



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
**Biomedicinska instrumentacija**



# Biomedicinska instrumentacija

## P9 – Ultrazvučni medicinski uređaji



Ak.god. 2009./2010.

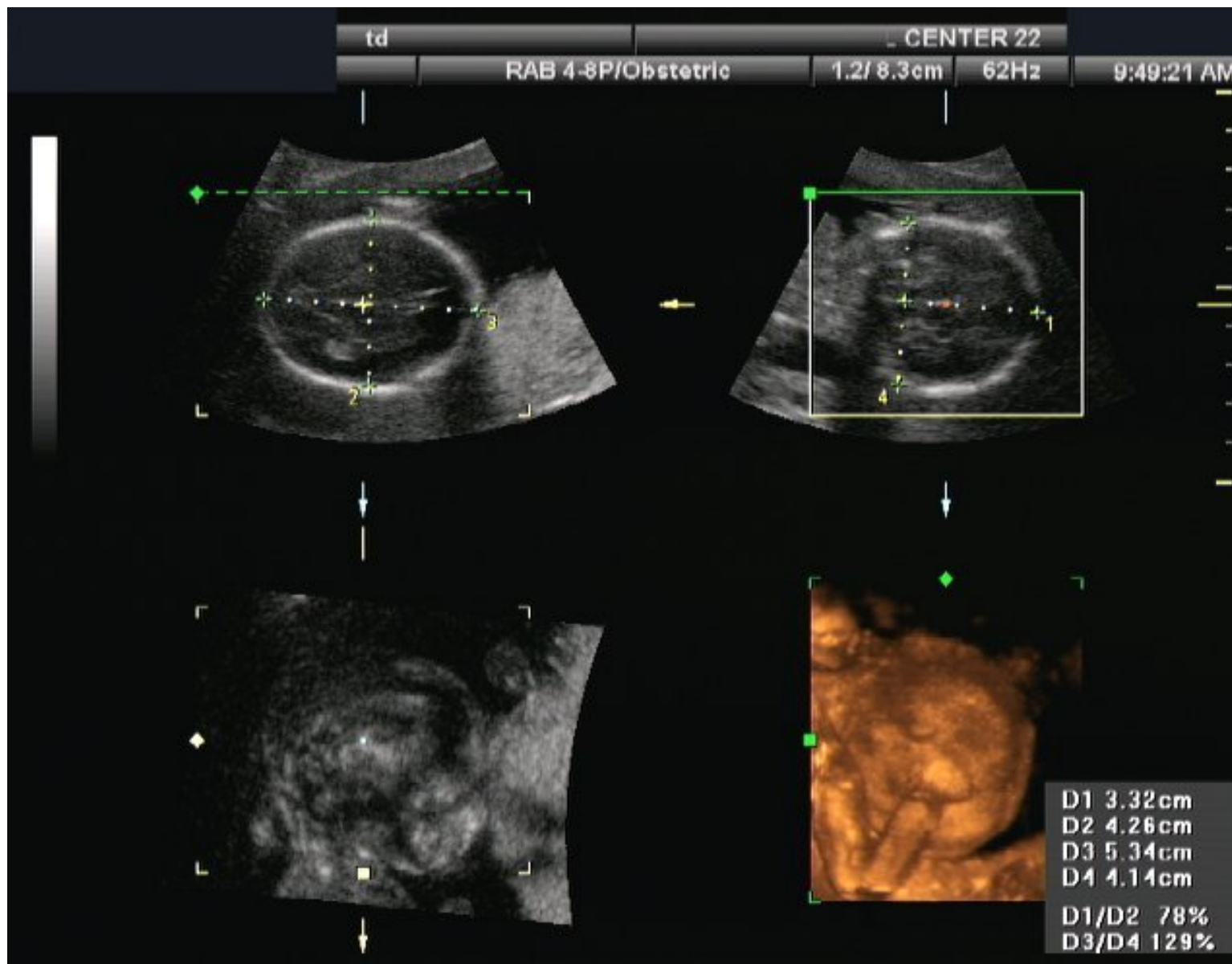
prof.dr.sc. Ratko Magjarević

# Ultrazvuk

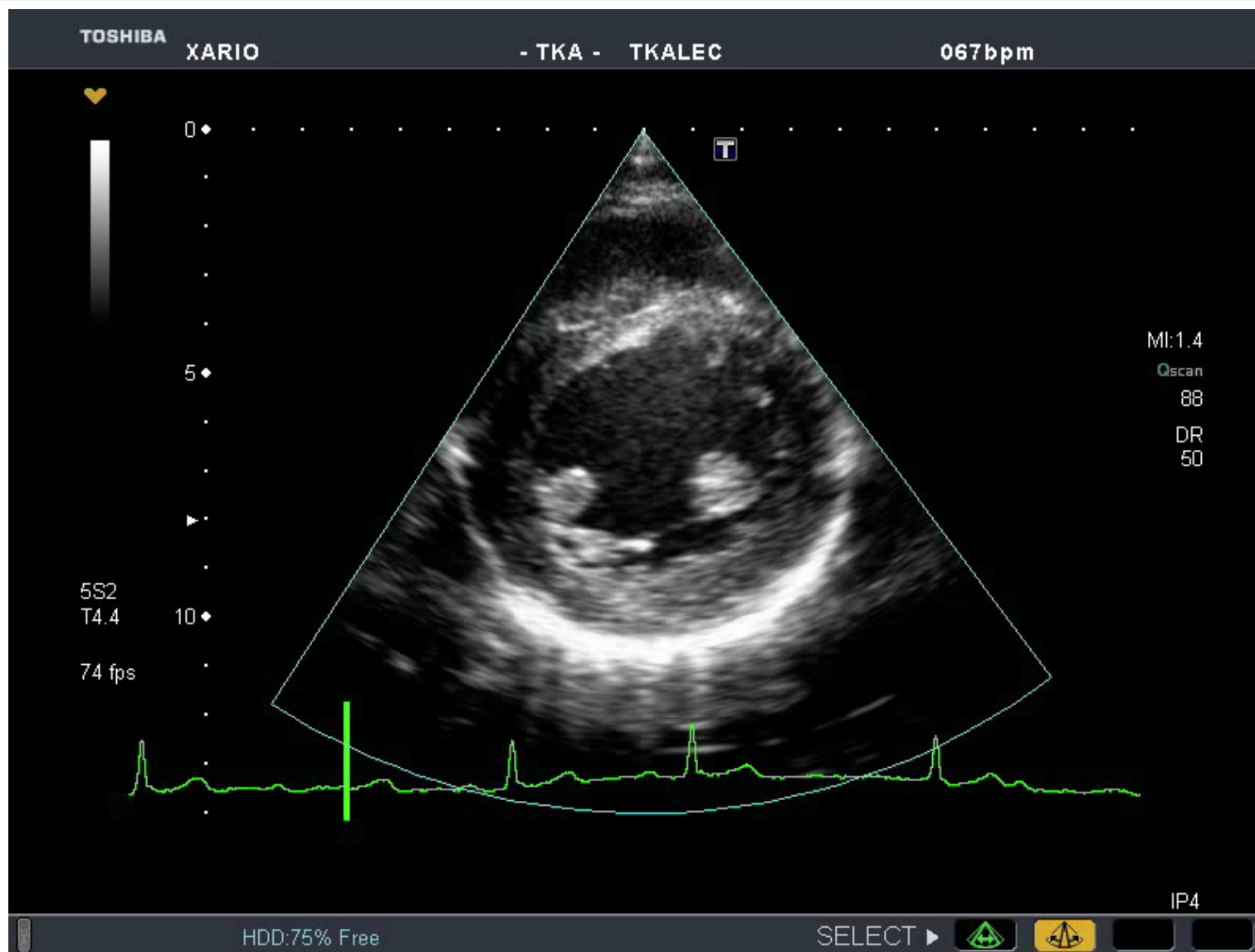
---

- Fizikalna načela ultrazvuka
  - Ultrazvuk je (isto kao i zvuk) mehaničko titranje čestica medija kroz koji se prostire
  - Područje frekvencija koje smatramo ultrazvukom je iznad čujnog područja, tj. iznad otprilike 20 kHz
- Načela rada medicinskih ultrazvučnih uređaja
  - Ultrazvučna dijagnostika:
    - impulsni ehoskopi za dobivanje slojnih slika unutrašnjosti tijela
    - uređaji na Dopplerovom načelu za mjerenje i prikazivanje pomaka struktura u tijelu
    - uređaji koji su zasnovani na oba načela
    - u medicinskoj dijagnostici koriste se najčešće frekvencije ultrazvuka od 1MHz-18MHz
  - Ultrazvučna terapija
    - razbijanje bubrežnih i ureterskih kamenaca
    - dubinsko zagrijavanje tkiva

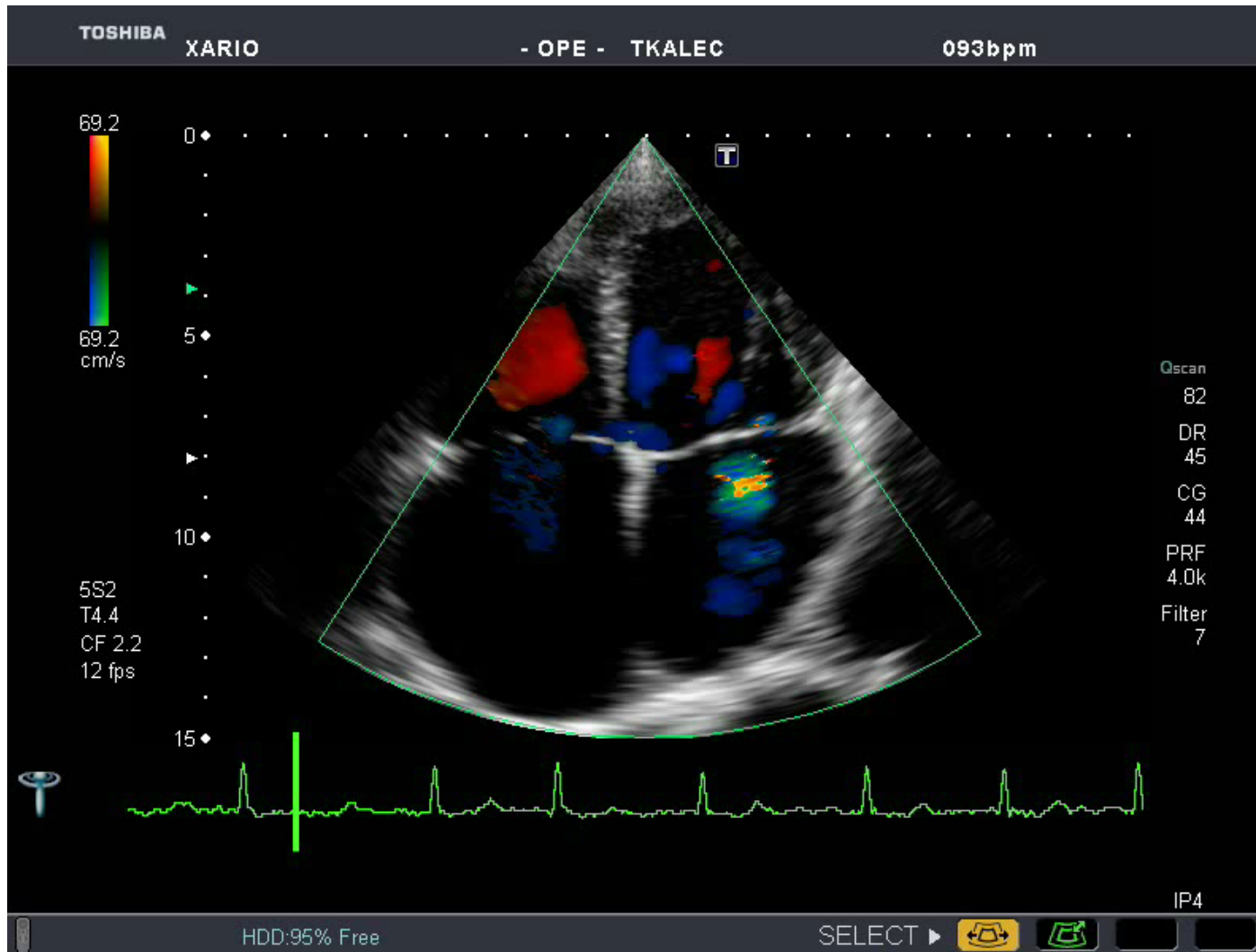
# Ultrazvučne 2D slike



# UZV srca u stvarnom vremenu

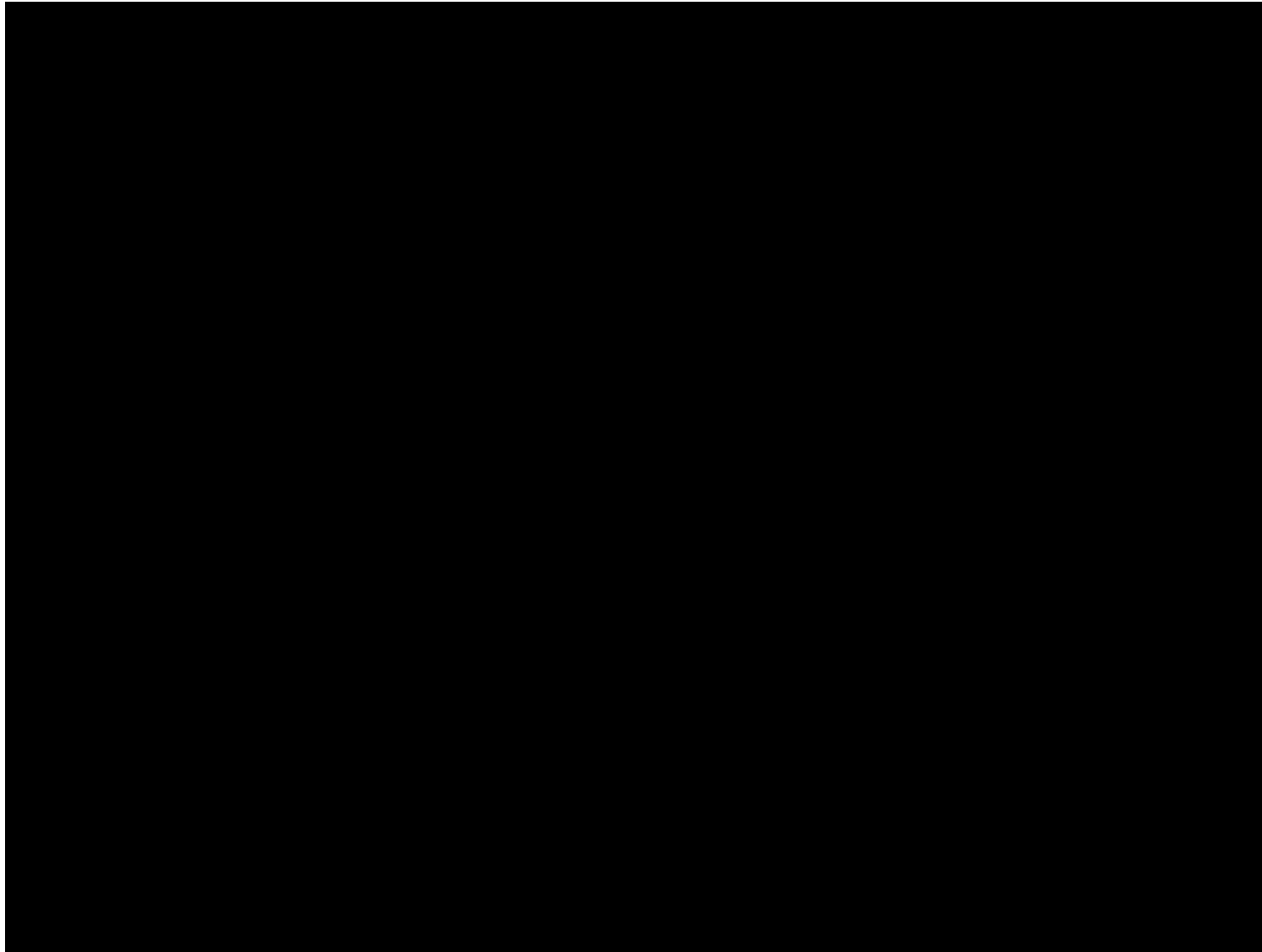


# UZV uz mjerenje protoka



# 3D ultrazvuk

---



# Rasprostiranje ultrazvuka

- Mehaničko titranje čestica može se opisati jednačbom

$$s = A \cdot \sin \omega t$$

gdje se trenutni pomak  $s$  čestice može za ultrazvuk koji se širi brzinom  $c$  opisati i na prostornu dimenziju  $x$  (primjer za jednu dimenziju)

$$s = A \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

- Položaj čestice  $s$  na udaljenosti  $x$  od mjesta gdje je zraka ultrazvuka ušla u medij ovisi o proteklom vremenu  $t$
- Brzina širenja ovisna o gustoći tvari

| TVAR                 | BRZINA $c$ (m/s) |
|----------------------|------------------|
| voda (20 °C)         | 1480             |
| zrak (normalni tlak) | 331              |
| pleksistaklo         | 2680             |
| aluminij             | 6400             |
| mišići               | 1585             |
| krv                  | 1570             |
| kosti lubanje        | 4080             |
| mozak                | 1541             |

# Rasprostiranje ultrazvuka

---

- Brzina gibanja čestice

$$v = \frac{ds}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot t$$

- odnosno njezina titranja manja je od brzine širenja ultrazvuka po pravcu  $x$ .
- Opisano gibanje čestice je **longitudinalno** (u smjeru širenja vala). Transverzalno titranje samtra se zanemarivim.

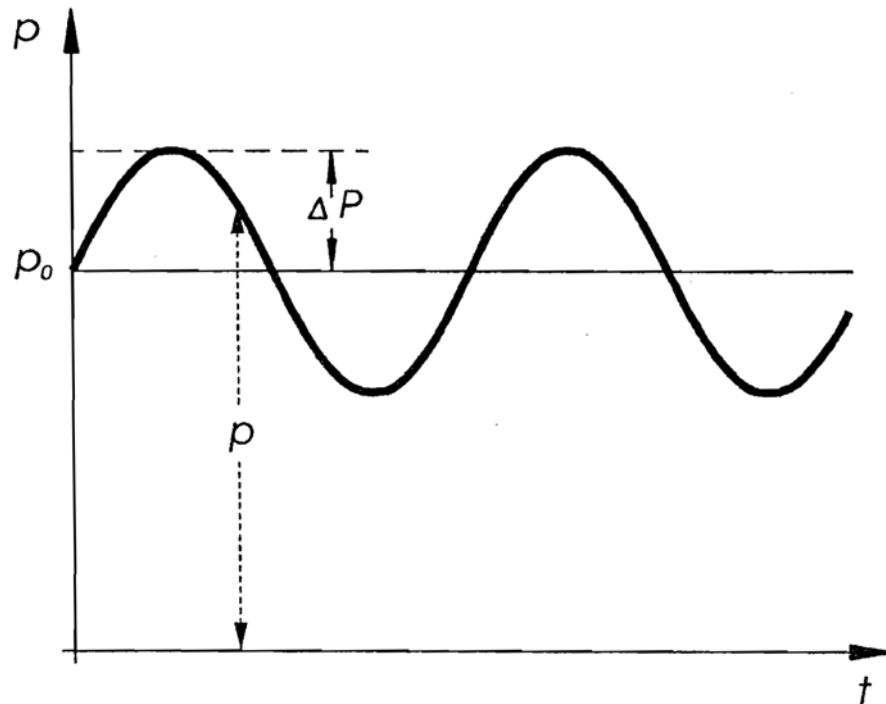
# Rasprostiranje ultrazvuka

## ➤ Gustoća sredine

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_m \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) + \Psi \right]$$

## ➤ Tlak sredine

$$p = p_0 + \Delta P \cdot \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) + \varphi \right]$$



- gdje je  $\rho_0$  srednja vrijednost gustoće, a  $p_0$  srednja vrijednost tlaka
- odnosno  $\Delta\rho_m$  maksimalna promjena gustoće, a  $\Delta P$  maksimalna promjena tlaka izazvane ultrazvukom

# Pretvornici zvuka u napon

---

- Pretvorba zasnovana na promjeni tlaka na pretvorniku na prijamnoj strani

$$\Delta P = v \cdot \rho_0 \cdot c$$

$v$ ... brzina čestice

$\rho_0$ ...srednja gustoća

$c$ ... brzina ultrazvuka

- Promjena tlaka uzrokuje pomicanje membrane ili titranje piezoelektričnog kristala (pretvornika) kapaciteta  $C$ , pri čemu se inducira naboj  $q$

$$q = u \cdot C$$

- Gdje je prijamna strana i o čemu ovisi inducirani naboj?

# Akustička impedancija

- Analogija mehanika-elektrotehnika:

$$p \square u$$

$$v \square i$$

- Akustična impedancija nekog tkiva

$$Z_a = \frac{\Delta P}{v} = \rho \cdot c \quad \left[ \frac{Ns}{m^3} = \frac{kg}{m^2 s} \right]$$

uz pretpostavku  $\Delta \rho_m \square \rho_o$

| TVAR                   | Z (Ns/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------------------|
| zrak (normalni uvjeti) | 0,0004                 |
| voda                   | 1,48                   |
| aluminij               | 17,4                   |
| čelik                  | 45,7                   |
| mišići (srednja vrsta) | 1,70                   |
| krv                    | 1,61                   |
| kosti lubanje          | 7,80                   |
| mozak                  | 1,58                   |
| mast                   | 1,38                   |
| bubreg                 | 1,62                   |
| jetra                  | 1,65                   |
| aorta                  | 1,69                   |

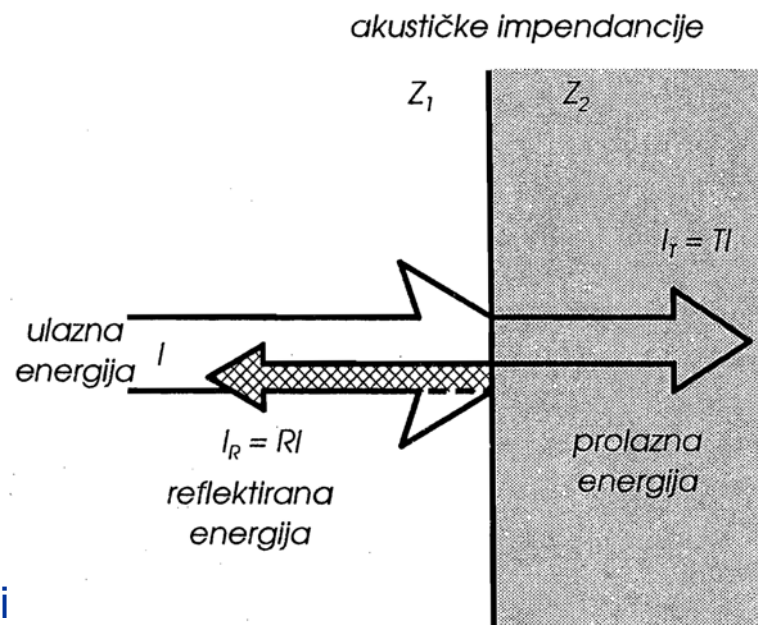
# Koeficijent refleksije

- Prilikom širenja ultrazvuka, na granici sredstava (organa) dolazi do refleksije dijela odašlane energije (prema odašiljaču)
- Koeficijent refleksije  $R$  ovisi o impedanciji pojedinog sredstva

$$R = \frac{I_R}{I_1} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Intenzitet ultrazvuka  $I$  definiran je kao energija ultrazvuka  $E$  koja prođe kroz jedinični presjek  $A$  u jedinici vremena  $t$

$$I = \frac{E}{A \cdot t} \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$



Bi

# Koeficijent transmisije

- Koeficijent transmisije (prolaznosti)

$$T = \frac{I_T}{I_1} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$T + R = 1$$

- Pri dolasku na sljedeću granicu sredstava (tkiva) ponovno će se dio energije reflektirati (vratiti) prema izvoru
- Ako ne promatramo energiju, nego tlak, izrazi za koeficijent refleksije i transmisije glase:

$$R^* = \frac{\Delta p_R}{\Delta p} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$T^* = \frac{\Delta p_T}{\Delta p} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

# Primjer:

➤ Koef. refleksije na granici:

- mišić – masno tkivo

$$R = \frac{I_R}{I_1} = \left( \frac{Z_{mi} - Z_{ma}}{Z_{mi} + Z_{ma}} \right)^2 = \left( \frac{1,7 - 1,38}{1,7 + 1,38} \right)^2 = 0,01$$

- kost – meko tkivo(mišić)

$$R = \frac{I_R}{I_1} = \left( \frac{Z_{ko} - Z_{mt}}{Z_{ko} + Z_{mt}} \right)^2 = \left( \frac{7,8 - 1,7}{7,8 + 1,7} \right)^2 = 0,42$$

| TVAR                   | Z (Ns/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------------------|
| zrak (normalni uvjeti) | 0,0004                 |
| voda                   | 1,48                   |
| aluminij               | 17,4                   |
| čelik                  | 45,7                   |
| mišići (srednja vrsta) | 1,70                   |
| krv                    | 1,61                   |
| kosti lubanje          | 7,80                   |
| mozak                  | 1,58                   |
| mast                   | 1,38                   |
| bubreg                 | 1,62                   |
| jetra                  | 1,65                   |
| aorta                  | 1,69                   |

# Prigušenje

- Intenzitet energije prolaskom kroz homogenu tvar (tkivo) smanjuje se po eksponencijalnom zakonu:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

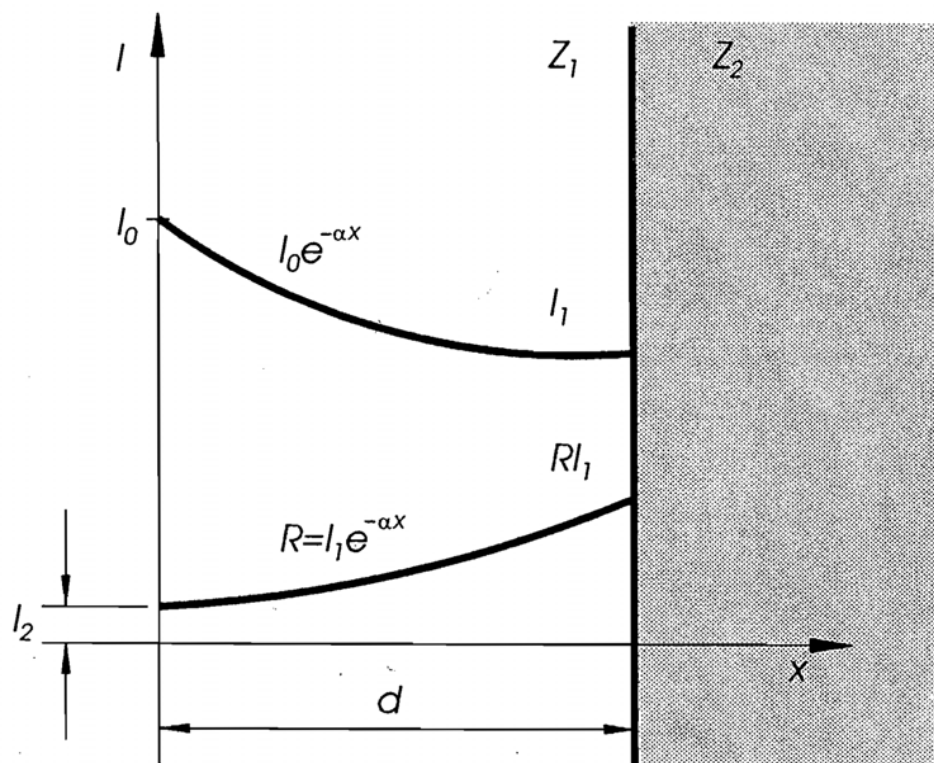
pa je energija  $I_2$  primljena na prijarniku

$$\frac{I_2}{I_0} = R \cdot e^{-\alpha 2d}$$

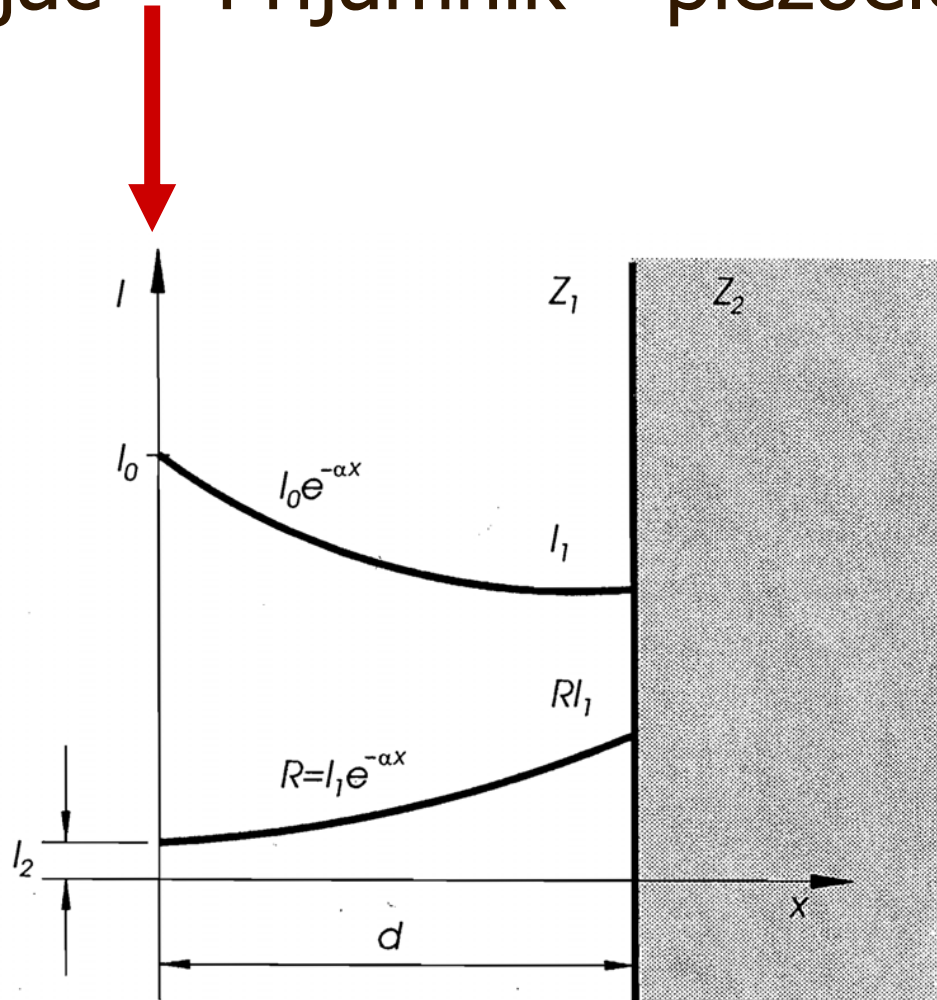
gdje je  $a$  koeficijent prigušenja, različit za tkiva.  
 $a$  je ujedno i funkcija frekvencije

$$f^n$$

gdje se  $n$  za biološka tkiva kreće u granicama od 1 do 1,2

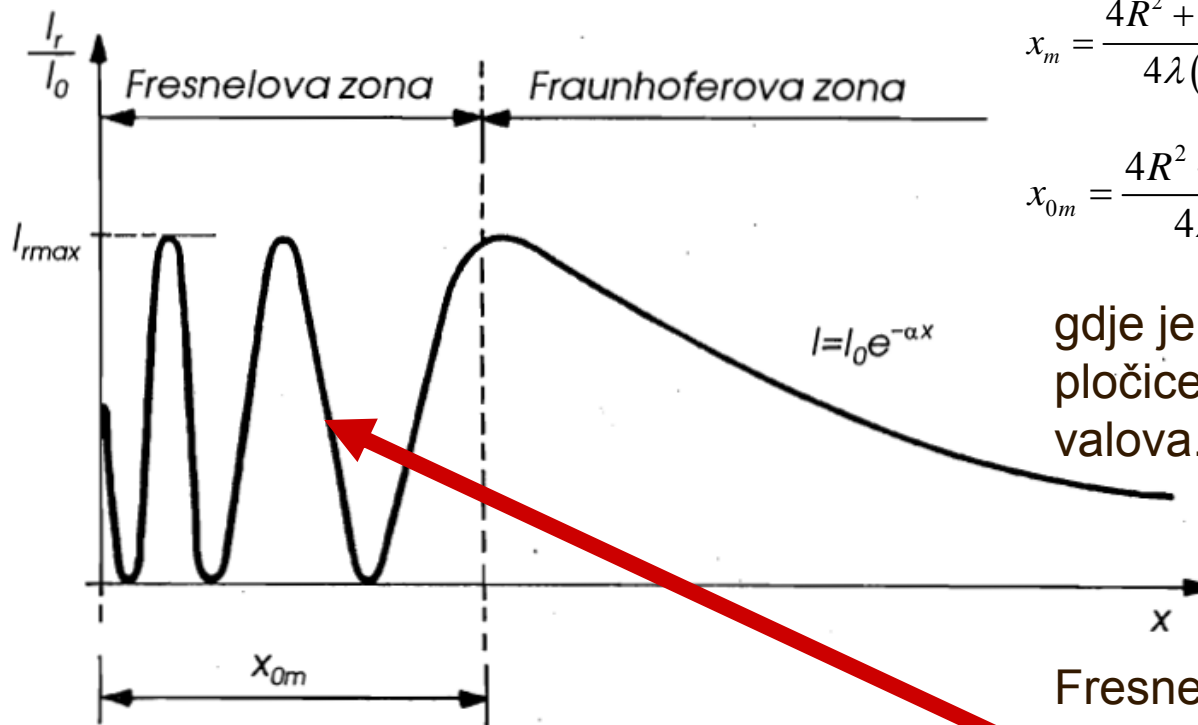


# Odašiljač = Prijamnik – piezoelektrički kristal



# Fresnelova/Fraunhoferova zona

- Promjena energije u neposrednom okolišu oko izvora i na većoj udaljenosti



$$x_m = \frac{4R^2 + \lambda(2m+1)}{4\lambda(2m+1)} \dots \text{maksimumi u Fresnelov zoni}$$

$$x_{0m} = \frac{4R^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{R^2}{\lambda} \dots \text{najudaljeniji maksimum}$$

gdje je  $R$  promjer piezoelektrične pločice, a  $\lambda$  valna duljina ultrazvučnih valova.

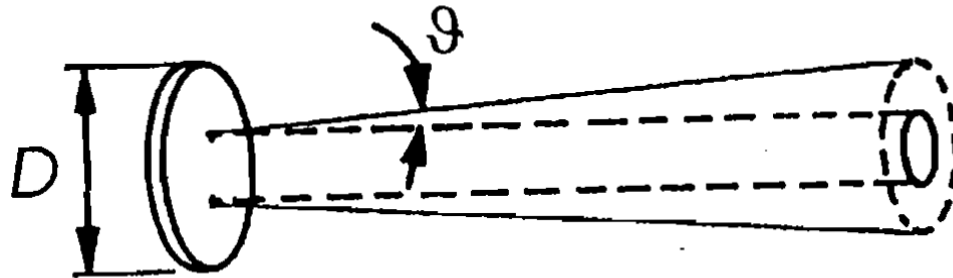
Fresnelova zona se zbog fluktuacije energije ne može koristiti za mjerenje (dobivanje ultrazvučnih slika)

# Rasap snopa

- Kut divergencije (rasapa) snopa

$$\theta = \arcsin\left(0,61\frac{\lambda}{D}\right) \approx 0,61\frac{\lambda}{D} \dots \text{za } \lambda \ll D$$

gdje je  $D=2R$ ,  $R$  promjer pločice piezoelektričkog kristala



- Kompromis:  $D / \lambda > 10$

# Razlučivost UZV

➤ Razlučivost ovisi o:

- Promjeru UZV snopa ( $d$ )
- Valnoj duljini UZV ( $\lambda$ )

$$d \geq \lambda = \frac{c}{f}$$

- Npr.  $c = 1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   
 $f = 2 \text{ MHz}$   
 $\Rightarrow d > 0,75 \text{ mm}$

➤ Niže frekvencije (veći organi, manja razlučivost, veća dubina)

➤ Više frekvencije (manji organi) → veće prigušenje

- |                           |               |          |
|---------------------------|---------------|----------|
| • Ginekologija            | → duboko → LF | 2-5 MHz  |
| • štitnjača, mozak, dokje | → srednje →   | 5-8 MHz  |
| • oftamogoiija            | → plitko → HF | 5-10 MHz |

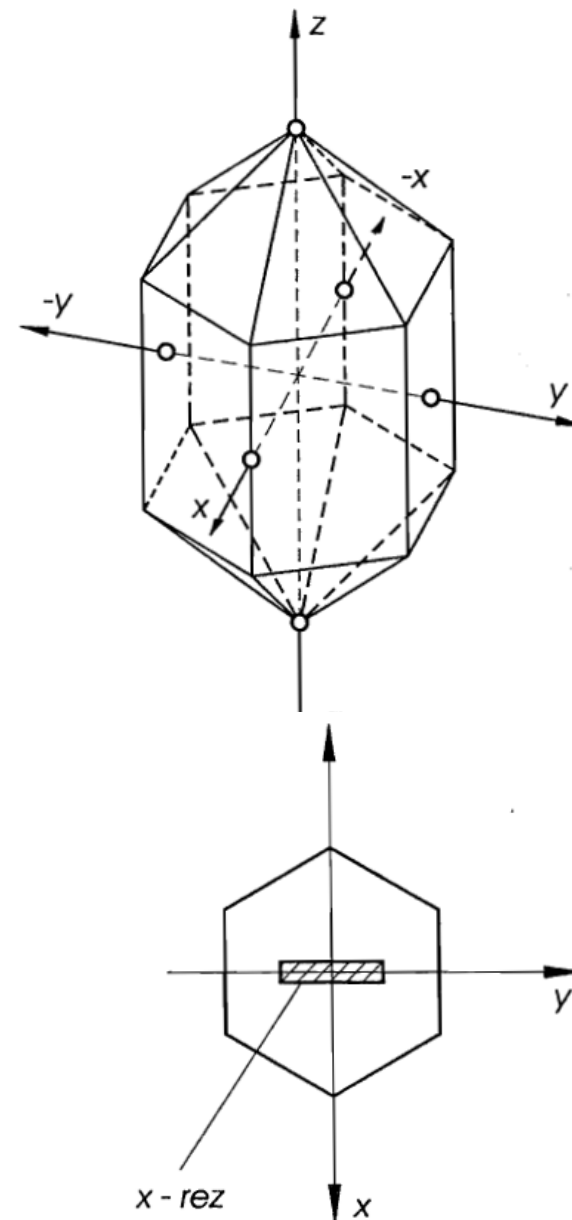
# Diskusija

---

- Može li se ostvariti ultrazvučna biopsija?
  - Razmislite o tehničkim značajkama UZV, svojstvima tkiva i njihovoj dubini (položaju) u tijelu.

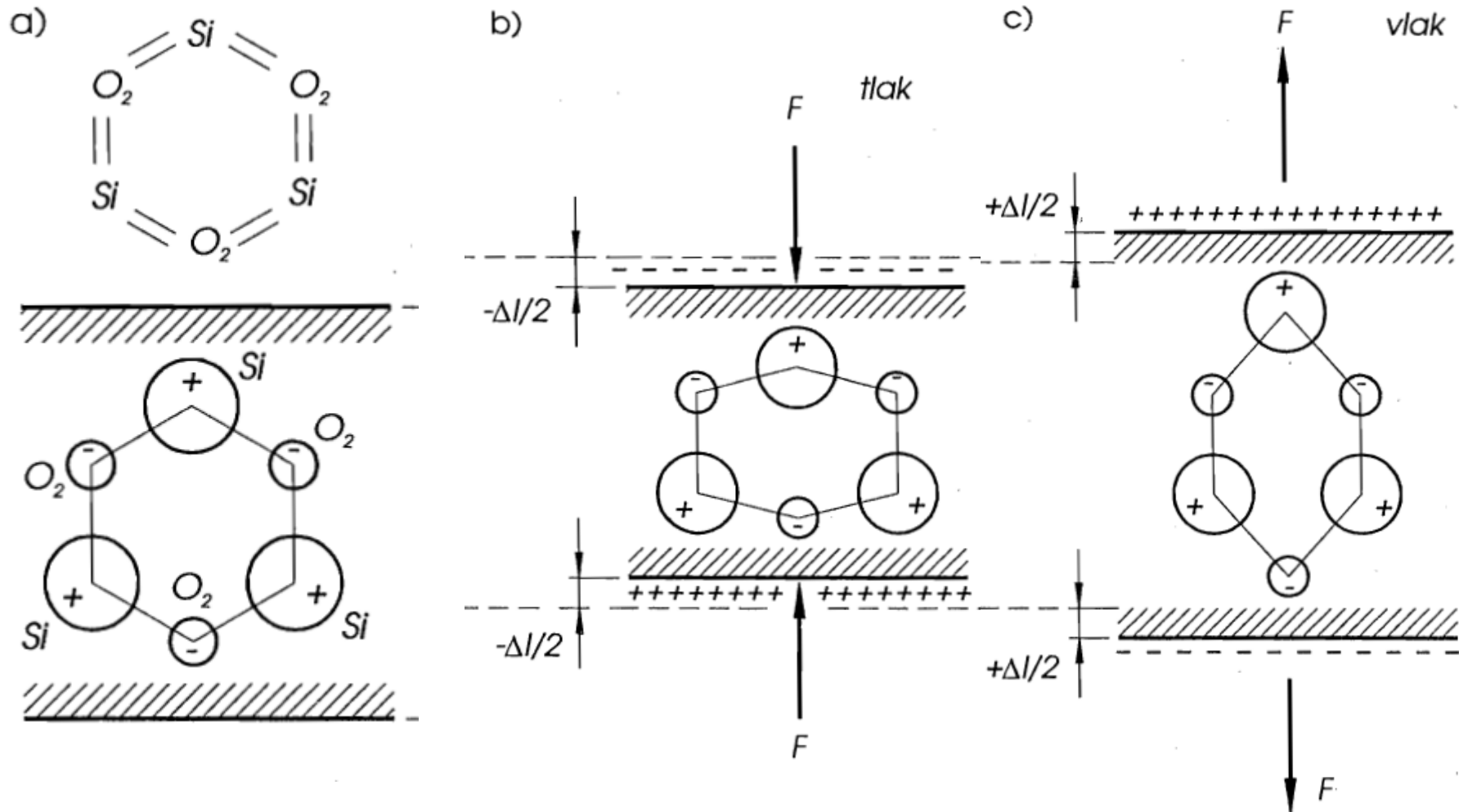
# Ultrazvučni pretvornici

- Piezoelektrični (do 1GHz)
- Magnetostrikcijski (10-100kHz)
- Materijali:
  - Kristali
    - Kristal kremena
    - Niobat litija
  - Amorfni materijali:
    - Mikrokristalične strukture
    - Neki keramički materijali



# Kristal kremena

## ➤ Kristal kremena



# Ultrazvučni pretvornici

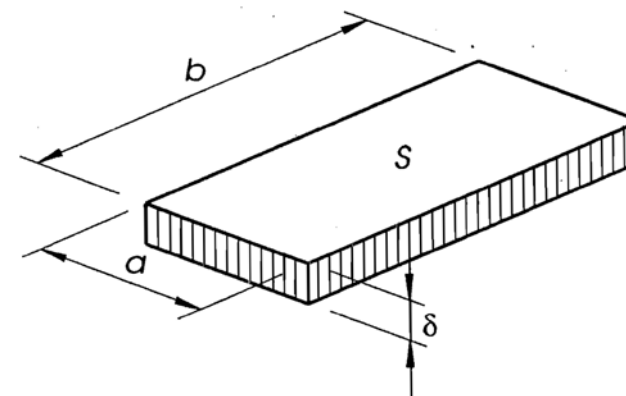
$$q = d_x \cdot F_x$$

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{S}{\delta}$$

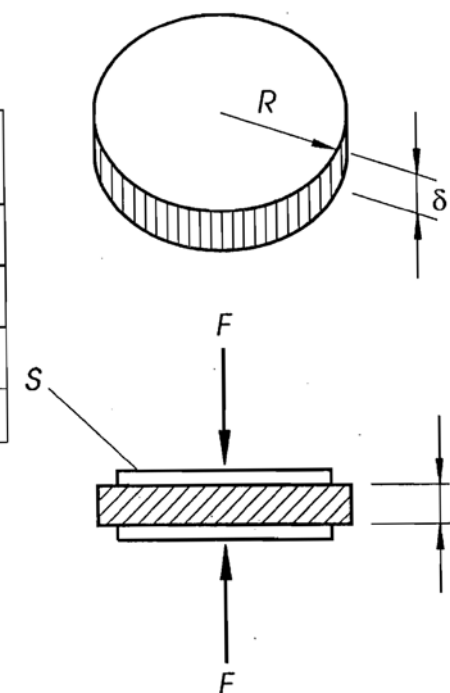
$$u = \frac{d_x}{C} F_x = \frac{d_x \cdot \delta \cdot F_x}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}$$

$$E_x = \frac{u}{\delta} = \frac{d_x}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'} \frac{F_x}{S} = g \cdot \sigma_x$$

$$\frac{\Delta \delta}{\delta_0} = \frac{\sigma_x}{E_m} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'}{d_x \cdot E_m} E_x = \frac{1}{h}$$



| Piezelektrični materijal | Brzina zvuka $c$ m/s | $\varepsilon'_s$ statička | Piezomodul $d \cdot 10^{-12}$ As/N | Mehanički $Q_m$ | $g \cdot 10^{-3}$ V m/N |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Kremen                   | 5 470                | 4,5                       | 2,31                               | $>10^4$         | 58                      |
| Barij-titanat            | 4 200 ÷ 4 600        | 1 500                     | 45 ÷ 100                           | 400             | 175                     |
| Olovni cirkonat-titanat  | 3 200 ÷ 3 500        | 2 300                     | 160-320                            | 350             | ?                       |
| Segnetova sol            | 3 100                | 350                       | 275                                | -               | 90                      |



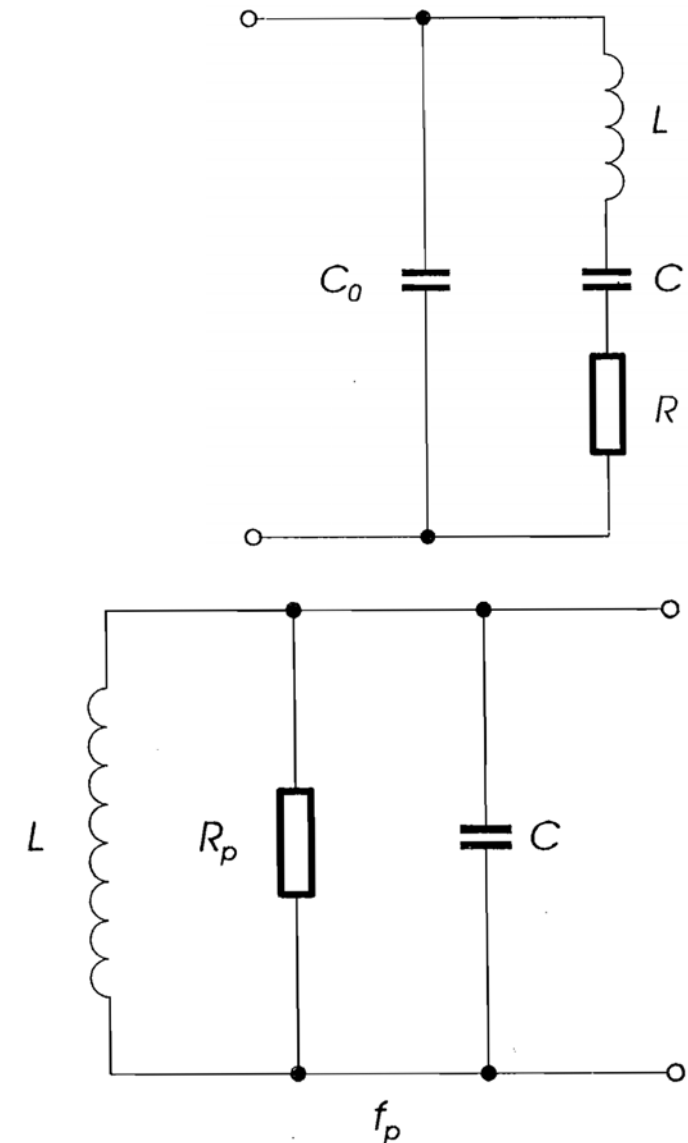
# Ultrazvučni pretvornici

## ➤ Faktor kvalitete

$$Q = \frac{R_p}{\omega L} = \frac{\omega L}{R_s}$$

## ➤ Rezonantna frekvencija

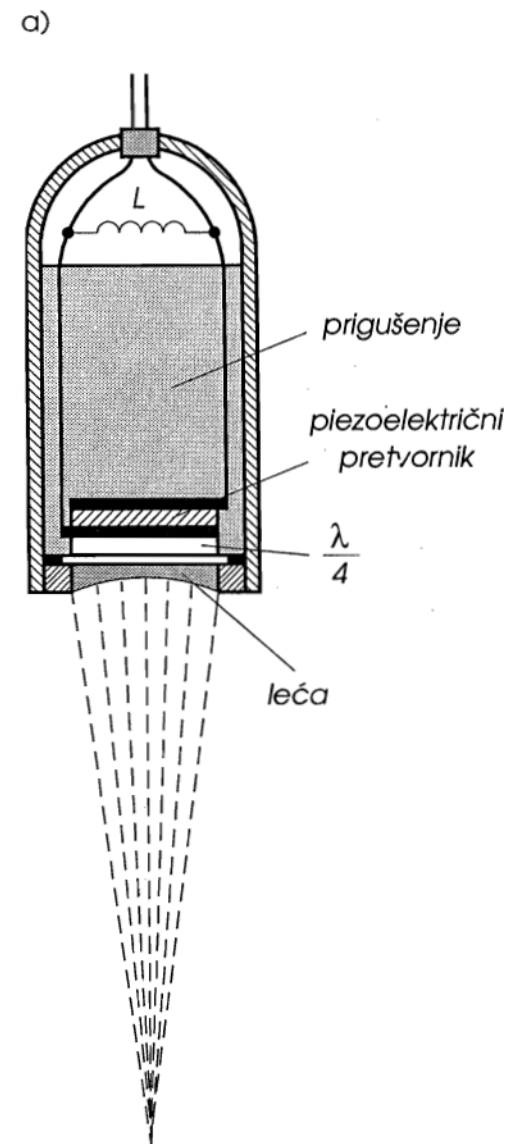
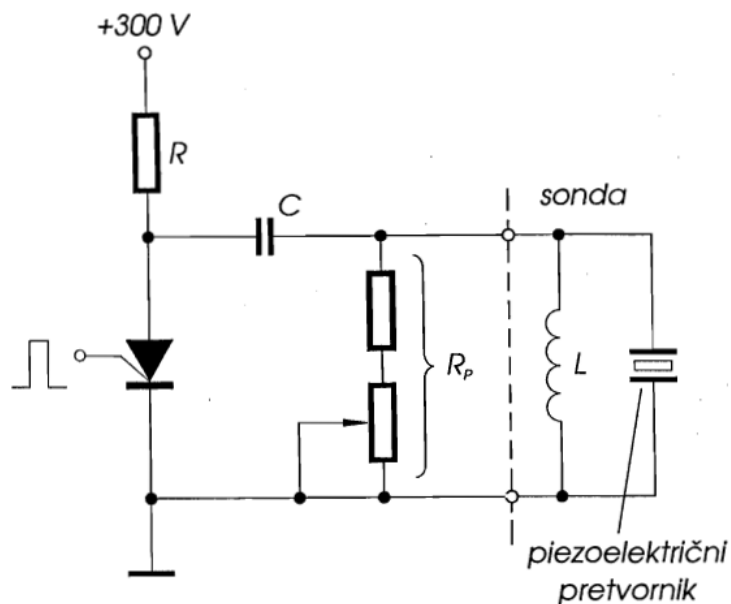
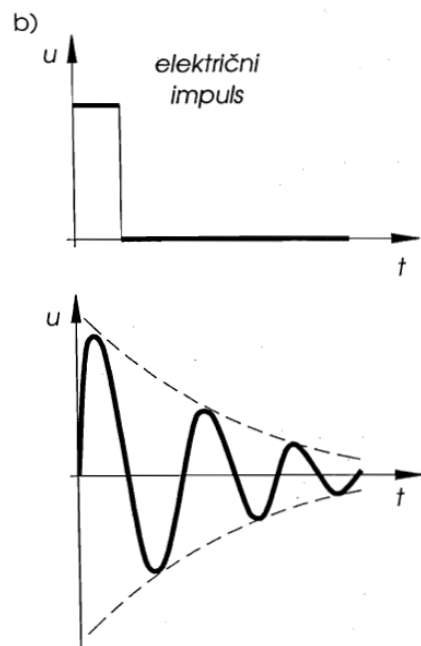
$$f_0 = \frac{c}{2\delta}$$



# Ultrazvučna sonda

## ➤ Sabirna leća:

- Zvuk: bikonkavna  
→ c kroz leću brže
- Svijetlo: konveksna  
→ c kroz leću sporije



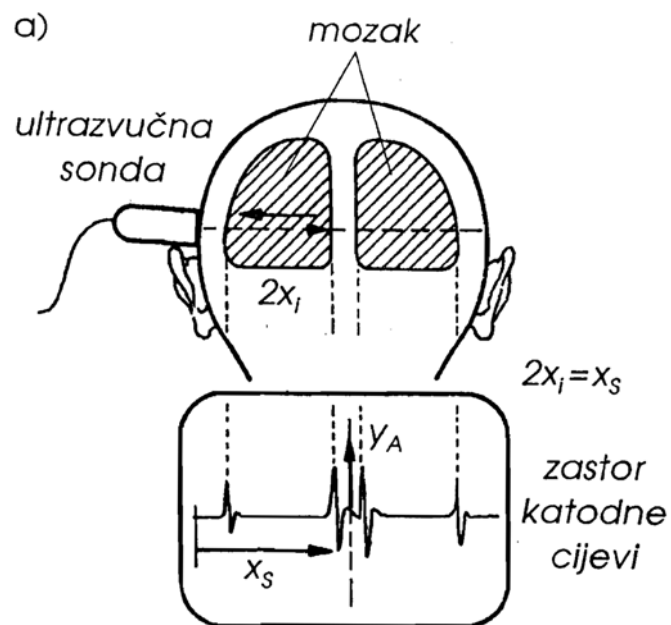
# A prikaz

- Eksponencijalni porast pojačanja s vremenom:

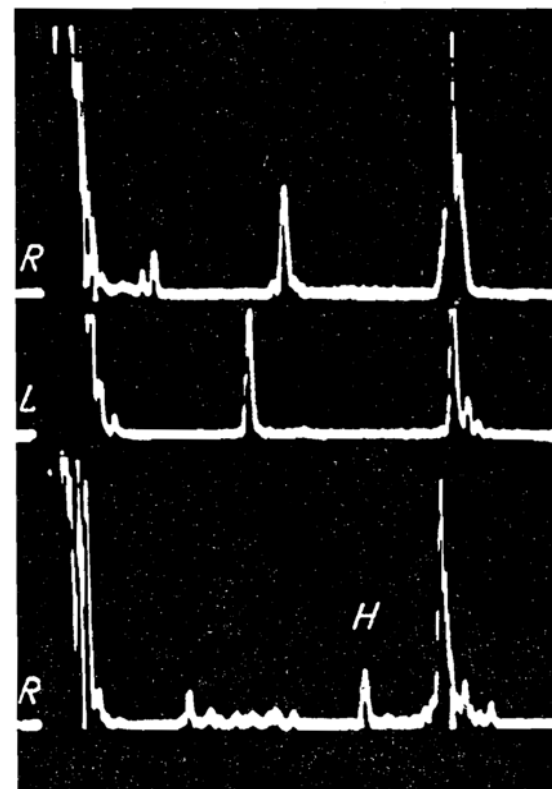
$$A = A_0 \cdot e^{k_1 u_p}$$

$$= A_0 \cdot e^{k_1 k_2 t}$$

$$A I_r = A_0 I_0 R = konst.$$

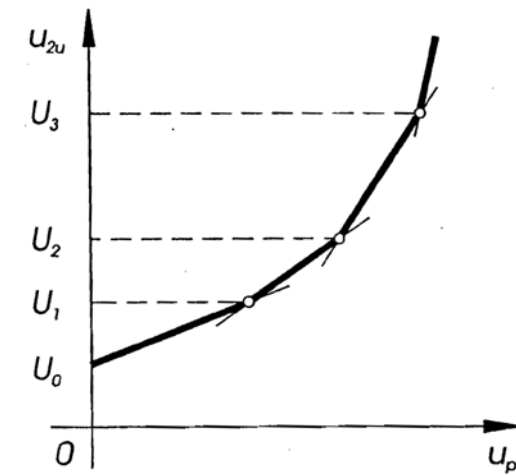
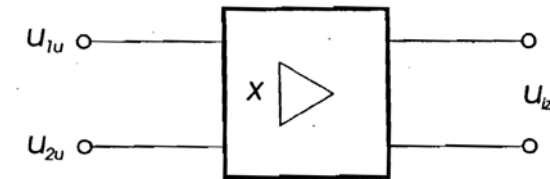
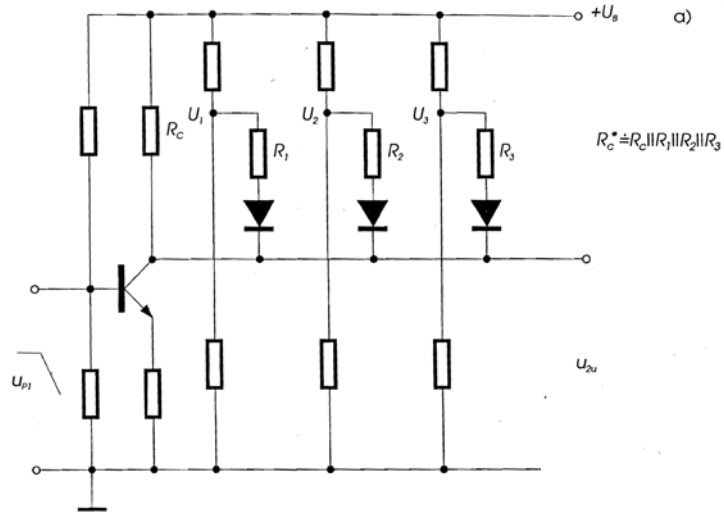


b)

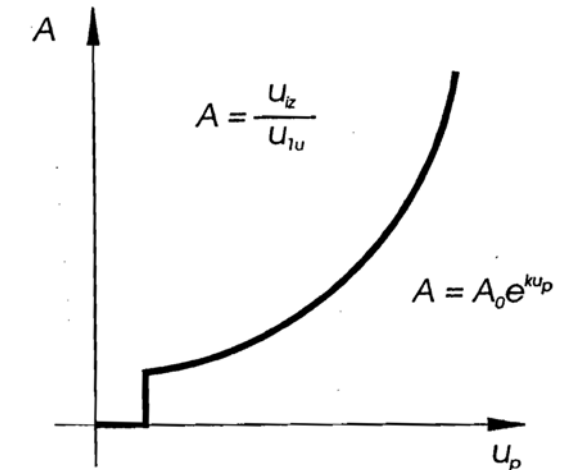
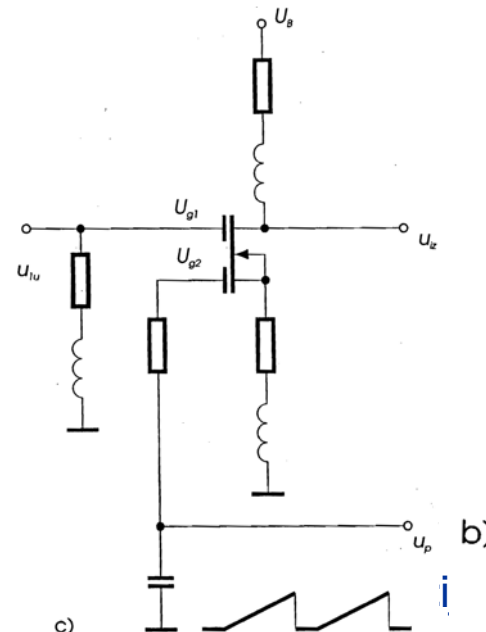


# Sklopovi za dobivanje exp. funk.

## ➤ Sa diodama

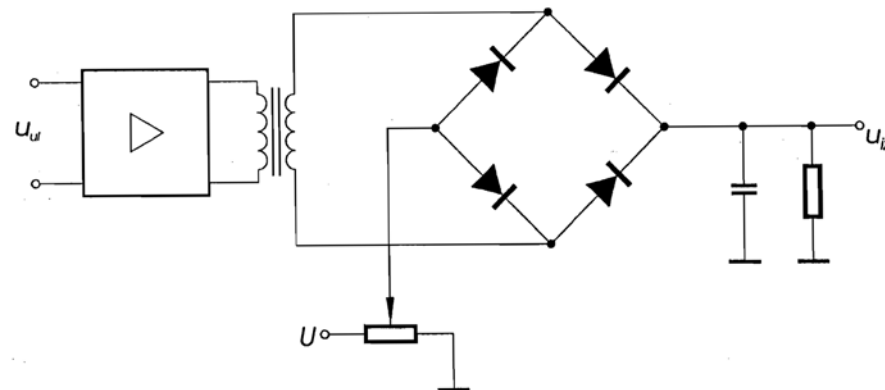
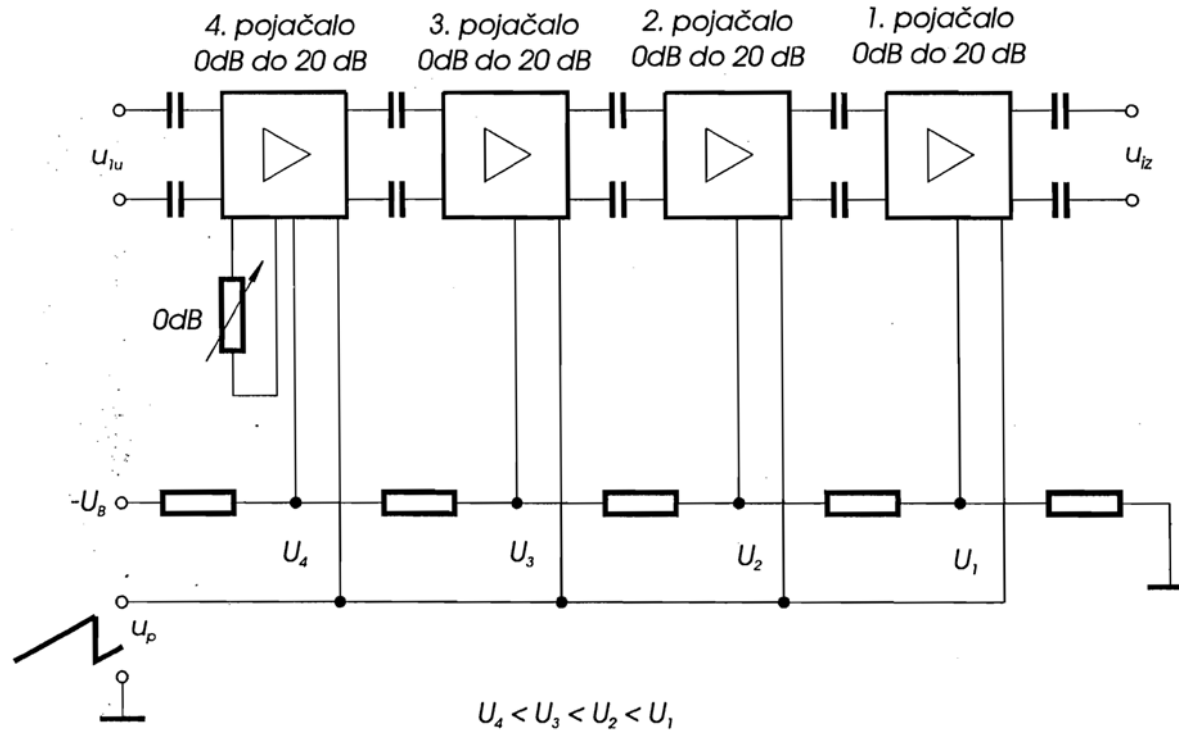


## ➤ sa MOSFET-om



Bion

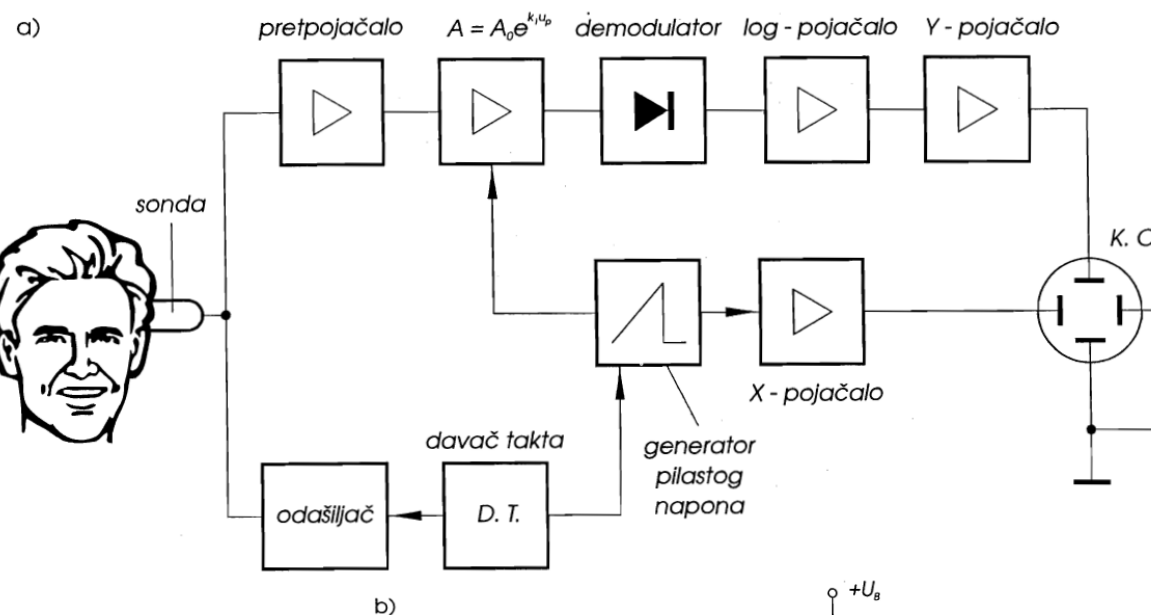
# Eksponecijaln f-ja sa 4 pojačala



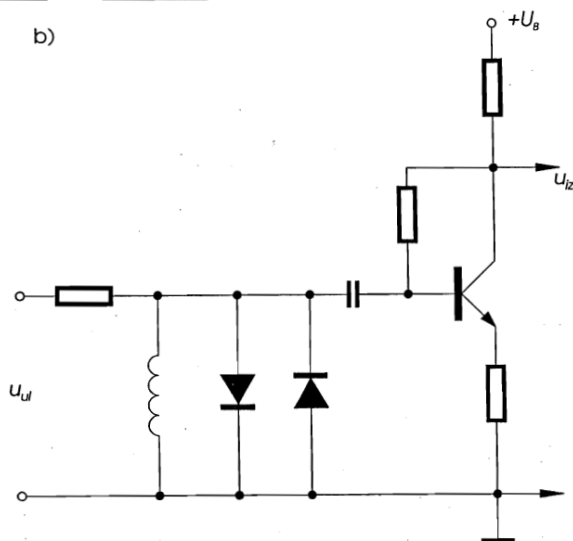
a

# Ehoencefalograf

## ➤ Blok shema

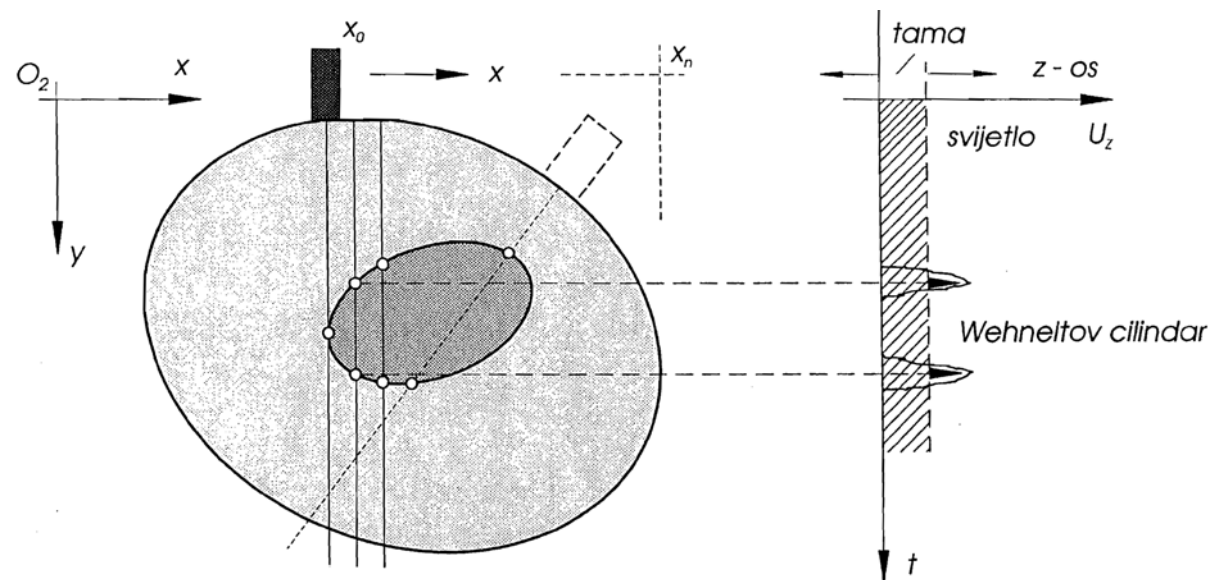


## ➤ pretpojačalo

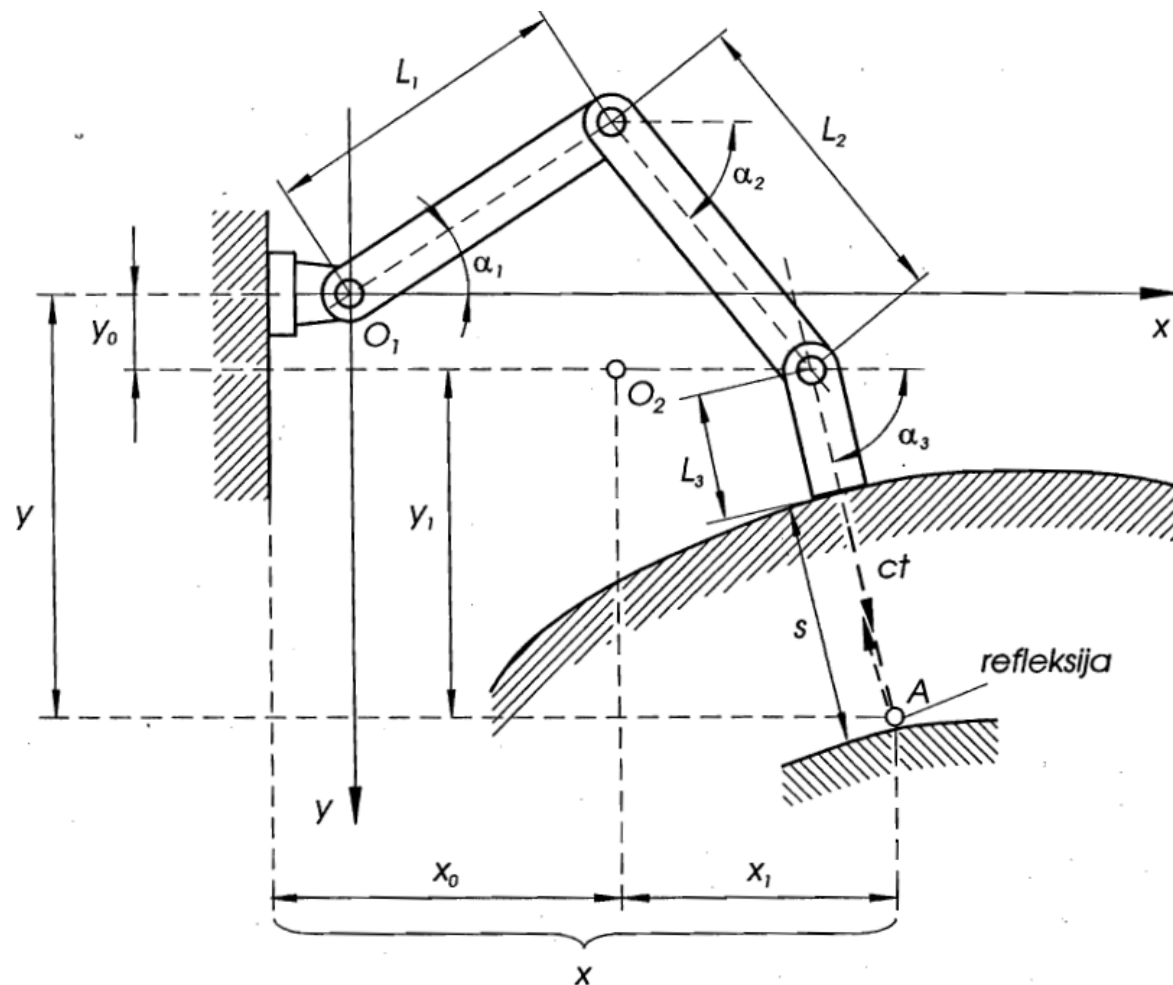


# B prikaz

## ➤ Načelo dobivanja B prikaza

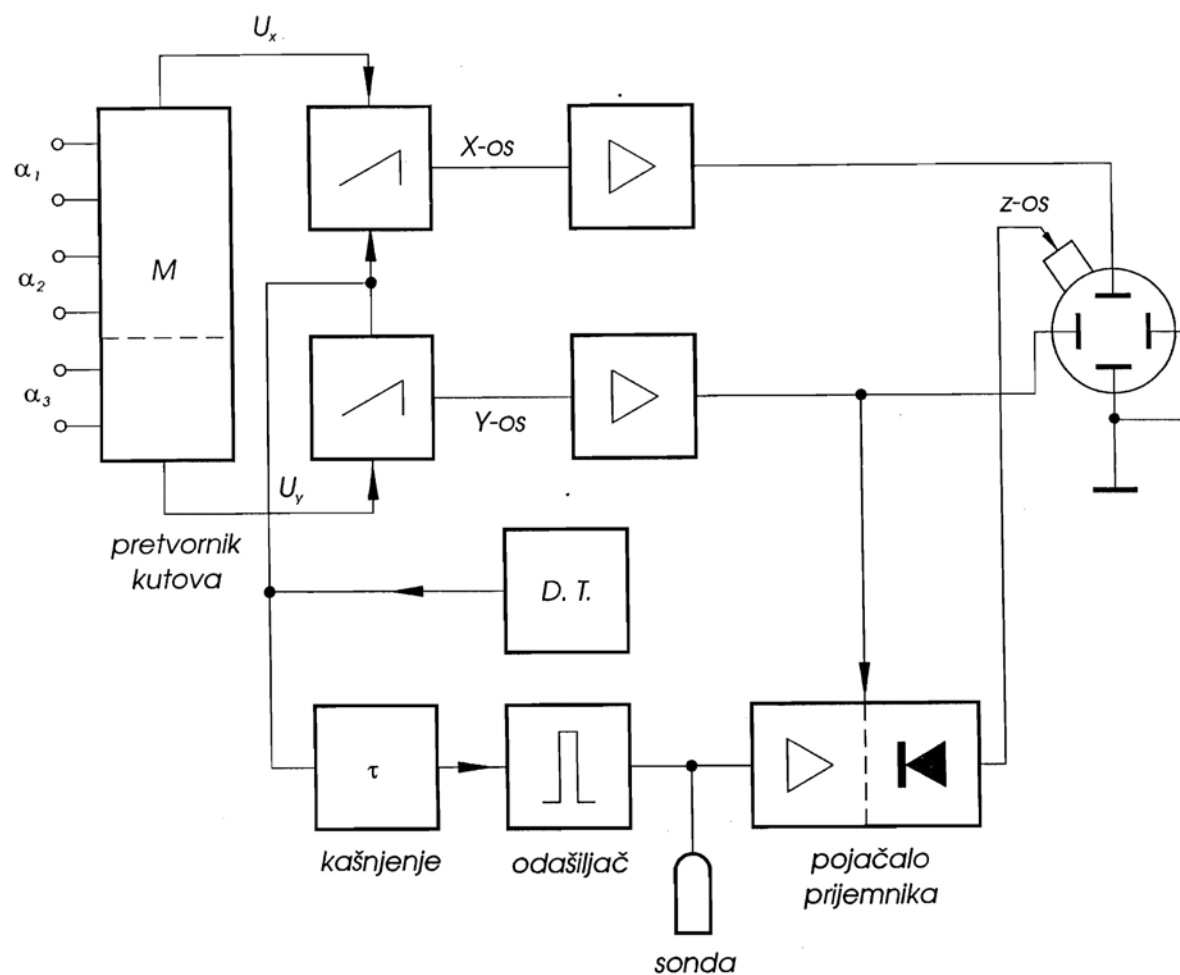


# Određivanje pozicije sonde



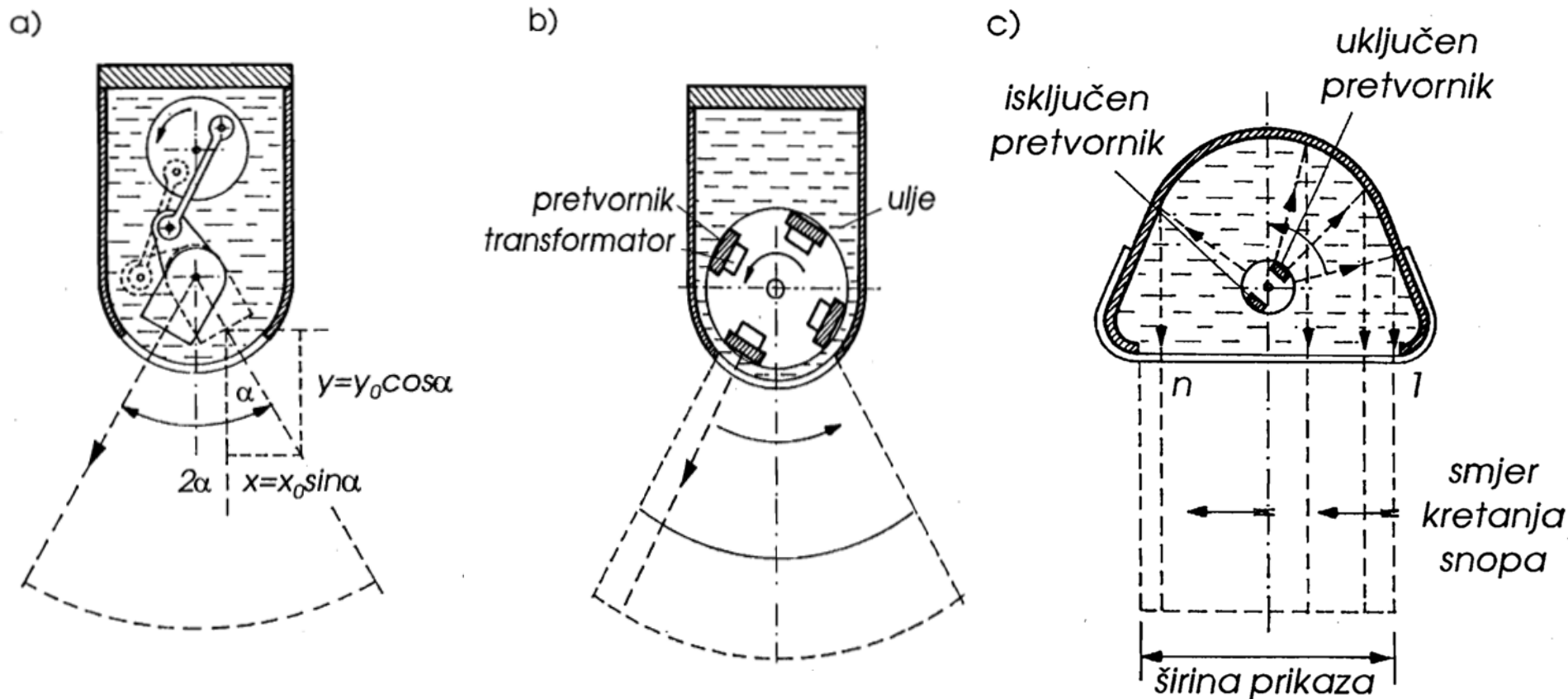
# B prikaz

- Blok shema uređaja za dobivanje B prikaza



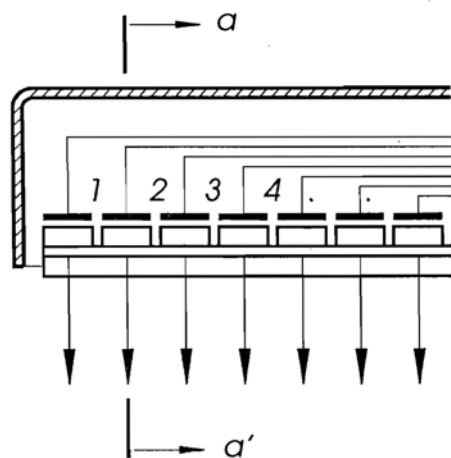
# Mehaničko skeniranje

Zadržalo se u oftalmologiji, sustavi poput a)

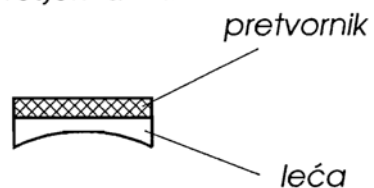


# Sonde s lineranim nizom pretvornika

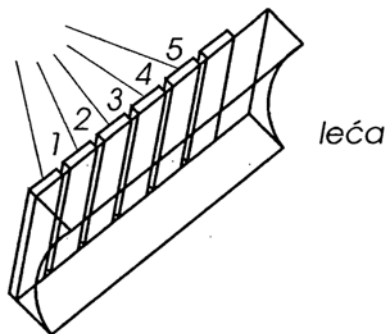
a) od 64 do 420 pretvornika



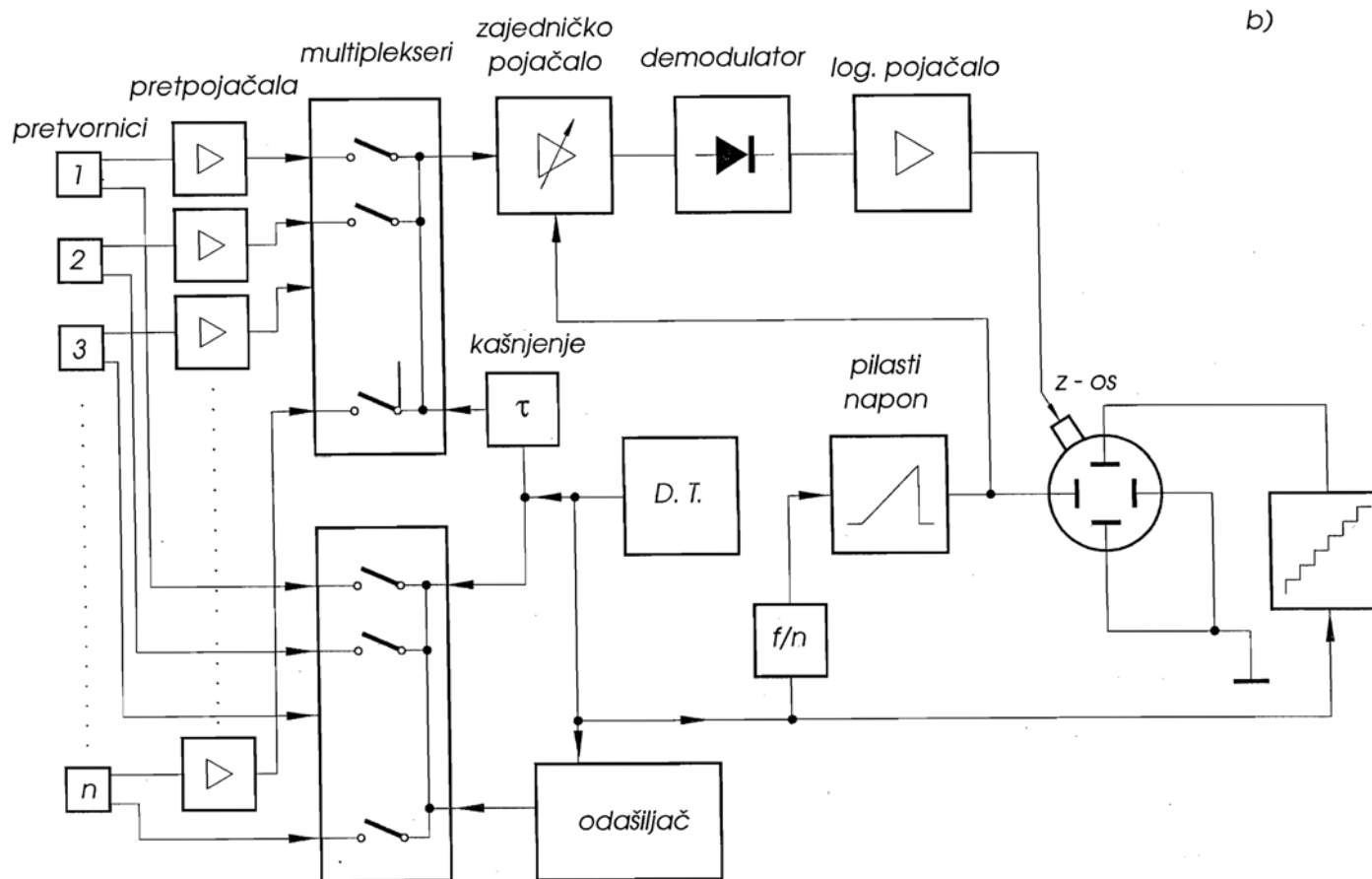
presjek a - a'



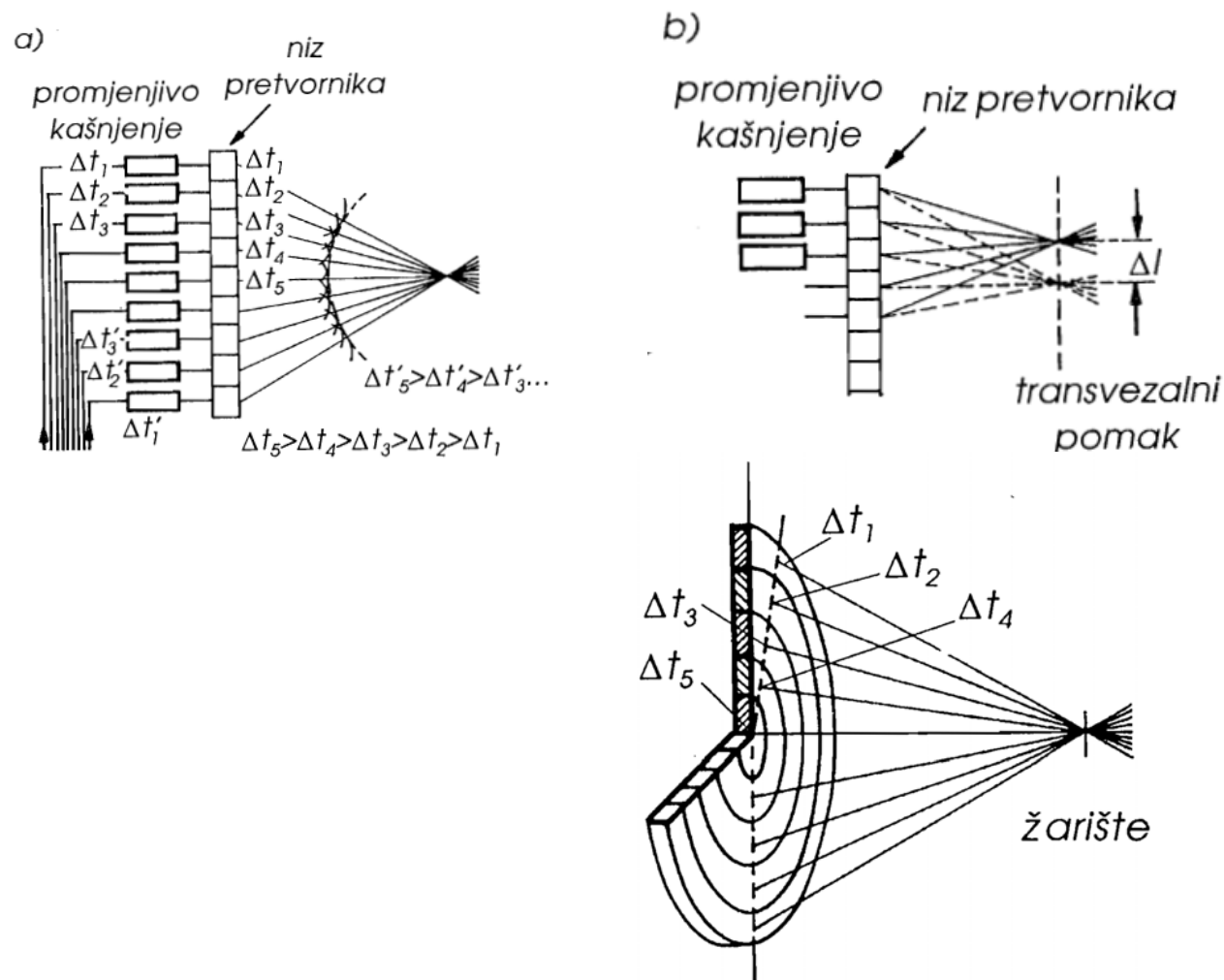
pogled sa strane



# Sonde s linearnim nizom pretvornika



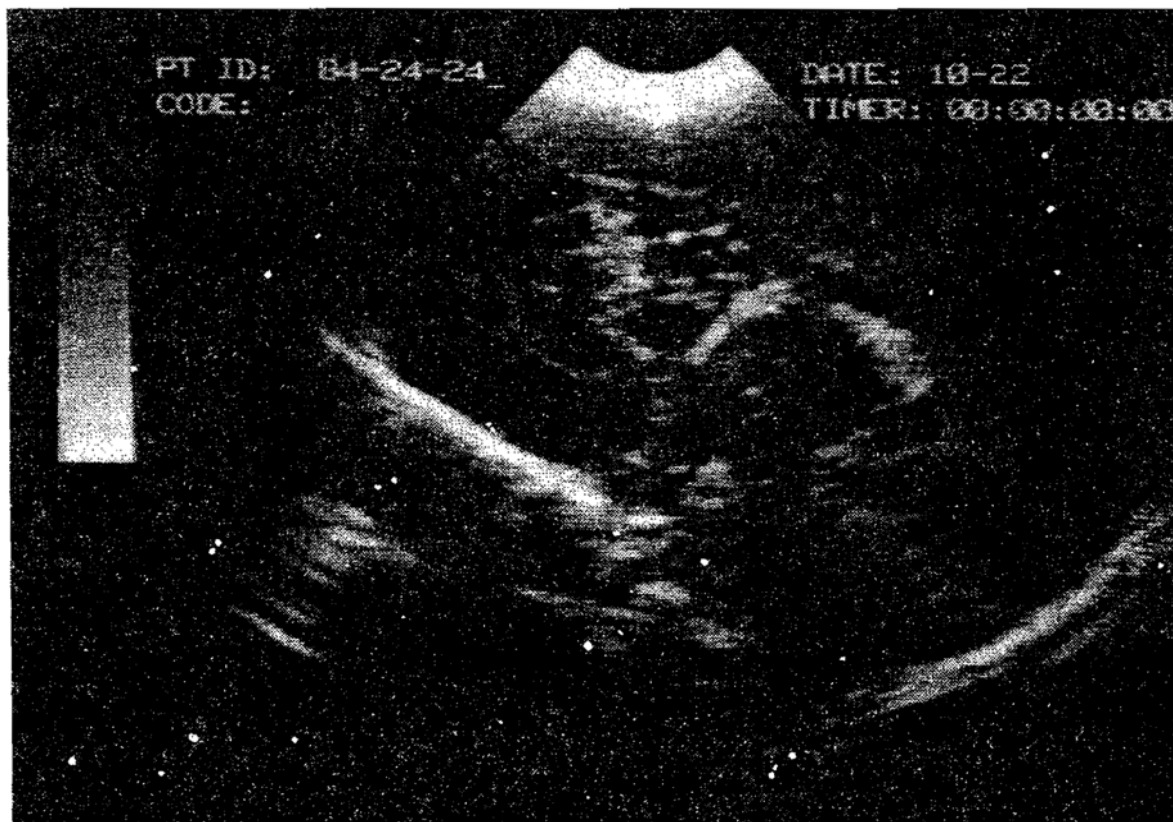
# Elektroničko fokusiranje



c)  
Biomedicinska instrumentacija

# B prikaz

## ➤ Sektorski prikaz glave ploda



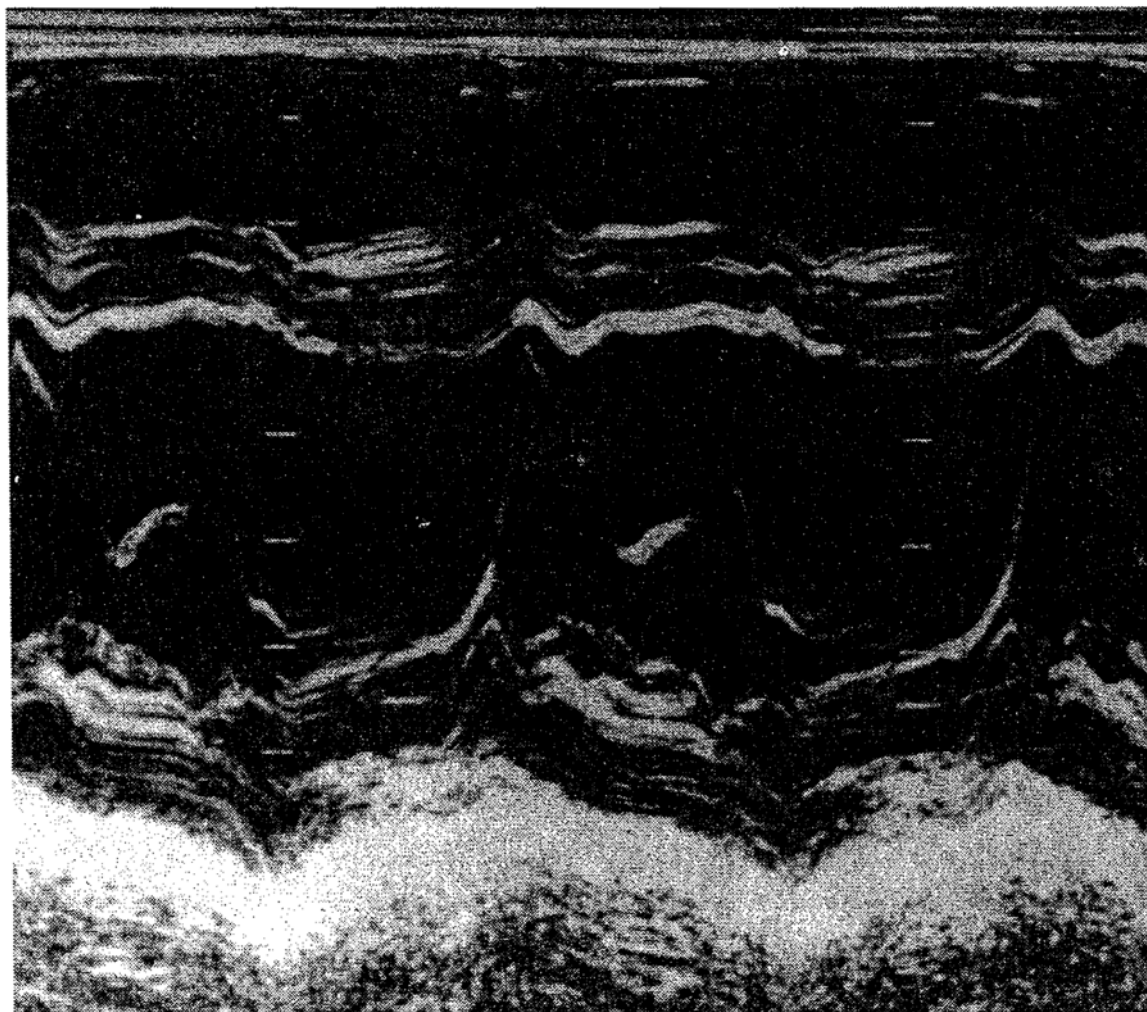
# B prikaz

- Linearni B prikaz glave ploda

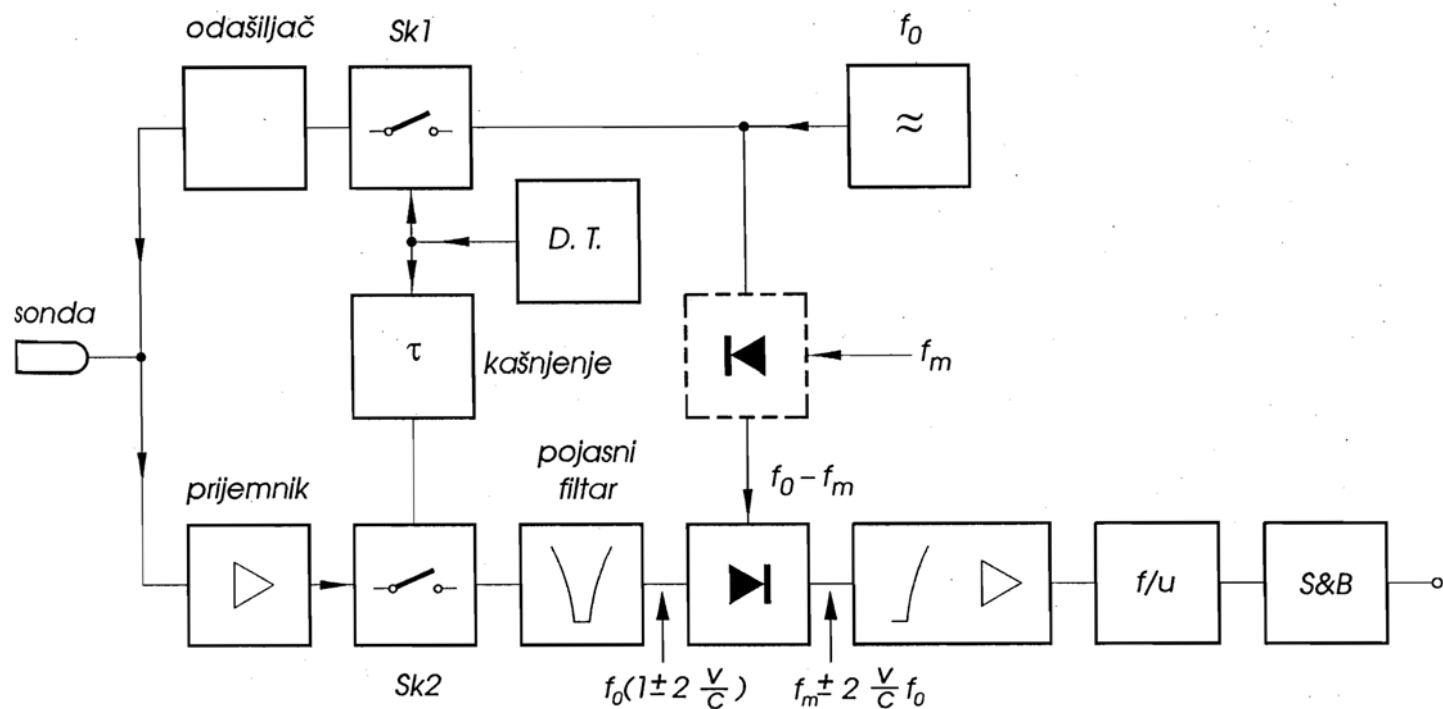


# M - prikaz

- Pomak mitralnog zalistka duž M pravca

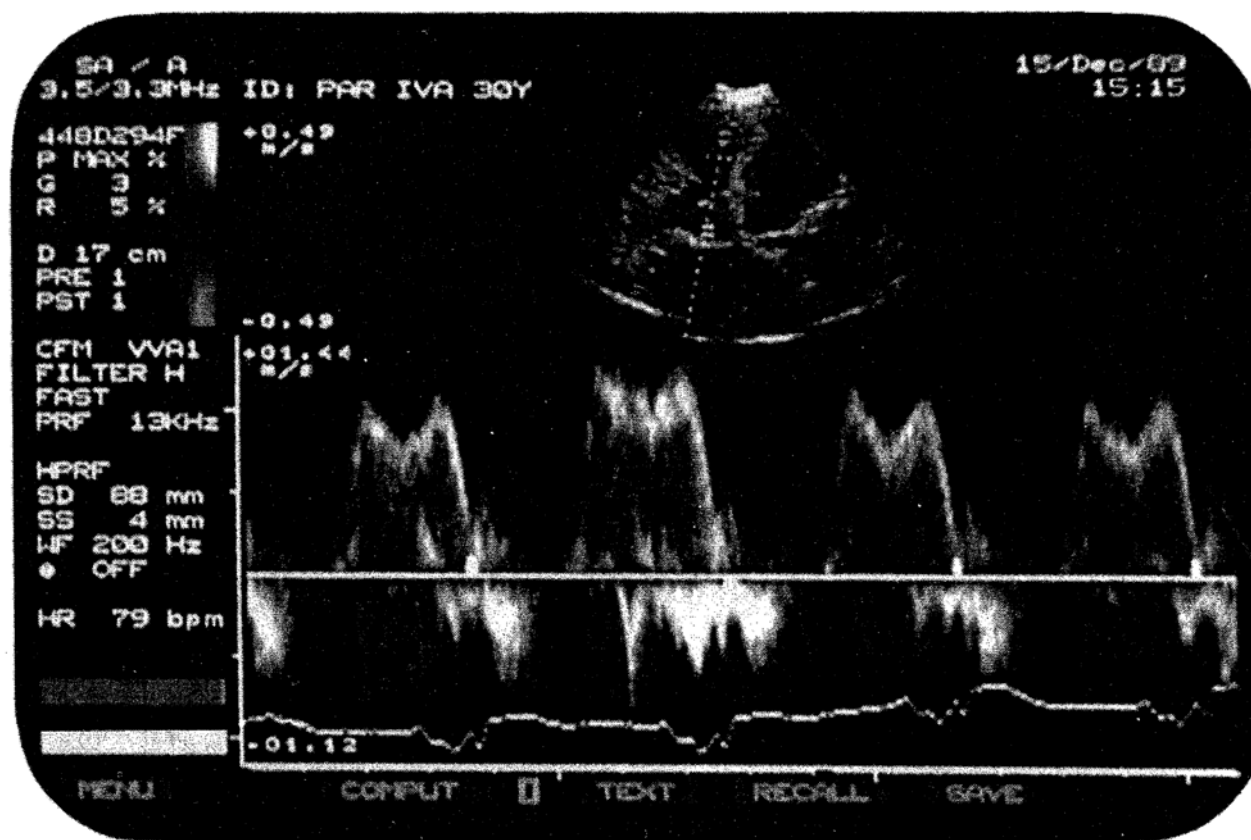


# Dopplerov efekt

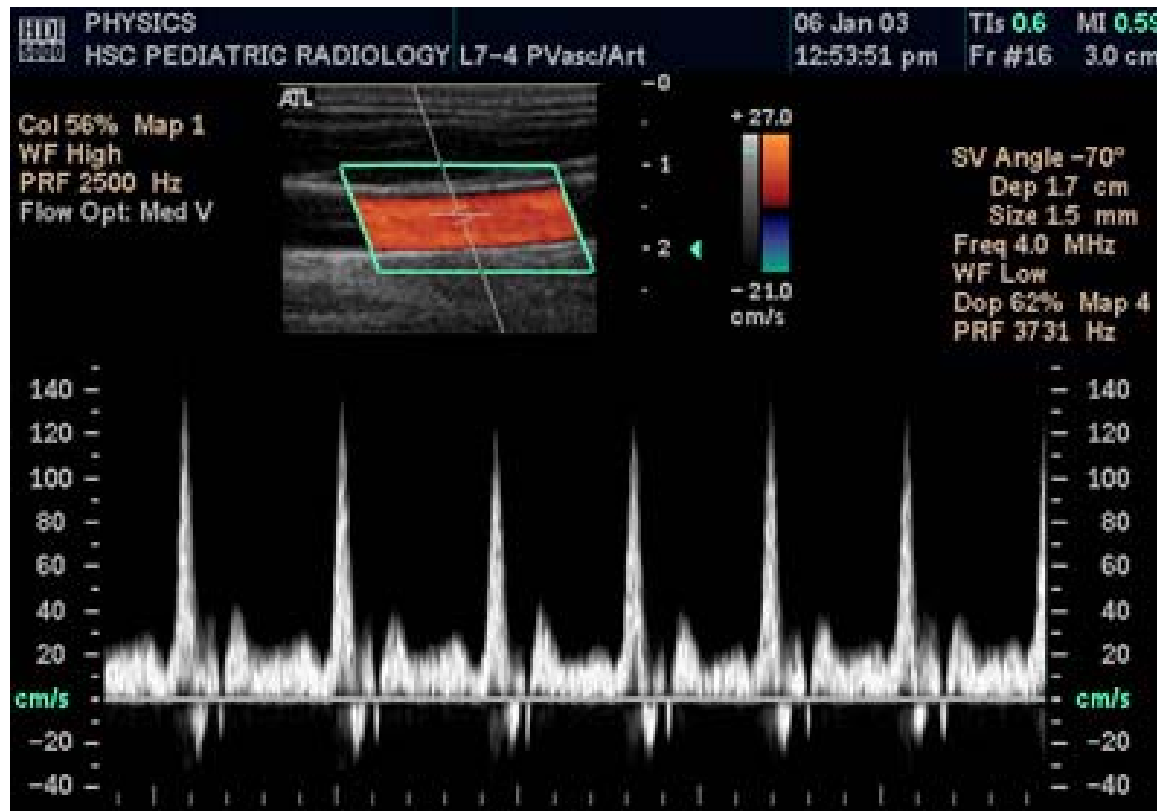


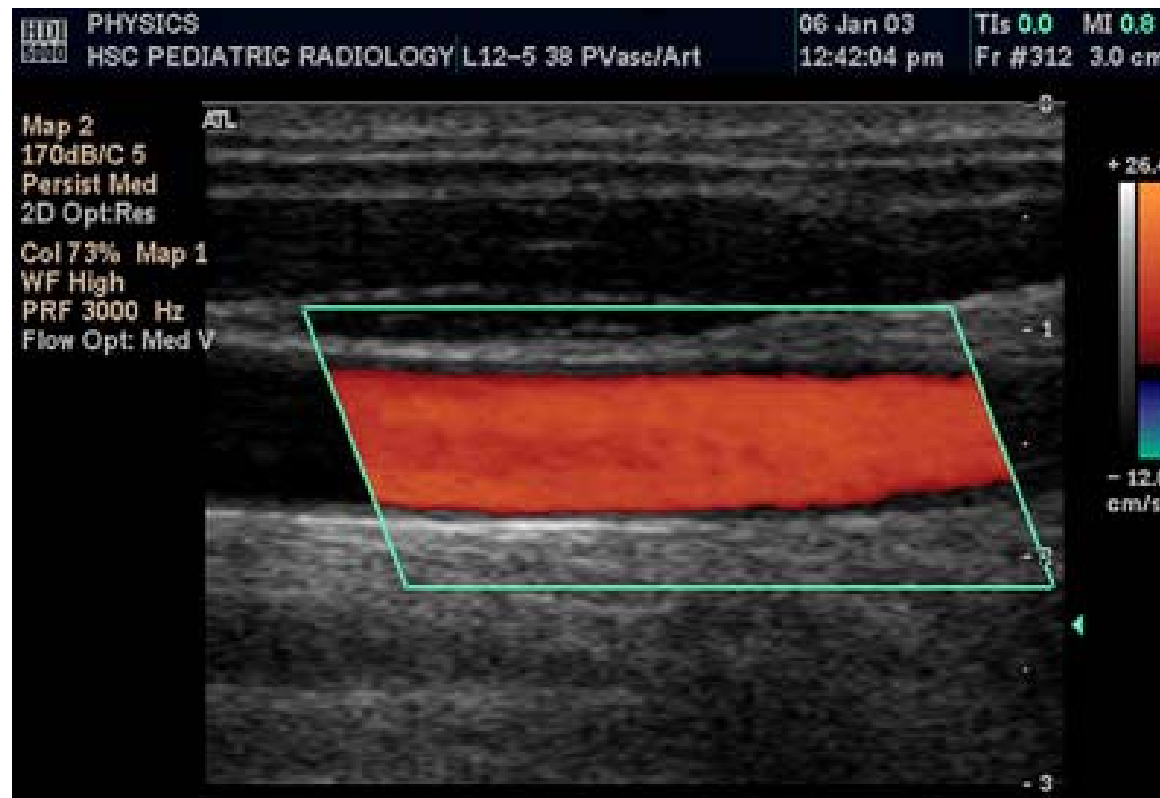
# Dopplerov efekt

- Sektorski prikaz s pravcem duž kojeg je proveden impulsni Doppler









# Literatura:

---

- Šantić, A., "Biomedicinska elektronika", Školska knjiga, Zagreb, 1995
- Breyer, B., "Medicinski dijagnostički ultrazvuk", Školska knjiga, Zagreb, 1991
- Brown, BH., Smallwood, RH., et al., "Medical Physics and Biomedical Engineering, IoP Press, Bristol, 1999