

Akustické vlnění

Zvukové (akustické) vlny:

- ⊕ **elastické podélné vlny** s frekvencí v intervalu 16Hz-20kHz
- ⊕ **objektivní fyzikální příčina** (akustická vlna) **vyvolá subjektivní vjem** (vnímání zvuku)
- ⊕ člověk tyto vlny vnímá sluchovým orgánem jako **zvuk**

Akustická výchylka:

- vychýlení objemového elementu prostředí ze střední polohy při vlnění

Harmonické zvukové vlny:

$$u(x, t) = u_0 \sin[\omega(t - x / c)]$$

Akustická rychlost:

- rychlost uspořádaného kmitání částic prostředí kolem střední polohy při vlnění

$$v(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = u_0 \omega \cos[\omega(t - x / c)]$$

$$v_0 = u_0 \omega$$

u_0 ... amplituda akustické výchylky

v_0 ... amplituda akustické rychlosti

Akustické vlnění

⊕ Akustický tlak

$$p_c = p + p_a$$

- přídatný tlak, způsobený šířením vlny v elastickém materiálu

Akustický tlak v tekutinách:

$$p_a = -K \frac{\partial u}{\partial x} = -c^2 \rho \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$p_a = p_0 \cos[\omega(t - x/c)]$$

$$p_0 = \rho c \omega u_0 = \rho c v_0$$

Intenzita vlnění:

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 u_0^2 = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{Z}$$

obecně mohou být
rychlost a akustický
tlak fázově posunuty

akustický vlnový
odpor

$$Z = \rho c \leftarrow$$

Efektivní hodnoty akustických veličin:

$$p_e = \frac{p}{\sqrt{2}}$$

$$v_e = \frac{v}{\sqrt{2}}$$

$$I = p_e v_e = \rho c v_e^2 = \frac{p_e^2}{\rho c}$$

Výkon zvuku:

$$P = IS$$

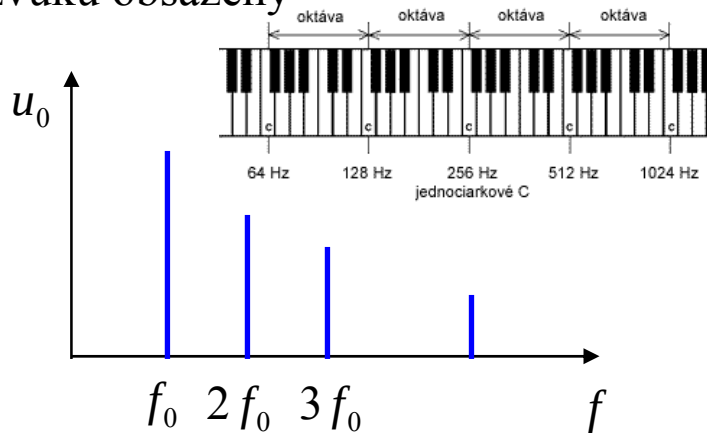
Subjektivní vnímání zvuku

⊕ **Hudební zvuky, tóny** – akustický tlak je periodickou funkcí času (vyvolává libozvučné sluchové vjemy) - **čárové frekvenční spektrum**

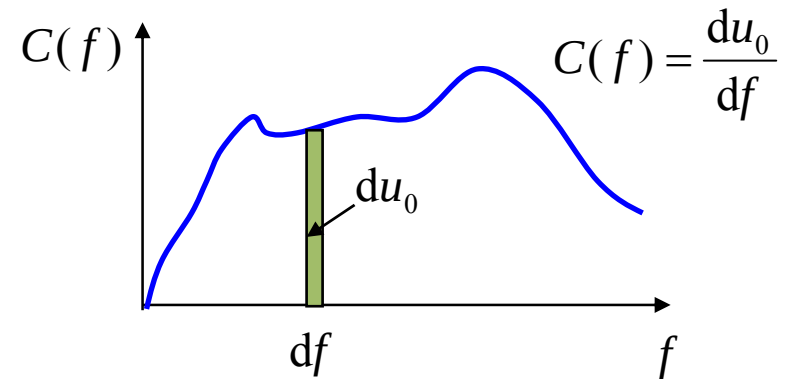
⊕ **Nehudební zvuk (hluk, šum)** – akustický tlak nepravidelně a neperiodicky kolísá (vyvolává nelibozvučné, rušivé sluchové vjemy) - **spojité frekvenční spektrum**

- **frekvenční spektrum**

- závislost amplitudy zvukové vlny na frekvencích, jež jsou ve vyšetřovaném zvuku obsaženy



Hudební zvuk



Hluk, šum

Subjektivní vnímání zvuku

⊕ Harmonická analýza zvuku:

- každý periodický i neperiodický zvukový signál můžeme rozložit v součet **dílčích harmonických funkcí (Fourierovy řady a integrály)**

periodické funkce

$$u(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_j e^{im\omega_0 t} = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos(m\omega_0 t) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin(m\omega_0 t)$$

$$C_k = C_{-k}^* = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-ik\omega_0 t} dt \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

**základní frekvence
(první harmonická)**

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

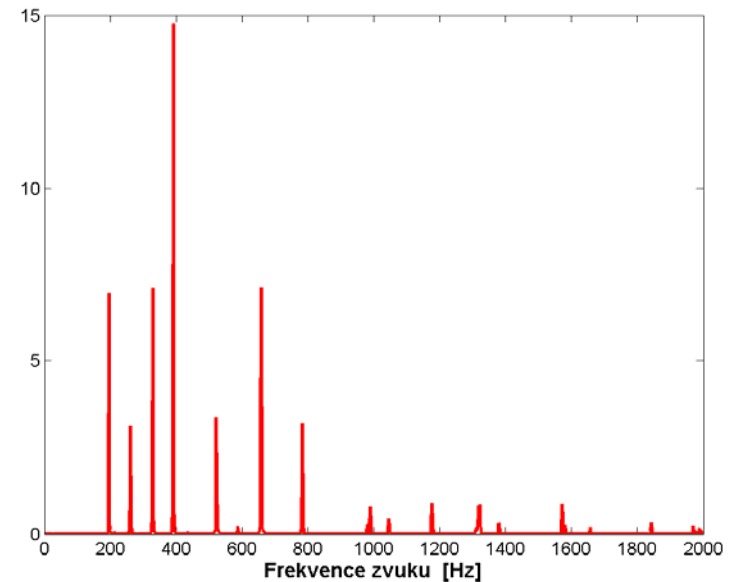
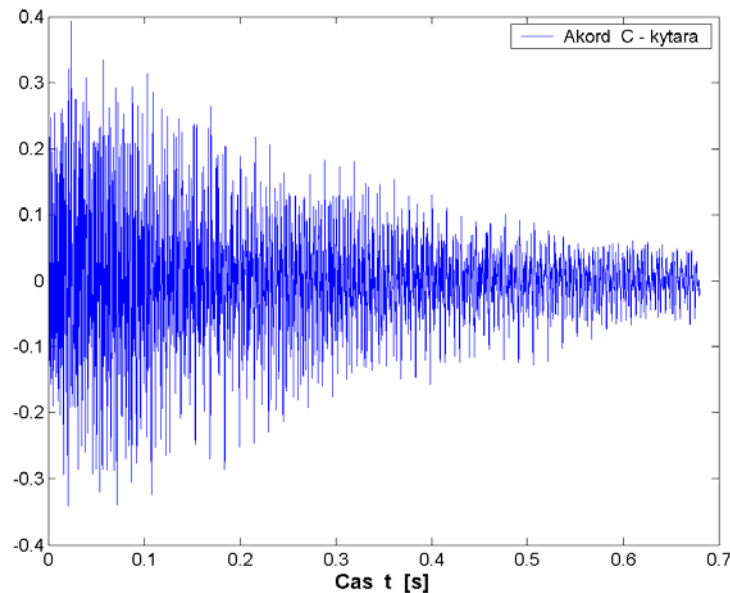
vyšší harmonické

$$\omega_k = k\omega_0 = k \cdot 2\pi f_0$$

$$k = 2, 3, 4, \dots$$

Subjektivní vnímání zvuku

Harmonická analýza zvuku:



Subjektivní vnímání zvuku

Při subjektivním hodnocení zvukového vjemu rozlišujeme tři základní charakteristiky zvuku:

1) Výška tónu

- je objektivně určena základní (nejnižší) frekvencí ve spektru a **určuje výšku celého hudebního zvuku.**

2) Barva zvuku

- vyjadřuje kvalitu hudebního zvuku, je **závislá na typu spektra** (počtu harmonických složek a poměru jejich intenzit (amplitud))

3) Hlasitost

- příčinou větší či menší hlasitosti vnímaného zvuku je větší či menší **intenzita dopadající vlny**, dále je vjem síly zvuku závislý i na frekvenci vnímaného zvuku.

Subjektivní vnímání zvuku

Výška tónu

minimální postřehnutelná
relativní změna frekvence u
lidského ucha 0,2-1%

✚ absolutní výška tónu

- je dána frekvencí čistého tónu, o němž pozorovatel usoudí, že zní stejně vysoko jako zkoumaný zvuk (hladina intenzity 40 dB)

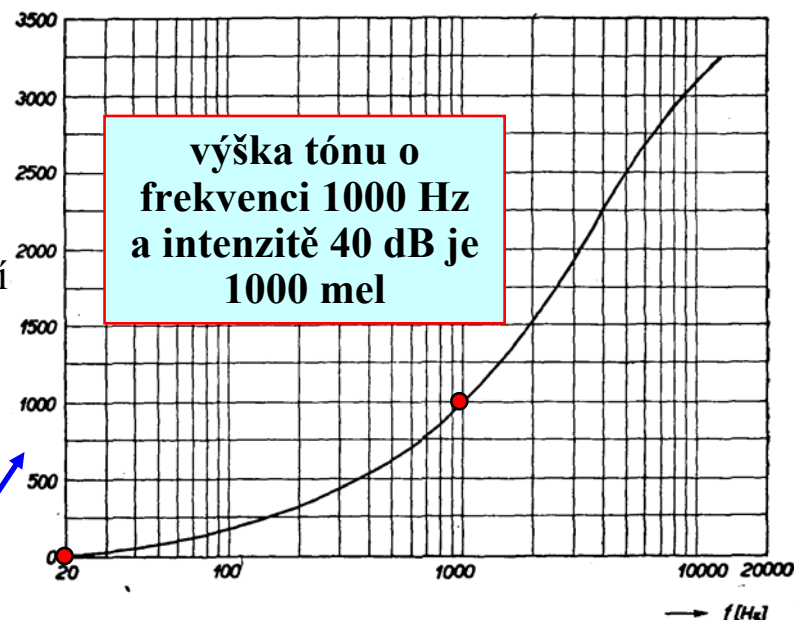
✚ relativní výška tónu

- je vyjádřena hudebním intervalem (poměr dvou frekvencí) oproti základnímu tónu hudební stupnice – jednotkou je 1 tón (relativní výška se potom vyjadřuje v násobcích nebo zlomcích tónů)

✚ subjektivní výška tónu

- čistě subjektivní hodnocení výšky
- není totožná s frekvencí
- frekvenční interval se subjektivně rozdělí na stejně velké výškové intervaly (stupnice subjektivní výšky tónu)
- jednotkou je **1 mel** (melody)

subjektivní vjem výšky tónu o stejné intenzitě je závislý na frekvenci



Subjektivní vnímání zvuku

Hlasitost zvuku

- subjektivní vjem hlasitosti zvuku **závisí na intenzitě a frekvenci zvuku**
- ⊕ pro sjednocení hodnocení hlasitosti a subjektivní výšky tónů byl vybrán tzv. **referenční tón** - harmonický tón o **frekvenci 1000 Hz**

citlivost sluchového orgánu je nejvyšší

⊕ Práh slyšitelnosti

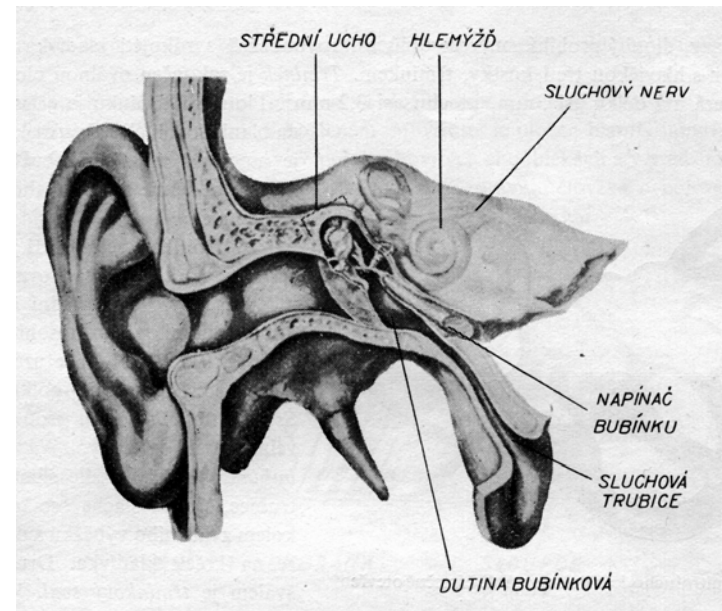
- nejnižší slyšitelná intenzita referenčního tónu

$$I_0 \doteq 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

⊕ Práh bolestivosti

- nejvyšší intenzita vnímaného zvuku, která ještě nezpůsobí bolest

$$I_{\text{max}} \doteq 10 \text{ Wm}^{-2}$$



Subjektivní vnímání zvuku

✚ Weber-Fechnerův zákon

změna fyziologického vjemu
 X je úměrná relativní změně
jeho fyzikální příčiny P

W.-F.zákon platí
pouze přibližně

$$dX = C \cdot \frac{dP}{P}$$



$$X = C' \cdot \log \frac{P}{P_0}$$

týká se sluchových i
zrakových vjemů

- pro míru vjemu v akustice zavádíme pojem **hladina intenzity L_I**

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$



$$L_I = 20 \log \frac{p_e}{p_{e0}} \quad [\text{dB}]$$

měřítkem fyzikální
intenzity zvuku

I ... intenzita referenčního tónu

I_0 ... prahová intenzita

$$I_0 \doteq 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

p_{e0} ...prahový efektivní akustický tlak

$$p_{e0} \doteq 2,03 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

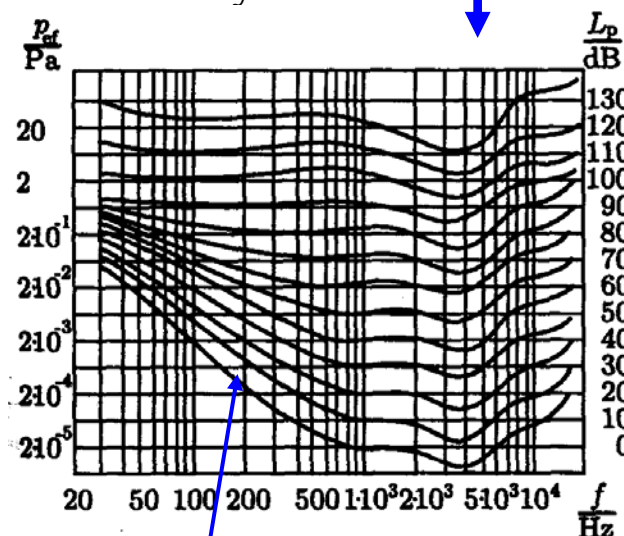
L_I neumožňuje vyjádření
subjektivního vjemu hlasitosti

Subjektivní vnímání zvuku

- ✚ **citlivost sluchu** je značně závislá na frekvenci zvuku
- ✚ zvuky (tóny) o různých frekvencích a stejné intenzitě se nám tedy jeví různě silné (hlasité)
- ✚ závisí od jaké prahové hodnoty určíme hladinu intenzity zvuku
- pro **hodnocení subjektivního vjemu hlasitosti** zvuku považujeme Weber-Fechnerův zákon přesně platný pro referenční tón o frekvenci 1000 Hz



referenční tón používáme pro subjektivní srovnávání hlasitosti vyšetřovaného zvuku



křivky se stejným subjektivním vjemem hlasitosti jako má referenční tón o dané intenzitě

Subjektivní vnímání zvuku

⊕ **hladina hlasitosti L_H**

- hladina intenzity srovnávacího referenčního tónu, při níž se tento tón v místě poslechu jeví stejně hlasitý jako vyšetřovaný zvuk

Zvuk se nám bude jevit hlasitější o 1Ph, vzroste-li jeho intenzita o 26%, což je minimální uchem postřehnutelný rozdíl.

$$L_H = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{Ph}]$$

hladina hlasitosti závisí na frekvenci $L_H(f)$

0 Ph ... práh slyšitelnosti
120 Ph ... práh bolesti

tj. dva tóny o různých frekvencích a stejné intenzitě neslyšíme stejně hlasitě

⊕ **Hlasitost H**

$$H = 2^{(L_H - 40)/10} \quad [\text{son}]$$

- vyjadřuje subjektivní míru síly zvukového vjemu
- udává se v sonech

$$dH \doteq C \frac{dI}{I^{0,7}}$$

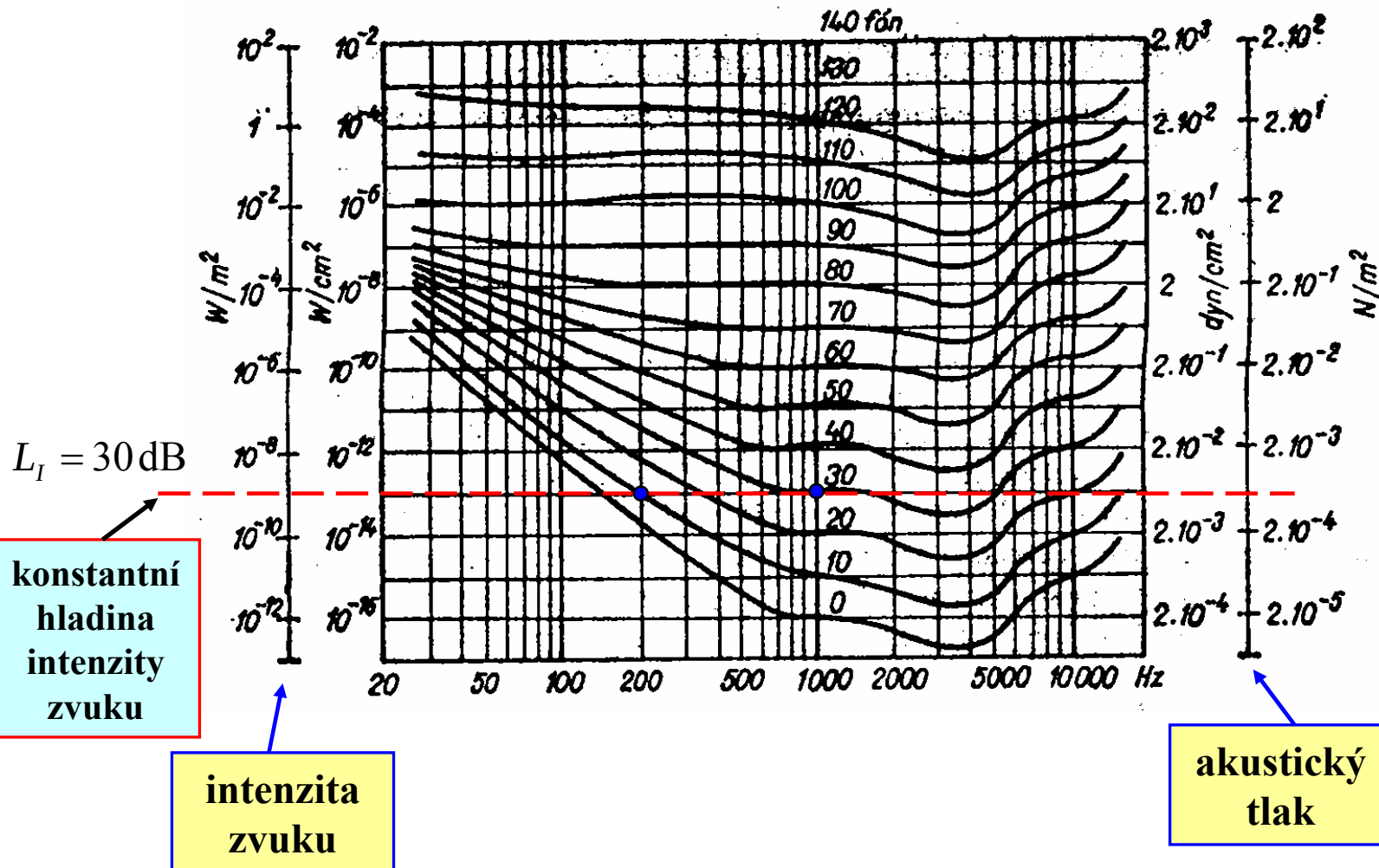
subjektivní odhad poměru intenzity srovnávaného zvuku a referenčního zvuku s hladinou hlasitosti 40 Ph

Hlasitost respektuje nelinearitu subjektivního vnímání intenzity zvuku

zvuk s dvojnásobnou hlasitostí se bude jevit pozorovateli dvakrát hlasitější

Subjektivní vnímání zvuku

Křivky stejné hladiny hlasitosti



Subjektivní vnímání zvuku

Hladina zvuku (hluku)

Zvuk	L_I [dB]	H [son]
absolutní ticho	0	0,06
tiché dýchání	10	0,13
tichá odhlučněná místnost	15	0,17
tichá obývací místnost	30	0,5
průměrný hluk v bytě	40	1
klidná konverzace	40-60	1-4
hlučná ulice	70-90	8-32
silný křik	80	16
rockový koncert	130	512
tryskové letadlo	150	2048
raketový motor	180	16384

120 dB ... práh bolesti



Subjektivní vnímání zvuku

Příklad: (hladina intenzity hluku)

- určete, jak se sníží hladina intenzity hluku L_I , vzdálíme-li se od zdroje hluku do dvojnásobné ($n=2$) resp. šestinásobné ($n=6$) vzdálenosti (hluk se šíří všemi směry)

Intenzita hluku:

$$I \sim \frac{1}{R^2} \longrightarrow \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 = n^2$$

Hladina intenzity hluku:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$\Delta L_I = L_{I1} - L_{I2} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log n^2$$



$$n = 2 \Rightarrow \Delta L_I = 6 \text{ dB}$$

$$n = 6 \Rightarrow \Delta L_I = 15,6 \text{ dB}$$



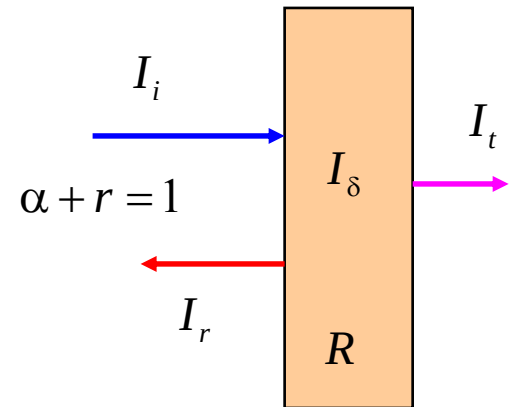
Šíření zvuku v prostoru

Zvuková odrazivost

$$r = \frac{I_r}{I_i}$$

Zvuková průzvučnost

$$\tau = \frac{I_t}{I_i}$$



Stupeň zvukové neprůzvučnosti

$$R = 10 \log(1/\tau) \quad [\text{dB}]$$

Zvuková pohltivost

$$\alpha = \frac{I_\delta + I_t}{I_i} = \delta + \tau$$

zvuk se odráží a pohlcuje na stěnách místností

činitel zvukové pohltivosti

zeslabení intenzity při průchodu vrstvou tloušťky dx

$$\beta dx = -\frac{dI}{I} \quad \longrightarrow \quad \frac{I_x}{I_0} = e^{-\beta x}$$

součinitel pohltivosti

Šíření zvuku v prostoru

Pohltivost stěny:



$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$$

Ozvěna (echo):

- jev, při kterém vlivem odrazu zvuku, slyší pozorovatel zvuk dvakrát nebo vícekrát za sebou (v uzavřeném i volném prostoru)
- pokud dorazí dostatečně intenzivní zvuková vlna po době $\Delta t = 0,1$ s nebo delší po přijetí přímé zvukové vlny

$$c \doteq 340 \text{ m/s}$$

$$L = c \cdot \Delta t \doteq 34 \text{ m}$$

Doba dozvuku:

- doba, za kterou hladina intenzity po vypnutí zdroje zvuku klesne na 10^{-6} původní hodnoty (tj. o 60 dB)

ozvěnu pozorujeme,
jestliže zvuk odrážející
plocha je dále nežli 34m

$$T = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV}$$

**Millingtonův vzorec pro
dobu dozvuku**

m...součinitel pohltivosti zvuku ve vzduchu
V... objem místnosti

Šíření zvuku v prostoru

Blesk a hrom:

- určete přibližně, jak vzdálená je bouřka, jestliže hrom uslyšíme po čase $\Delta t = 10$ s

$$D = c\Delta t = 340 \cdot 10 = 3,4 \text{ km}$$

- určete intenzitu zvuku I , jestliže naměřená hladina intenzity hromu je $L_I = 120$ dB

$$I = I_0 10^{\frac{L_I}{10}} = 1 \text{ W/m}^2$$



Použití ultrazvuku

Ultrazvuk

- ⊕ mechanické vlnění s frekvencí vyšší nežli 20 kHz
- ⊕ budiče **piezoelektrické** nebo **magnetostrikční**
- ⊕ lze dosáhnout frekvence až 10^6 Hz a intenzitu v řádu 10^6 W/m²
- ⊕ ultrazvukové vlny mají velmi krátkou vlnovou délku λ a šíří se kolem překážek prakticky přímočaře

Útlum ultrazvuku:

- ⊕ absorpce vlnění $\longrightarrow \frac{I_x}{I_0} = e^{-\beta x}$
- ⊕ odraz, lom a rozptyl vlnění

Plyny a kapaliny: $\beta/f^2 \approx \text{konst.}$

Kovy: $\beta/f \approx \text{konst.}$

- výrazně se zeslabují ve vzduchu (s rostoucí frekvencí)
- malá absorpce ultrazvuku ve vodě (použití - sonary)

zeslabení $I_x = I_0/2$



Materiál	$f=100$ kHz	$f=1000$ kHz
voda	$x = 1400$ m	$x = 14$ m
vzduch	$x = 2,6$ m	$x = 0,026$ m
hliník	$x = 58$ m	$x = 0,58$ m

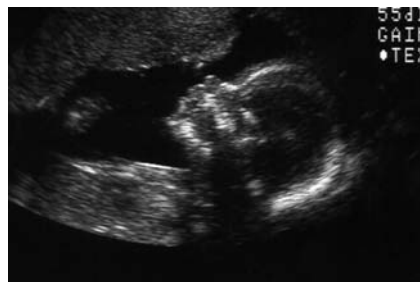
Použití ultrazvuku

⊕ vlastnosti ultrazvuku (různá pohltivost a odrazivost v materiálech) nabízí široké spektrum použití v technice a lékařství

- a) zobrazování ultrazvukem (lékařská diagnostika)
- b) echolokace (sonary, živočichové)
- c) průzkum a mapování oceánů (měření hloubek)
- d) nedestruktivní kontrola výrobků a materiálů

ultrasonografie

- vhodné pro zobrazování a diagnostiku měkkých tkání



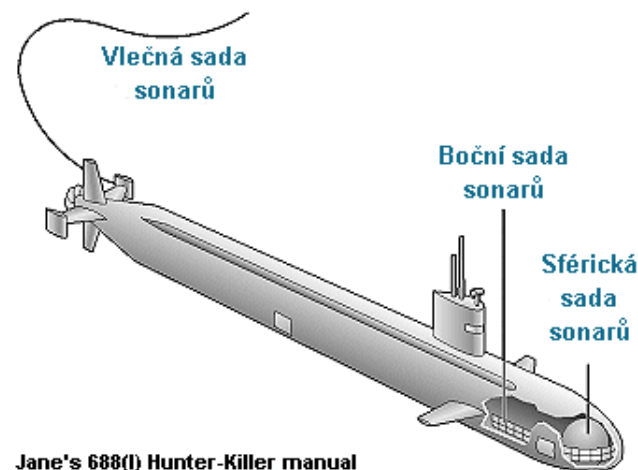
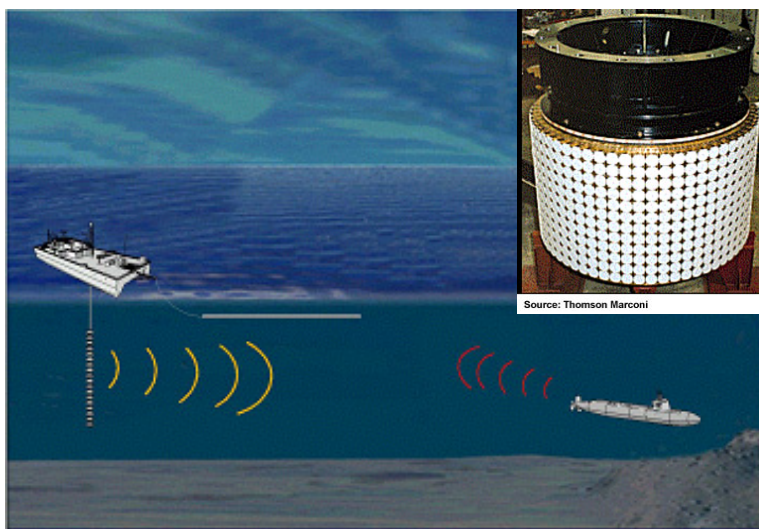
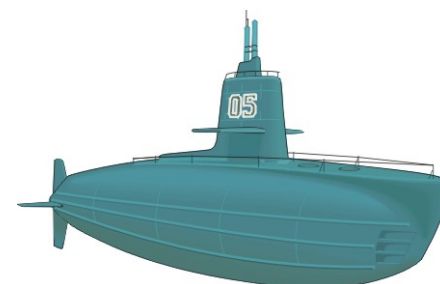
Použití ultrazvuku

echolokace

- ⊕ využití odrazů ultrazvukových vln na překážkách pro detekci jejich rozmístění v prostoru

sonary

- aktivní i pasivní sonarové systémy pro podhladinovou detekci plavidel
- používají se detektory a vysílače ultrazvukových pulsů o frekvencích 10 Hz- 10 kHz

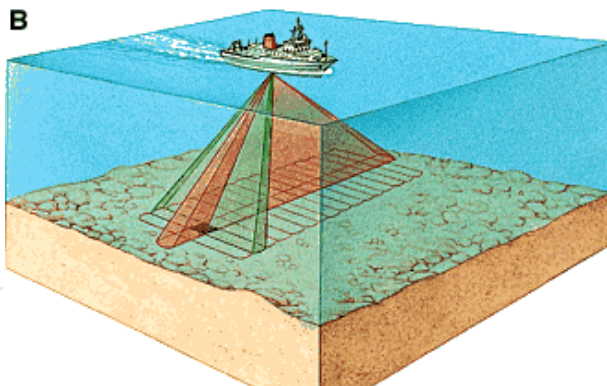


Jane's 688(I) Hunter-Killer manual

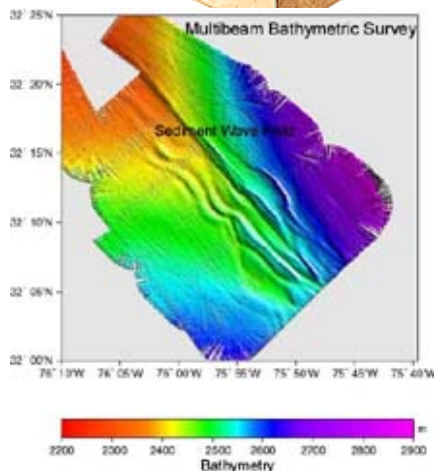
Použití ultrazvuku

Měření hloubek oceánů sonarem (topografie dna)

- ✚ měřením doby T mezi vysláním a příjmem odražených ultrazvukových pulsů (ech) ode dna lze určit hloubku



$$h = \frac{cT}{2}$$



echolokace živočichů

- ✚ někteří živočichové (např. netopýři, delfini, ...) používají ultrazvukových signálů pro orientaci při pohybu a detekci potravy

netopýři

zvukový puls: frekvence 20-160 kHz, délka 0,7-60 ms, opakování 5-150 s⁻¹, intenzita 40-150 dB

sonar: rozlišovací schopnost 0,05 mm (nepřímo úměrná vzdálenosti překážky), dosah 5-500 m, úhlové rozlišení < 5°

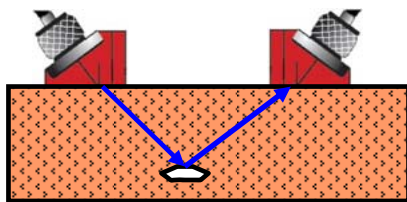


Použití ultrazvuku

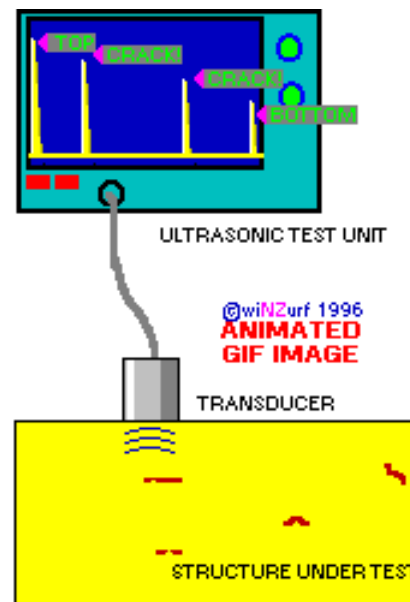
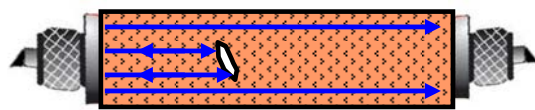
Nedestruktivní kontrola materiálů

- využívají odrazu a útlumu ultrazvukových vln na rozhraní pevných a plyných látek (detekce kazů) pomocí detekce odražených ultrazvukových pulsů (ech)
- lze použít i u kovových vzorků značné tloušťky a odhalit vnitřní vady materiálu (trhliny, bubliny a jiné nehomogenity) o milimetrové velikosti
- ⊕ **detekce vnitřních defektů materiálů**
- ⊕ **měření tloušťky vrstev materiálu (s přesností $1\mu\text{m}$)**
- ⊕ **měření mechanických parametrů materiálů (modul pružnosti,...)**

**odrazová
metoda**



**průchodová
metoda**



Použití ultrazvuku

rezonanční metoda

- ve vzorku o tloušťce D se vytvoří po odrazu na spodním rozhraní stojatá vlna, která
- frekvence vysílaného vlnění se spojitě mění a vyhledávají se hodnoty f , pro které nastává rezonance

$$D = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{c}{2f}$$

⊕ měření tloušťky vrstev materiálu

⊕ měření rychlosti šíření vln

