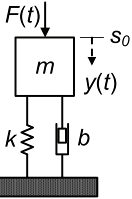
Signali i sustavi

Profesor
Branko Jeren

21. veljače 2007.

Jednadžba jednostavnog mehaničkog sustava

- neka je sustav, prije primjene sile F, u mirovanju na poziciji s_0, dakle, opruga generira silu suprotnu sili gravitacije
- neka je k koeficijent elastičnosti, a b koeficijent prigušenja prigušivača



Slika 1: Primjer mehaničkog sustava

- ravnoteža sila na masu u titranju je:

$$my''(t) = F(t) - ky(t) - by'(t)$$

- pa je diferencijalna jednadžba za ovaj sustav:

$$y''(t)+\frac{b}{m}y'(t)+\frac{k}{m}y(t) = \frac{1}{m}F(t)$$

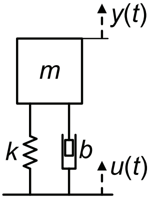
Model sustava ovjesa automobila 1

- dani primjer jednostavnog mehaničkog sustava često se koristi i kao vrlo pojednostavljeni model sustava ovjesa automobila
- i dana jednadžba opisuje ponašanje ovjesa automobila u mirovanju i pri djelovanju sile na karoseriju

$$y''(t) + \frac{b}{m}y'(t) + \frac{k}{m}y(t) = \frac{1}{m}F(t) \qquad (1)$$

Model sustava ovjesa automobila 2

- jednadžba se unekoliko mijenja ako pretpostavimo da želimo analizirati ponašanje ovjesa kao rezultat pomaka kotača koji prati neravnine ceste



Slika 2: Primjer modela ovjesa automobila

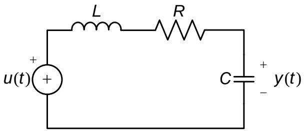
- ravnoteža sila je:

$$my''(t) = k[u(t) - y(t)] + b[u'(t) - y'(t)]$$

- pa je diferencijalna jednadžba za ovaj primjer:

$$y''(t)+\frac{b}{m}y'(t)+\frac{k}{m}y(t) = \frac{b}{m}u'(t)+\frac{k}{m}u(t)$$

Jednadžba jednostavnog električnog kruga



Slika 3: *RLC* krug

- ulazni signal – napon izvora $u(t)$
- izlazni signal – napon na kapacitetu $y(t)$

- iz

$$u(t) = L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + y(t)$$

i

$$i(t) = C\frac{dy(t)}{dt}$$

- slijedi

$$u(t) = LC\frac{d^2y(t)}{dt^2} + RC\frac{dy(t)}{dt} + y(t)$$

- i finalno

$$y''(t) + \frac{R}{L}y'(t) + \frac{1}{LC}y(t) = \frac{1}{LC}u(t) \tag{2}$$

Jednadžba modela glazbene vilice

- glazbena vilica je također mehanički sustav i jednadžba koja predstavlja model vilice dobije se također iz ravnoteže sila
- neka je k koeficijent elastičnosti kraka vilice, b konstanta prigušenja zraka oko krakova, m je masa vilice i zahvaćenog zraka, $F(t)$ sila koja djeluje na krak, a y je pomak kraka vilice iz ravnotežnog položaja
- iz

$$my''(t) = F(t) - ky(t) - by'(t)$$

- iz ovoga slijedi jednadžba – oblikom identična jednadžbama (1) i (2) –

$$y''(t) + \frac{b}{m}y'(t) + \frac{k}{m}y(t) = \frac{1}{m}F(t)$$

Diferencijalna jednadžba općeg sustava drugog reda

- glazbena vilica, RLC mreža, i mehanički sustav (pojednostavljeni model automobilskog ovjesa) modelirani su kao sustavi drugog reda i opisani su diferencijalnim jednadžbama drugog reda
- linearne vremenski kontinuirane[1] sustave drugog reda općenito možemo opisati diferencijalnom jednadžbom drugog reda

$$y''(t) + a_1 y'(t) + a_2 y(t) = b_0 u''(t) + b_1 u'(t) + b_2 u(t) \quad (3)$$

- u prethodnim primjerima sustavi su rezultirali s jednadžbama u kojima su $b_0 = b_1 = 0$

[1] Kasnije će biti objašnjeno.

Linearni vremenski kontinuirani sustavi drugog reda uz $b_0 = b_1 = 0$

- za linearne vremenski kontinuirane sustave drugog reda za koje vrijedi $b_0 = b_1 = 0$ čest je tradicionalni način[2] pisanja diferencijalne jednadžbe

$$y'' + 2\zeta\Omega_n y' + \Omega_n^2 y = A\Omega_n^2 u \qquad (4)$$

- gdje su ζ-stupanj prigušenja, Ω_n-neprigušena prirodna frekvencija i A-konstanta
- tako za prethodne primjere vrijedi:
  - $\Omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\zeta = \frac{b}{2\sqrt{mk}}$, $A = \frac{1}{k}$ za model ovjesa automobila po jednadžbi (1)
  - $\Omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\zeta = \frac{b}{2\sqrt{mk}}$, $A = \frac{1}{k}$ za model i parametre glazbene vilice
  - $\Omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\zeta = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$, $A = 1$ za model R-L-C električne mreže

[2] oznake vezane uz svojstva slobodnog odziva sustava

Model vremenski diskretnog sustava 1

- u nabavi novih udžbenika fakultetska skriptarnica uzima u obzir broj upisanih studenata te činjenicu da je vijek trajanja udžbenika 3 godine i da 20% studenata proda korišteni udžbenik skriptarnici nakon odslušane godine
- dodatna je pretpostavka da svi studenti kupuju udžbenik, te slušaju predmet samo jednom i da su stariji udžbenici jeftiniji i zato ih studenti preferiraju u nabavi
- neka je $y(n)$ broj novih udžbenika koje skriptarnica treba naručiti, a $u(n)$ je broj upisanih studenata
- dakle skriptarnica će uz $0.2y(n-1)$ udžbenika starih godinu dana i $0.2 \cdot 0.2y(n-2)$ starih dvije godine trebati nabaviti još $y(n)$ novih kako bi zadovoljila potrebe $u(n)$ studenata u n-toj školskoj godini

Model vremenski diskretnog sustava 2

- algoritam za određivanje $y(n)$ slijedi iz jednakosti

$$y(n) + 0.2y(n-1) + 0.2[0.2y(n-2)] = u(n)$$

odnosno

$$y(n) + 0.2y(n-1) + 0.04y(n-2) = u(n)$$

- ova jednadžba je jednadžba diferencija drugog reda i predstavlja model vremenski diskretnog sustava drugog reda

Jednadžba diferencija općeg sustava drugog reda

- općenito linearni vremenski diskretni sustav drugog reda opisan je jednadžbom diferencija

$$y(n)+a_1y(n-1)+a_2y(n-2) = b_0u(n)+b_1u(n-1)+b_2u(n-2) \tag{5}$$

Određivanje odziva sustava

- pokazano je da linearni vremenski kontinuirani sustav drugog reda opisujemo jednadžbom (3)

$$y''(t) + a_1 y'(t) + a_2 y(t) = b_0 u''(t) + b_1 u'(t) + b_2 u(t)$$

- a linearni vremenski diskretni sustav drugog reda jednadžbom (5)

$$y(n)+a_1 y(n-1)+a_2 y(n-2) = b_0 u(n)+b_1 u(n-1)+b_2 u(n-2)$$

- određivanje (izračunavanje) odziva sustava $y(t)$ odnosno $y(n)$ uz poznate $u(t)$ ili $u(n)$ svodi se na rješavanje gornjih jednadžbi
- jednadžbe je moguće riješiti analitički ili numerički

Veza blokovskog dijagrama i matematičkog modela

- na prvom je predavanju pokazano kako sustave možemo prikazati blokovskim dijagramima
- ovdje se pokazuje veza između blokovskih dijagrama i matematičkih modela za razmatrane primjere sustava

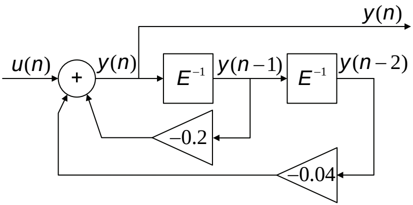
Blokovski dijagram vremenski diskretnog sustava

- u prethodno razmatranom primjeru vremenski diskretni sustav je matematički modeliran jednadžbom diferencija

$$y(n) + 0.2y(n-1) + 0.04y(n-2) = u(n)$$

- ovu jednadžbu transformiramo u oblik pogodan za izravno određivanje blokovskog dijagrama

$$y(n) = u(n) - 0.04y(n-2) - 0.2y(n-1)$$



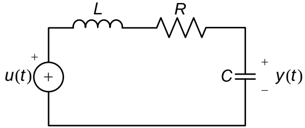
Slika 4: Blok dijagram vremenski diskretnog sustava – primjer

Signali i sustavi
školska godina 2006/2007
Predavanje 2.

Profesor Branko Jeren

Blokovski dijagram vremenski kontinuiranog sustava 1

- za primjer električnog RLC kruga opisanog shemom



- odnosno, diferencijalnom jednadžbom,

$$y''(t) + 2\zeta\Omega_n y'(t) + \Omega_n^2 y(t) = A\Omega_n^2 u(t),$$

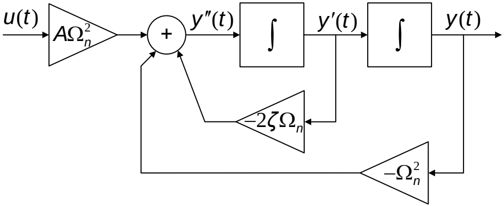
uz $\Omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\zeta = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$,

- diferencijalnu jednadžbu transformiramo u oblik pogodan za određivanje blokovskog dijagrama

$$y''(t) = A\Omega_n^2 u - \Omega_n^2 y(t) - 2\zeta\Omega_n y'(t),$$

Blokovski dijagram vremenski kontinuiranog sustava 1

- iz $y''(t) = A\Omega_n^2 u(t) - \Omega_n^2 y(t) - 2\zeta\Omega_n y'(t)$ crtamo blokovski dijagram



Slika 5: Blokovski dijagram vremenski kontinuiranog sustava – primjer

- apstraktni sustav opisan gornjim blokovskim dijagramom simulira realne sustave opisane s diferencijalnom jednadžbom $y''(t) + 2\zeta\Omega_n y'(t) + \Omega_n^2 y(t) = A\Omega_n^2 u(t)$
- poznavanje blokovskog dijagrama pojednostavljuje postupak simulacije realnih sustava

Simulacija sustava

- na primjeru RLC kruga i modela ovjesa automobila pokazano je kako su opisani istim apstraktnim modelom – diferencijalnom jednadžbom istog oblika
- zaključujemo kako bi se u izučavanju vladanja mehaničkog sustava mogli poslužiti, analognim, realnim električnim krugom
- kažemo da jedan sustav (električni krug) simulira drugi sustav (mehanički sustav)
- simulaciju možemo provesti realizacijom blokovskog dijagrama
- realizacija može biti sklopovska ili programska
- korištenjem programskog sustava Simulink kao dijela programskog sustava MATLAB ilustriramo primjer simulacije mehaničkog sustava

Odziv glazbene vilice 1

- odziv glazbene vilice možemo odrediti rješavanjem diferencijalne jednadžbe

$$y''(t) + \frac{b}{m}y'(t) + \frac{k}{m}y(t) = \frac{1}{m}F(t)$$

- zanemarimo li, u prvoj aproksimaciji, prigušenje zraka oko krakova i analiziramo jednadžbu neposredno nakon primjene sile (kratkog udarca u krak u $t = 0$) jednadžba prelazi u

$$y''(t) + \frac{k}{m}y(t) = 0 \qquad \text{i uz} \qquad y(0^+) \neq 0$$

Odziv glazbene vilice 2

- prije je definirana Ω_n-neprigušena prirodna frekvencija kao $\Omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ pa prethodnu jednadžbu možemo pisati kao

$$y''(t) = -\Omega_n^2 y(t)$$

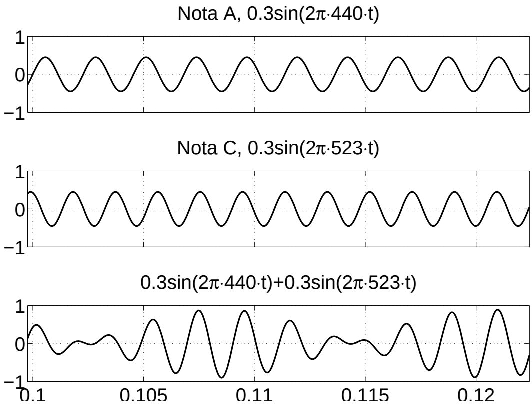
- rješenje ove jednadžbe je signal (funkcija) koja je proporcionalna svojoj drugoj derivaciji, a to je upravo sinusoida do koje smo došli snimanjem zvuka glazbene vilice

Zbroj dva sinusoidna signala 1

- pokazano je kako je signal koji generira glazbena vilica sinusoidni signal frekvencije 440 Hz
- pokazano je da je sinusoidni signal te frekvencije možemo generirati računalom
- generirajmo sada sinusoidni signal frekvencije 523 Hz koji odgovara noti C
- istovremeno "sviranje" nota A i C kao rezultat daje

Zbroj dva sinusoidna signala 2

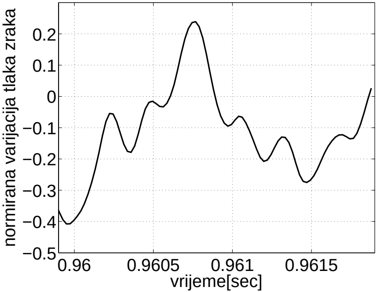
- istovremeno “sviranje” nota A i C je zapravo zbroj sinusoidnih signala frekvencije 440Hz i 523Hz i njihov zbroj je prikazan na slici



Slika 6: Nota A + Nota C

Signal je suma više sinusoida

- podsjetimo li se kratkog odsječka signala glazbe "Wild Thing"



Slika 7: Signal glazbe

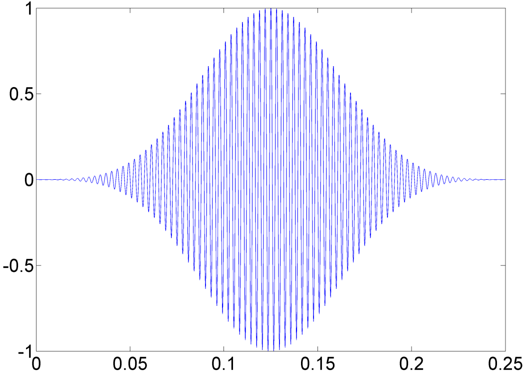
- možemo prepoznati da je i taj signal moguće prikazati kao zbroj više sinusoidnih signala različitih frekvencija

Generiranje signala glazbe

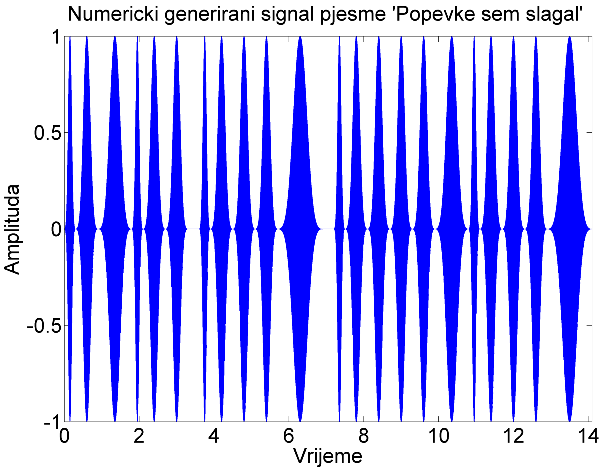
- svakoj glazbenoj noti pridružuje se signal odgovarajuće frekvencije
- vrlo izravan, i vrlo pojednostavljen, način "sviranja" neke glazbe svodi se na generiranje "sinusoidnih" signala čija frekvencija odgovara potrebnim notama
- poslušajmo jednu takvu računalnu "svirku"
- svakoj glazbenoj noti pridružuje se sinusoidni signal odgovarajuće frekvencije
- kako note mogu biti različite duljine trajanja sinusoidni signal treba vremenski ograničiti odgovarajućim vremenskim otvorom
- za potrebe danog primjera korišten je vremenski otvor Blackman-Harris

Jedan način numeričkog generiranja glazbenih nota

- na slici je prikaz generacije note E modulacijom sinusoidnog signala frekvencije 330 Hz s Blackman-Harrisovim otvorom



Signal glazbe u vremenskoj domeni



Digital Sound Synthesis[3]

- Wavetable Synthesis
- Recorded or synthesized musical events stored in internal memory and played back on demand
- Playback tools consists of various techniques for sound variation during reproduction such as pitch shifting, looping, enveloping and filtering
- Example: Giga Sampler

[3] Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra, University of California, Santa Barbara

Digital Sound Synthesis[4]

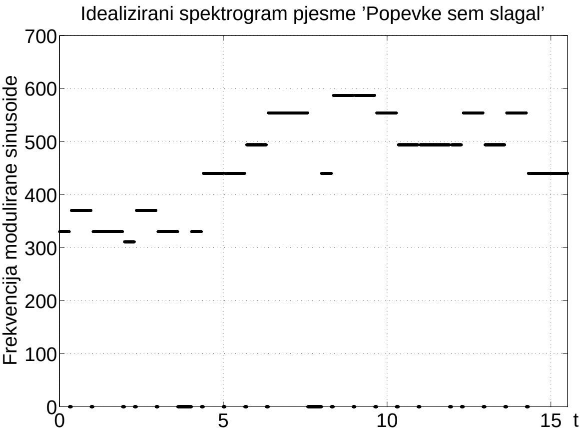
- Physical Modeling
- Models the sound production method
- Physical description of the main vibrating structures by partial differential equations
- Most methods based on wave equation describing the wave propagation in solids and in air
- Example: Tenor saxophone, (CCRMA, Stanford)

[4] Dobrotom autora: Prof. dr. Sanjit Mitra, University of California, Santa Barbara

Spektrogram

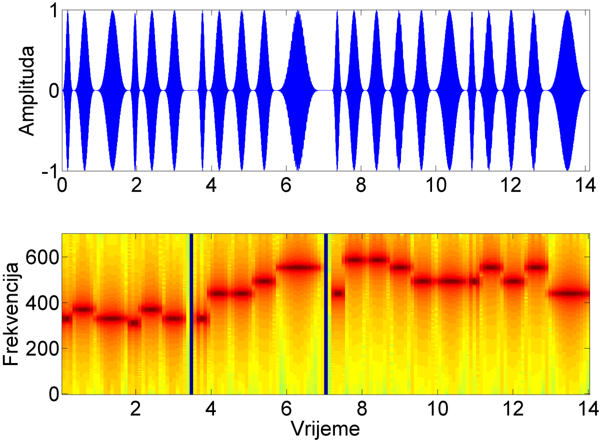
- prije prikazani signal glazbe za pjesmu "Popevke sam slagal" možemo interpretirati i na sljedeći način
- sintetiziraj vremenski ograničenu sinusoidu frekvencije koja odgovara prvoj noti u trajnaju prve note, pa zatim sintetiziraj vremenski ograničenu sinusoidu frekvencije koja odgovara drugoj noti ...
- ovaj postupak možemo prikazati i slikom i kasnije će biti objašnjeno kako se ovakav način prikaza signala zove spektrogram
- slika koja slijedi ilustrira kako notni zapisi po kojima ljudi sviraju slijede upravo ovaj način prikaza informacije koju nosi signal glazbe

Note i spektrogram



Note i spektrogram

- usporedba vremenske domene i spektrograma



Domena i kodomena signala

- na primjeru signala glazbe u trajanju 10.68 sekundi ilustrirano je da ovaj signal možemo predstaviti funkcijom

$$Glazba : Vrijeme \rightarrow Tlak \qquad Vrijeme = [0, 10.68] \subset Realni$$

- signal *Glazba* definiran je
  - kodomenom, ovdje označenom kao *Tlak*, skupom koji se sastoji od mogućih vrijednosti tlaka i
  - domenom, označenom kao skup *Vrijeme*, koji predstavlja vremenski interval $[0, 10.68] \subset Realni$
  - zbog karaktera signala funkciju *Glazba* ne možemo prikazati deklarativnim matematičkim izrazom
- ovdje su korištena "duga" imena za funkciju i varijable jer u ovom konkretnom slučaju imaju konkretne interpretacije
- korištenje "dugih" imena korisno je jer, kao i u programiranju, donosi bolju preglednost i garantira nedvosmislenost

Signal kao funkcija

- općenito signal je definiran funkcijom

$$NekiSignal : Domena \rightarrow Kodomena$$
$$\forall w \in Domena, \quad NekiSignal(w) = \text{matematički izraz po } w$$

- za većinu signala *Domena* je skup koji predstavlja vrijeme ili prostor (jedno ili višedimenzionalan)
- signali za koje je *Domena* skup koji predstavlja interval vremena nazivaju se *vremenski signali*
- niz događaja ili niz simbola možemo, također zvati signalom i tada *Domena* predstavlja položaj simbola ili događaja neovisno o fizikalnoj notaciji vremena ili prostorne pozicije

Realni i kompleksni signali

- signali opisani s realnim funkcijama su realni
- primjer realnog sinusnog signala frekvencije 440Hz koji odgovara noti A i označenog kao *NotaA*

$$\begin{aligned} &NotaA : Realni \to Realni \\ &\forall t \in Realni, \quad NotaA(t) = K \sin(2\pi \cdot 440t) \\ &K \in Realni \text{ je amplituda sinusoide} \end{aligned}$$

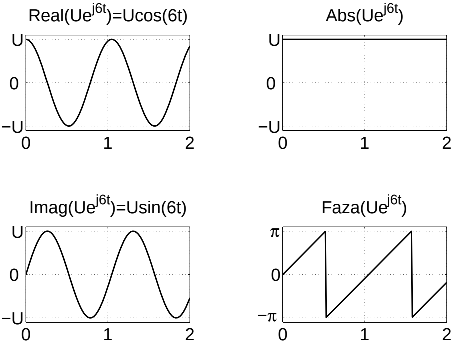
- signali mogu biti kompleksni tada su prikazani funkcijama kompleksnih varijabli[5]
- primjer kompleksne eksponencijale $u(t) = Ue^{j6t}$

$$\begin{aligned} &u : Realni \to Kompleksni \\ &\forall t \in [0, 2] \subset Realni, \quad U \in Realni \\ &u(t) = Ue^{j6t} = U\cos(6t) + jU\sin(6t) \end{aligned}$$

[5] uloga kompleksnih signala biti će pojašnjena kasnije

Primjer kompleksnog signala

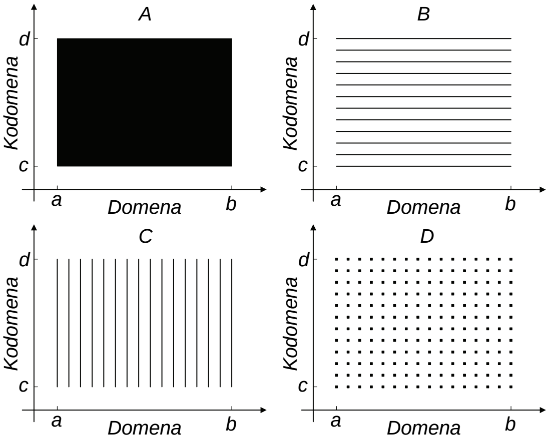
- signal $u(t)$ ima svoj realni i imaginarni dio i grafički je moguće crtati njegov realni i imaginarni dio odnosno modul i fazu
- prikazan je kompleksni signal $u(t) = Ue^{j6t}, t \in [0, 2], U \in Realni$



Slika 8: Grafički prikazi kompleksnog signala

Klasifikacija signala prema svojstvima domene i kodomene

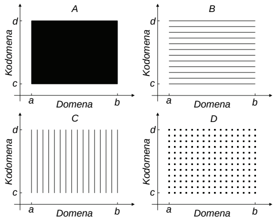
- ovisno o definiciji *Domene* i *Kodomene* postoji četiri mogućnosti



Slika 9: Kontinuirane i diskretne domene i kodomene

Klasifikacija signala 2

- signali za koje je $Domena = [a, b] \subset Realni$ – vremenski kontinuirani signali (Sl.9-A i Sl.9-B)
- signali za koje je $Domena = [a, b] \subset Cjelobrojni$ – vremenski diskretni signali (Sl.9-C i Sl.9-D)
- signali za koje je $Domena = [a, b] \subset Realni$ i $Kodomena \subset Realni$ – analogni signali (Sl.9-A)
- signali za koje je $Domena = [a, b] \subset Cjelobrojni$ i $Kodomena \subset Cjelobrojni$ – digitalni signali[6] (Sl.9-D)



[6] da bi signal nazvali digitalnim potrebno je još vrijednosti signala kodirati kao binarne brojeve

Svevremenski i kauzalni signali

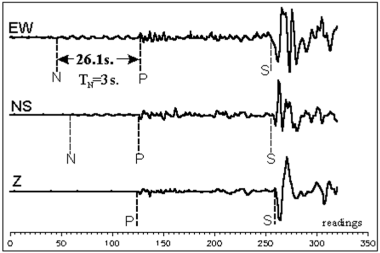
- signale $u_1(t)$ i $u_2(n)$ definirane kao:

$$\begin{aligned} u_1 &: \mathit{Realni} \to \mathit{Realni} \\ u_2 &: \mathit{Cjelobrojni} \to \mathit{Realni} \end{aligned}$$

- nazivamo *svevremenskim* signalima jer je $u_1(t)$ definiran za $-\infty < t < \infty$, a $u_2(n)$ $-\infty < n < \infty$
- svevremenske signale nije moguće generirati u praksi ali zbog svojih svojstava imaju važnu ulogu u studiju signala i sustava
- za kauzalne signale je $\mathit{Domena} \subseteq \mathit{Realni}_+$, odnosno $\mathit{Domena} \subseteq \mathit{Cjelobrojni}_+$, dakle, *kauzalni* su signali $u_1(t)$ i $u_2(n)$ definirani kao:

$$u_1(t) = \begin{cases} u_1(t), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \qquad u_2(n) = \begin{cases} u_2(n) & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$$

Primjer analognog signala 1



Slika 10: Signal potresa [7]

[7] May 29, 1982, earthquake on Hokkaido (origin time 12:21:13; coordinates 42.43N, 143.16E; M = 5.9; H = 120 km); P and S denote the onsets of P and S waves, respectively; N marks the beginning of the low-frequency precursory signal in EW and NS components. The records were made with Russian broadband seismographs at the Yuzhno-Sakhalinsk station. One reading is 0.373s. Iz: E.V. Sassorova, B.W. Levin, and A.O. Mostrioukov: A comparison analysis of the low-frequency seismic signal foregoing the main shock and the acoustic signal preceding a rock rupture in laboratory experiments.

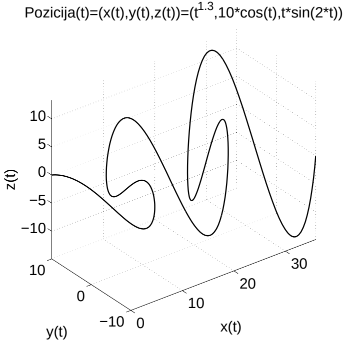
Primjer analognog signala 2

Slika 11: EKG signal

Primjer analognog signala 3

- pozicija gibajućeg objekta u prostoru, određena prostornim koordinatama x, y, z prikazana je funkcijom

$$Pozicija : Vrijeme \rightarrow Realni^3$$
$$\forall t \in Vrijeme \subset Realni, \quad Pozicija(t) = (x(t), y(t), z(t))$$



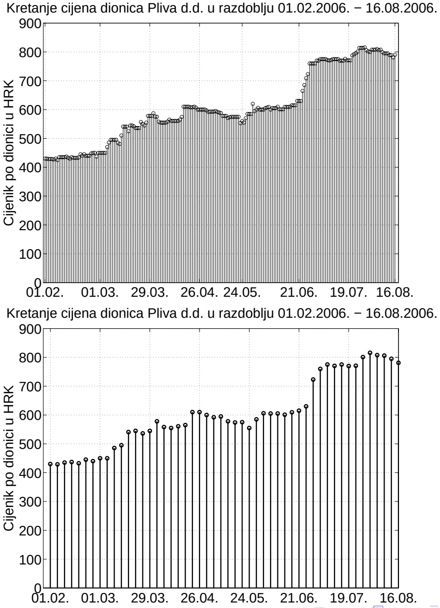
Slika 12: Signal pozicije objekta u prostoru

Primjer analognog signala 4

- za praćenje pozicija gibajućeg objekta u prostoru potrebno je uzeti u obzir i brzinu objekta pa je definirana funkcija

$$
\begin{aligned}
&\mathit{PozicijaBrzina} : \mathit{Vrijeme} \rightarrow \mathit{Realni}^6\\
&\forall t \in \mathit{Vrijeme} \subset \mathit{Realni},\\
&\mathit{PozicijaBrzina}(t) = (x(t), y(t), z(t), v_x(t), v_y(t), v_z(t))
\end{aligned}
$$

Primjer vremenski diskretnog signala 1



Primjer vremenski diskretnog signala 2

- niz podataka može biti prikazan kao diskretni signal

$$Podaci : Indeksi \rightarrow Simboli$$

gdje su $Indeksi \subset Prirodni$

a kodomena *Simboli* je skup odgovarajućih simbola

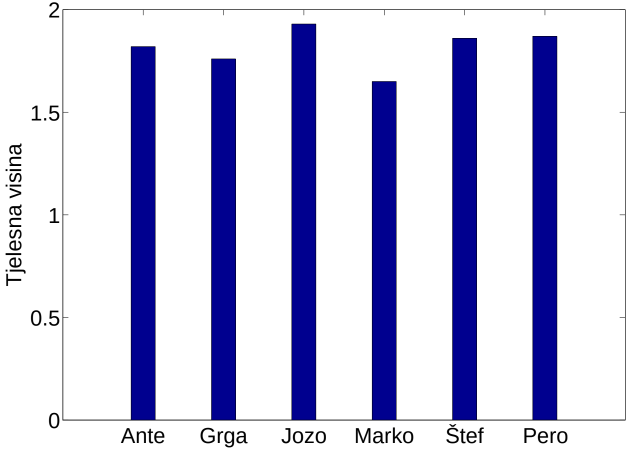
- primjer: hrvatski tekst dužine N riječi možemo prikazati funkcijom

$$HrvatskiTekst : Indeksi \rightarrow HrvatskeRijeci$$

gdje su $Indeksi = \{1, 2, \ldots, N\} \subset Prirodni$

- signal *HrvatskiTekst* je diskretan signal i njegova nezavisna varijabla označuje mjesto pojedinog simbola (riječi) u tekstu

Primjer diskretnog signala 3



Slika 14: Primjer diskretnog signala

Višedimenzionalni signali

- jednodimenzionalni (1-D) signal je funkcija jedne nezavisne varijable
- višedimenzionalni (M-D) signal je funkcija više od jedne nezavisne varijable
- signal slike, kao što je crno-bijela fotografija, je primjer 2-D signala gdje su dvije nezavisne varijable dvije prostorne varijable

Slika 15: Primjer dvodimenzionalnog signala

Slika–monokromatska 1

- slika (monokromatska) je dvodimenzionalna funkcija $f(x, y)$ (ili npr. $Leica(x, y)$) gdje su x i y prostorne koordinate, a vrijednost funkcije predstavlja svjetlinu (razina sivila, gray level) slike u toj točki
- slika se može zamisliti kao matrica čiji elementi predstavljaju svjetlinu slike u toj točki
- slikovni element (picture element, pixel, pel)
- ako je monokromatska slika – fotografija – prikazana na papiru dimenzija [18 $\times$ 19,8] cm tada je ona prikazana kao funkcija:

$$Leica : [0, 18] \times [0, 19.8] \rightarrow [0, I_{max}],$$

- I_{max} je maksimalna vrijednost sive slike (0 je crno, a I_{max} je bijelo)
- skup $[18 \times 19, 8]$ definira površinu papira

Slika–monokromatska 2

- generalno monokromatska slika je funkcija:

$$\mathit{Slika} : \mathit{VertikalnaOs} \times \mathit{HorizontalnaOs} \rightarrow \mathit{Intenzitet},$$

- $\mathit{Intenzitet} = [\mathit{crno}, \mathit{bijelo}]$ je mjeren u odgovarajućoj skali

Slika–monokromatska 3

- monokromatska slika može biti pohranjena u računalu i tada signal slike definiramo kao

$$
\begin{aligned}
&\mathit{RacunalnaSlika} : \mathit{VertikalnaOs} \times \mathit{HorizontalnaOs} \to \mathit{Cjelobrojni}_8, \\
&\mathit{DiskretnaVertikalnaOs} = \{1, 2, \ldots, 450\}, \\
&\mathit{DiskretnaHorizontalnaOs} = \{1, 2, \ldots, 500\}, \\
&\mathit{Cjelobrojni}_8 = \{0, 1, 2, \ldots, 255\}
\end{aligned}
$$

Slika–monokromatska 4

$$DiskretnaVertikalnaOs = \{1, 2, \dots, 450\},$$
$$DiskretnaHorizontalnaOs = \{1, 2, \dots, 500\},$$
$$Cjelobrojni_8 = \{0, 1, 2, \dots, 255\}$$

$$DiskretnaVertikalnaOs = \{1, 2, \dots, 45\},$$
$$DiskretnaHorizontalnaOs = \{1, 2, \dots, 50\},$$
$$Cjelobrojni_8 = \{0, 1, 2, \dots, 255\}$$

Slika u boji 1

- reflektirano svjetlo se definira preko RGB (*red*, *green*, *blue*) vrijednosti pa je:

$$Slika\_u\_Boji : VertikalnaOs \times HorizontalnaOs \to Intenzitet^3,$$

- bilo kojoj točki (x, y) domene odgovara trojka $(r, g, b) \in Intenzitet^3$ pa su RGB vrijednosti pridružene signalu $Slika\_u\_Boji$

$$(r, g, b) = Slika\_u\_Boji(x, y)$$

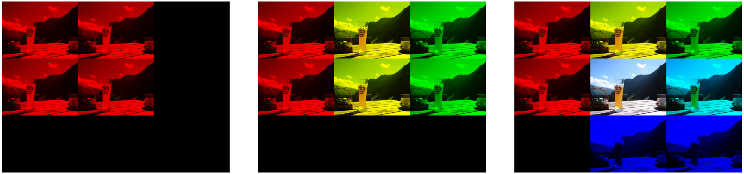
Slika u boji 2

- dakle slika u boji je signal koji se sastoji od tri 2D signala koji predstavljaju tri osnovne boje: crveno (r), zeleno (g) i plavo (b)
- tri komponente slike u boji prikazane su ovim primjerom:



Slika u boji 3

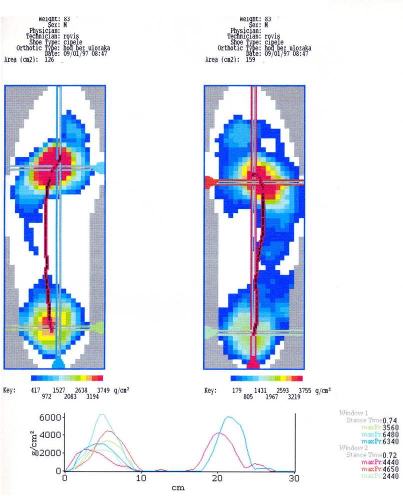
- potpuna slika u boji dobiva se kombinacijom prethodne tri slike:



Slika u boji 4

- uvećana finalna kombinacija

Signal pritiska stopala na podlogu (pri hodu)



Slika 16: Signal pritiska stopala na podlogu

Video 1

- video signal (film) je niz slika koji možemo promatrati kao funkciju tri varijable, i to dvije prostorne i jedne vremenske
- PAL 625 linija po okviru, 25 okvira u s

Video 2

Video 3

Video 4

- video signal možemo opisati funkcijom *Video*

$$Video : VrijemeOkvira \times VertikalnaOs \times HorizontalnaOs \rightarrow Intenzitet^3,$$

- bilo kojoj točki (x, y) okvira u diskretnom trenutku t odgovara trojka $(r, g, b) \in Intenzitet^3$ pa su RGB vrijednosti pridružene signalu *Video*

$$(r, g, b) = Video(t, x, y), \text{ za } \forall t \in \{0, \frac{1}{25}, \frac{2}{25}, \frac{3}{25}, \ldots\}$$