Fázová a grupová rychlost ultrazvuku v kapalinách

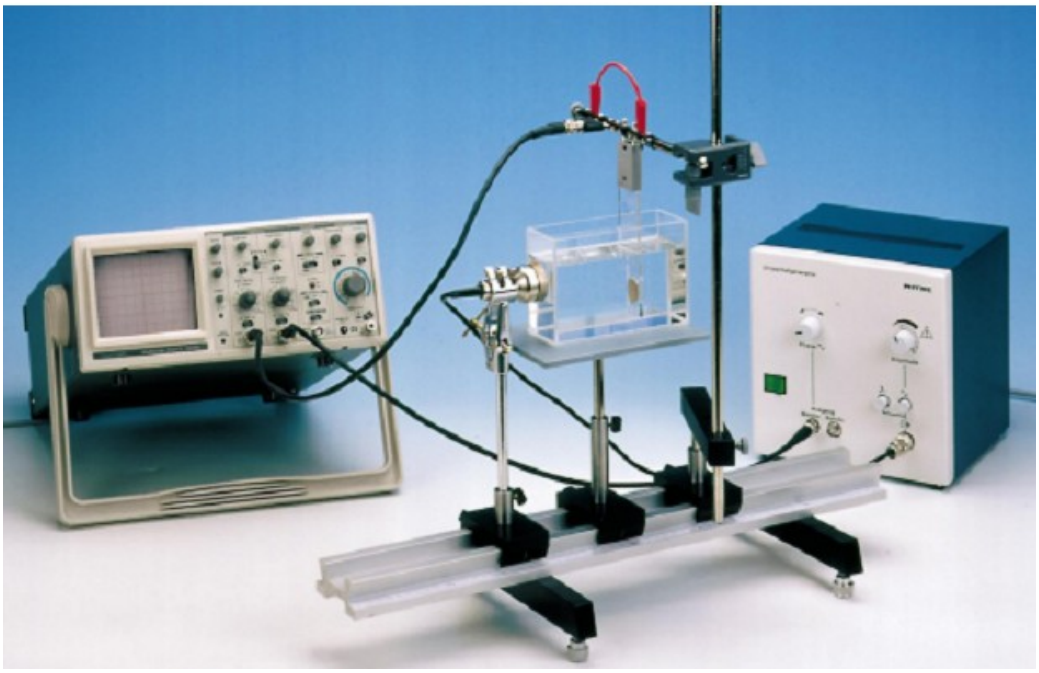
Klíčové pojmy: podélné (longitudinální) vlnění, rychlost zvuku v kapalinách, vlnová délka, frekvence, piezoelektrický efekt, piezoelektrický ultrazvukový převodník

Princip
Zvukové vlny jsou v kapalině vyvolány ultrazvukovým generátorem a jsou detekovány piezoelektrickým ultrazvukovým přijímačem. Signály z vysílače a přijímače sledujeme pomocí osciloskopu. Signály z generátoru ultrazvuku a přijímače ultrazvuku zaznamenáváme pomocí osciloskopu.

Ultrazvukem vznikají v kapalném prostředí podélné, postupné nebo stojaté vlny. Pro určení fázové a grupové rychlosti použijeme podélné postupné vlny. V experimentu jsou zvukové vlny vysílány do kapaliny vysílačem – ultrazvukovým zvukovým generátorem a snímány piezoelektrickým ultrazvukovým čidlem. Fázová rychlost je vypočtena pomocí relativního posunu fázových pozic signálů. Grupová rychlost je určená z měření zpoždění zvukových pulsů.

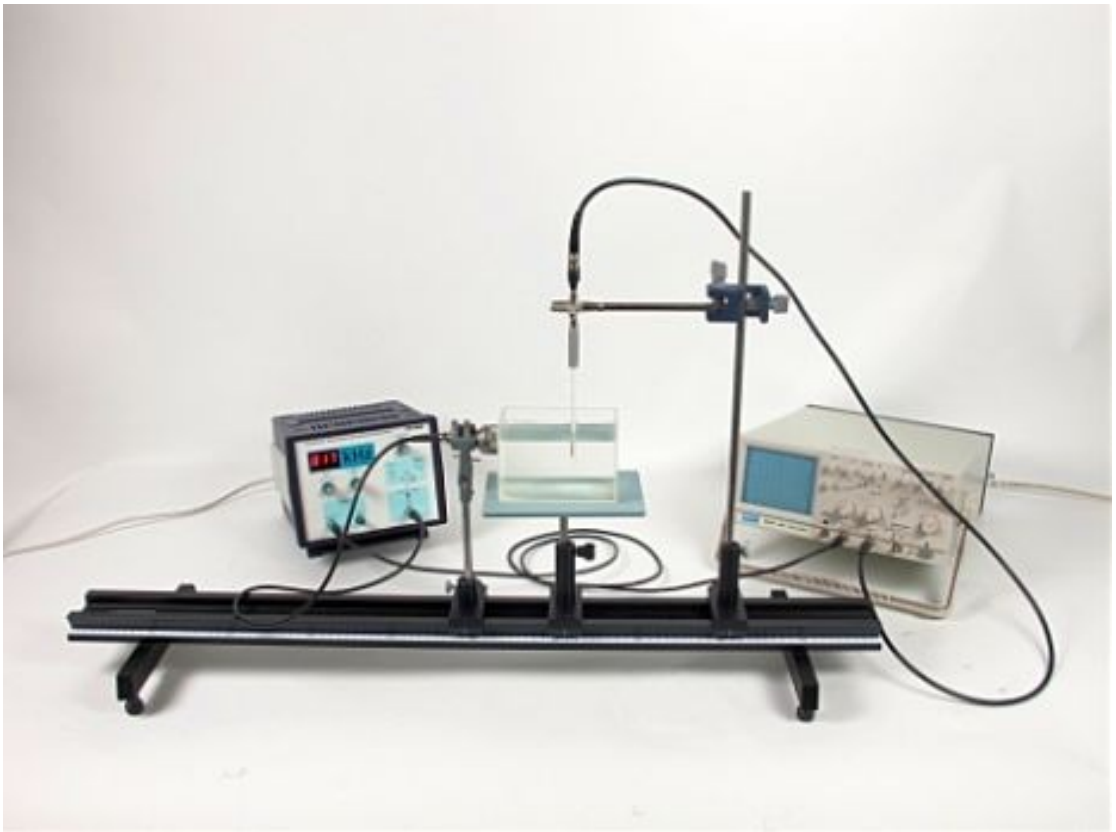
Úlohy
1. Naměřte relativní fázový posun signálu ultrazvukového přijímače jako funkci vzdálenosti od ultrazvukového generátoru (sinusový mód) a určete ultrazvukovou vlnovou délku a fázovou rychlost, frekvence vlnění je známa.
2.1 Najděte vhodné nastavení koeficientu rozmítání „sweep“ osciloskopu pro ultrazvukovou frekvenci.
2.2 Pomocí generátoru v pulsním módu zaznamenejte „delay time“ zpoždění zvukových pulzů jako funkci vzdálenosti mezi generátorem a přijímačem. Stanovte grupovou rychlost.

Obr.2 -Aparatura potřebná ke studiu rychlosti šíření ultrazvuku



Vybavení

11744.00 1 přijímač – sonda ultrazvuku
11744.93 1 generátor ultrazvuku
03504.00 1 skleněná kyveta 150 _ 55 _ 100mm
07924.00 1 izolační stojan
08283.00 1 optická lavice l = 60 cm
08284.00 2 nastavitelná podstava optické lavice
08286.01 2 jezdec pro optickou lavici, h = 30mm
08286.02 2 jezdec na optickou lavici, h = 80mm
08060.00 1 stoleček na tyčce
08256.00 1 otočné rameno
02040.55 1 dvojitá svorka -PASS-
02032.00 1 podpůrná nerezová tyč, l = 500mm
37715.00 1 univerzální držák
11459.95 1 osciloskop, 30MHz, 2 kanálový
07359.95 1 vodič, l = 100mm, červený
07542.11 2 koaxiální kabel, BNC, l = 750mm
07542.27 1 adaptér, BNC-zásuvka/ 4mm plug pair
05949.00 1 laboratorní teploměr 10 + 30 C
30084.25 3 glycerín, 250ml
30155.50 1 NaCl, 500 g
31246.81 1 destilovaná voda, 5 l



Postup.
Plošku generátoru smočíme pro lepší kontaktní vlastnosti glycerínem nebo vodou. Abychom zabránili vzniku stacionárního vlnění a vícenásobného echa zvukovým odrazem, kyvetu s kapalinou naproti generátoru opatříme zvukově absorpčním materiálem jako je např. pěna nebo pokrčený papír.

Úkoly stručně:

1. Osciloskop připojíme tak, aby přijímal signál z monitorovaného ultrazvukového sinusového generátoru na interním kanálu 2. Měníme-li vzdálenost mezi generátorem a přijímací sondou, sledujeme na osciloskopu změny fáze přijímaného signálu. Sondu nejprve nastavíme tak, aby její signál byl ve fázi s monitorovaným signálem braným z generátoru. Posuneme-li nyní sondu o celistvé násobky vlnové délky, budou oba signály opět ve fázi. Tak lze ze vzdálenosti, o které byla sonda přenesena a její signál byl opět ve stejné fázi určit vlnovou délku vlnění v daném prostředí.

2.1. Časovou základnu osciloskopu (tu, která odpovídá zkoumanému zpoždění) ověříme, případně kalibrujeme pomocí známého (spolehlivého) frekvenčního generátoru.

2.2. Osciloskop je spouštěn externím synchronním signálem generátoru, který pro tuto část úlohy je nastaven v pulsním módu. Ultrazvukový přijímač - sonda přesuneme z počáteční polohy blíže ke generátoru vln a změnu v pulsním odezvě („delay time“) se zjistíme z toho, že hrana pulsu na oscilogramu se posune, toto posunutí zaznamenáme.
Dále sledujeme a zaznamenáváme teplotu kapaliny: Měření opakujeme pro další prostředí glycerol a roztoky soli.

Teorie a rozbor

Úkol 1: vlnová délka, fázová rychlost vlnění

Se změnou vzdálenosti Δ mezi generátorem a sondou, z její počáteční polohy (relativní fáze = 0), se přijímaný signál fázově posunuje vzhledem k vysílači takto

$$\Delta = \frac{\hat{\ }}{\lambda} \qquad (1)$$

Pokud vzdálenost dále měníme, signál se znovu překryje pro (při posunu sondy o celistvé násobky vlnové délky, budou oba signály opět ve fázi):

$$\Delta = \cdot \qquad = \qquad (2)$$

Vlnovou délku λ je možné vypočítat ze vzájemného posuvu fáze obou signálů jako

$$\lambda = \frac{\hat{\ }}{\Delta} \cdot \qquad - \hat{\ } \qquad (3)$$

To plyne z rovnic (1) a (2).

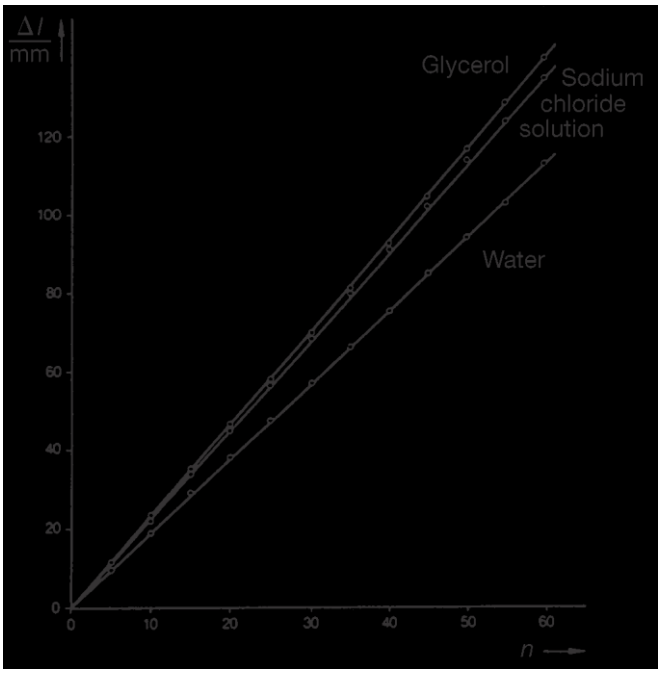
Pokud známe frekvenci zvuku ***f***, je fázová rychlost

$$c_p = \cdot \qquad (4)$$

Vlnovou délku λ určujeme ze (3) jako směrnici regresní přímky.

Tabulka 1 ukazuje vlnové délky s jejich standardními odchylkami a fázové rychlosti c_p počítané při frekvenci f = 800 kHz podle vztahu (4). Odchylky pro fázovou rychlost jsou počítány pomocí odchylek vlnové délky a předpokládané frekvenční nestálosti generátoru ±5 kHz.

Kapalina	°C	mm	mm	c_p / m / s	c_p / m / s
Destilovaná voda	25	1.873	0.003	1500	12
Nasycený roztok NaCl	25	2.255	0.007	1800	20
Glycerol+	25	2.353	0.004	1880	15



Obr. 1.2: Závislost posunutí sondy pro vodu, glycerol a roztok NaCl jako funkce počtu „přejetých“ vlnových délek(při teplotě 25°C)

Úkol 2.1. Práce s osciloskopem
Koeficient „sweepu“ získáme takto:

$$t^* = \frac{N T}{x} \qquad (5)$$

kde:
N = počet ukázaných vibračních period.
T = 1/f = délka periody f (T=1.25 μs pro f=800 kHz)
x = délka vibračních period z oscilogramu.

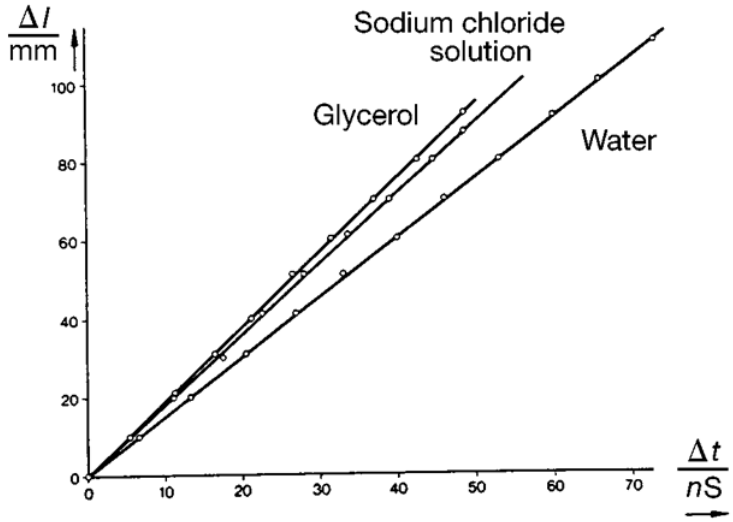
Úkol 2.2. Grupová rychlost c_g
Grupová rychlost vlnění má význam při šíření skupiny (grupy) harmonických vln. Jeto rychlost, kterou se pohybuje tato skupina prostředím, tzn. rychlost, jíž je vlněním přenášena energie. Grupovou rychlost c_g určíme ze vzdálenosti Δl, kterou zvukový signál (sledovaný impuls) v kapalině urazil a času Δ , který potřeboval.

$$c_g = \frac{\Delta l}{\Delta t} \qquad (6)$$

Tabulka 2 ukazuje grupové rychlosti určené ze směrnice regresní přímky podle rovnice (6) a jejich standardní odchylky Δc_g.

Kapalina	°C	c_G / m/s	c_G / m/s	$M c_G$ / m/s
Destilovaná voda	25	1506	7	12
NaCL (satur.)	25	1800	9	14
Glycerol+	25	1900	9	15

Poslední sloupec obsahuje standardní odchylku získanou ze statistických a systematických odchylek vyskytujících se při stanovení koeficientu „sweepu“ t^* při dané frekvenci generátoru.



Obr. 1.3: Změna l(t) pro vodu, glycerol a roztok NaCl jako funkce zpoždění (delay time Dt, (při teplota 25°C)

C).

Grupová a fázová rychlost jsou propojené vztahem:

$$c_g = \quad - \frac{dc}{d\lambda}$$

Fakt, že výsledek rovnosti grupové a fázové rychlosti vlnění: $c_g = c_p$ je v rámci limitů odchylky měření, ukazuje, že

$$\frac{dc_p}{d\lambda} =$$

A tedy, že nedochází k disperzi.

Tabulka 3 údaje převzaté z referenčních zdrojů

Kapalina	°C	$\frac{c}{m/s}$	$\frac{c/T}{m/s \cdot °C}$	Source
Glycerol+	20	1923	−1.8	*
	25	1904	−2.2	**
Voda (destllovaná)	25	1497	+2.5	
	25	1498	+2.4	*
			(0 < u < 40°C)	**

* L. Bergmann, Der Ultraschall (Ultrasonics), Hirzel-Verlag
** Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Co.

Poznámky

1. Glycerol je hygroskopický, takže měřená rychlost zvukového vlnění bývá pomalejší, než jakou nalezneme v referenčních tabulkách.

2. Osciloskop: relativná chyba záchytu „sweep“ error ± 5 %.

3. Ultrazvukový generátor: relativní odchylka pro frekvenci 800 kHz: ± 0.6 %.

4. Podle údajů z Bergmana * rychlost zvuku v NaCl lineárně roste s koncentrací. Rychlost se mění stejně s teplotou stejně jako v případě destilované vody.

5. Zvukové rychlosti jsou funkcí teploty viz * a **.