

Laboratórna úloha č. 5

Rýchlosť zvuku

Úloha: Pomocou akustického interferometra skladaním kolmých kmitov určiť rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu pri izbovej teplote.

Teoretický úvod

Akustický interferometer (obr. 1) sa skladá zo zdroja akustickej frekvencie, reproduktora, mikrofónu a osciloskopu. Lúč osciloskopu je vo vertikálnom smere vychýľovaný priamo signálom zo zdroja (generátora), v horizontálnom smere signálom prichádzajúcim z mikrofónu, ktorého vzdialenosť od reproduktora možno plynulo meniť. Zmenou vzdialenosti sa mení vzájomné fázové posunutie kmitania lúča v horizontálnom a vertikálnom smere, takže na obrazovke osciloskopu vidíme skladanie dvoch navzájom kolmých kmitavých pohybov, s možnosťou meniť ich fázový rozdiel. Ak na horizontálne a na vertikálne vychýľovacie platničky osciloskopu privádzame sínusové napätie rovnakej uhlovej frekvencie ω , výchylky lúča v horizontálnom a vertikálnom smere opisujeme vzťahmi:

$$\begin{aligned}x &= x_0 \sin(\omega t + \varphi_m) \\y &= y_0 \sin(\omega t + \varphi_g)\end{aligned}\tag{1}$$

kde x_0 a y_0 sú amplitúdy kmitavého pohybu a φ_m a φ_g fázové konštanty (začiatočné fázy). Indexy m a g nám majú pripomenúť, ktorá fáza pochádza priamo z generátora striedavého napätia a ktorá z mikrofónu. Tvar obrazca na obrazovke závisí od rozdielu fáz $\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_g$. Ak $\Delta\varphi = k\pi$, kde $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, rovnice (1) nadobudnú tvar

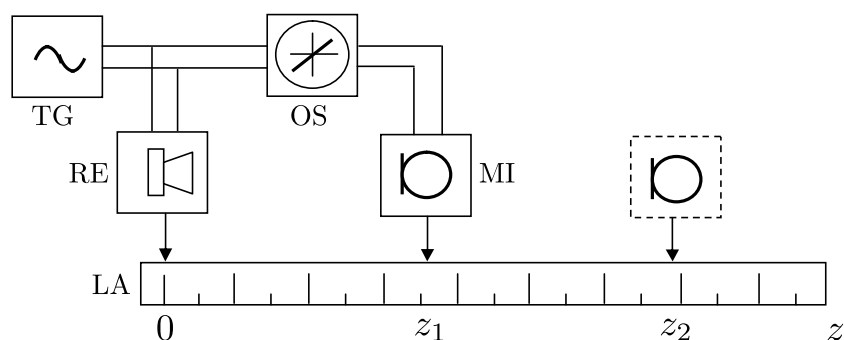
$$\begin{aligned}x &= x_0 \sin(\omega t + \varphi_m) \\y &= y_0 \sin(\omega t + \varphi_m - k\pi) = (-1)^k y_0 \sin(\omega t + \varphi_m)\end{aligned}\tag{2}$$

Podielom týchto dvoch rovníc je rovnica priamky:

$$y = (-1)^k \frac{y_0}{x_0} x\tag{3}$$

Obrazec na obrazovke má v tomto prípade tvar naklonenej úsečky, ktorej smernica má hodnotu $\pm y_0/x_0$. Ak $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi/2$, kde k je opäť celé číslo, potom rovnice (1) nadobudnú tvar

$$\begin{aligned}x &= x_0 \sin(\omega t + \varphi_m) \\y &= y_0 \sin[\omega t + \varphi_m - (2k + 1)\pi/2] = (-1)^k y_0 \cos(\omega t + \varphi_m)\end{aligned}\tag{4}$$



Obr. 1: Bloková schéma akustického interferometra.

Umocnením a sčítaním týchto rovníc dostaneme po menšej úprave rovnicu elipsy, ktorej osi sú rovnobežné so súradnicovými osami:

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} = 1 \quad (5)$$

Pri iných fázových rozdieloch majú obrazce tvar elipsy s osami, ktoré už nie sú rovnobežné so súradnicovými osami. Spojitými zmenami fázového rozdielu $\Delta\varphi$ dosahujeme spojitú zmenu tvaru obrazca na osciloskope. Niektoré špeciálne prípady obrazcov pre prípad, keď amplitúdy x_0 a y_0 sú rovnaké, sú uvedené na obrázku 2.

Metóda merania

Z reproduktora vychádza zvuková vlna, ktorú budeme v hrubom priblížení považovať za rovinnú. Potom rovnicu, ktorá vyjadruje akustickú výchylku $u(z,t)$ ako funkciu času t a vzdialenosti z od reproduktora, napíšeme v tvare

$$u = u_0 \sin(\omega t - Kz) \quad (6)$$

kde u_0 je amplitúda vlny, ω jej uhlová frekvencia, $K = 2\pi/\lambda$ je uhlové vlnové číslo vlny a λ jej vlnová dĺžka. Uhlová frekvencia vlny $\omega = 2\pi f$ je 2π -násobkom frekvencie f striedavého napätia, ktoré je zo zdroja privádzané na reproduktor. Medzi frekvenciou f , vlnovou dĺžkou λ a rýchlosťou v šírenia sínusovej zvukovej vlny platí vzťah

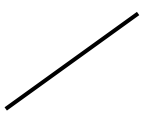

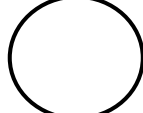

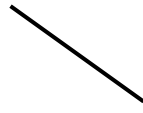
$$v = \lambda f \quad (7)$$

a tak rovnicu (6) môžeme zapísať aj v tvare

$$u = u_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}z\right) = u_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi f}{\lambda f}z\right) = u_0 \sin\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)\right] \quad (8)$$

Napríklad v tesnej blízkosti reproduktora, teda v mieste s polohou $z = 0$, akustickú výchylku v súlade s rovnicou (6) vyjadríme funkciou

$$u = u_0 \sin(\omega t) \quad (9)$$

$\Delta\varphi = 0$	$\Delta\varphi = \pi/4$	$\Delta\varphi = \pi/2$	$\Delta\varphi = 3\pi/4$	$\Delta\varphi = \pi$
				

Obr. 2: Obrazce na osciloskope pri skladaní kmitov s rovnakými amplitúdami.

Akustické oscilácie registrujeme mikrofónom, ktorý ich mení na elektrické oscilácie¹. Ak privedieme napájacie napätie reproduktora na vertikálnu os osciloskopu a výstup z mikrofónu na horizontálnu os, na obrazovke pozorujeme skladanie dvoch navzájom kmitavých pohybov. Pozorované interferenčné obrazce zodpovedajú fázovému rozdielu obidvoch kmitavých pohybov. Možno nájsť takú vzdialenosť z_1 mikrofónu od reproduktora, pri ktorej pozorujeme napríklad sklonenú úsečku (ľavý krajný obrázok). Pri postupnom vzdalovaní mikrofónu od reproduktora vzniknú aj ďalšie obrazce z obrázku 2, až vo vzdialenosti z_2 sa opäť objaví pôvodná úsečka. Vtedy sa fáza výstupného signálu z mikrofónu zmenila práve o 2π a teda rozdiel $z_2 - z_1$ sa rovná vlnovej dĺžke zvuku, ako vyplýva z nasledujúcej úpravy:

$$\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z_1\right) - \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z_2\right) = 2\pi \implies \frac{2\pi}{\lambda}(z_2 - z_1) = 2\pi \implies z_2 - z_1 = \lambda$$

To znamená, že zmeraním vzdialenosti $d = z_2 - z_1$ určíme vlnovú dĺžku akustickej vlny a pomocou vzťahu (7) aj rýchlosť v jej šírenia, ak frekvenciu f generátora poznáme.

Opis aparatury a postup práce

Akustický interferometer je nakreslený na obrázku 1. Celé zariadenie sa skladá z tónového generátora TG, osciloskopu OS, reproduktora RE, mikrofónu MI a lavice LA, na začiatku ktorej je umiestnený reproduktor a po ktorej sa mikrofón môže posúvať. Reproduktor je napájaný z laditeľného zdroja sínusového napätia akustických frekvencií a je zdrojom akustických vln rovnakej frekvencie. Tieto sa registrujú mikrofónom a ním aj transformujú na elektrické kmity, ktoré sa potom privádzajú na horizontálnu vychyľovaciu sústavu osciloskopu. Na vertikálnu sústavu sa privádza striedavé napätie priamo z tónového generátora.

Praktické meranie spočíva v nájdení vzájomne najbližších polôh mikrofónu, v ktorých sú obrazce na obrazovke osciloskopu rovnaké (napríklad na ľavú stranu naklonená úsečka). Ak chceme vlnovú dĺžku určiť čo najpresnejšie, je potrebné mikrofón posunúť o viac (n) vlnových dĺžok a merať pri väčších vzdialenostiach od zdroja vlnenia. Vlnovú dĺžku potom

¹Pre jednoduchosť úvah môžeme predpokladať, že fázové posunutie sa pri transformácii akustického signálu na elektrický nemení. Tento predpoklad však vôbec nie je nutný a ani ho nikde nevyužívame, pretože v meraní vyhodnocujeme len rozdiely vzdialeností mikrofónu od reproduktora, nie absolútne vzdialenosti.

určíme vzťahom

$$\lambda = \frac{z_2 - z_1}{n} \quad (10)$$

Takto získané hodnoty λ zapisujeme do tabuľky. Meriame pri aspoň desiatich rôznych frekvenciách vo frekvenčnom pásme 20–25 kHz. Namerané hodnoty zapisujeme do tabuľky. Na začiatku alebo na konci meraní zistíme aj teplotu v laboratóriu a zapíšeme ju do protokolu.

Vyhodnotenie výsledkov

Pri štatistickom vyhodnotení nameraných rýchlostí je potrebné brať do úvahy, že každé meranie sme robili za iných podmienok (pri inej frekvencii generátora napätia a zvuku). Princípy štatistického vyhodnotenia súboru nameraných údajov pritom vyžadujú, aby sa veličiny ako napr. smerodajná odchýlka aritmetického priemeru určovali len z údajov získaných za tých istých nastavených podmienok experimentu.

Bežné pozorovania nám však potvrdzujú fakt, že rýchlosť šírenia sa zvuku vo vzduchu nezávisí od frekvencie zvukového vlnenia, alebo že táto závislosť je prakticky zanedbateľná. Preto môžeme predpokladať, že v ideálnom experimente, t.j. pri absencii rôznych systematických aj náhodných zdrojoch chýb, by sme pre každé naše meranie dostali tú istú hodnotu rýchlosti zvuku. Na základe toho má zmysel vypočítať aspoň priemernú hodnotu zo súboru získaných rýchlostí. Okrem nej je vhodné do zhodnotenia výsledkov uviesť aj šírku intervalu, do ktorého namerané rýchlosti spadajú.²

Do zhodnotenia výsledkov zapíšeme aj hodnotu rýchlosti zvuku zodpovedajúcu teplote v laboratóriu, ktorú získame z empirického vzťahu

$$v_\theta = \sqrt{1 + \frac{\theta}{273,15^\circ\text{C}}} \cdot 331,3 \text{ m/s} \quad (11)$$

v ktorom θ je teplota³ v laboratóriu vyjadrená v stupňoch Celzia.

²Alternatívnym a rigoróznejšim spôsobom štatistického vyhodnotenia merania by bola lineárna regresia vzťahu

$$\lambda = v \frac{1}{f}$$

Je to lineárna závislosť medzi prevrátenou frekvenciou a vlnovú dĺžkou vlnenia. Hľadaná rýchlosť zvuku v je smernicou tejto závislosti. Namiesto jednoduchého spôsobu vyhodnotenia navrhnutého v hlavnom texte preto môžete použiť vyhodnotenie lineárnou regresiou typu $y = kx$, teda takú, kde prekladaná priamka je prinútená presne prechádzať počiatkom. Nezabudnite pritom z regresie určiť aj smerodajnú odchýlku s_v smernice, teda rýchlosti a zostrojíte aj graf nameranej závislosti λ of $1/f$. Do grafu zapíšete hodnotu v aj s_v . Na grafe ani v protokole nepoužívajte symboly x , y , k , ale fyzikálne symboly $1/f$, λ a v .

³Symbol θ je jednou z foriem zápisu gréckeho písmena, ktoré vyslovujeme „theta“. Je to jeden zo zaužívaných symbolov pre Celziovu teplotu.

Meno:

Krúžok:

Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy č. 5

Rýchlosť zvuku

Stručný opis metódy merania

Vzťahy, ktoré sa používajú pri meraní

Prístroje a pomôcky

Záznam merania, výpočty a výsledky

i	f (kHz)	z_1 (cm)	z_2 (cm)	$z_2 - z_1$ (cm)	n	λ (m)	v (m/s)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Hlavný výsledok⁴: $v_{\text{mer}} =$

Celziová teplota v laboratóriu: $\theta =$

Výpočet rýchlosti zvuku podľa vzťahu (11) s uvedením hodnôt a rozmerov veličín:

$$v_{\theta} = \sqrt{1 + \frac{\theta}{273,15^{\circ}\text{C}}} \cdot 331,3 \text{ m/s} =$$

Zhodnotenie výsledkov

Dátum odovzdania protokolu:

Podpis študenta:

Hodnotenie a podpis učiteľa:

⁴Do zhodnotenia výsledkov okrem iného uveďte, či bol získaný ako priemer alebo z lineárnej regresie.