

# Senzorové systémy v CIM

Ing. Richard Balogh

## Akustické systémy

5. 5. 2020

## Plán

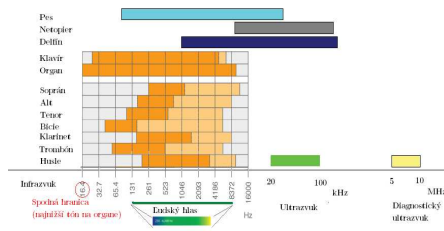
- Ešte 2 prednášky (dnes + bud. týždeň)
- **Skúška** – písomka – termín dohodou
- Upozornenie na výpadok siete **7. – 12. 5.**
- Chýbajúce zadania? Návrhy?
- Komentár ku **GPS**
- **Projekty:** enviro senzory alebo GPS + thingsboard
- Fotka / potom už nahrávame
- **Thingsboard.io** ukážka
- Prednáška: **akustické senzory**

## Akustické systémy

Zameranie na ultrazvuk (UZ):  
vyššia f (40kHz + 10MHz)

- Prečo?
- UZ frekvencie sa ľahšie smerujú a detekujú
  - menšia  $\lambda$  → vyššia presnosť (100 kHz →  $\lambda = 3,43$  mm)
  - vysieláče a prijímače - prijateľnejšie rozmery
  - systémy nerušia ľudský sluch

- Metódy:
- známa rýchlosť šírenia zvuku c
  - geometria šírenia.



## Akustické systémy – využitie

Využitie:

- zistenie prekážok, meranie vzdialeností
- defektoskopia
- meranie prietoku
- medicína - kontrola vnútorných orgánov
- systémy s povrchovými vlnami (PAV, angl SAW)
- spolupráca s inými obormi - akustooptika, chémia, atď...



## Základné pojmy

**Zvuk (sound, Schall, Звук)**

šírenie mechanických kmitov hmotných častíc prostredia okolo rovnovážnej polohy

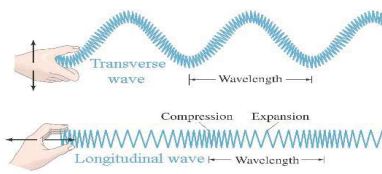
Typy vln:

- priestorové (objemové)

- priečne
- pozdĺžne

•Povrchové Akustické Vlny (PAV)

- priečne
- pozdĺžne



Plyny a kvapaliny – len pozdĺžne vlny

**Ultrazvukové (UZ) vlny**

- plyny od 20 ÷ 40 kHz do 300 ÷ 400 kHz
- kvapaliny a tuhé telesá rádovo MHz
- PAV 10-ky MHz.

## Akustické veličiny

veličina	jednotka	popis	vzt'ahy
<b>akustický tlak</b> p sound pressure	[Pa]	rozdiel medzi okamžitým tlakom prostredia a jeho tlakom pri šírení zvuku	
<b>akustická rýchlosť'</b> v sound particle velocity	[m/s]	rýchlosť pohybu častíc – porovnaj s c	$v = \xi / t$
<b>rýchlosť šírenia</b> c sound velocity	[m/s]	rýchlosť šírenia zvukovej vlny v prostredí	závisí od teploty a vlhkosti
<b>akustická impedancia</b> Z acoustic impedance	[Pa.s.m <sup>-1</sup> ]	komplexná veličina vyjadrená podielom tlaku na danej ploche a rýchlosti	$Z = \frac{p}{v} = \rho c$
<b>intenzita zvuku</b> I sound intensity	[W/m <sup>2</sup> ] [dB]	charakterizuje prenos akustického výkonu P	$I = p \cdot v = P/A$
<b>akustický výkon</b> P <sub>s</sub> sound power	[W]	výkon vyžarovaný alebo prenášaný prostredníctvom akustického vlnenia	$P = E / t$
<b>vlnová dĺžka</b> λ wavelength	[m]	pre rýchlosť c v danom prostredí	$\lambda = c / f$



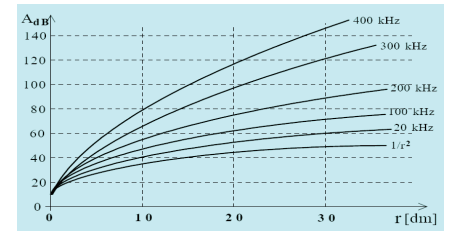
## Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

### Útlm UZ vln

intenzita klesá  $\approx 1/x^2$   
– reálne viac.

koeficient útlmu

- $\alpha$  [1/m] alebo
- $\alpha_{dB}$  [dB/m]  $\rightarrow (A_{dB} = \alpha_{dB} \cdot r)$



kont. budenie – harmonický signál – pokles amplitúdy  
imp. budenie – obdĺžnik (impulzy) – klesá strmosť hrán

## Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

### Rýchlosť šírenia c

upravená rovnica (vzduch, platí pre  $f < 100$  MHz)

$$c = 331,46 (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \vartheta) (1 + 2,2 \cdot 10^{-4} \delta),$$

$\vartheta$  - teplota (plynu) [°C] a  
 $\delta$  - relatívna vlhkosť (plynu) [%].

Príklad:

Pri meraní  $L = 1$  m a  $\Delta\vartheta 2$  °C je chyba 3,62 mm.  
Pri  $\Delta\vartheta 20$  °C je chyba 35,33 mm (pre  $L = 1$  m)

Poznámka:

$c$  vo vzduchu je cca 1234 km/hod = 1 MACH (letecký termín)

## Akustické meniče



- geometria
- elektrické parametre
- akustické parametre (ich vzťah k elektrickým)
- recipročná činnosť - jeden menič vysiela i prijíma

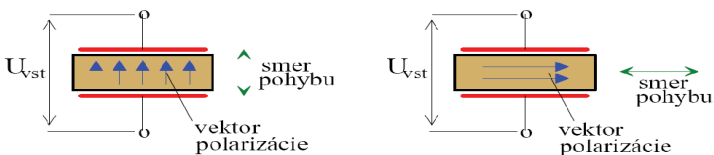
Reálne systémy:

- **piezoelektrické** (ako permanentný magnet v el.)
- **kondenzátorové** (elektrostatické)
- **elektrický výboj** - najmä iskra ako vysielač

Akustické parametre:

- akustický výkon (tlak) v mieste merania min.  $10^{-2}$  Pa
- citlivosť prijímača min. 0,1 mV/Pa (bežne  $1 \div 20$  mV/Pa)
- akustické prispôsobenie - malý rozdiel akust. impedancií (vln. odporov)

## Piezoelektrické meniče piezoelectric transducer



piezoelektrický jav  
piezokeramika, (prírodné materiály)

Výroba:

suroviny, mletie, zmiešanie, lisovanie,  
vypálenie, **polarizácia**

## Piezoelektrický jav

Materiály

$(\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$  with  $0 \leq x \leq 1$ ) – keramika, skratka PZT

Kryštalické látky

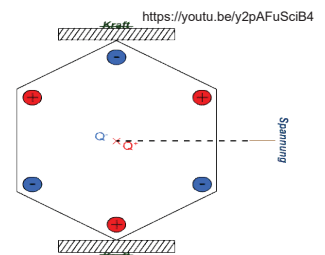
- Kremeň
- Langazit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) – a quartz-analogous crystal
- Gallium orthophosphate ( $\text{GaPO}_4$ ) – a quartz-analogous
- Lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ )
- Lithium tantalate ( $\text{LiTaO}_3$ )
- Lead titanate ( $\text{PbTiO}_3$ )

Keramika

- PZT
- $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

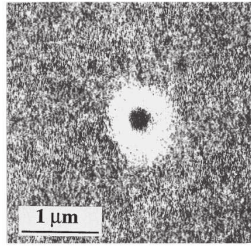
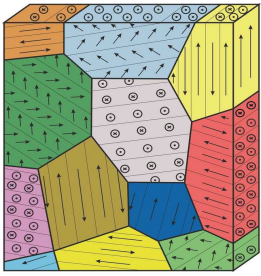
Bezolovnaté

- Bismuth ferrite ( $\text{BiFeO}_3$ )
- Barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ )



March 1890: Jacques and Pierre Curie Brothers Discover Piezoelectricity

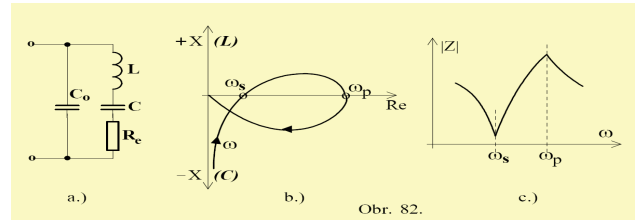
## Piezelektrické meniče piezoelectric transducer



Piezoresponse image of a PZT-0.8 film excited by voltage pulses of opposite polarities. A positive 25 V voltage, applied to the central part of the film for 20 s, resulted in a bright spot of 900 nm in diameter, corresponding to a polarized area. An opposite domain, which appeared as a dark spot of 300 nm in diameter, was subsequently written in by a negative 8 V pulse applied for 3 s

Gruverman, Alexei & Auciello, O. & Tokumoto, H., (1996). Scanning force microscopy for the study of domain structure in ferroelectric thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 14, 602 - 605. 10.1116/1.589143.  
Kozinov, Sergey & Kuna, Meinhard. (2018). Simulation of fatigue damage in ferroelectric polycrystals under mechanical/electrical loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 116, 150-170. 10.1016/j.jmps.2018.03.013.

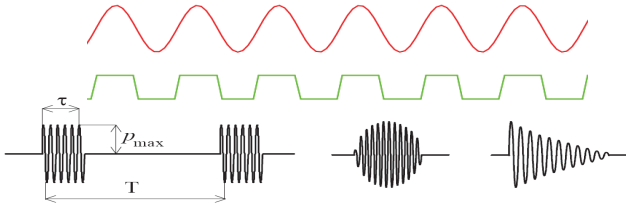
## Piezelektrické meniče ekvivalentná schéma



rezonančný obvod – náhradné parametre:

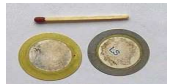
- $C_0$  – statická kapacita (~nF)
- $L$  – úmerná hmotnosti
- $\omega_s$  – sériová rezonancia
- $C$  – úmerná mech. poddajnosti
- $R_c$  – mechanické straty
- $\omega_p$  – paralelná rezonancia

## Piezelektrické meniče budenie vysieláča



- kontinuálny signál  
- harmonický, alebo obdĺžnik 30 ÷ 200 V
- rádiový impulz
- impulzné budenie - jeden impulz

## Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov



Materiály:

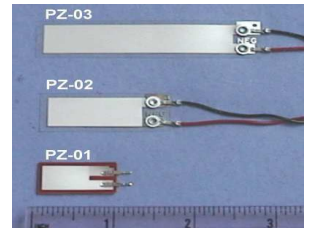
### Piezokeramika

Vyžarovanie do vzduchu

fólia z **PVdF** (polyvinylidenfluorid)  
polarizovaný polymér,  
použitie ako piezokeramika

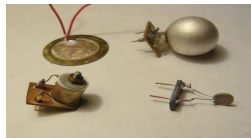
Vlnový odpor  $p.c$  (resp.  $Z$ ) [Pa.s.m<sup>-1</sup>]:

vzduch @ 20°C	4,13.10 <sup>2</sup>
voda @ 20°C	1,48.10 <sup>6</sup>
PVdF fólia	3,30.10 <sup>6</sup>
piezokeramika	3,00.10 <sup>7</sup>

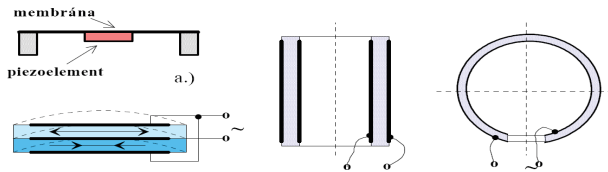


## Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov

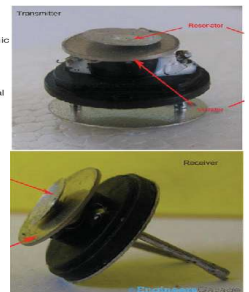
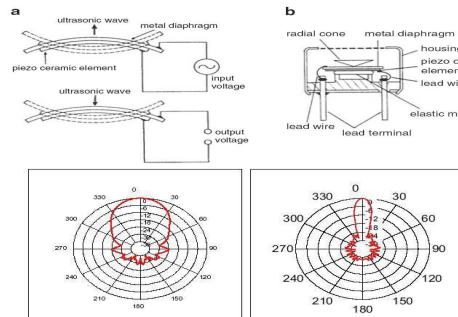
- platnička, disk → x  
membrána  
Sawyerovo dvojča (opačné vektory polarizácie)
- dutý valec → x/y, valcová vlna
- dutá guľa → guľová vlnoplocha, priestorové merania



recipročný režim možný a využívaný (sonda)



## Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov



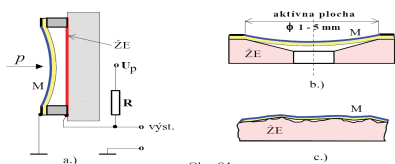
## Kondenzátorové meniče

**vysielače:** elektrostatické sily  
**prijímače** (mikrofóny): dopad zvuku → zmena C

ŽE – živá elektróda  
 M – membrána  
 U<sub>p</sub> – pol. napätie (50 – 300 V)

pre UZ frekvencie:  
 – malé rozmery  
 – tenké membrány  
 (pokovený plast 1 + 20 μm)

– polarizovaný plast typu **elektret** – netreba polarizačné napätie  
 – *sell systém* - pre plochu viacnásobný (84b)  
 – zdrsnená elektróda (84c)



Obr. 84.

## Kondenzátorové meniče



Využitie Si (aj ako membrána)

**Príklad:**

Vytvorená Si membrána 0,8 x 0,8 mm, h = 150 nm, Al pokovenie 100 nm. V ďalšej časti Si substrátu je elektronika.

Budenie meničov: ~ 10 + 100 V.

Meniče sú širokopásmové,  $f_{medz} = 50 + 300$  kHz

recipročný režim možný a využívaný

## Elektrický výboj ako vysielač UZ vln



**Elektrická iskra**

- **výboj medzi elektródami**

prietrzné napätie

- + veľká intenzita zvuku
- strmá nábežná hrana
- široké frekv. spektrum, od počutelných do cca 500 kHz
- kvázibodový zdroj zvuku
- iskra - zdroj porúch, nutné sú odrušenia (tlenenia)
- dráha iskry je náhodná - menšia presnosť
- výbušné prostredia !!!

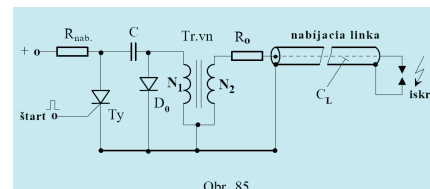
## Elektrický výboj Iskra



Realizácia:

statický zdroj - potrebné V<sub>n</sub> (8 + 10 kV), menej vhodný  
 impulzný zdroj - V<sub>n</sub> impulzný transformátor obr. 85.

- \* C sa nabíja z + cez R<sub>nab.</sub> (50 + 300 V)
- \* štart otvorí Ty a C je vybíjaný do primáru Tr.vn
- \* N<sub>2</sub> >> N<sub>1</sub>  
 → U<sub>vyb.</sub> je vysoké (impulz)
- \* nabíja sa "nabíjacia linka" (koaxiálny kábel) s kapacitou C<sub>L</sub>
- \* U medzi elektródami rastie  
 → ionizačný proces
- \* U prekročí elektrickú pevnosť vzduchu  
 → kanálový výboj
- \* energia z nabíjacej linky  
 $W_L = 1/2 C_L \cdot U_{prietrz}$



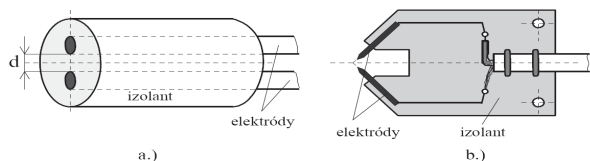
Obr. 85.

## Elektrický výboj Iskra

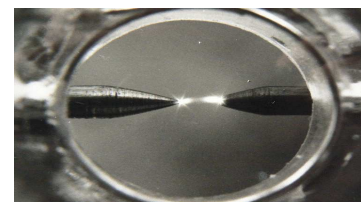
Optimálna medzera medzi elektródami je 0,3 + 0,6 mm  
 (intenzita a presnosť polohy iskry)

Vlastné meniče – žiariče

- s výbojom po povrchu
- medzi hrotmi



## Tlejivý výboj ako prijímač UZ vln



stabilný výboj,  
 definovaný pre I = 10<sup>-5</sup> + 1 A  
 (nízke tlaky-trubice)

parametre výboja závisia od p  
 (aj akustický p)

elektrické parametre vieme vyhodnotiť

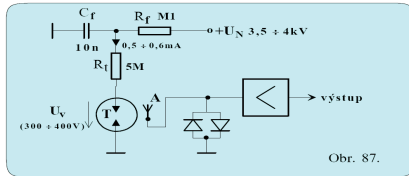
Vlastnosti:

- malé rozmery - bodový prijímač
- bez hmotných pohyblivých častí - vysoká medzná f
- recipročný režim práce
- komplikované napájanie - konšt. = U<sub>N</sub> cca 4 kV
- výbušné prostredie
- nestabilita výboja : (cittivosť, vlastné kmitanie)

## Tlejivý výboj ako prijímač

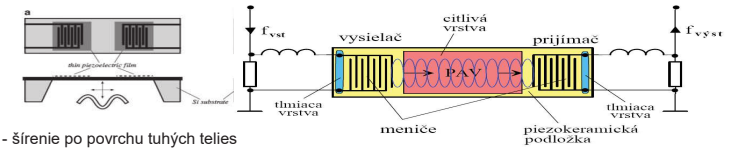
výboj je medzi dvoma zahrotenými elektródami

- prúd pri atm. tlaku musí byť obmedzený odporom (na  $10^{-5} \div 1A$ ), inak vzniká iskra
- pretekajúci prúd závisí od tlaku
- riešenie s "anténou" A.



**Poznámka:**  
Nestabilita výboja - vážny problém. Prijímač sa náhodne stáva kmitajúcou sústavou, vydávajúcou zvuk (prskanie), čím je vyradený z činnosti. Toto bráni zatiaľ jeho vážnejšiemu využitiu.

## PAV: Povrchová akustická vlna SAW: Surface acoustic wave "Rayleighiho vlny"



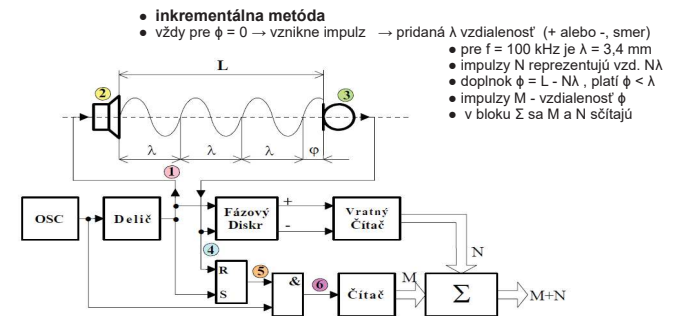
- šírenie po povrchu tuhých telies
- c je vysoká  $\Rightarrow$  vysoké f (desiatky MHz)
- filtre, analyzátory plynov, vlhkomery
- budenie - interdigitálne meniče = hrebeňové elektródy na piezokeramickej podložke - PZT keramika, t.j.  $Pb(ZrTi)O_3$
- rozmery a charakter meničov  $\rightarrow$  základná f (napr. pre 30 MHz šírka 25 X<sub>m</sub>, medzery 25 X<sub>m</sub>)
- Senzor - dva interdigitálne meniče, medzi nimi je aktívna (selektívna) vrstva

## 6.3. Akustické metódy

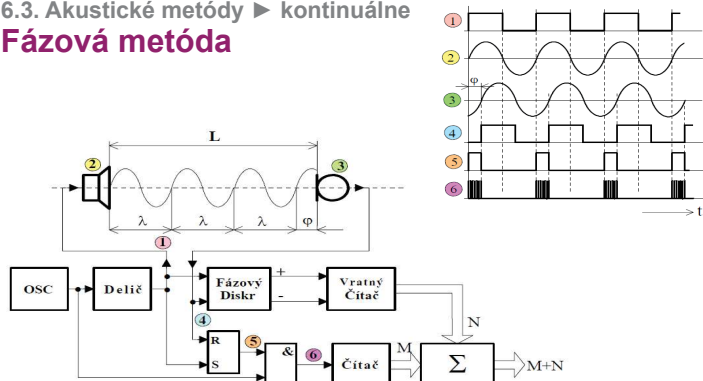
Možnosti merania vzdialeností a súradníc:

- vysielanie
  - kontinuálne metódy - nepretržité
  - impulzné metódy - vysielanie okamih
- zachytenie
  - priama vlna
  - odrazená vlna

## 6.3. Akustické metódy ► kontinuálne Fázová metóda

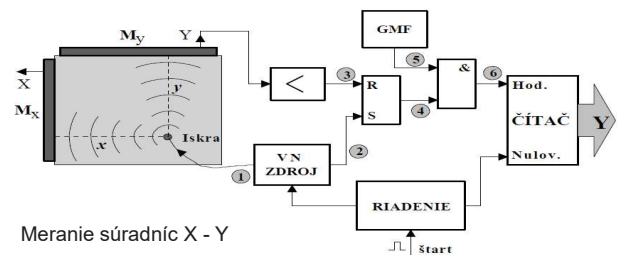


## 6.3. Akustické metódy ► kontinuálne Fázová metóda

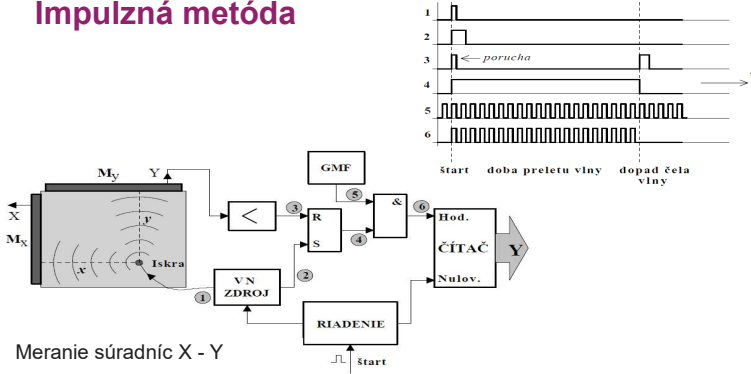


## 6.3. Akustické metódy ► impulzné Impulzná metóda

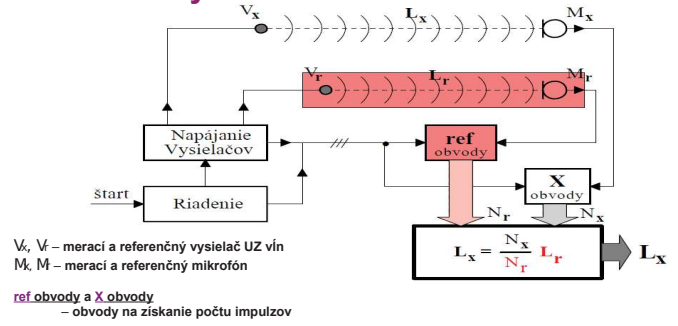
- metódy sú absolútne - skutočná vzdialenosť.
- potrebný akustický impulz (strmý nástup)
- modulovaná nosná - rádiový impulz



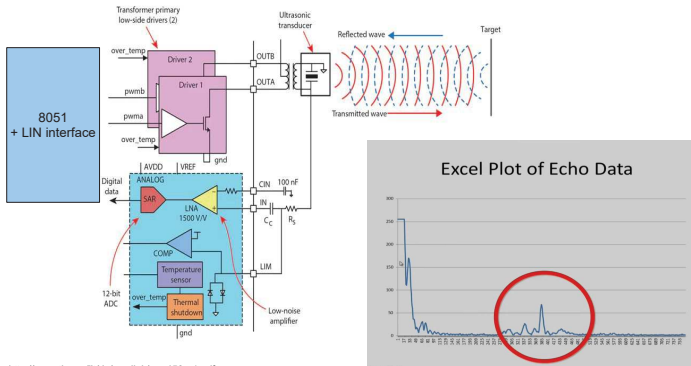
### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Impulzná metóda



### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Referenčný kanál



### 6.3. Akustické metódy ► PGA450 – ASIC od TI



Source: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga450-q1.pdf>

### 6.3. Akustické metódy ► Porovnávací tabuľka

	Parallax (PING J))	China HC SR-04	Devantech SRF08	Devantech SRF02	Maxbotix LV-MaxSonar-EZ0	Polaroid / SensComp 6500
robotshop.eu	33,29 €	1,67 – 6,61	36,40 €	14,27 €	28,81 €	–
rozsah opakovanie	0,2 – 3 m 20 ms	0,2 – 4 m 25 ms	0,03 – 6 m 65 ms	0,22 – 6 m 65 ms	0,3 – 5 m 50 ms	0,15 – 10,5 m 80 ms
presnosť napájanie	±2 cm 5 V	0,5 cm 5 V	3-4 cm 5 V	3-4 cm 5 V	1% 2,5 – 5 V	1% 5 V
budenie	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	42 kHz	50 kHz
interface	start+echo	start, echo	I2C bus	I2C, serial	serial, analog, pulse	Init / echo / blank...

### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Priestorové merania

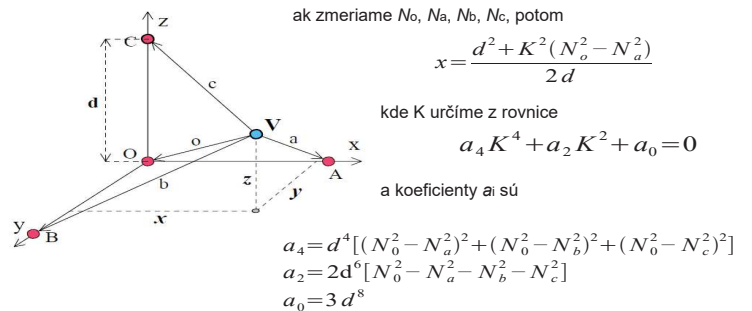
usporiadanie s bodovými, kvázibodovými, resp. guľovými mikrofónmi

nutné min. 3, pre 4 a viac možná i určitá kompenzácia

- a.) kompenzuje vplyv teploty a vlhkosti (4 ks)
- b.) kompenzuje aj gradient teploty v zvislom smere – častý (5 ks)

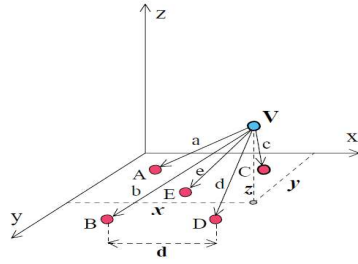
- zdroj guľovej vlny (piezo, iskra)
- snímače bodové, kvázibodové, alebo guľové
- meriame 4 (5) vzdialeností, (počty impulzov  $N_a, N_b, N_c, N_o$ )
- súradnice – zložitejšie vzťahy

### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Priestorové merania





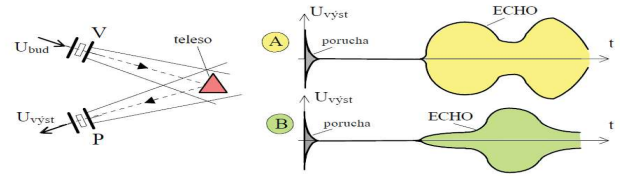
### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Priestorové merania



**Poznámka:**  
Kompenzácia vektorových vplyvov - prúdenia je možná len cyklickou zámienou funkcie vysielača a niektorého prijímača  
→ nutné **recipročné** meniče.

### 6.3. Akustické metódy ► impulzné Určenie tvaru telesa z echa

približná metóda pre jednoduché, značne odlišné telesá využitá je odrazená vlna impulznej metódy



- obálka odrazenej vlny má určitý tvar - ECHO
- tvar je pre každé teleso iný (závisí tiež od natočenia)
- **A, B** sú echá pre dva rôzne typy telesa

Porovnaním so "standardnými tvarmi" sa dá približne usúdiť, čo sa nachádza v zornom poli.

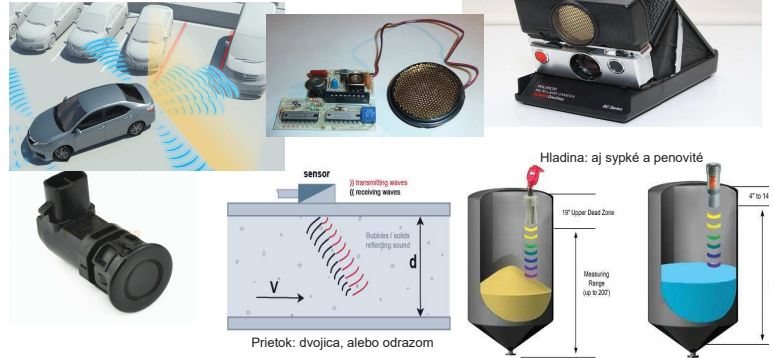
### 6.3. Akustické metódy ► aplikácie Akustická mapa



Analýza hlučnosti, odhlučenie problematických častí

Source: [https://www.microflow.com/assets/uploads/bestanden/Product-Leaflets/Product-Leaflet\\_ScanPaint-8pages.pdf](https://www.microflow.com/assets/uploads/bestanden/Product-Leaflets/Product-Leaflet_ScanPaint-8pages.pdf)

### 6.3. Akustické metódy ► aplikácie



Prietok: dvojica, alebo odrazom