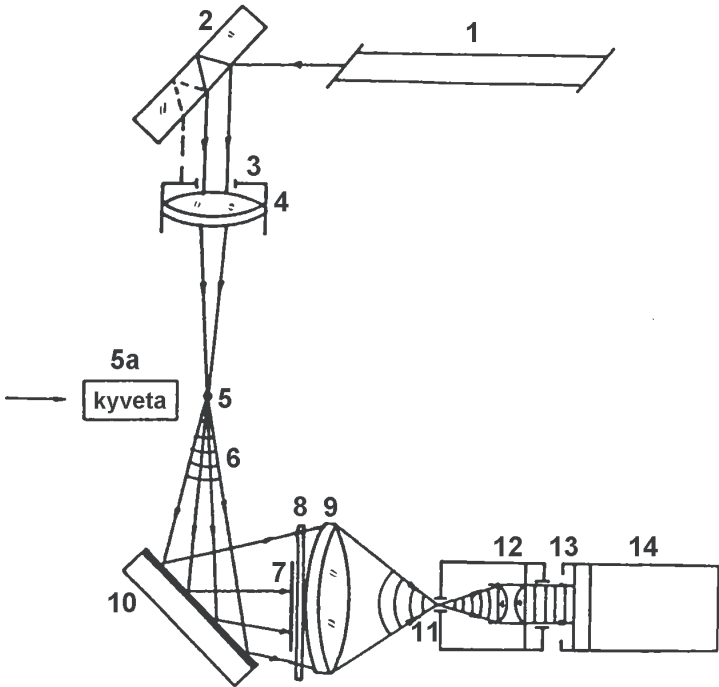


Popis laserového dopplerovského anemometru (LDA)

Schéma laserového dopplerovského anemometru je znázorněno na obr. 4.6-4.

Označené elementy této sestavy jsou:

- 1 He-Ne laser
- 2 planparalelní skleněná deska pro rozdělení laserových paprsků
- 3 clona vysílacího objektivu
- 4 optika vysílacího objektivu
- 5 optická sonda LDA v průsečíku paprsků
- 5a kyveta s roztokem
- 6 detekovaný kužel rozptylového signálu
- 7 stínítko zamezující přímý vstup laserových paprsků do detekční optiky
- 8 červený filtr
- 9 detekční objektiv
- 10 odkláněcí zrcadlo
- 11 dírková clona v rámečku
- 12 kondensor
- 13 výstupní clona
- 14 fotonásobič



Obr. 4.6-4 Schéma laserového dopplerovského anemometru

Paprsek z He-Ne laseru (1) je rozdělen na skleněné planparalelní desce (2) na dvojici paprsků, které vstupují do vysílacího objektivu (4). Paprsky vznikající vícenásobnými odrazy jsou odstíněny irisovou clonou u vysílacího objektivu (3). Za

vysílacím objektivem paprsky interferují a vytvářejí optickou sondu anemometru (5). Detekční objektiv (9) přijímá pouze kužel rozptýleného světla (6), neboť laserové paprsky procházející v původním směru jsou odstíněny kruhovým stínítkem (7). Jako objektivy jsou použity buď standardní fotografické objektivy o ohniskových vzdálenostech $f_v = 135$ mm (vysílací) a $f_d = 75$ mm (detekční), či spojné čočky.

Vzhledem k tomu, že vlnová délka použitého laserového světla leží v červené oblasti spektra, slouží červený filtr (8) k odfiltrování zelených a modrých složek světla v laboratoři. Dírková clona (11) a výstupní irisová clona (13) zajišťují prostorovou filtraci tak, aby na fotokatodu fotonásobiče dopadal jen kuželovitý svazek rozptýleného světla z průsečíku paprsků (5) a nikoliv z oblasti před a za průsečíkem (5).

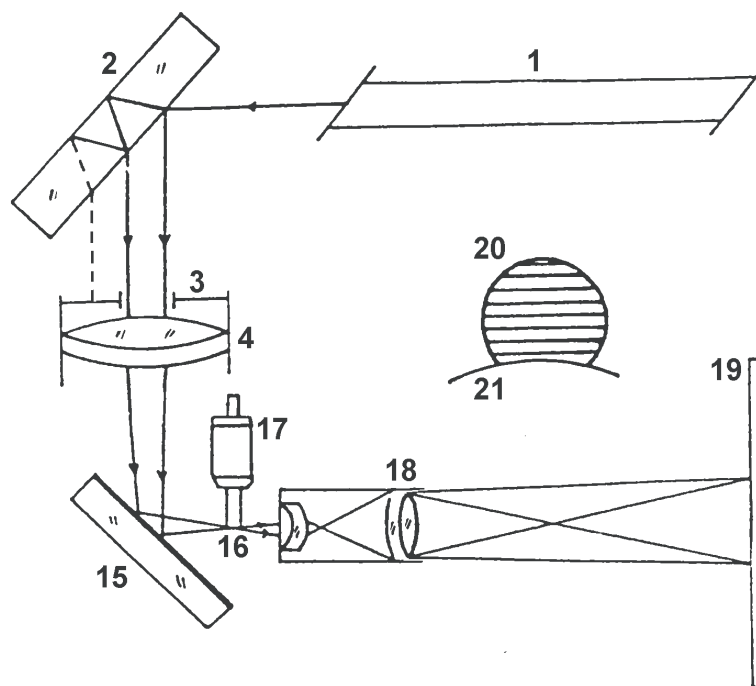
Kondensor (12) vytváří přibližně rovnoběžný svazek, který dopadá na fotokatodu fotonásobiče (14). Diferenciální dopplerovský signál se vyhodnocuje počítačem s digitálně paměťovým osciloskopem.

V úloze je použit He–Ne laser TKG 205 a fotonásobič M 12 FQC 51. He–Ne laser TKG 205 vysílá paprsek o vlnové délce $\lambda_0 = 632,8$ nm, jeho minimální výstupní výkon je 1 mW.

Fotonásobič M 12 FQC 51 má 12 dynod s jednou fokusační elektrodou a tříalkalickou fotokatodou S 20/Q. Ta je nanесena na křemenném okénku. Spektrální citlivost fotokatody leží v intervalu 180–760 nm. Maximální citlivost je pro 420 nm, pro vlnovou délku $\lambda_0 = 632,8$ nm je citlivost zhruba poloviční.

Experimentální uspořádání aparatury LDA

Schéma experimentálního uspořádání aparatury LDA pro kalibraci „optické sondy“ je uvedeno na obr. 4.6–5, kde prvky 1–4 zůstávají (základní sestava LDA) a do sestavy se zařazují další prvky (15–19):



Obr. 4.6–5 Úprava anemometru pro kalibraci optické sondy

1–4 zůstává
 15 odkláněcí zrcadlo mezi 4 a 5
 16 sférický dotyk mikrometrického posuvu
 17 mikrometr
 18 projekční objektiv
 19 stínítko
 20 a 21 ilustrují kalibraci (vzhled stopy vytvořené projekčním objektivem na stínítku při měření vzdáleností proužků interferenčního pole).

Postup měření

Kalibrace optické sondy metodou projekce
 (Pracovní úkol č.1)

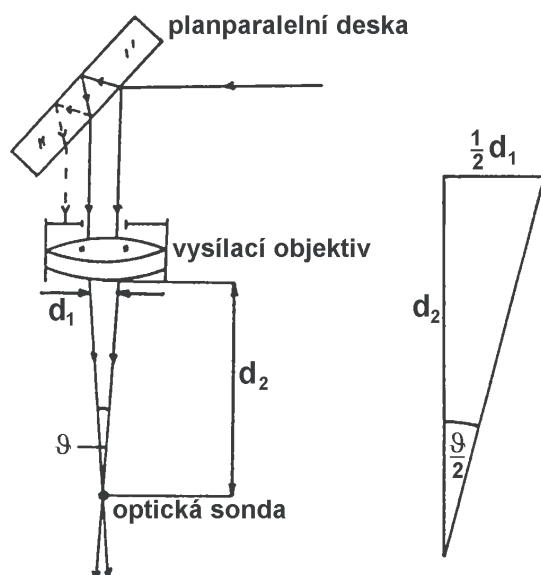
Schéma aparatury při kalibraci optické sondy je uvedeno na obr. 4.6–5.

- Zkontrolujte, zda dvojice paprsků vychází symetricky ze střední části objektivu 4 a nastavte clonu 3 na objímce objektivu tak, aby odstínila paprsky vznikající vícenásobnými odrazy (znázorněno čárkovaně).
- Do prostoru mezi 4 a 5 zařaďte odkláněcí zrcadlo 15.
- Lístkem papíru najděte průsečík laserových paprsků a nastavte do něj osu mikrometru 17. Polohu sférického dotyku 16 nastavte tak, aby se právě dotýkal paprsků. Projekčním objektivem 18 posunujte v objímce až do zaostření obrazu sférického dotyku 21 na stínítku 19.

- d) Stojanem prvků 16 – 18 posunujte v ose dvojice laserových paprsků tak, aby průměr obrazu optické sondy 20 byl minimální. Tím je projekce optické sondy, tj. projekce interferenčního pole v průsečíku laserových paprsků, nastavena na centrální rovinu.
- e) Na stínítku 19 vyznačte krajní polohy projekce optické sondy. Otáčením mikrometru posunujte sférický dotyk napříč interferenčním polem a odečtením údajů na mikrometru pro vyznačené krajní polohy získáte průměr optické sondy ϕ . Spočtete počet interferenčních proužků N_F mezi vyznačenými krajními polohami a hledanou vzdálenost interferenčních plošek d_F získáte vydělením průměru optické sondy ϕ celkovým počtem mezer mezi interferenčními proužky ($N_F - 1$).

Kalibrace optické sondy z geometrie uspořádání

Vzdálenost interferenčních plošek v tomto případě počítáme ze vztahu (9). Úhel protnutí laserových paprsků ϑ určíme změřením vzdálenosti d_2 mezi optickou sondou a vysílacím objektivem a změřením rozestupu d_1 laserových paprsků vystupujících z vysílacího objektivu, viz obr. 4.6–6. Úhel ϑ můžeme změřit také využitím odkláňacího zrcátka a stínítka z metody projekce, změříme-li vzdálenost stop obou paprsků na stínítku a vzdálenost mezi stínítkem a průsečíkem paprsků.



Obr. 4.6–6 Kalibrace optické sondy z geometrie uspořádání

Měření rychlostí částic v kyvetě

Uspořádání aparatury pro měření rychlostí částic v kyvetě vyhodnocením frekvence diferenciálního dopplerovského signálu je uvedeno na obr. 4.6–4.

Seřízení detekční optiky

(Pracovní úkol č.2)

- a) Odstraňte prvky 15–19.
- b) Zkontrolujte, zda laserové paprsky dopadají na kruhové stínítko 7.
- c) Do místa 5 zařaďte kyvetu s vodou tak, aby optická sonda 5 byla přibližně uprostřed kyvety. Do kyvety vložte matnici (případně papír) tak, aby byla v průsečíku 5. Rozptyl na matnici simuluje rozptylový světelný tok, který využijeme pro další seřizování.
- d) Lístkem papíru se přesvědčte o chodu detekovaného světelného kužele v prostoru 9–11.
- e) Zasuňte rámeček dírkové clony s folií 11 a přesvědčte se o zaostření světelného kužele do roviny folie. Případné rozostření je způsobeno buď nesprávnou polohou matnice nebo nesprávnou polohou držáku 11–13.
- f) Folií nastavte připraveným otvorem do svazku. (Otvor nemá být větší než průměr zaostřené stopy. Zmenšováním otvoru zvětšujete hloubku modulace signálu, ale na druhou stranu snižujete celkovou úroveň signálu. Připravený otvor by měl být vhodným kompromisem).

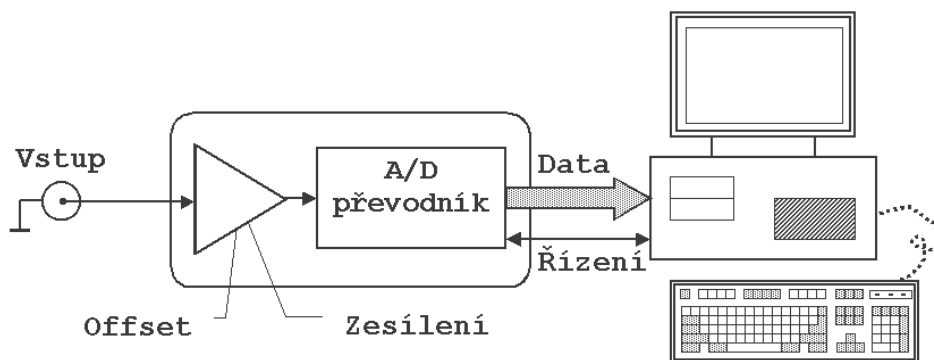
Optimalizace dopplerovského signálu

(Pracovní úkol č.3)

- a) Fotonásobič připojte na napětí $(0,6 \pm 0,1)$ kV.
- b) Do kyvety zasuňte míchací vrtulku tak, aby byla přibližně v rovině paprsku a najděte takovou polohu, aby byl dopplerovský signál optimální (tj. částice ve vodě prolétávají přibližně kolmo na interferenční pole).
- c) Na obrazovce monitoru digitálního paměťového osciloskopu pozorujte dopplerovský signál, všimněte si amplitudy signálu a hloubky modulace. Otáčejte objímkou zaostřování detekčního objektivu až do polohy, kdy amplituda dopplerovského signálu je nejvyšší.
- d) Postupně uzavírejte výstupní irisovou clonu (ve směru pohybu hodinových ručiček) až do polohy, když právě zpozorujete pokles četnosti dopplerovských signálů.
- e) Při měření signálu dbejte na to, aby byly vypnuty všechny zdroje světla zapojené v síti. Jímí vysílané světlo by se mohlo rozptylovat na tekutině v kyvetě, případně na optických površích, a vnášet do měření signál na frekvenci ≈ 100 Hz (dvojnásobek frekvence elektrické sítě).

Digitální paměťový osciloskop

Digitální osciloskop se skládá z počítače PC a rychlého 8-bitového převodníku se vstupním zesilovačem (schematicky znázorněno na obr. 4.6–7). Vstupní zesilovač,



Obr. 4.6–7 Digitální paměťový osciloskop

který má nastavitelné zesílení a posuv nuly (t.zv. offset), upravuje signál z fotonásobiče na napětí zpracovatelné převodníkem. Analogově-digitální převodník převádí napětí na 8-bitovou digitální informaci (číslo 0-255), která je v počítači zpracována a uložena do paměti. Průběh světelného dopplerovského signálu snímaného fotonásobičem je do paměti osciloskopu ukládán v konstantních časových intervalech o délce $\tau = 30,02 \mu\text{s}$. Jeden načtený soubor obsahuje 4850 hodnot. Po načtení souboru se naměřené veličiny znázorní na obrazovce.

Osciloskop může pracovat ve dvou základních režimech:

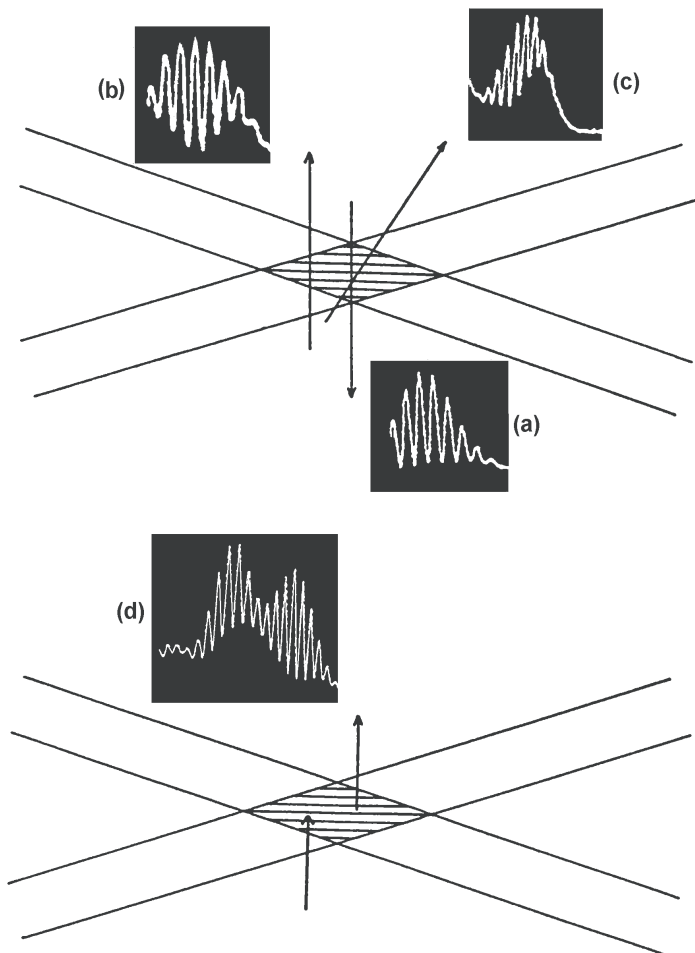
- **Opakovací režim:** data jsou stále načítána a zobrazována na obrazovce. Režim slouží k nastavení optimálního světelného signálu.
- **Naměření souboru hodnot:** osciloskop uloží právě jeden soubor 4850-ti hodnot. Ty je možno postupně prohlížet, odečítat či uložit na disk.

Načtení hodnot se v obou režimech provede při překročení spouštěcí úrovně, kterou lze před měřením nastavit kurzorovými klávesami ($\uparrow\downarrow$). Nastavená hladina je znázorněná zelenou značkou (–) na levé straně obrazovky. Stiskem libovolné klávesy vždy pokračujeme v měření. Klávesou *Enter* (v opakovacím režimu) zastavíme načítání a můžeme odečítat vzdálenost jednotlivých míst posledního signálu. V zobrazené části experimentálních hodnot se lze pohybovat pomocí kurzorových šipek ($\leftarrow\rightarrow$) nebo lze „rolovat“ o třetinu obrazovky pomocí klávesy *Ctrl* a příslušné kurzorové šipky ($\leftarrow\rightarrow$). Klávesou *Space* nastavíme momentální pozici kurzoru jako nulovou, aktuální poloha kurzoru je udávána v levém horním rohu obrazovky. Klávesou *Enter* pokračujeme v dalším měření. Klávesou *Esc* se vracíme do hlavního Menu.

Postup při vyhodnocení dopplerovského signálu
(Pracovní úkol č.4)

Na obrazovce monitoru pozorujte dopplerovský signál. Čtyři hlavní typy dopplerovského signálu jsou zobrazeny na obr. 4.6–8.

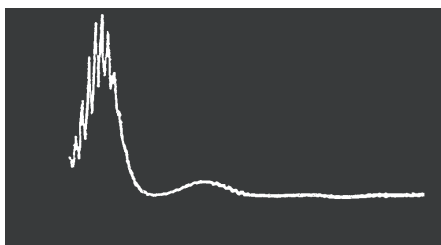
Symetrický dopplerovský signál s přibližně gaussovskou obálkou (a) vznikne při průletu částice v centrální rovině optické sondy. Při průletu částice v některé z rovin paralelních k rovině centrální má dopplerovský signál průběh (b). Při šikmém průletu



Obr. 4.6–8 Hlavní typy dopplerovského signálu

částice je dopplerovský signál asymetrický (c). Při průletu dvou částic za sebou se dopplerovské signály mohou částečně překrývat (d).

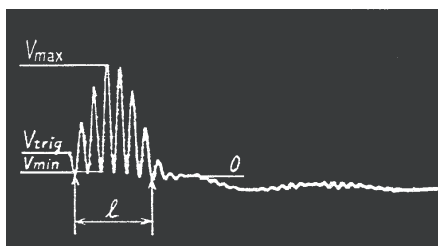
Při měření frekvence vyhodnocujte jen signály typu (a). Rovněž nevyhodnocujte signály s velmi malou hloubkou modulace, vznikající na velmi velkých částicích, viz obr. 4.6–9.



Obr. 4.6–9 Signál s malou hloubkou modulace

Parametry dopplerovského signálu potřebné k určení frekvence $\Delta\nu_D$ odečítáme dle obr. 4.6–10. Označíme V_{sum} hladinu šumového pozadí. Význam veličin na obr.

4.6.-10 je pak následující:



Obr. 4.6–10 Parametry dopplerovského signálu

V_{trig} ... spouštěcí úroveň signálu (typicky se volí $V_{sum} < V_{trig} < 1/2V_{max}$)

V_{max} ... maximální amplituda signálu

V_{min} ... minimum signálu před nebo po V_{max}

Odečítáme délku l připadající na celistvý počet pulsů N (l je relativní délka v jednotkách počtu vzorků). Dopplerovskou frekvenci pak určíme ze vztahu

$$\Delta\nu_D = \frac{N}{l\tau}, \quad (11)$$

kde $\tau = 30,02 \mu s$ je vzorkovací perioda. Počet pulsů N může být maximálně roven počtu interferenčních proužků N_F ($N \leq N_F$).

Návod k sestrojení histogramu rozdělení rychlostí v kyvetě

Odhadněte rychlostní interval Δv (zaokrouhlený maximálně na 2 platná čísla) tak, aby na celý rozsah naměřených rychlostí vyšlo cca 8–10 intervalů Δv . Na svislou osu vynášejte počet měření n , jejichž hodnota spadá do příslušného intervalu ($v_i; v_i + \Delta v$).

Na histogramu vyznačte střední rychlost (\bar{v}) a střední kvadratickou odchylku ($2\sigma_v$).