

Senzorové systémy v CIM

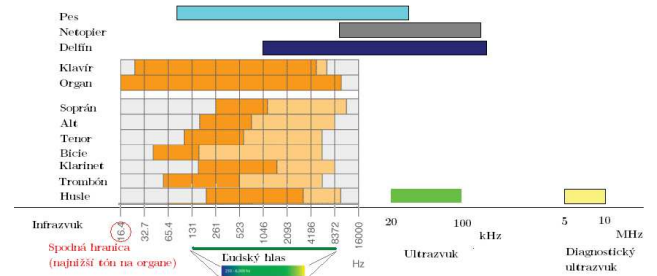
Ing. Richard Balogh

Akustické systémy

21. 3. 2022



Akustické systémy



Zameranie na **ultrazvuk (UZ)**, vyššia f (40kHz + 10MHz) Prečo?

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

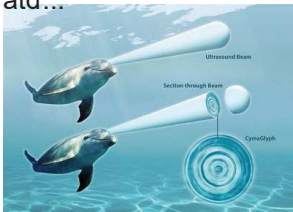
Metódy:

- 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...



Jazyk delfínov

- Schopnosť komunikovať pomocou prepracovaného verbálneho systému
- Konkrétne zvuky varujú pred nebezpečenstvom alebo pred jedlom
- Keď sa stretnú, pozdravia sa s istou slovnou zásobou
- Každá skupina delfínov má svoju vlastnú slovnú zásobu.



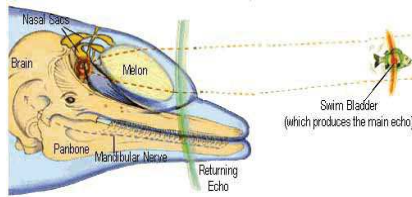
Echolokácia

- 1944 - Donald R. Griffin
- Používanie ozvien zvukov za účelom detekcie prekážok a potraviny
- Umožňuje loviť korisť, vidieť v tme



Echolokácia u delfínov

- Lov v skupinách
- 15 jedincov v 10-metrových odstupoch prehľadáva 150 metrov široký pás mora
- Nízko-frekvenčné zvuky vydávajú cez melón
- Vysokofrekvenčné zvuky cez koniec ryπάka



Zaujímavosti

- 80 % svojho času trávia hľadáním potravy, zvyšok odpočinkom a hrou
- Nemajú čuch, zato majú dobre vyvinutú chuť
- Spia len "na jedno oko"
- Vedia plakať



Lukrécia Szilvásiová: Netopiere



- ▶ Echolokácia - kombinácia morfológie a sonaru
- ▶ Hrtan - výroba vysokofrekvenčných vln
- ▶ Ústa, nos - emitovanie
- ▶ Výška tónov - 15 až 115 kHz
- ▶ Zmena tónu klesaním o 40 kHz

Morfológia

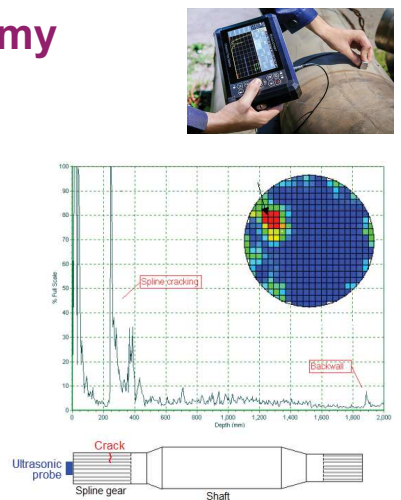
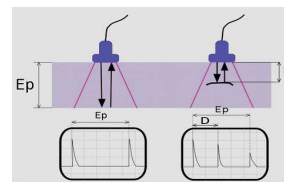


- ▶ Fyzické adaptácie
 - ▶ Mäsitý nos
 - ▶ Tvar, záhyb, vrásky vonkajšieho ucha
- ▶ Dopplerov efekt - zmena frekvencie zvuku v závislosti od okolitých javov vyvolaný stlačením

Druhy echolokácií

- ▶ S nízkym pacovným cyklom
- ▶ Umožňuje odhadnúť vzdialenosť od objektu
- ▶ Patrí k najhlasnejším zvukom
- ▶ Intenzita 60 až 140 dB
- ▶ Mimo rozsahu sluchu ľudí
- ▶ V náročnom cykle
- ▶ Informácie o pohybe v trojrozmernom umiestení
- ▶ Netopier vydáva nepretržité volanie

Akustické systémy defektoskopia



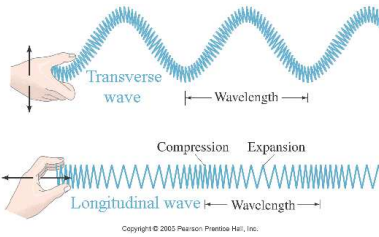
Základné pojmy

Zvuk (sound, Schall, Звук)

Šírenie mechanických kmitov hmotných častíc prostredia okolo rovnovážnej polohy

Typy vln:

- priestorové (objemové)
 - priečne
 - pozdĺžne
- Povrchové Akustické Vlny
 - priečne
 - pozdĺžne



Plyny a kvapaliny – len pozdĺžne vlny

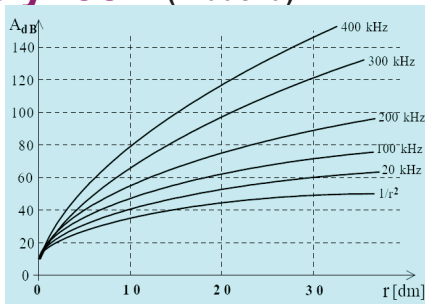
Ultrazvukové (UZ) vlny

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

Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

Útlm UZ vln

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



koeficient útlmu

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

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

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 ÷ 20 mV/Pa)
- akustické prispôbenie - malý rozdiel akust. impedancií (vln. odporov)

Akustické veličiny

veličina	jednotka	popis	vzťahy
akustický tlak p sound pressure	[Pa]	rozdiel medzi okamžitým tlakom prostredia a jeho tlakom pri šírení zvuku	
akustická rýchlosť v sound particle velocity	[m/s]	rýchlosť pohybu častíc – porovnaj s c	$v = \xi / t$
rýchlosť šírenia c sound velocity	[m/s]	rýchlosť šírenia zvukovej vlny v prostredí	závisí od teploty a vlhkosti
akustická impedancia Z acoustic impedance	[Pa.s.m ⁻¹]	komplexná veličina vyjadrená podielom tlaku na danej ploche a rýchlosti	$Z = \frac{p}{v} = \rho c$
intenzita zvuku I sound intensity	[W/m ²] [dB]	charakterizuje prenos akustického výkonu P	$I = p \cdot v = P/A$
akustický výkon P_s sound power	[W]	výkon vyžarovaný alebo prenášaný prostredníctvom akustického vlnenia	$P = E / t$
vlnová dĺžka λ wavelength	[m]	pre rýchlosť c v danom prostredí	$\lambda = c / f$

Šírenie UZ v plynoch (vzduchu)

Rýchlosť šírenia c

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

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

ϑ - teplota (plynu) [°C] a
 δ - 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)

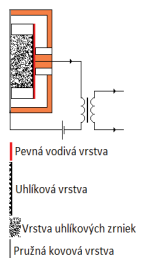
Poznámka:

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

Odporový mikrofón, popis

Ján Dolinay

- Založený na zmenách odporu uhlíkových zrn slačovaných membránou
- Dopadom zvuku sa membrána rozkmitá, zrnká sa stlačia => zmena tlaku => zmena odporu
- Zmena jednosmerného prúdu na pulzujúci
- Prúd sa mení na základe odporu, závislé na amplitúde dopadajúceho zvuku
- Časový priebeh prúdu zodpovedá zvuku, ktorý ho vyvolal



Odporový mikrofón, použitie

- Citlivé mikrofóny
- Zkresľujú zvuk
- Veľký šum



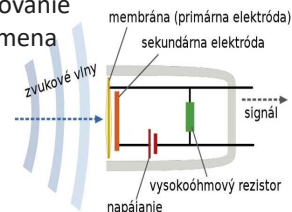
Použitie:

- Staršie telefóny, zariadenia, kde nezáleží na kvalite
- Odolnosť voči otrasom => použitie v armádnych vysielачkách

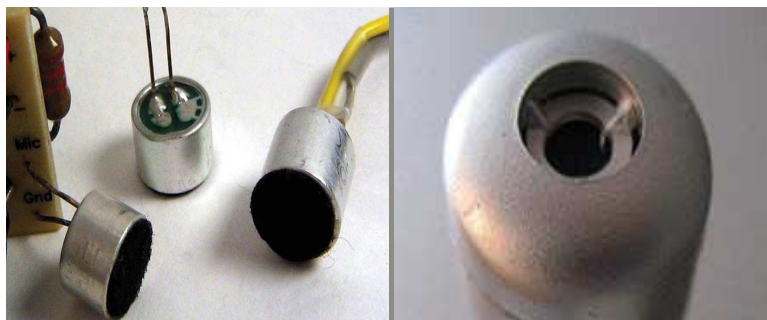


Kondenzátorový mikrofón

- Dve kovové dosky => spolu tvoria kondenzátor
- Membrána – pohyblivá, tenká, nanosená vrstva vzácneho kovu
- Vzájomné približovanie a oddiaľovanie spôsobuje zmenu kapacity => zmena výstupného napätia



- Najširší záber frekvencií
- Použitie:
 - V štúdiách
 - Na meracie účely



Myroslav Khoma

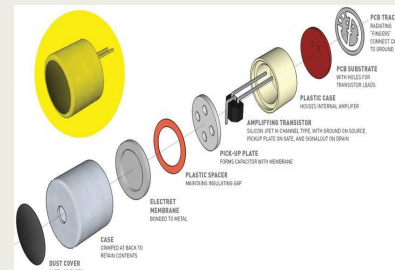
Čo to je elektretový mikrofón a ako funguje?

Ako funguje?



Z čoho sa skladá?

- protiprachový kryt - látkový alebo papierový
- puzdro - na zadnej strane zovreté, aby sa zachoval obsah
- elektretová membrána - pripevnená ku kovu
- plastová dištančná vložka - udržuje izolačnú medzeru
- zberná doska - tvorí kondenzátor s membránou
- zosilňovací tranzistor - zabudovaný FET tranzistor
- plastové puzdro - obsahuje vnútorný zosilňovač
- substrát na doske plošných spojov - s otvormi pre vodiče tranzistora
- stopy na doske plošných spojov - vyžarujúce "prsty" spájajú puzdro so zemou

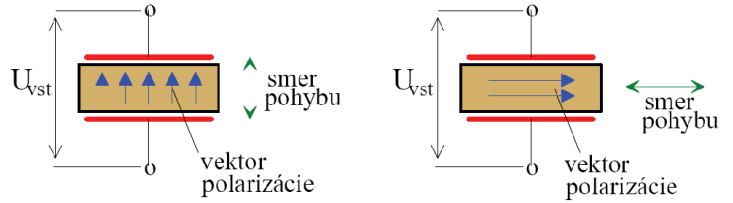


Výhody a nevýhody elektretových mikrofónov

- Výhody elektretových mikrofónov:
 - Ich výroba je jednoduchá a lacná
 - Používajú sa predovšetkým ako povrchové a konferenčné mikrofóny
 - K dispozícii sú modely s konektorom XLR, 3,5 mm jack a drôtovými svorkami
 - Vysoká citlivosť a dlhodobá stabilita.
 - Odolné voči vlhkosti, nárazom a mechanickému poškodeniu
- Nevýhody elektretových mikrofónov:
 - Nie sú obľúbené u nahrávacích inžinierov
 - Potrebné ďalšie napájanie, v tomto prípade však stačí 1 V



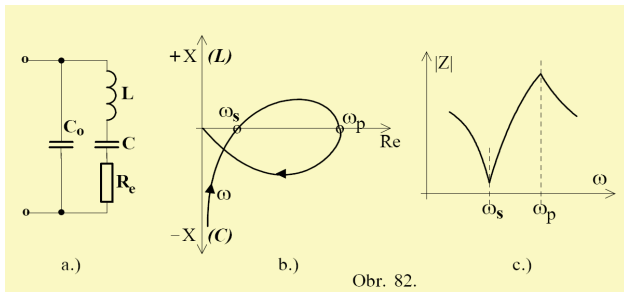
Piezelektrické meniče piezoelectric transducer



piezoelektrický jav
piezokeramika, (prírodné materiály)

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

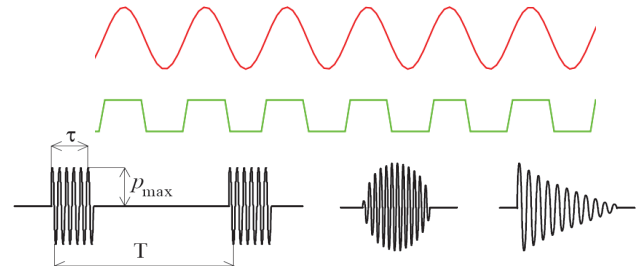
Piezelektrické meniče ekvivalentná schéma



rezonančný obvod – náhradné parametre:

- C_0 – statická kapacita (~nF)
- L – úmerná hmotnosti
- ω_s – sériová rezonancia
- C – úmerná mech. poddajnosti
- R_e – mechanické straty
- ω_p – paralelná rezonancia

Piezelektrické meniče budenie vysielča



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

Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov



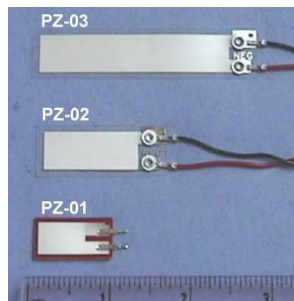
Materiály:

Piezokeramika

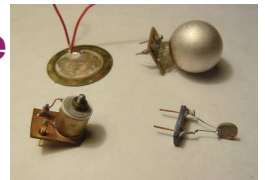
Vyžarovanie do vzduchu

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

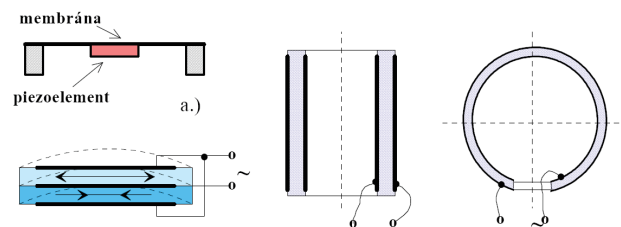
- Vlnový odpor ρ_c (resp. Z) [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]:
- vzduch @ 20°C $4,13 \cdot 10^2$
 - voda @ 20°C $1,48 \cdot 10^6$
 - PVdF fólia $3,30 \cdot 10^6$
 - piezokeramika $3,00 \cdot 10^7$



Piezelektrické meniče Tvary piezomeničov

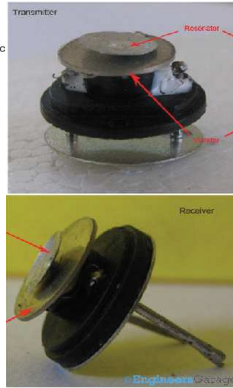
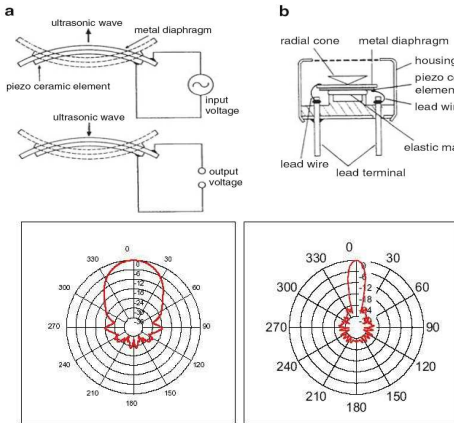


- platnička, disk → x
membrána
Sawyerovo dvojča (opačné vektory polarizácie)
 - dutý valec → x/y, valcová vlna
 - dutá guľa → guľová vlnoplocha, priestorové merania
- recipročný režim možný a využívaný (sonda)**



Piezoelektrické meniče

Tvary piezomeničov

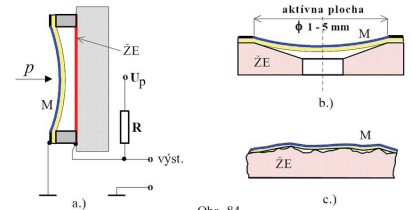


Kondenzátorové meniče

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

ŽE – živá elektróda
 M – membrána
 U_p – pol. napätie (50 – 300 V)

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



Obr. 84.

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

Kondenzátorové meniče



Elektrický výboj ako vysielač UZ vln



Elektrická iskra

- **výboj medzi elektródami**
 prierazné napätie

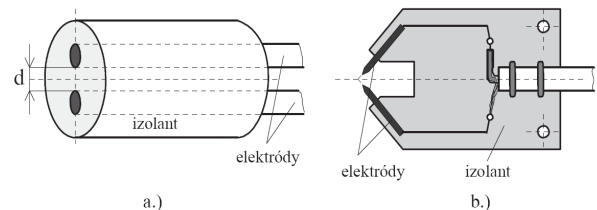
- + veľká intenzita zvuku
 strmá nábežná hrana
 široké frekv. spektrum, od počuteľných do cca 500 kHz
 kvázibodový zdroj zvuku
- iskra - zdroj porúch, nutné sú odrušenia (tínenia)
 dráha iskry je náhodná - menšia presnosť
 výbušné prostredia !!!

Elektrický výboj

Iskra

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

Vlastné meniče – žiariče
 a.) s výbojom po povrchu
 b.) medzi hrotmi



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

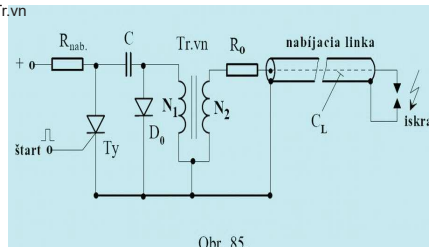
Iskra



Realizácia:

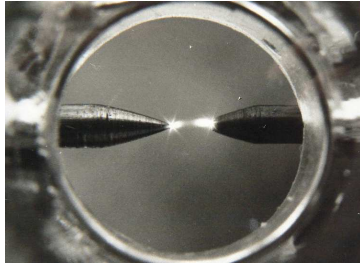
statický zdroj - potrebné V_n (8 ÷ 10 kV), menej vhodný
 impulzný zdroj - V_n impulzný transformátor obr. 85.

- * C sa nabíja z + cez R_{nab} (50 ÷ 300 V)
- * štart otvorí Ty a C je vybíjaný do primátu Tr.vn
- * N₂ >> N₁
 → U_{výst} je vysoké (impulz)
- * nabíja sa "nabíjacia linka"
 (koaxiálny kábel) s kapacitou C_L
- * U medzi elektródami rastie
 → ionizačný proces
- * U prekročí elektrickú pevnosť vzduchu
 → kanálový výboj
- * energia z nabíjacej linky
 W_L = 1/2 C_L · U_p² prierazu



Obr. 85.

Tlejivý výboj ako prijímač UZ vln



stabilný výboj, definovaný pre $I = 10^{-5} \div 1A$ (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_N cca 4 kV
- výbušné prostredie
- nestabilita výboja : (citlivosť, vlastné kmitanie)

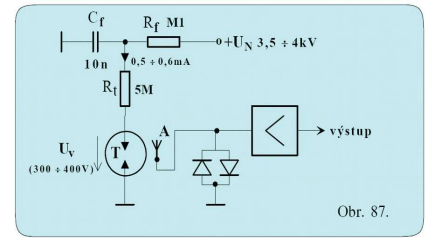
Tlejivý výboj ako prijímač

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.

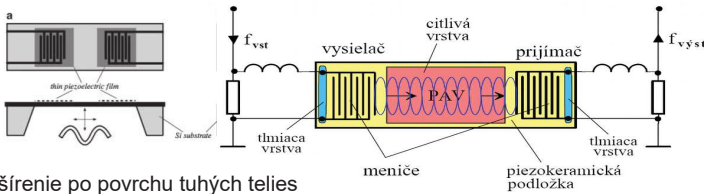


Poznámka:

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 λ m, medzery 25 λ m)

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

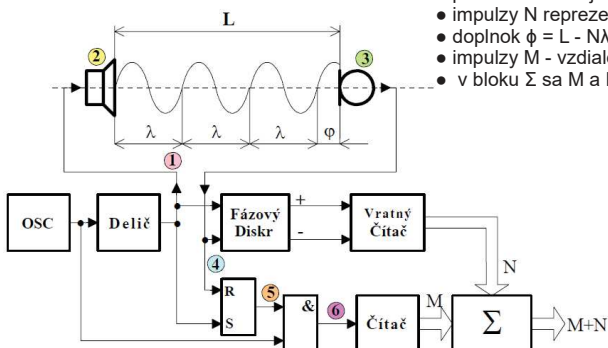
• zachytenie

- priama vlna
- odrazená vlna

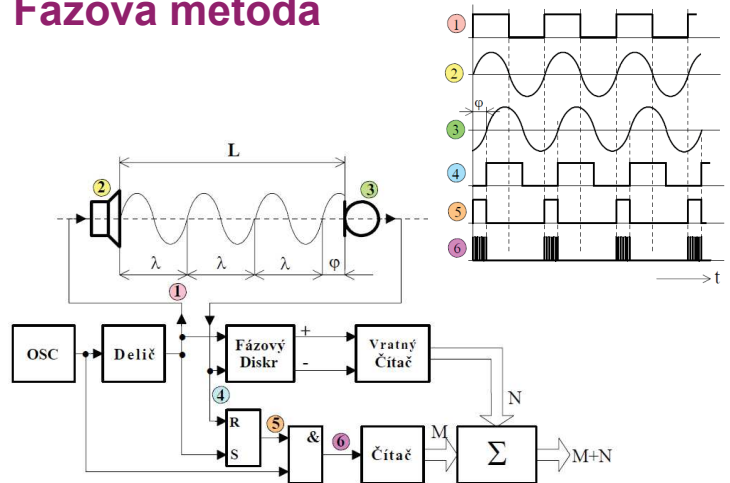
6.3. Akustické metódy ► kontinuálne Fázová metóda

• inkrementálna metóda

- vždy pre $\phi = 0 \rightarrow$ vznikne impulz \rightarrow pridaná λ vzdialenosť (+ alebo -, smer)
 - pre $f = 100$ kHz je $\lambda = 3,4$ mm
 - impulzy N reprezentujú vzd. $N\lambda$
 - doplnok $\phi = L - N\lambda$, platí $\phi < \lambda$
 - impulzy M - vzdialenosť ϕ
 - v bloku Σ sa M a N sčítajú

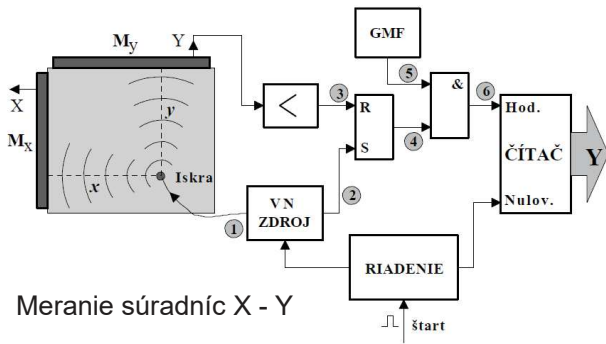


6.3. Akustické metódy ► kontinuálne Fázová metóda

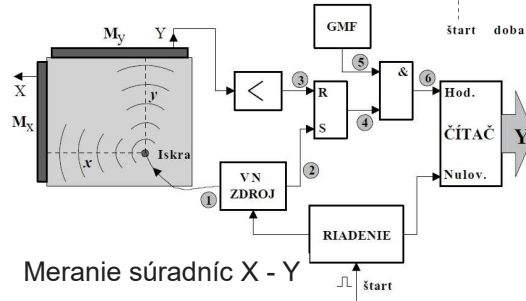
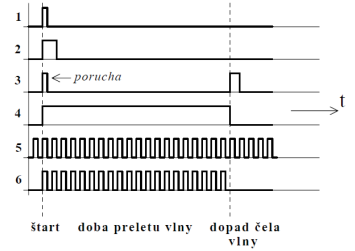


6.3. Akustické metódy ► impulzné Impulzná metóda

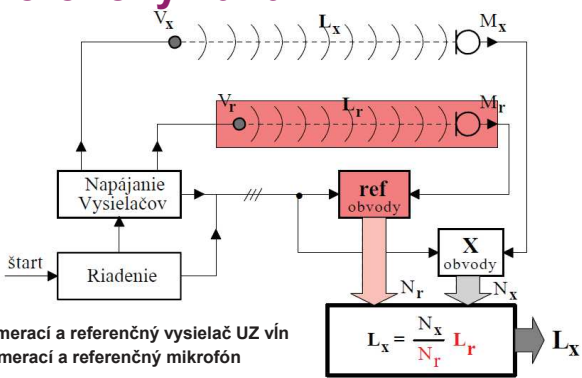
- metódy sú absolútne - skutočná vzdialenosť.
- potrebný akustický impulz (strmý nástup)
- modulovaná nosná - *rádiový impulz*



6.3. Akustické metódy ► impulzné Impulzná metóda



6.3. Akustické metódy ► impulzné Referenčný kanál



V_x, V_r – merací a referenčný vysielač UZ vln
 M_x, M_r – merací a referenčný mikrofón

ref obvody a X obvody
– obvody na získanie počtu impulzov

6.3. Akustické metódy ► impulzné Priestorové merania

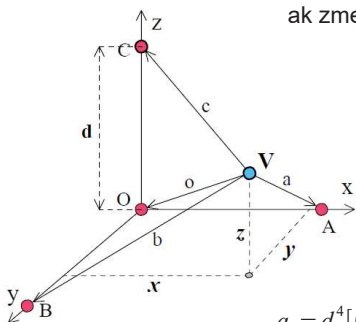
usporiadanie s bodovými,
kvázibodovými, resp.
guľovými mikrofónmi

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

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

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

6.3. Akustické metódy ► impulzné Priestorové merania



ak zmeriame N_0, N_a, N_b, N_c , potom

$$x = \frac{d^2 + K^2(N_0^2 - N_a^2)}{2d}$$

kde K určíme z rovnice

$$a_4 K^4 + a_2 K^2 + a_0 = 0$$

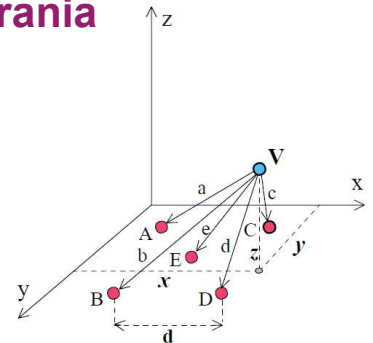
a koeficienty a_i sú

$$a_4 = d^4 [(N_0^2 - N_a^2)^2 + (N_0^2 - N_b^2)^2 + (N_0^2 - N_c^2)^2]$$

$$a_2 = 2d^6 [N_0^2 - N_a^2 - N_b^2 - N_c^2]$$

$$a_0 = 3d^8$$

6.3. Akustické metódy ► impulzné Priestorové merania



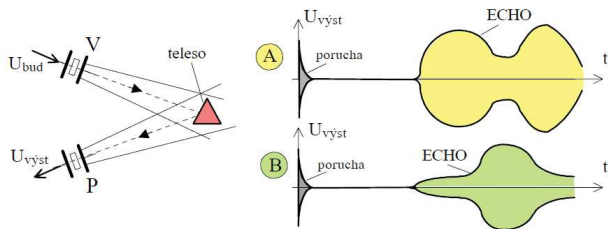
Poznámka:

Kompenzácia vektorových vplyvov - prúdenia je možná len cyklickou zámenou 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 "štandardnými tvarmi" sa dá približne usúdiť, čo sa nachádza v zornom poli.