Úkoly

1. Proveďte kalibraci „optické sondy anemometru“. Použijte uspořádání navržené na obr. 4.6–-5 v [1]. Parametry optické sondy získáte jednak měřením vzdálenosti interferenčních plošek v průsečíku laserových paprsků metodou projekce, jednak výpočtem z geometrie uspořádání. Oba výsledky porovnejte.
2. Připravte aparaturu k měření rychlosti částic. Zkontrolujte chod paprsků v detekční optice a vymezte prostorovou dírkovou clonu.
3. Na základě průběhu dopplerovských signálů optimalizujte dopplerovský signál na proudění vody v kyvetě.
4. Změřte frekvence dopplerovského signálu na souboru 60 – 80 částic. Převeďte hodnoty frekvence na hodnoty rychlostí. Graficky zpracujte rozložení rychlostí ve vodě formou histogramu. Histogram fitujte funkcí normálního rozdělení a z ní stanovte střední hodnotu rychlosti částic a standardní odchylku nalezeného rozdělení.
5. Diskutujte, jaký vliv na výsledek má to, že parametry optické sondy jsou měřeny ve vzduchu, zatímco měření rychlostí částic probíhá ve vodě.

Teorie

Jednou z metod přesného měření rychlostí je dopplerovská anemometrie. Princip měření je dobře popsán v [1]; částice, která odrazí nebo rozptýlí elektromagnetickou vlnu (v našem případě světlo z laseru) způsobí změnu frekvence vlny. Z pozorování těchto změn lze zpětně zjistit rychlost částice.

Jelikož je tento jev směrově závislý, použijeme tzv. diferenční uspořádání experimentu, kde dvojice laserových paprsků tvoří ve svém průsečíku sondu anemometru. Měření se pak provádí pouze v tomto místě a pomocí optické soustavy, fotonásobiče a digitálního převodníku se zpracovává počítačově.

Sonda je tvořena interferenčním polem dvou paprsků, které tvoří při zobrazení objektivem proužky. Vzdálenost d_F jednotlivých proužků v sondě lze z geometrie vypočítat podle [1] vztahem

$$d_F = \frac{\lambda_0}{2\sin(\theta/2)} \tag{1}$$

kde λ_0 je vlnová délka použitého laseru a θ úhel mezi paprsky.

Frekvenční rozdíl (modulace signálu n osciloskopu) mezi dopadajícím a odraženým světlem je potom

$$\Delta\nu_D = \frac{v_x}{d_F} = v_x \frac{2\sin(\theta/2)}{\lambda_0} \tag{2}$$

kde v_x označujeme kolmou složku rychlosti částice vůči interferenčním rovinám.

Úhel θ mezi paprsky laseru vypočteme podle vztahu

$$\theta = 2\arctan(d/2l) \tag{3}$$

kde d je vzdálenost paprsků na stínítku a l vzdálenost stínítka od průsečíku paprsků

Měření

Podle zadání jsme sestavili aparaturu a zkalibrovali sondu. Změřili jsme počet proužků $N = 19$ a šířku sondy pomocí mikrometru $D_{sondy} = (0,55 \pm 0,06)mm$. Chyba měření šířky sondy vychází z vícenásobného měření (viz zápis z měření), kde jsme kvůli neostrosti obrazu nenaměřili vždy stejné hodnoty. Střední hodnota vzdálenosti proužků potom vyšla $d_F = (0,029 \pm 0,003)mm$.

Dále jsme změřili úhel θ podle vztahu 3. Ten vyšel $\theta = (0,022 \pm 0,002)$rad. Spočteme–li d_F podle vztahu 1, dostaneme $d_F = (0,029 \pm 0,003)mm$, což je stejný výsledek jako jsme naměřili předchozí metodou.

Po kalibraci jsme připravili aparaturu pro měření. Frekvence vzorkování byla nastavena na $\tau = 30,02\mu s$. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 1, kde N je počet peaků v pulsu, t je doba pulsu a v_x je vypočtená rychlost částice.

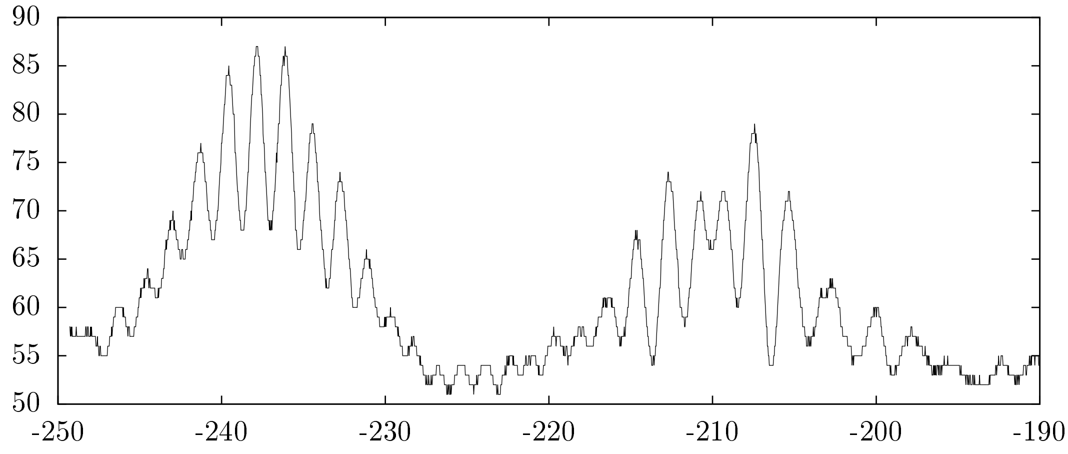
Tabulka 1: měření dopplerovského signálu

N	t [μs]	v_x	N	t [μs]	v_x	N	t [μs]	v_x	N	t [μs]	v_x
8	20,94	0,011	16	24,61	0,019	13	26,33	0,014	13	25,03	0,015
10	28,00	0,010	12	23,93	0,014	12	24,27	0,014	10	24,55	0,012
11	29,68	0,011	12	24,07	0,014	10	26,34	0,011	11	28,70	0,011
10	27,71	0,010	11	23,93	0,013	12	23,31	0,015	9	21,32	0,012
11	29,04	0,011	16	37,86	0,012	12	24,57	0,014	10	18,48	0,016
9	26,55	0,010	9	24,57	0,011	11	24,63	0,013	17	48,24	0,010
10	27,34	0,011	15	39,05	0,011	17	44,21	0,011	12	25,17	0,014
20	50,12	0,011	10	19,26	0,015	9	27,84	0,009	12	26,33	0,013
9	33,09	0,008	10	24,03	0,012	11	21,21	0,015	19	47,88	0,011
12	26,62	0,013	15	35,70	0,012	19	46,38	0,012	14	28,54	0,014
10	24,37	0,012	9	26,47	0,010	16	38,63	0,012	11	27,82	0,011
11	25,71	0,012	19	44,78	0,012	17	38,59	0,013	10	29,88	0,010
19	45,54	0,012	9	28,31	0,009	13	21,27	0,018	12	38,82	0,009
16	24,28	0,019	12	29,76	0,012	10	24,64	0,012	11	38,56	0,008
12	24,09	0,014	12	25,92	0,013	12	29,10	0,012	13	38,47	0,010
10	21,37	0,013	15	28,90	0,015	14	29,60	0,014	10	26,70	0,011
16	43,77	0,011	12	20,99	0,016	10	29,21	0,010	11	22,95	0,014
17	30,34	0,016	12	24,67	0,014	9	17,84	0,015	17	30,79	0,016
17	28,95	0,017	11	23,50	0,013	15	29,94	0,014	11	18,84	0,017

Histogram je na obrázku 2, šířku binu jsme zvolili na 0,001. Křivka v histogramu je graf funkce normálního rozdělení, jehož parametry vyšly:

$$\sigma = (0,005 \pm 0,002)\, ms^{-1}$$

$$\mu = (0,0118 \pm 0,0004)\, ms^{-1}$$



Obrázek 1: ukázka dopplerovského efektu sledovaném na osciloskopu

Diskuse

Podle předpokladů rychlosti částic přibližně odpovídají normálnímu rozdělení. Pokles v oblasti nejvyšší pravděpodobnosti vysvětlujeme tak, že jsme na osciloskopu vybírali jiné signály – podle téměř čistě subjektivních měřítek „čitelnosti". Pro vylepšení experimentu bychom měli použít lepší způsob zpracování dat, jelikož práce s programem Anemometrie byla zdlouhavá a nepřímočará. Pro lepší objektivitu navrhujeme stanovit normy „které signály vybrat a které ne" a zapracovat je algoritmicky do zpracování dat. Mohli bychom tak potom naměřit mnohem více částic a dosáhnout lepších výsledků.

Z uspořádání experimentu usuzujeme, že kalibrace ve vodě by nenesla lepší výsledky, protože při průchodu paprsků vodou se odchylky symetricky vyruší.

Závěr

Provedli jsme kalibraci anemometru, vzdálenost interferenčních rovin vyšla:

$$d_F = (0,027 \pm 0,003) mm$$

Měřili jsme rychlosti částic ve vodě dopplerovskou anemometrií. Grafické výsledky (histogram a gaussova křivka) jsou na obrázku 2. Statistickým zpracováním jsme došli k výsledku:

$$v_x = (0,012 \pm 0,005)\, ms^{-1}$$

Literatura

[1] text k úlohám z pratika 3, http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani_f3.htm