tačke 1. generisati signal sa parametrima kao u gornjem primjeru.
3. Napišite program u MATLAB-u koji će generisati zvučni signal C-dur ljestvice. Vrijednosti frekvencija pojedinih tonova možete preuzeti iz članka u Vikipediji (http://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies).
4. Ljudski mozak može da odredi visinu tona čak i ako nedostaju osnovni i niži harmonici. Sintetišite zvukove kod kojih je $p_1 = 0$, $p_1 = p_2 = 0$ i $p_1 = p_2 = p_3 = 0$. Vrijednosti amplituda ostalih harmonika možete izabrati proizvoljno, ali treba da u svim slučajevima budu jednake. Poslušati rezultate. Kakva je visina tonova koje čujete?
5. Helmholtz je 1859. predložio vrijednosti harmonika za sintezu samoglasnika

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_8	p_{16}
U	*ff*	*mf*	*pp*					
O	*mf*	*f*	*mf*	*p*				
A	*p*	*p*	*p*	*mf*	*mf*	*p*	*p*	
E	*mf*		*mf*			*ff*		
I	*mf*	*p*				*p*		*mf*

Neka je frekvencija osnovnog harmonika 220Hz. Sintetišite ove samoglasnike koristeći sledeće vrijednosti amplituda:

```
ff=1; mf = 0.7; f = 0.3; p = 0.1; pp = 0.07;
```

Poslušati dobijeni rezutat.

6. Primijenite fade-out efekat na tonove iz prethodnih tačaka. Poslušajte signale dobijene sa vremenskim konstantama $T \in \{0.01, 0.1, 1\}[s]$. Formirajte tonsku ljestvicu od tonova sa fade-out efektom.

Subtraktivna sinteza

1. Napisati funkciju iircomb.m koja će projektovati IIR comb filtar sa vrhovima na frekvencijama koje su umnošci zadate frekvencije. Zaglavlje funkcije treba da ima oblik:

```
function [b, a] = iircomb(f, fs)
% [b, a] = iircomb(f, fs)
%
% Projektuje comb filtar sa vrhovima na frekvencijama koje su
% umnosci zadate frekvencije f (u Hz).
% Vraca nizove koeficijenata u direktnoj (b) i povratnoj (a)
% sprezi, kao sto se koriste u funkciji filter.
```

2. Generisati odmjerke bijelog šuma (`help rand`) u trajanju od 0,4s. Frekvenciju odmjeravanja izaberite proizvoljno.
3. Bijeli šum propustiti kroz comb filtar iz tačke 1, projektovan za frekvenciju 440Hz. Poslušati dobijeni signal. Trebalo bi da odgovara noti A440 (http://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies).
4. Muzički instrumenti obično proizvode zvuk čija se glasnoća (i spektralni sadržaj) mijenja tokom vremena. Ovo se može postići i pomoću fade-out efekta iz prve vježbe. Primijenite fade-out na dobijeni ton. Varirajte trajanje fade-out efekta i poslušajte dobijene rezultate.
5. Napišite program u MATLAB-u koji će generisati zvučni signal C-dur ljestvice. Vrijednosti frekvencija pojedinih tonova možete preuzeti iz članka u Vikipediji.
6. Napišite program u MATLAB-u koji će svirati jednostavnu pjesmu. Za ovo će vam vjerovatno biti potrebno i da omogućite da tonovi imaju različita trajanja. Tonove sintetišite jednom od dvije opisane metode. Umjesto bijelog šuma i comb filtra kod subtraktivne sinteze možete iskoristiti i druge oblike ulaznog signala, npr. pravougaoni ili testerasti i frekvencijski selektivne filtre kao što je opisano u prethodnoj vježbi.