

# Studium ultrazvukových vln

**Pomůcky:** Generátor 40kHz vln, zesilovač, 3 mikrofony, dvoukanálový digitální osciloskop, čítač Tesla, odrazová kovová deska, laboratorní stojan, parabolický odražeč, difrakční mřížka s nastavitelným počtem štěrbin, elektrický vozíček s nastavitelnou rychlostí pojezdu, pojezdová lavice s měřítkem (2 ks), stopky, výsuvné měřítko, kovové měřítko 50cm, úhломěr, kabely, sada držáků pro mikrofony

## 1 Základní pojmy a vztahy

Cílem úlohy je podrobné studium vlastností ultrazvukových vln. Druhým cílem je seznámení studentů s moderním digitálním osciloskopem a jeho nejpoužívanějšími funkcemi.

Jako ultrazvukové jsou definovány vlny nad 20kHz, jedná se o zvuk, který již nemůže zachytit lidské ucho. Ultrazvukové vlny vykazují známé vlnové vlastnosti jako např. difrakci, odraz, lom či disperzi. Zvukové vlny jsou vlny longitudinální (podélné, tedy kmitající ve směru šíření vlny).

### 1.1 Rychlost zvuku

Při zanedbání disperze je rychlost zvuku  $v_z$  daná fázovou rychlostí zvukových vln. Fázová rychlost  $v_f$  zvukových vln je v tekutinách určena modulem objemové pružnosti  $K$  (převrácená hodnota stlačitelnosti) a hustotou prostředí  $\rho$ .

$$v_f = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Předpokládáme-li, že se vzduch chová jako ideální plyn, je pak šíření zvuku v plynech adiabatický děj a pro rychlost vzduchu  $v_z$  vychází

$$v_z = v_f = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}},$$

kde  $p$  je tlak plynu a  $\gamma$  Poissonova konstanta. Po dosazení hodnot vychází závislost rychlosti suchého vzduchu na teplotě  $T$  [°C]

$$v_z = 331.3 \sqrt{1 + T/273.15} \quad (1)$$

Chceme-li zjistit rychlost zvuku je měření totožné s měřením vzdáleností pomocí zvukových vln (sonar). Použije se jednoduchý vztah

$$v_z = \frac{s}{t}, \quad (2)$$

kde  $s$  je vzdálenost mezi zdrojem zvuku a přijímačem a  $t$  je doba než vyslaný zvukový signál dorazil do přijímače.

### 1.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev se projevuje, jestliže se zdroj nebo pozorovatel periodického vlnění vůči sobě navzájem pohybují. Ve zjednodušeném případě, kdy se přijímač a vysílač pohybují ve směru šíření (tedy od sebe či k sobě) platí následující vztahy. Jestliže se vysílač s vlastní frekvencí  $f_0$  pohybuje rychlostí  $v$  vůči přijímači v klidu, platí pro pozorovanou (změřenou) frekvenci  $f$  vztah

$$f = \frac{v_z}{v_z \mp v} f_0, \quad (3)$$

kde znaménko minus je pro případ pohybu vysílače k přijímači a znaménko plus pro pohyb od přijímače. Jestliže se přijímač pohybuje rychlostí  $v$  vůči vysílači s vlastní frekvencí  $f_0$ , který je v klidu, platí pro pozorovanou (změřenou) frekvenci  $f$  vztah

$$f = \frac{v_z \pm v}{v_z} f_0, \quad (4)$$

kde znaménko plus je pro případ pohybu přijímače k vysílači a znaménko minus pro pohyb od vysílače.

### 1.3 Difrakce

U ultrazvukových vln můžeme také pozorovat difrakci vlnění na mřížce. Jestliže vlna o vlnové délce  $\lambda$  dopadá kolmo na šterbinu šířky  $a$ , pak pro minima intenzity platí

$$\sin\theta = \pm \frac{k\lambda}{a}, \quad (5)$$

kde  $\theta$  je úhel pod kterým můžeme pozorovat  $k$ -té minimum ( $k \in \mathbb{N}$ ).

Jestliže vlna o vlnové délce  $\lambda$  dopadá kolmo na soustavu šterbin (mřížku) vznikne difrakční obrazec, pro jehož maxima intenzity platí vztah

$$\sin\alpha = \frac{m\lambda}{d}, \quad (6)$$

kde  $\alpha$  je úhel pod kterým můžeme pozorovat maximum  $m$ -tého řádu ( $m \in \mathbb{Z}$ ) a  $d$  je mřížková konstanta, tedy vzdálenost dvou sousedících šterbin.

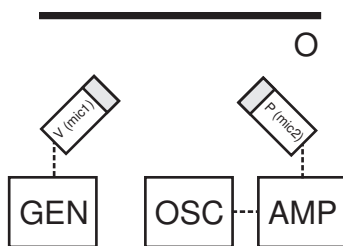
## 2 Experimentální uspořádání

### 2.1 Zákon odrazu

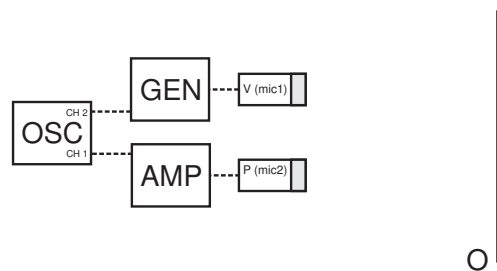
Při tomto měření, kdy se ověřuje zákon odrazu, se měří intenzita přijímaného signálu. Schéma experimentálního uspořádání je na obrázku 1. Pro toto měření použijte osciloskop a hliníkové držáky mikrofonů s ryskou. Kovovou odrazovou desku postavte na papírový úhloměr na stole a přidržte ji laboratorním stojanem tak, aby byla kolmá ke stolu. Vysílač (zapojený do generátoru 40kHz vln) nastavte na vámi zvolený úhel a pomocí druhého hliníkového držáku a mikrofonu zapojeného do zesilovače proměřte intenzitu signálu v závislosti na úhlu odrazu. Generátor nastavte na kontinuální režim.

Nejprve se pomocí osciloskopu ujistěte, že výstupní signál není příliš zesílen a tudíž není zesilovačem ořezaný do obdélníkových tvarů. To provedete tak, že výstup zesilovače přepnete na střídavý signál a pozorujete jestli i v maximu má signál sinusoidální tvar (Osciloskop nastaven na AC mód). Pokud je výstupní signál zkreslený změňte zesílení.

Pro vlastní měření amplitudy odraženého signálu přepněte zesilovač na stejnosměrný výstupní signál a osciloskop na DC mód přijímaného signálu. Vypněte zesilovač a nastavte nulovou vertikální polohu signálu na osciloskopu (také zvolte vhodný napěťový rozsah). Zapněte zesilovač a pro odečítání napětí používejte kurzory na obrazovce osciloskopu k tomu určené.



Obrázek 1: Experimentální schéma pro měření úhlu odrazu zvukových vln (GEN=generátor 40kHz, V=vysílač, O=odrazová plocha, P=přijímač, AMP=zesilovač, OSC=osciloskop)



Obrázek 2: Schéma měření rychlosti zvuku či vzdálenosti (GEN=generátor, V=vysílač, P=Přijímač, AMP=zesilovač, O=odrazová plocha, OSC=osciloskop)

### 2.2 Měření rychlosti zvuku a vzdáleností

Experimentální uspořádání je na obrázku 2. Jako odrazovou plochu použijte stěnu místnosti, nebo kovovou desku. Je také možné provést několik měření přímo, tedy postavit přijímač a vysílač čelem k sobě. Při tomto měření nastavte generátor na pulzní režim a výstup TRIGGER připojte na jeden z kanálů osciloskopu (CH I nebo CH II oba AC

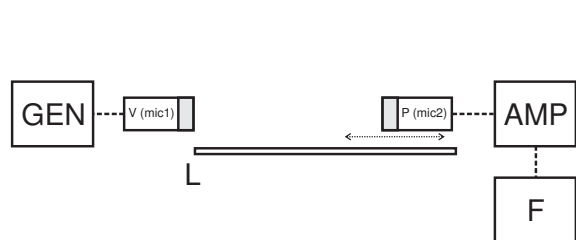
mód). Podle tohoto kanálu budete určovat čas vyslání signálu. Zesilovač nastavte na střídavý výstupní mód a výstup zapojte do druhého kanálu osciloskopu. Na osciloskopu zobrazte oba kanály najednou a trigger osciloskopu nastavte na signál přicházející z generátoru, poté změnou časového rozlišení osciloskopu naleznete signál z přijímače a odečtete časovou prodlevu pulsů. Snažte se zvýšit přesnost odečítání času volbou vhodných časových a napěťových rozsahů na osciloskopu a také vhodnou volbou zesílení zesilovače a frekvence generátoru.

Při měření vzdáleností volte vzdálenost přijímače a vysílače od odrazové plochy stejnou.

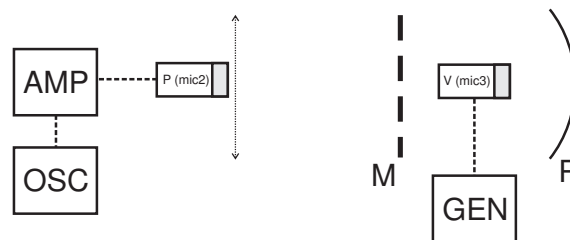
## 2.3 Dopplerův jev

Schéma tohoto měření je na obrázku 3. Pojezdové lavice spojte zespodu gumou v drážce a nastavte je tak, aby byly pokud možno vodorovně. Do vozičku vložte přijímač/vysílač a na konec pojezdové dráhy pomocí laboratorního stojanu druhý mikrofón tak, aby byl na úrovni mikrofónu ve vozičku. Zapněte generátor na kontinuální režim a výstup ze zesilovače nejprve zapojte do osciloskopu. Při největší vzdálenosti (na lavici) přijímače a vysílače dosáhněte (volbou maximálního zesílení zesilovače a vhodné frekvence generátoru) pokud možno obdélníkových tvarů přijímaného signálu, toto je důležité proto, aby výstupní signál ze zesilovače měl stabilní frekvenci. Poté zapojte výstup ze zesilovače do čítače Tesla, frekvenci měřte s přesností na jeden Hz (při nastavení čítače na průměrování 1s).

Při měření Dopplerova jevu je důležité systematicky měřit a přesně určit rychlost vozičku v době odečítání hodnot z čítače Tesla. Pomocí stopek a měřením různých úseků na lavici určete oblast, kde je rychlost stálá (při daném nastavení potenciometru rychlosti vozičku). V ideálním případě můžete pro každé měření Dopplerova jevu měřit zároveň rychlost i změnu frekvence.



Obrázek 3: Uspořádání experimentu při studiu Dopplerova jevu (GEN=generátor, V=vysílač, P=přijímač, L=pojezdová lavice, AMP=zesilovač, F= čítač Tesla)



Obrázek 4: Experimentální uspořádání pro měření interference a ohybu na soustavě štěrbin (GEN=generátor, V=vysílač s parabolou (P) a mříží (M), P=přijímač, AMP=zesilovač, OSC=osciloskop)

## 2.4 Difrakce a interference zvuku

Experimentální uspořádání je na obrázku 4. Vysílač s parabolickým odražečem a soustavou štěrbin je umístěn cca 3-4m od přijímače zapojeného přes zesilovač do osciloskopu. Generátor nastavte na kontinuální režim. Pro odečítání intenzity signálu použijte osciloskop, a nastavení proveďte stejně jako při ověřování úhlu odrazu (viz. 2.1). V případě, že nebude mít zesílený signál stálou amplitudu, můžete průměrovat pomocí osciloskopu (ENV - envelope mód, nebo vhodné nastavení časového rozlišení). Měří se intenzita na přímce kolmé k ose odražeče. Úhel se tedy určí přes tangens vzniklého trojúhelníku. Měření proveďte pro  $N = 1, 2, 5$  štěrbin a výsledky graficky znázorněte a okomentujte v protokolu. Posun na měřítku volte tak, abyste sestrojili graf s dostatečným počtem bodů jasně zobrazující nejen maxima i minima, ale i hodnoty mezi nimi.

## 3 Pracovní úkoly

1. Změřte velikost přijímaného signálu v závislosti na úhlu mezi přijímačem a kolmicí k odrazové ploše. Výsledky zpracujte tabulkově i graficky a ověřte zda-li platí zákon odrazu pro ultrazvukové vlny. Měření proveďte pro 3 různé úhly dopadu.
2. Změřte rychlost zvuku ve vzduchu. Proveďte alespoň deset měření při různých vzdálenostech vysílače od přijímače a výsledky zpracujte statisticky. Porovnejte váš výsledek se vztahem (1).

3. Změřte alespoň pět vzdáleností odrazové plochy od vysílače/přijímače pomocí ultrazvukových vln (princip sonaru). Porovnejte vzdálenosti měřené sonarem a měřítkem. Použijte vámi experimentálně stanovenou rychlost zvuku z úkolu 2.
4. Změřte Dopplerův jev pro dvě rychlosti  $v$  vozičku pro oba případy (přijímač klid nebo přijímač pohyb) a porovnejte výsledky s teoretickými výpočty. Měření proveďte pro každý případ - přijímač klid/pohyb - a pro každou rychlost minimálně 5-krát.
5. Proměřte závislost intenzity zvukového signálu po průchodu zvukových vln soustavou štěrbin pro  $N$  (počet štěrbin) = 1,2,5. Výsledky zpracujte graficky a okomentujte v protokolu.

## 4 Poznámky k měření

1. Může mít tato aparatura zpoždění, které by negativně ovlivnilo měření rychlosti zvuku? Jak byste takové zpoždění určili a jak by jeho případná znalost ovlivnila vaše výsledky?
2. Čítač Tesla má různou přesnost určení frekvence (podle doby měření). Měřte při nastavení 1s. Když zelené světélko svítí, čítač měří.
3. Pozor! Frekvence generátoru se postupem času zmenšuje (postupně o 1 Hz) mějte to na paměti hlavně při měření Dopplerova jevu.
4. Při měření Dopplerova jevu může být slabá baterka ve vozičku, rychlosti 0,3m/s - 0,6m/s jsou dostačující, maximální rychlost je kolem 0,8m/s.

## Reference

- [1] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/HFrame.html>
- [2] E. Mechlová, K. Košťál a kol., *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*, Prometheus, Praha 2001
- [3] J. Tolar, *Vlnění, optika a atomová fyzika*, skripta FJFI, <http://www.fjfi.cvut.cz/files/k402/files/skripta/voaf/V0AF2008.pdf>