



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# LASEROVÁ DOPPLEROVSKÁ ANEMOMETRIE

LASER DOPPLER ANEMOMETRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

TOMÁŠ OSIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. JAN JEDELSKÝ, PH.D.



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Tomáš Osička

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Laserová Dopplerovská anemometrie**

v anglickém jazyce:

### **Laser Doppler anemometry**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laserová Dopplerovská anemometrie (LDA) je pokročilá optická metoda pro měření rychlosti proudění s použitím tzv. vnesených částic. Je neintruzivní, vysoce přesná a vhodná pro obousměrná proudění. Vyžaduje však zkušenou obsluhu a správné nastavení. Předmětem práce bude seznámit se s konkrétním přístrojem a seřídit jej pro konkrétní aplikaci.

Cíle bakalářské práce:

- Seznámení se s LDA jako metodou a s použitým přístrojem
- Popis metody a specifikace použitých komponent LDA
- Příprava LDA pro provedení experimentu (měření rychlosti proudění vzduchu)
- Optimalizace nastavení LDA
- Dokumentace nastavení a analýza výsledků

Seznam odborné literatury:

LDA [online]. 5.2.2011 [cit. 2011-04-03]. VUT Fakulta stavební – Ústav vodních staveb. Dostupné z: < <http://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm> >

PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. Vizualizační a optické měřicí metody. 2. vydání. Brno, Květen 2007. Dostupné z: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>>.

ALBRECHT, H.-E.; et al. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 3-540-67838-7

Dantec Dynamics A/S. FlowExplorer - Installation & User's Guide, Publication no.: 9040U2141, Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark. First edition. Printed in 2007.

Dantec Dynamics A/S. LDA and PDA Reference Manual, Publication no.: 9040U1312, Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark. First edition. Printed in 2011.

LEHNER, M.; et al. Applied Optical Measurements: Heat and Mass Transfer, ISBN 3 540 66173 5 (hbk), (Berlin: Springer) 462 pp, 1999

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty



## **Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se zabývá metodou laserové Dopplerovské anemometrie (LDA). Jedná se o moderní metodu sloužící k bezdotykovému měření rychlosti proudění tekutin. V práci se zabývám teoretickými principy metody a popisem důležitých komponent. Experimentální část se zabývá nastavením měřicího systému. Výsledky měření jsou prezentovány pomocí vektorového pole a rychlostního profilu.

## **Klíčová slova:**

Laserová Dopplerovská anemometrie, LDA, proudění tekutiny, optické metody, interference, stopovací částice.

## **Abstract:**

This bachelor thesis deals with laser Doppler anemometry (LDA). It is a modern, non-intrusive flow measurement technique. The work deals with theoretical principles and components of the method. The experimental part is devoted to setting of the system. Vector plot and profile plot display the measurement results.

## **Key words:**

Laser Doppler anemometry, LDA, fluid flow, optical methods, interference, seeding particles.

## **Bibliografická citace:**

OSIČKA, T. *Laserová Dopplerovská anemometrie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..

## **Prohlášení autora o původnosti práce:**

Já, Tomáš Osička, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Laserová Dopplerovská anemometrie* vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne:

Podpis: .....

## **Poděkování:**

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za odbornou pomoc při tvorbě bakalářské práce, ochotu při jejím zpracování a poskytnutí kvalitních literárních zdrojů. Dále Ing. Matoušovi Zarembovi za pomoc při experimentu. Poděkování patří také rodině za podporu během studií na vysoké škole.



## Obsah

1	Úvod.....	11
2	Anemometrie.....	12
2.1	Metody měření rychlosti proudění.....	12
2.1.1	Kontaktní metody.....	12
2.1.2	Bezkontaktní metody.....	12
3	Laserová Dopplerovská anemometrie (LDA).....	13
3.1	Dopplerův jev.....	13
3.2	Rozptyl světla na pohybující se částici.....	14
3.3	Vlastnosti laserů využívaných v LDA.....	15
3.3.1	Optická sonda.....	15
3.3.2	Interferenční model.....	16
3.3.3	Vícesložkové měření.....	17
3.3.4	Průlet částice optickou sondou.....	18
3.4	Komponenty LDA.....	19
3.4.1	Způsoby geometrického uspořádání LDA.....	19
3.4.2	Detekování signálu.....	20
3.4.3	Procesory LDA.....	20
3.4.4	Zpracování signálu.....	21
3.4.5	Braggova cela.....	21
3.5	Stopovací částice.....	22
3.5.1	Vlastnosti stopovacích částic.....	23
3.5.2	Stopovací částice v kapalinách.....	24
3.5.3	Stopovací částice v plynech.....	24
4	Měřicí přístroj a software.....	25
4.1	Specifikace přístroje.....	25
4.1.1	Laserové světlo.....	25
4.1.2	Čočky.....	26
4.2	Možnosti nastavení.....	26
4.2.1	Rozsah a zesílení.....	27
4.2.2	Výstup měření.....	28
5	Měření.....	29
5.1	Volba vlastního nastavení.....	29
5.2	Vliv citlivosti fotonásobiče.....	30
5.2.1	Vliv citlivosti fotonásobiče na datový tok.....	31
5.2.2	Vliv citlivosti fotonásobiče na validaci.....	32
5.3	Vliv zesílení fotonásobiče.....	33
5.3.1	Vliv zesílení fotonásobiče na datový tok.....	33
5.3.2	Vliv zesílení fotonásobiče na validaci.....	34
5.4	Volba optimálního nastavení.....	35
5.5	Měření rychlostního profilu.....	37
6	Závěr.....	39
7	Seznam použité literatury.....	40
8	Seznam použitých symbolů.....	41

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá metodou laserové Dopplerovské anemometrie (LDA). Která slouží k neintrusivnímu měření rychlostí proudění kapalin nebo plynů. Tedy nijak neovlivňuje měřený proud. Jedná se o absolutní měřidlo. LDA se řadí do skupiny laserové anemometrie. Ta zahrnuje všechny metody využívající k měření laserové záření. Mimo využití laserového záření mají laserové anemometry společné i jiné vlastnosti. Měří rychlost média pomocí mikroskopických částic v něm obsažených, měření je lineární pro celý rozsah rychlostí a je nezávislé na okolních vlivech jako je tlak, teplota, viskozita a jiné.

Měření pomocí metody LDA probíhá v místě tzv. optické sondy, kde se střetává jeden až tři páry paprsků. Během měření tedy získáváme informaci o rychlosti v jediném bodě. Počet párů paprsků závisí na konstrukci přístroje a koresponduje jeho schopnost měřit rychlosti v jednom až třech směrech.

Potřebnou podmínkou pro měření je přítomnost částic v proudění, které reflektují vlastnosti toku. Částice slouží k rozptylování světelných paprsků. V případě nepřítomnosti vhodných částic v proudu jsme nuceni tekutinu částicemi obohacovat. Logicky je vyžadován také optický přístup k místu měření. Optický přístup může ovlivňovat také průhlednost tekutiny.

LDA umožňuje měřit velké rozpětí rychlostí. Jako horní hranice rozsahu bývají uváděny rychlosti až do 300 m/s. Je vhodný také pro měření malých, dokonce i nulových rychlostí proudění.

Využití metoda LDA nachází například při měření proudění v aerodynamických tunelech, hydromechanice, medicíně nebo může sloužit jako kalibrační přístroj pro jiné metody měření rychlostí.

Součástí práce je kromě popisu teoretických principů metody i jednoduchý experiment sloužící k využití teoretických znalostí v praxi. Důležité bylo také hledání optimálního nastavení přístroje pro provedení experimentu. Toto nastavení bylo následně použito pro vyhodnocení rychlostního pole spreje v jedné rovině.

Výsledky, které zde byly publikovány jsou výstupem výzkumné a vědecké činnosti NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I”.

## 2 Anemometrie

Pojem anemometrie pochází z řeckého slova „*anemos*“, což v překladu znamená vítr. Jde o vědní disciplínu, která se zabývá zkoumáním proudění v tekutinách. Může se jednat o zkoumání rychlostí, směru, nebo také tlaku tekutiny. [1]

### 2.1 Metody měření rychlosti proudění

Nejrůznější metody pro měření se dají rozdělit do dvou hlavních skupin a to na metody kontaktní a metody bezkontaktní. Rozdíl je zřejmý, kontaktní metody přichází do fyzického styku s prouděním a dále jej také ovlivňují. Bezkontaktní metody nijak nezasahují do proudění měřené tekutiny. Nemají tedy vliv na jeho průběh a nenarušují případnou funkčnost měřeného objektu.

#### 2.1.1 Kontaktní metody

Principů měření je celá řada, počínaje jednoduchými mechanickými anemometry, mezi ně patří např. Robinsonův mechanický anemometr na obr. 2.1. Termoanemometrické sondy využívají velmi tenký kovový drátek (často wolfram). Ten je žhaven elektrickým proudem, který ochlazuje proudící vzduch. Mezi rychlostí proudění a elektrickým odporem existuje závislost. Dále akustické anemometry využívají změny rychlosti šíření zvukové vlny v závislosti na proudění a jiné. [1]



Obr. 2.1 Robinsonův mechanický anemometr [2]

#### 2.1.2 Bezkontaktní metody

Všechny tyto metody využívají pro zkoumání proudění laserového záření. Řadí se mezi ně metoda **LDA** (*Laser Doppler Anemometry*), která je hlavním předmětem této práce. Slouží pro měření rychlostí v jednom určitém bodě. Metoda **PIV** (*Particle Image Velocimetry*) umožňuje studovat proudová pole v definované rovině a také zaznamenávat jejich vývoj v čase. Dalšími metodami jsou např. **PDA** (*Phase Doppler Anemometry*), která rozšiřuje LDA o měření velikosti částic a **L2F** (*Laser Two-Focus Anemometry*). [1], [3]

### 3 Laserová Dopplerovská anemometrie (LDA)

Jak již bylo uvedeno metoda LDA využívá pro měření monochromatické laserové světlo. Jako zdroj světla bývá často využíván plynový laser. Měření probíhá díky rozptýlení laserového světla částicí pohybující se s proudem. Frekvence světla rozptýleného na částici, která je v relativním pohybu vzhledem k přijímači se změní v závislosti na její rychlosti a směru. [3], [4]

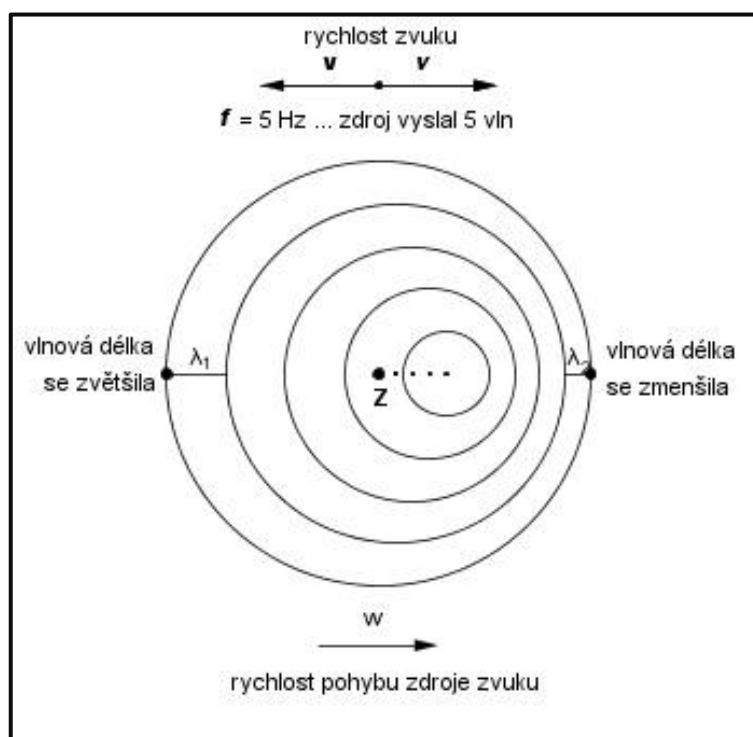
#### 3.1 Dopplerův jev

Dopplerův jev byl popsán rakouským fyzikem a matematikem Christianem Dopplerem v roce 1842. Popisuje změnu frekvence a vlnové délky signálu přijímaného přijímačem oproti signálu vyslaného, tato změna je způsobena nenulovou vzájemnou rychlostí přijímače a vysílače. V metodě LDA jako vysílač chápeme částici reflektující záření. Tento jev je popsán rovnicí (3.1). [5]

$$f = f_0 \left( 1 + \frac{v_0}{v} \right) \quad (3.1)$$

kde

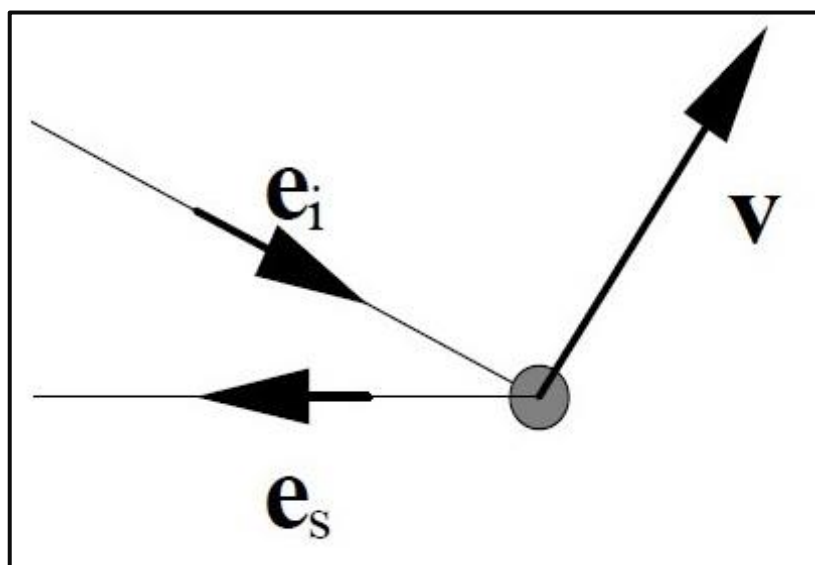
- $f$  frekvence signálu na přijímači
- $f_0$  frekvence vysílaného signálu
- $v$  rychlost vlny v dané látce
- $v_0$  rychlost přijímače (přibližující +, oddalující -)



Obr. 3.1 Dopplerův jev [6]

V běžném životě tento jev můžeme zaregistrovat při jízdě sanitního vozu se zapnutou sirénou. Pokud se k nám přibližuje, slyšíme vyšší tóny sirény. Pokud se sanitní vůz vzdaluje, slyšíme nižší tón.

### 3.2 Rozptyl světla na pohybující se částici



Obr. 3.2 Rozptýlení světelné vlny částicí v pohybu [7]

Na obr. 3.2 znázorňuje vektor  $\mathbf{v}$  rychlost pohybující se částice. Dále vektor  $\mathbf{e}_i$  představuje rovinné monochromatické záření vyslané laserovým zařízením. Poslední vektor z obrázku  $\mathbf{e}_s$  značí světlo odražené od částice, které je frekvenčně posunuté v závislosti na směru a velikosti  $\mathbf{v}$ .

Dle Lorenz-Mieho teorie rozptylu se odražené světlo rozptyluje do všech směrů, nám ovšem postačí uvažovat směr k přijímači. [7]

Záření vyslané laserem se pohybuje rychlostí světla  $c$ , frekvenci tohoto světla označíme  $f_i$ . Vlivem pohybu se frekvence na částici liší od  $f_i$  a její velikost z pohledu částice je  $f_s$ . Posunutá vlna se od částice odrazí a tuto vlnu detekuje přijímač. [3]

$$f_s = f_i \frac{1 - e_i \cdot \left(\frac{\mathbf{v}}{c}\right)}{1 - e_s \cdot \left(\frac{\mathbf{v}}{c}\right)} \quad (3.2)$$

Rovnice platí také pro nadzvukové rychlosti proudění. I takto vysoká rychlost bezpečně splňuje podmínku  $\mathbf{v} \ll c$ .

V praxi ovšem takové měření není dost přesné. Dopplerovská frekvence takového signálu je v porovnání s frekvencí světla o několik řádů nižší. Docházelo by tedy k odčítání dvou hodnot s rozdílem až  $10^4$ . [3]

### 3.3 Vlastnosti laserů využívaných v LDA

Na zdroj laserového světla v systému LDA jsou kladeny určité požadavky. Splněním těchto kritérií se stává metoda dostatečně přesnou. [3]

- **Monochromatický zdroj světla**, tedy záření o stále frekvenci  $f_i$  zaručuje stálou hodnotu vlnové délky  $\lambda$ . Jedná se tedy o hodnotu vystupující ve výpočtu dopplerovské frekvence.
- **Koherentní zdroj záření** zaručuje stejnou frekvenci, směr a stálý rozdíl fází. Díky koherentnosti záření mohou vznikat interferenční proužky.
- **Lineárně polarizované záření**, to je důležité pro viditelnost interferenčních proužků.
- **Minimální divergence**. Je nutné, aby paprsky světla držely stálý tvar. Tímto zaručíme rozměry optické sondy v místě průniku paprsků. Divergence je definována vztahem (3.3) pomocí vlnové délky  $\lambda$  a průměru paprsku  $d_f$ .

$$\alpha = \frac{4\lambda}{\pi d_f} \quad (3.3)$$

Všechny tyto podmínky splňují lasery, které jsou základním prvkem všech LDA systémů. Nejčastěji se využívají plynové lasery. Parametry dvou nejužívanějších plynových laserů jsou v tab. 3.3. [3], [7]

Tab. 3.3 Typy plynových laserů [4]

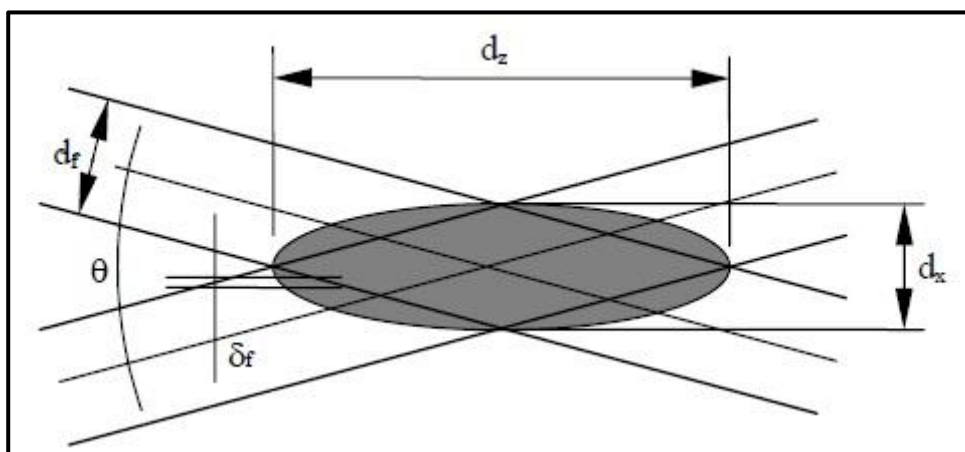
Laser	Vlnová délka ( $\lambda$ )	Výkon
He-Ne	632,8 nm	0,5 - 30 mW
Ar-ion	488 a 514,5 nm	0 – 5(25) W

#### 3.3.1 Optická sonda

Optická sonda se nachází v místě, kde se protínají laserové paprsky rozdělené na polopropustném zrcadle, tento bod je místem měření. Velikost bodu je definována úhlem mezi paprsky  $\theta$  a jejich průměru  $d_f$ . Optická sonda má tvar elipsoidu. Rozložení intenzity záření paprsku má v příčném řezu podobu Gaussova rozdělení. Ve středu paprsku je maximální a směrem k okraji klesá. Pomyslná hranice paprsku je dána kružnicí, kde intenzita dosahuje násobku  $e^{-2}$  maxima.

Z praktického hlediska je vhodné, aby rozměry optické sondy byly co nejmenší. Toho dosáhneme maximalizací úhlu mezi paprsky. Tím ovšem snižujeme vzdálenost ohniska od měřicího zařízení, což nemusí být v praxi vždy možné. Výrobci tedy dodávají více druhů čoček, které dovolují optimalizovat ohniskovou vzdálenost. Vhodná čočka je tedy ta, která povoluje bezproblémový přístup k místu měření při zachování minimálních rozměrů sondy. [7]

Rozměry optické sondy jsou naznačeny na obr. 3.4. Jejich výpočty pomocí průměru paprsku a úhlu, který svírají, udávají vztahy (3.4).



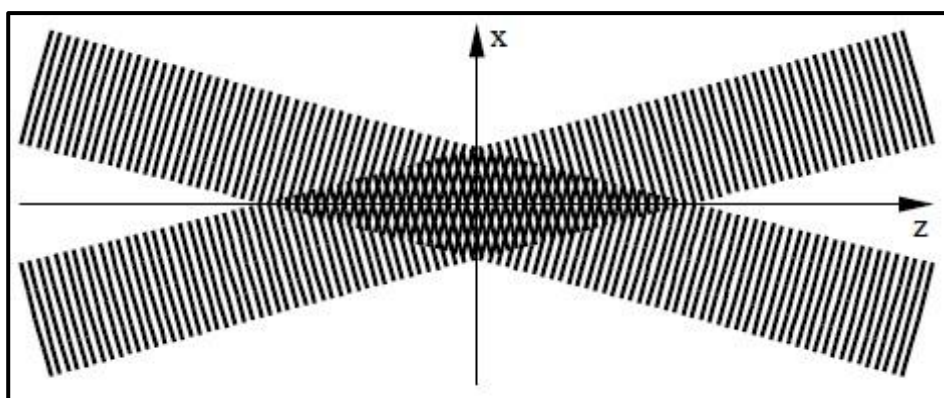
Obr. 3.4 Rozměry optické sondy [7]

Vztahy pro výpočet rozměrů optické sondy:

$$d_x = \frac{d_f}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad d_y = d_f \quad d_z = \frac{d_f}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.4)$$

### 3.3.2 Interferenční model

V optické sondě při střetu koherentních a lineárně polarizovaných paprsků (vln) dochází k interferenci. Výsledkem je vznik interferenčních rovin, které se v příčném řezu jeví jako proužky. Tato interference je znázorněna na obr 3.5. Zjednodušeně se jedná o proužky se střídající se nižší a vyšší intenzitou záření. Proto se jeví jako světlá a tmavá místa. [7]



Obr. 3.5 Interferenční model [7]

Pokud známe rozměry optické sondy a vlnovou délku laserového světla, jsme schopni spočítat počet interferenčních proužků. Tím definujeme všechny důležité parametry optické sondy. Nejprve se spočte vzdálenost mezi jednotlivými interferenčními proužky  $\delta_f$ .

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.5)$$

Počet interferenčních proužků  $N_f$  je poté jen podílem šířky optické sondy a rozestupu jednotlivých proužků.

$$N_f = \frac{d_x}{\delta_f} = \frac{2d_f}{\lambda} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.6)$$

Ohnisková vzdálenost optické sondy je dána geometrií čočky, která rovnoběžné paprsky soustředí do jediného bodu. Výsledná rychlost je součinem šířky proužků a zaznamenané Dopplerovy frekvence reflektovaného záření. [3]

### 3.3.3 Vícesložkové měření

Při měření rychlosti je v některých případech postačující znát pouze jednu složku vektoru rychlosti. Pro zkoumání složitějšího problému můžeme pomocí LDA měřit i více složek rychlosti najednou. V tom případě je potřeba využít dva nebo tři páry paprsků, přičemž každý pár interferuje pouze se svým protějškem.

- **Jednosložkový systém** je schopen měřit najednou pouze rychlosti v jednom směru. Pro měření v druhém směru je potřeba natočit laserové paprsky o  $90^\circ$  a změřit druhou složku. Tento postup je použitelný jen v případě stacionárního proudění.
- **Vícesložkový systém** dokáže měřit dvě i tři složky rychlosti najednou a to díky kombinaci více jednosložkových systémů.

Pro měření více složek rychlosti pomocí nezávislých jednosložkových systémů je nutné dokázat rozpoznat, která odražená vlna patří danému směru. Tento problém se řeší pomocí rozdílných optických vlastností paprsků pro každý směr měření. Paprsky můžeme odlišit pomocí barvy, směru polarizace nebo rozdílné frekvence.

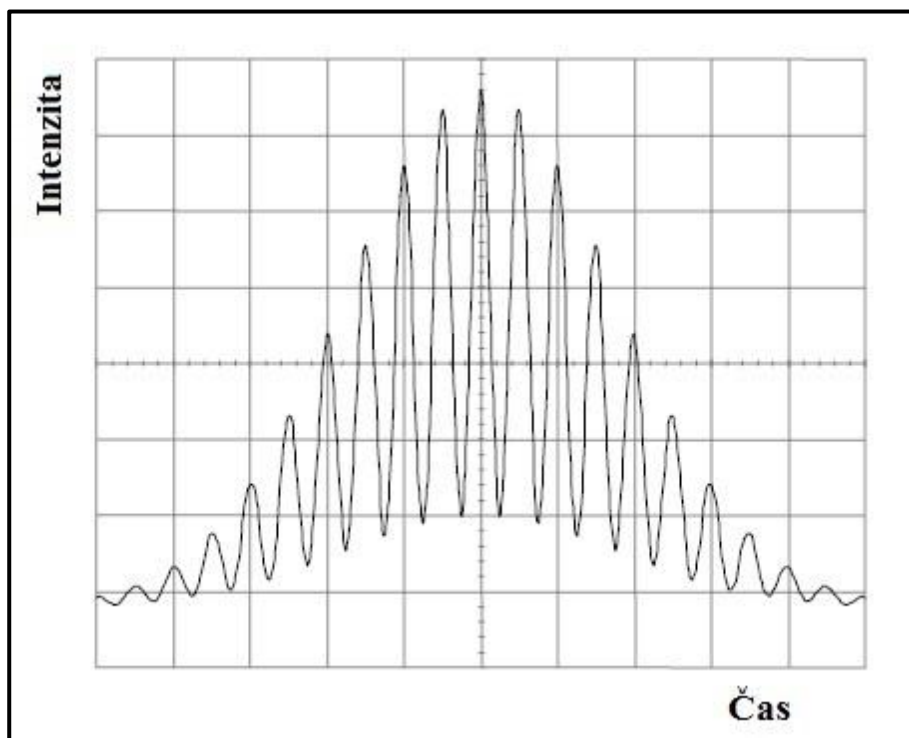
- **Barevná separace** je nejúčinnější metodou, ovšem vyžaduje dvou nebo tříbarevný laser. Příkladem může být argonový laser, který lze díky frekvenčnímu posuvu a následným průchodem barevným děličem rozdělit na paprsky o různých barvách (vlnových délkách).
- **Polarizační separace** využívá toho, že pár lineárně polarizovaných světelných vln spolu neinterferují v případě, že jsou polarizace navzájem kolmé. Reálně ovšem při použití této metody dochází k částečné depolarizaci, což snižuje účinnost tohoto druhu separace.
- **Frekvenční separace** je vhodná pouze pro měření pomalých proudění (do 20 m/s). K frekvenčnímu posuvu paprsků využívá Braggovu celou, která je popsána v kapitole 3.4.5 Braggova celá.

Třísložkový systém využívá jednosložkovou a dvousložkovou sondu. Osy sond svírají úhel  $\alpha$ . Metoda měří rychlosti ve směrech  $u_1, u_2, u_3$ , které pomocí transformační matice (3.7) převede na kartézské souřadnice  $u, v$  a  $w$ . [3]

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tan \alpha} & \frac{1}{\sin \alpha} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

### 3.3.4 Průlet částice optickou sondou

Pro rozptýlení světla je nutná přítomnost částic, které proudí společně s měřenou tekutinou. O stopovacích částicích je uvedeno více v kapitole 3.5 Stopovací částice. Tento průlet optickou sondou vyvolá dopplerovský vzryv. Ten má tvar daný rozložením intenzity světla v paprsku. Uprostřed je nejsilnější a k okrajům slábne. Dopplerovský vzryv je znázorněn na obr. 3.6. [3], [7]



Obr. 3.6 Dopplerovský vzryv [6]

Na tvar dopplerovského vzryvu má také vliv velikost částice, od které se záření odráží. Každý zákmit značí moment, kdy částice prolétává interferenčním proužkem s nižší nebo vyšší intenzitou. Signál dále zpracovává procesor.

Důležitým faktorem pro promodelování dopplerovského signálu je viditelnost (3.8). Ta udává poměr maximální amplitudy dopplerovské frekvence  $\widehat{e}_D$  vůči amplitudě nízkofrekvenční složky (pedestalu). [3]

$$\bar{v} = \frac{\widehat{e}_D}{\widehat{e}_p} \quad (3.8)$$

Vlastnosti dopplerovského signálu:

- nespojitost – signál detekujeme pouze v době průletu částice sondou
- krátká (náhodná) doba výskytu
- proměnlivá velikost amplitudy
- vysoké frekvence a jejich rozdíly.

### 3.4 Komponenty LDA

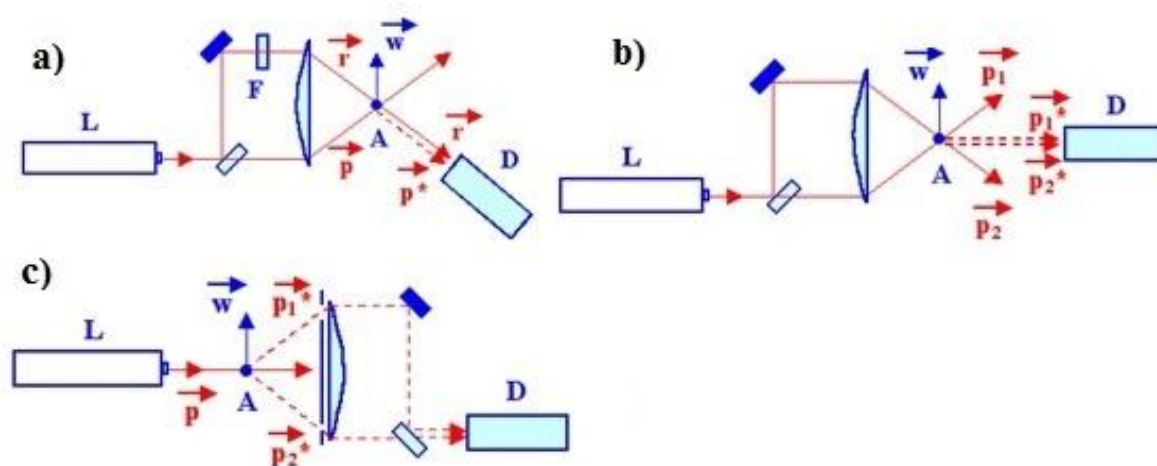
S principy měření LDA jsme již obeznámeni. Nyní si přiblížíme LDA jako přístroj, jeho jednotlivé komponenty, jejich vlastnosti a uspořádání.

Základním prvkem je detektor světelného signálu (např. fotonásobič). Braggova cela, která umožňuje rozeznávat smysl (znaménko) měřené rychlosti. Poté procesor a vyhodnocovací počítačové rozhraní, který naměřené hodnoty zpracuje.

#### 3.4.1 Způsoby geometrického uspořádání LDA

LDA využívá pro měření dopplerovského posuvu techniku heterogenní detekce. Ta spočívá ve smíšení vln různých frekvencí pomocí nelineárního prvku (obvodu). Konkrétně dochází ke smíšení vlny dopplerovsly posunuté s referenční vlnou, která nemusí být nutně dopplerovsly posunuta. Zdroje obou vln jsou stejné. Níže si uvedeme příklady tří geometrických systémů uspořádání a některá jejich specifika. [3], [8]

- **LDA s referenčním svazkem** na obr. 3.7 a) v detektoru porovnává rozptýlené záření ve směru  $p^*$  a  $r$ . V tomto případě je nutné umístit detektor ve směru referenčního svazku.
- **LDA interferenční – diferenční** je zobrazen na obr. 3.7 b). Detektor porovnává rozptýlené záření od svazku ve směru  $p_1$  a  $p_2$ . V optické sondě vzniká interferenční obrazec, který způsobuje kolísání velikosti intenzity světla rozptýleného částicí A. Frekvence kolísání odpovídá dopplerovské frekvenci nesoucí informaci o rychlosti částice. Toto uspořádání umožňuje umístění detektoru na stejnou stranu jako laser.
- **LDA se dvěma směry pozorování** na obr. 3.7 c) porovnává rozptýlené záření ve směru  $p_1^*$  a  $p_2^*$ . Pro měření je zapotřebí pouze jednoho laseru (s vysokým výkonem), další komponenty jsou ovšem zdvojeny.



Obr. 3.7 Geometrické uspořádání LDA [8]

Význam značek z obr. 3.7:

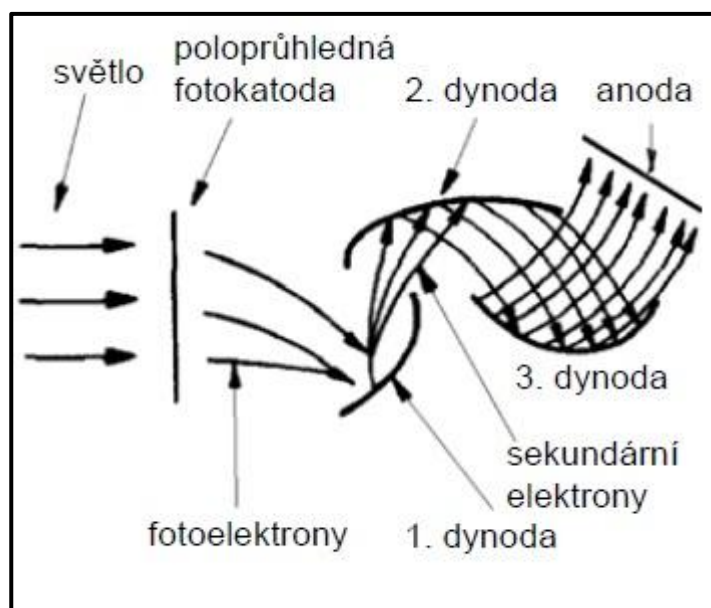
L	laser	w	vektor rychlosti částice	$p^*$	rozptýlený předmětový svazek
F	filtr	r	referenční svazek	D	detektor
A	částice	p	předmětový svazek		

### 3.4.2 Detekování signálu

Dopplerovský signál snímají vysokofrekvenční fotodetektory. Vhodná volba tohoto detektoru zajistí kvalitní signál, který se dále zpracovává. Důležité je jejich proudové zesílení, kvantová účinnost, frekvenční zesílení a velikost vlastního šumu. Podstatné je zajistit ideální poměr signálu od šumu. Nejčastěji se jako detektoru využívá fotonásobiče. [3]

Fotonásobič je vhodný pro detekování i velmi malých hodnot světelného záření. Výhodou je velmi rychlá odezva a také nízký vlastní šum. Světlo proniká do fotonásobiče poloprůhlednou fotokatodou, kde se postupně odráží od dynod a díky procesu sekundární emise dopadá na anodu velké množství elektronů. Dopadající elektrony generují proud. Princip fotonásobiče je znázorněn na obr. 3.8. [9]

Odezvou fotonásobiče na optické signály jsou proudové vzrhy. Tyto vzrhy nesou informaci o rychlosti a také šum. O šumu je uvedeno více v kapitole 3.4.4 Zpracování signálu. [3]



Obr. 3.8 Princip fotonásobiče [9]

### 3.4.3 Procesory LDA

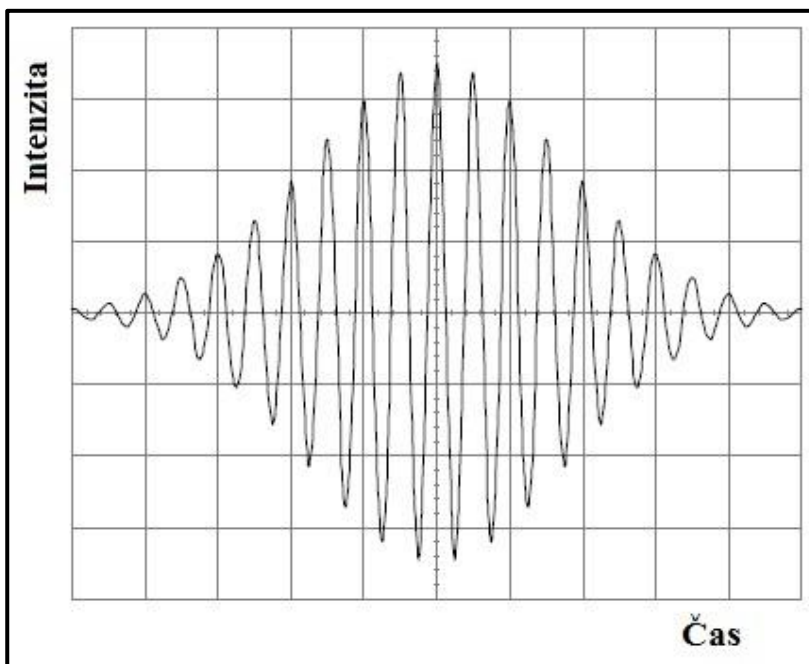
Vzhledem k typickým vlastnostem dopplerovského signálu z kapitoly 3.3.4 Průlet částice optickou sondou, jsou systémy LDA nuceny k využívání speciálních přístrojů pro měření frekvence. Využívají tedy procesory LDA, kterých existují tři základní typy.

- **Sledovač** – nejstarší typ procesoru LDA. Analogový přístroj využívaný pro měření nízkých frekvencí (do 20 MHz). V současnosti se již nevyužívá.
- **Čítačový procesor** – digitální přístroj umožňující nastavení parametrů signálu, který vyhovuje požadavkům. Jeho součástí je zesilovač s nastavitelným ziskem. Na ten se přivádí signál, který byl upraven vysoko a nízkofrekvenčním filtrem.
- **Analyzátor spektra dopplerovského vzrhy (BSA)** – nejmodernější LDA procesor. Využívá rychlé Fourierovy transformace. Jeho velkou výhodou je schopnost měřit i při velmi malém odstupě signálu a šumu. [3]

### 3.4.4 Zpracování signálu

Odezvou fotonásobiče na dopplerovský signál je proudový vzryv. Tyto vzryvy přenáší jak informaci o rychlosti částice, tak i šum. Šum vzniká uvnitř fotonásobiče během procesu fotodetekce. Dále také vinou sekundárního elektronového šumu na dynodách. V poslední řadě způsobuje šum okolí. [3]

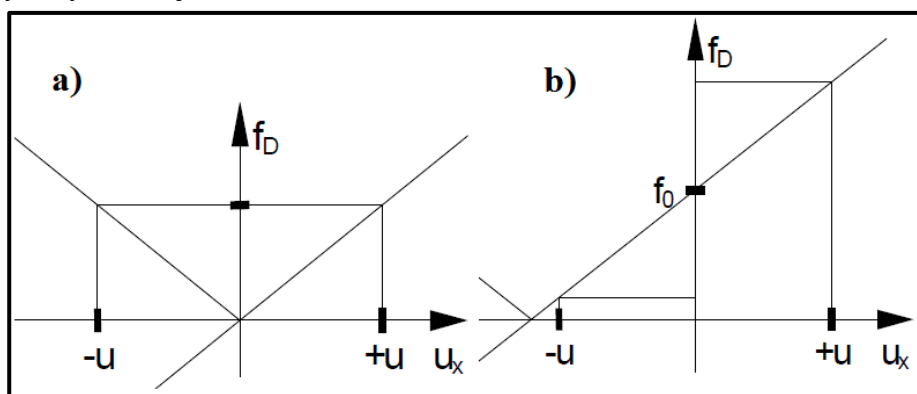
Tento šum je nutné odfiltrout pomocí nízkofrekvenčního filtru. Vysokofrekvenční filtr odstraní nosnou stejnosměrnou složku. Tímto se osamostatní filtrovaný dopplerovský signál, který je zobrazen na obr. 3.9, naopak nefiltrovaný dopplerovský signál je na obr. 3.6.



Obr. 3.9 Dopplerovský signál po filtraci [7]

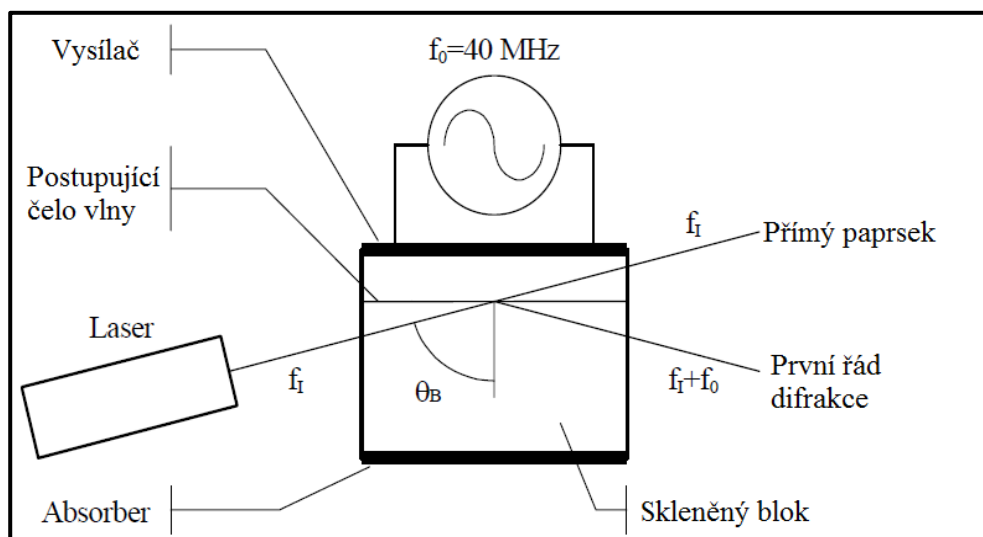
### 3.4.5 Braggova cela

Metoda LDA dokáže měřit složku rychlosti, ale nedokáže rozlišit, jestli je rychlost kladná nebo záporná. Směrovou nejednoznačnost způsobuje detektor, který není schopen rozeznávat mezi kladnou a zápornou frekvencí. Řešením je využít frekvenčního posunutí pomocí Braggovy cely. Praktický dopad na hodnoty frekvencí u dvou stejně velkých, opačně orientovaných rychlostí je zobrazen na obr. 3.10. [3]



Obr. 3.10 Důsledek použití Braggovy cely  
a) bez Braggovy cely b) s využitím Braggovy cely [7]

Braggova cela je akustooptický modulátor. Tvoří ji skleněný blok s elektromechanickým vysílačem akustických vln (typicky 40 MHz) připevněným k jedné stěně a absorberem akustické energie na stěně protilehlé. Šíření akustické vlny v Braggově cele způsobuje změnu indexu lomu. Vzhledem k velkému rozdílu frekvence světla a zvuku lze postup čela akustické vlny považovat za statický. Vzniká tedy difrakční mřížka. Maximální odrazivosti vln dosáhneme při tzv. Braggově úhlu  $\theta_B$ . Díky tomu jsou jednotlivé difrakce posunuty o  $2\pi$  a dochází k zesilování interakcí. [3]



Obr. 3.11 Braggova cela [7]

Díky využití Braggovy cely jsme schopni efektivně odstranit nosnou, stejnosměrnou složku signálu, měnit velikost dopplerovské frekvence a především určit znaménko složky rychlosti. K jejím hlavním nevýhodám patří vnesení šumu do signálu a snížení výkonu laseru (vlivem účinnosti Braggovy cely). [3]

### 3.5 Stopovací částice

Laserový anemometr je schopen měřit pouze tehdy, pokud optickou sondou prochází částice, která rozptyluje laserový paprsek. V případě, že takovéto částice tekutina neobsahuje, jsme nuceni je do tekutiny uměle dodávat. Nazývají se stopovací (vnesené) částice. Jejich volba je důležitá pro výslednou přesnost měření. Při výběru částic je nutné brát zřetel na druh tekutiny, charakter proudění, nebo typ aplikace.

Na vlastnosti částic se kladou nejrůznější požadavky. Nejpodstatnější z nich jsou popsány v kapitole 3.5.1 Vlastnosti stopovacích částic. Na tyto částice působí dva druhy sil. Síly od proudícího média, a síly okolních polí. Mezi ně se řadí např. gravitační, elektrické pole a Coriolisovy síly. Ve většině případů jsou vlivy těchto sil zanedbatelné. [3]

Základní požadavky, které by stopovací částice měly splňovat: [3]

- dobré sledování proudu
- dobře rozptylovat laserové záření
- snadný způsob generování
- netoxické, nekorozi, chemicky netečné
- nezpůsobující erozi
- nízká cena, malé rozdíly velikosti.

### 3.5.1 Vlastnosti stopovacích částic

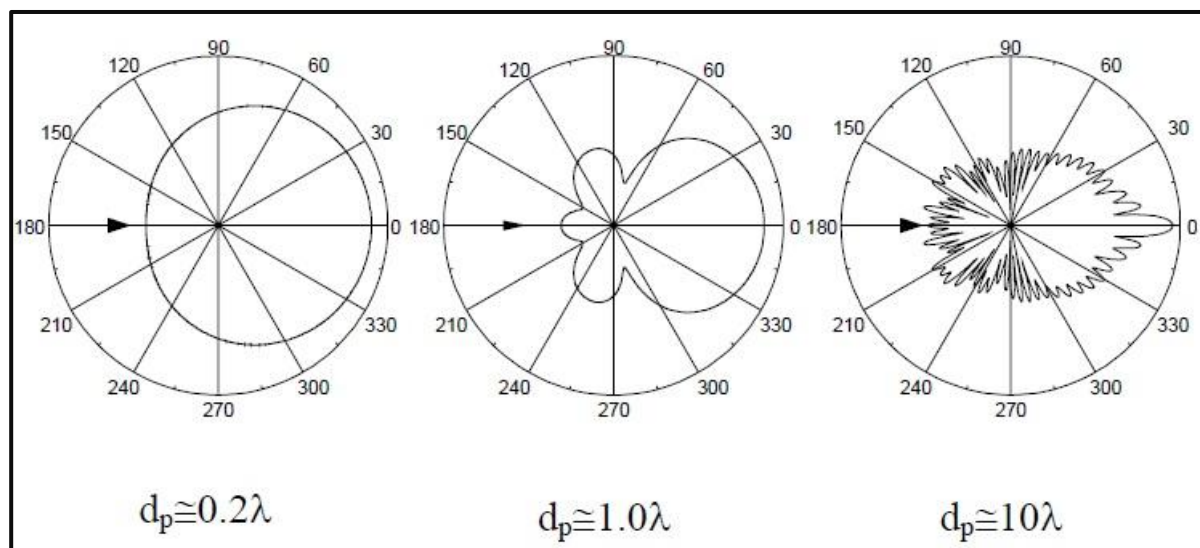
- **Velikost částic** má vliv především na jejich schopnost sledování proudu tekutiny. Malé částice sledují proud lépe, velké částice naopak lépe rozptylují světlo. Velikost je také důležitá pro viditelnost částic v poli interferenčních proužků. [7]

S velikostí je také spjata relaxační doba částice  $\tau_p$ , což je doba odezvy na změnu rychlosti proudění. Závisí na průměru, hustotě částice a dynamické viskozitě tekutiny. Vztah (3.9) je určen pro výpočet relaxační doby.

$$\tau_p = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} \quad (3.9)$$

Vynásobením relaxační doby rychlostí média získáme relaxační dráhu  $x_p$ , kterou již můžeme experimentálně měřit. Na dobu relaxace má rozhodující vliv průměr částice a také její hustota. Ideální jsou tedy malé částice lehkých materiálů. [3]

- **Viditelnost částice** ovlivňuje především samotný dopplerovský signál. Je funkcí mnoha parametrů. Obecně jsou malé částice v poli interferenčních proužků lépe viditelné. [3]
- **Optické vlastnosti** jsou hlavním faktorem k rozptýlení světla v optické sondě. Opět se zjednodušeně dá uvažovat, že velké částice rozptylují světlo lépe než ty malé. Velikost se projevuje také na rozložení odraženého světla. Na obr 3.12 je znázorněn rozptyl světla pro tři velikosti částice vzhledem k vlnové délce. [7]



Obr. 3.12 Světlo odrážející se od částic různých velikostí [7]

- **Koncentrace částic** v optické sondě také ovlivňuje kvalitu dopplerovského signálu. Pokud se v sondě nachází ve stejný moment více částic, výsledný signál vznikne jejich superpozicí. Problém nastává ve chvíli, když jsou v sondě například dvě částice, přičemž jsou v protifázi. Jedna částice je v místě tmavého a druhá světlého interferenčního proužku. Tato kombinace způsobuje, že celkový signál je nulový a nezískáme tedy žádnou informaci o rychlosti. [3]

### 3.5.2 Stopovací částice v kapalinách

Při měření proudění kapalin není vždy sycení potřebné. Většina kapalin sama o sobě obsahuje dostatek částic pro rozptyl světla. Zavádění stopovacích částic do kapaliny se nejčastěji provádí zředěním s monodisperzních směsí. Druh směsi volíme s ohledem na kapalinu, aplikaci a také měřený proud. Několik příkladů směsí a velikostí částic je uvedeno v tab. 3.13. [3], [7]

Tab. 3.13 Přehled některých materiálů pro sycení kapalin [3]

<b>Materiál</b>	<b>Velikost [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Poznámka</b>
Hliníkový prášek	< 10	Zachovává polarizaci
Bublinky	5 - 500	Vznik dvoufázových proudů
Skleněné kuličky (duté)	10 - 150	Levné, značný rozptyl rozměrů
Latexové kuličky	0,5 - 90	Drahé, přesnější velikosti
Polystyrenové kuličky	5 - 200	Lehké, dobré optické vlastnosti
Borovicový pyl	30 - 50	Vejcovitý tvar, bobtnají

### 3.5.3 Stopovací částice v plynech

Pro měření proudění v plynech je nutné využít stopovacích částic. Nejsnadnější je sycení pomocí kapiček aerosolu. Při měření proudění za vysokých teplot je potřeba využít pevných, nehořlavých částic. Postačující velikost částic se pohybuje v rozsahu jednotek  $\mu\text{m}$ . V tabulce 3.14 jsou uvedeny základní metody generování částic a jejich vlastnosti. Tabulka 3.15 zobrazuje přehled materiálů pro sycení proudů vzduchu. [3]

Tab. 3.14 Způsoby generování částic při sycení plynů [3]

<b>Metoda</b>	<b>Typ částic</b>	<b>Regulace velikostí</b>	<b>Regulace koncentrace</b>	<b>Využití</b>
Atomizace	tekuté	dobré	velmi dobré	nízké teploty
Fluidizace	pevné	horší	dobré	vysoké teploty
Kondenzace	tekuté	velmi dobré	velmi dobré	nízké teploty
Spalování, chemické reakce	tekuté i pevné	špatné	špatné	univerzální

Tab. 3.15 Přehled používaných materiálů pro sycení plynů [3]

<b>Materiál</b>	<b>Velikost [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Poznámka</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	<8	Fluidizace, vysoký bod tání
Glycerin	0,1-5	Atomizace, netoxické
Silikonový olej	1-3	Malý rozptyl velikostí
$\text{SiO}_2$	1-5	Rozptylují lépe než $\text{TiO}_2$ , ale hůře než glycerin
$\text{TiO}_2$	Sumbikrony až desítky mikronů	Stabilní do 2500°C
Voda	1-2	Atomizace, nutnost odsávání
MgO		Nestálá koncentrace

## 4 Měřicí přístroj a software

Při měření byl použit přístroj FlowExplorer Mini LDA od dánské společnosti DANTEC a procesor BSA F-P60 & 80. Program pro zpracování dat BSA Flow Software, který je společný jak pro metodu LDA tak i PDA. Jedná se o přístroj využívající laser bezpečnostní třídy 3B dle EN 60825. Při použití takového laseru je povinné použít ochranné brýle.

### 4.1 Specifikace přístroje

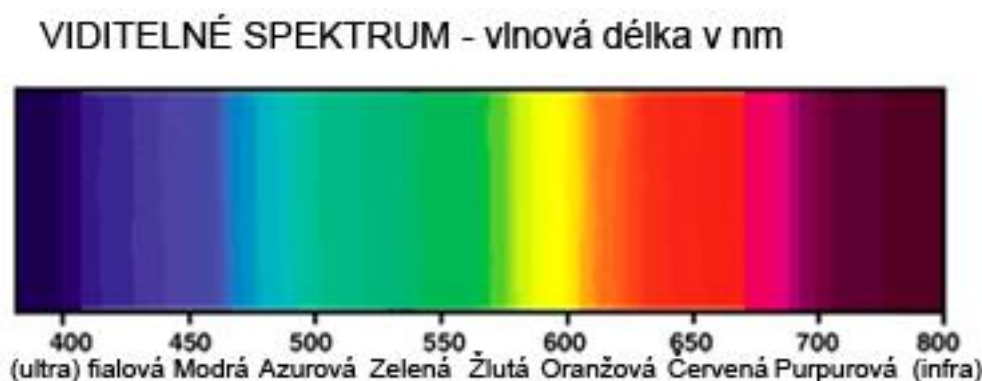
FlowExplorer Mini LDA disponuje dvěma páry protínajících se paprsků, určenými pro měření dvou, na sebe kolmých složek rychlosti. Zdrojem světla je jediný laser, jehož paprsek se dělí pomocí hranolového děliče. Jeden z paprsků projde Braggovou celou (dojde k frekvenčnímu posuvu) a následně k barevné separaci. Z děličů vychází dva rovnoběžné svazky paprsků o různých vlnových délkách, paprsky jsou pomocí objektivu soustředěny do jednoho bodu (optické sondy). Zde spolu vzájemně interferují pouze paprsky stejné vlnové délky a vznikají dva interferenční obrazce, přičemž jejich proužky jsou vzájemně kolmé. K detekování opět dochází skrze optiku, která přivede reflektované záření. To je zpětně barevným děličem rozděleno na dva svazky o původních vlnových délkách. Každý svazek je poté přiveden přes interferenční filtr k samostatnému fotonásobiči. Využívá se tedy zpětného rozptylu záření. [3]

Optika má rozměry 98 x 98 x 396 mm, což umožňuje snadnou manipulaci. S příslušenstvím dosahuje hmotnost celé soustavy cca 5 kg, jedná se tedy o mobilní zařízení. Optika je připojena třemi vodiči. Napájecí kabel poskytuje 12 V při 2 A. Dalším kabelem je připojen fotonásobič, kterým putuje výstupní signál. Poslední je optický kabel, který je připojen do BSA procesoru skrze frekvenční měnič (Braggovou celou). Optickým kabelem do procesoru putují informace o naměřené frekvenci každé detekované částice. Při manipulaci s optickým kabelem je nutné dbát zvýšené opatrnosti.

#### 4.1.1 Laserové světlo

Přístroj využívá světlo o dvou různých vlnových délkách rozdělené do dvou párů paprsků, které měří na sebe kolmé složky rychlosti. Záření emituje kontinuální He-Ne laser se standardním výkonem 35 mW. Vlnová délka paprsků je 660 nm pro první složku rychlosti a 785 nm pro druhou složku. Emitované záření je děleno v barevném separátoru. [10]

Na obr. 4.1 jsou zobrazeny barvy celého viditelného spektra podle vlnové délky. Světla o jiné vlnové délce již nejsme schopni okem vnímat. Hranice viditelnosti se podobně jako u vnímání zvuku u konkrétních jedinců mírně liší.



Obr. 4.1 Barevné spektrum [11]

### 4.1.2 Čočky

Výměnou čočky lze upravit především ohniskovou vzdálenost optické sondy. S její vzdáleností je ovšem spjat i úhel paprsků a dle vztahů (3.3) a změní se tedy i rozměry optické sondy. Výrazně se mění především její délka. Pro dodávané čočky jsou připraveny příslušné kalibrační soubory. V tabulce 4.2 je zobrazen konkrétní přehled sady čoček a jejich vlastností. Ohnisková vzdálenost je udávána od přední části objektivu optiky. [10]

Tab. 4.2 Přehled sady čoček [10]

Ohnisková vzdálenost [mm]	Průměr optické sondy [mm]	Délka optické sondy [mm]
300	0,1	1
500	0,17	2,8
750	0,25	6,3

Z tabulky 4.2 lze pozorovat, jak významně se optická sonda prodlouží při zvětšení ohniskové vzdálenosti. Volbu čočky většinou ovlivňuje především přístupnost k oblasti měření. V praxi je vhodné snažit se tuto vzdálenost minimalizovat. Tím se minimalizuje objem optické sondy a měřená rychlost se dá považovat za Eulerovu. [3]

Výměnu čočky u přístroje je nutné nastavit také v programu BSA Flow Software, pokud tak neučiníme, následující měření budou chybně vyhodnocena. Postup změny nastavení použité čočky je popsán v [12].

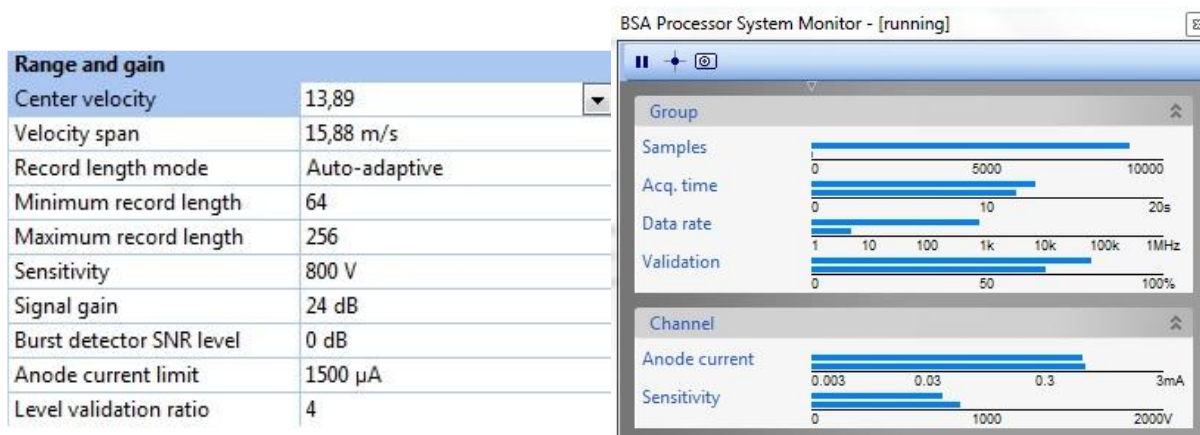
## 4.2 Možnosti nastavení

Při samotném měření nám software umožňuje upravit jisté parametry pro optimalizaci výsledků. Všechny tyto parametry můžeme nastavit v módu opakovaného měření (*repetitive measurement*), který měří hodnoty proudění, ale neukládá je. Změna hodnot se okamžitě projeví v okně „*system monitor*“ zobrazeném na obr. 4.3. Je vhodné provést kontrolu v několika specifických bodech (např. v místech s maximální a minimální rychlostí). V tomto módu je dobré kontrolovat například hodnotu proudu na anodě, aby nedošlo k přetížení. [10]

Hlavním cílem optimálního nastavení je maximalizace počtu detekovaných částic. Množství částic vlastně odpovídá počtu měření, které je následně statisticky zpracováno. S přibývajícím počtem detekovaných částic roste i přesnost měření.

### 4.2.1 Rozsah a zesílení

System umožňuje nastavení parametrů v menu „range and gain“, to je zobrazeno na obr. 4.3. Další menu „acquisition and monitor“ nám umožňuje ovlivnění délky měření. Lze zde nastavit maximální počet měřených vzorků (počet detekovaných částic), nebo maximální dobu setrvání a měření v jednom bodě. [12]



Obr. 4.3 Okna range and gain a system monitor

Stručný popis důležitých pojmů:

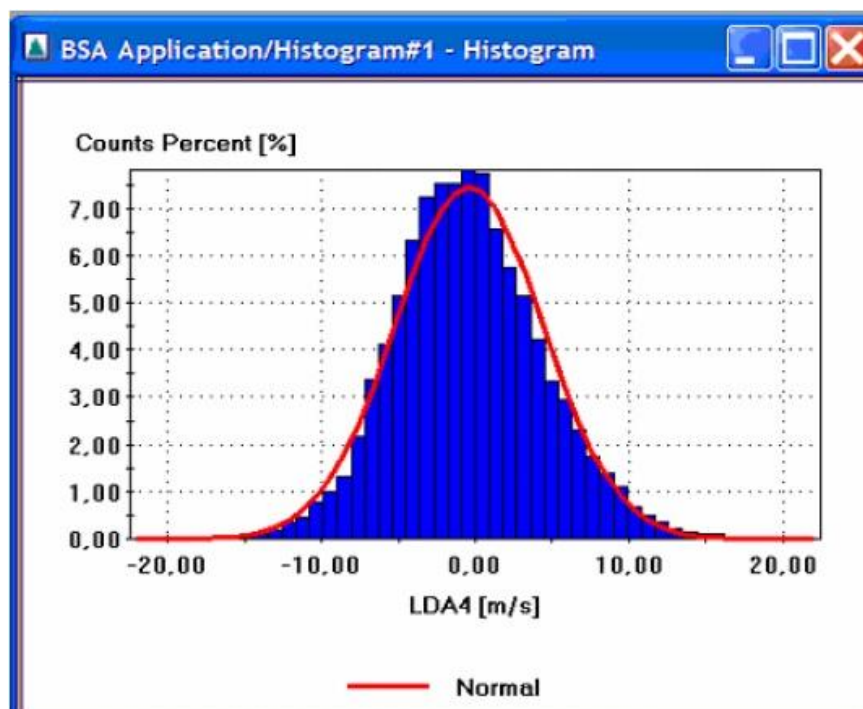
- **Center velocity** – nabízí hodnoty, z nichž se volí hodnota nejbližší střední rychlosti zkoumaného proudění.
- **Velocity span** – očekávané rozpětí měřených rychlostí.
- **Sensitivity** – citlivost. Nastavuje napětí na fotonásobiči. Kritériem pro vhodnou volbu může být validace, datový tok nebo kompromis mezi nimi.
- **Signal gain** – zesílení signálu na fotonásobiči.
- **Anode current limit** – tato hodnota omezuje maximální přípustný proud. Působí jako ochrana trubice fotonásobiče. Její hodnota závisí na použitém fotonásobiči. Při měření byl použit fotonásobič 57X08. Horní hodnota proudu byla zvolena 1 500  $\mu$ A, jak doporučuje [12].
- **Level validation ratio** – podmínka validace. Procesor kontroluje platnost dopplerovské frekvence pomocí minimálního poměru prvního a druhého lokálního maxima. Literatura [3] uvádí jako experimentálně zjištěnou hodnotu 4.

#### 4.2.2 Výstup měření

Při měření se nezaznamenávají pouze hodnoty velikosti rychlostí. Pro každý měřený bod se zapisuje hned několik výsledných hodnot. Při měření ve dvou směrech jsou hodnoty rozlišeny indexy 1 a 2, každý pro daný směr rychlosti. Význam jednotlivých hodnot je uveden níže. Kromě nich je samozřejmostí záznam času měření a souřadnic bodu, ve kterém měření proběhlo. V reálném čase nám některá z těchto dat zobrazuje okno „system monitor“ z obr. 4.3. [12]

- **Count** – hodnota udává počet částic, které byly detekovány v určité pozici.
- **Data rate** – udává průměrný počet detekovaných částic za jednotku času.
- **Validation** – značí procentuální podíl validních vzryvů v dané pozici.
- **Mean** – průměrná rychlost vzorků změřených v daném bodě.
- **RMS** (*Root mean square velocity*) – střední hodnota čtverce flukтуаčních rychlostí. [12]

Číselné hodnoty mohou vystupovat také v podobách grafů, které vytvoří přímo program BSA Flow Software. Jedná se například o histogramy, mapy rychlostních polí apod. Příklad histogramu rychlostí je na obr. 4.4, udává nám rozložení rychlostí v jednom bodě a směru.



Obr. 4.4 Histogram rychlostí [12]

## 5 Měření

Předmětem měření se stal aerosolový sprej. Sprej tvořila dvoumédiová tryska, přičemž jedním médiem byl vzduch a druhým olej. Úkolem bylo optimalizovat nastavení LDA, tak aby bylo možné měřit rychlosti proudění kapiček oleje. Olejové kapičky byly schopné dostatečně reflektovat záření a nebylo tedy nutné uvažovat o zavádění stopovacích částic.

Pomocí LDA a traverzovacího zařízení byl proměřen rychlostní profil v rovinně procházející osou spreje a zároveň kolmém na osu anemometru (osa X na obr. 5.1). Ústí trysky bylo orientováno svisle a průměr jejího výstupního otvoru byl 1 mm. GLR (*gas to liquid ratio*) udávající poměr hmotnostního průtoku plynu a kapaliny byl nastaven na 15%. Tlak vzduchu 3 bary. Tlak oleje 6 barů. Teplota v laboratoři byla 21°C.

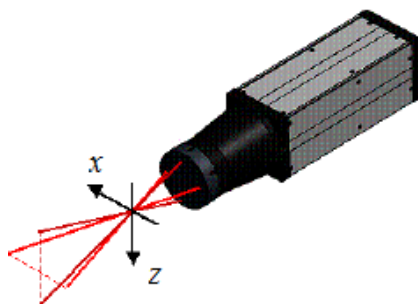
### 5.1 Volba vlastního nastavení

Pro měření bylo nutno najít ideální nastavení systému LDA. Jako hlavní faktory zobrazující změny nastavení byly zvoleny hodnoty validace (*validation*) a datového toku (*data rate*). Během úvodních měření sloužících k seznámení s přístrojem se projevil vliv nastavení citlivosti fotonásobiče (*sensitivity*) a jeho zesílení (*signal gain*). Obecně hodnoty datového toku byly výrazně menší v ose spreje, kde byla koncentrace i rychlost kapiček největší. Pro přesnější představu o vlivu změn obou hodnot na naměřené hodnoty byl zvolen testovací úsek spreje, který zasahoval jak do středu spreje, tak i na jeho okraje. V tomto úseku probíhala opakovaná měření při různých volbách nastavení.

Hlavním výstupem měření jsou velikosti rychlostí a jejich směr v jednotlivých bodech. Při nastavení nás však zajímají i další hodnoty jako je počet vzorku, validace, datový tok nebo RMS, které byly popsány v kapitole 4.2.2 Výstup měření.

Měření proběhlo v oblasti 110 mm od výstupu trysky, kde byl zvolen pomyslný bod 0 (v ose trysky). Traverzovací systém poté přesunoval sprej ve vodorovném směru. Došlo k proměření k oběma okrajům spreje s krokem 5 mm. K pohybu tedy docházelo pouze ve směru pomyslné osy X a to v rozmezí od -15 mm do 15 mm. Měření probíhalo v sedmi bodech, přičemž prostřední se nacházel přímo v ose spreje. Schéma souřadného systému pro celé měření je na obr. 5.1.

Problematika orientace optiky vůči proudění je v případě spreje zjednodušena. Při jiných problémech je ovšem nutné brát orientaci osy optického přístroje ke směru proudění v úvahu. LDA měří rychlosti ve dvou na sebe kolmých směrech v rovinně kolmé na svou osu. Pro náš konkrétní případ stačila rovná podložka, na kterou se laser umístil. Tím se osa spreje stala shodnou s osou Z na obr. 5.1. Tělo optiky má čtvercový průřez, zaručující snadné zachování správné orientace.



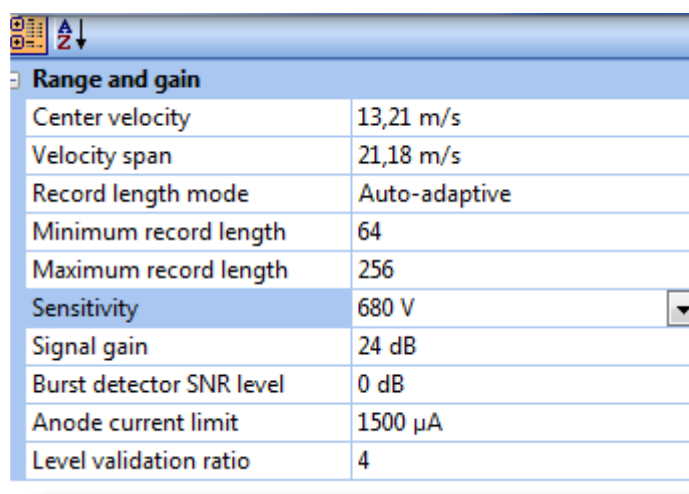
Obr. 5.1 Schematické zobrazení souřadného systému [10]

## 5.2 Vliv citlivosti fotonásobiče

Při stálém zesílení signálu (*signal gain*) bylo zvoleno 7 hodnot citlivosti fotonásobiče (*sensitivity*). Pro změnu velikosti napětí slouží rozbalovací seznam v menu, které je popsáno v kapitole 4.2.1 Rozsah a zisk. Z tohoto důvodu není rozdělení testovaných hodnot stejnoměrné. Všechny ostatní možnosti nastavení byly během tohoto měření neměnné. Nastavení je dokumentováno na obr. 5.2.

Největší velikost citlivosti byla 810 V, tuto volbu omezuje maximální bezpečný proud na anodě fotonásobiče. Toto proudové omezení zabraňuje poškození fotonásobiče a je nutné tuto hodnotu sledovat. Program upozorňuje na přetížení pomocí červené signalizace graficky znázorněné hodnoty „*anode current*“ na obr. 4.3. [10]

Soupis testovaných hodnot citlivosti: 680, 700, 726, 750, 776, 800 a 810 V.



Range and gain	
Center velocity	13,21 m/s
Velocity span	21,18 m/s
Record length mode	Auto-adaptive
Minimum record length	64
Maximum record length	256
Sensitivity	680 V
Signal gain	24 dB
Burst detector SNR level	0 dB
Anode current limit	1500 $\mu$ A
Level validation ratio	4

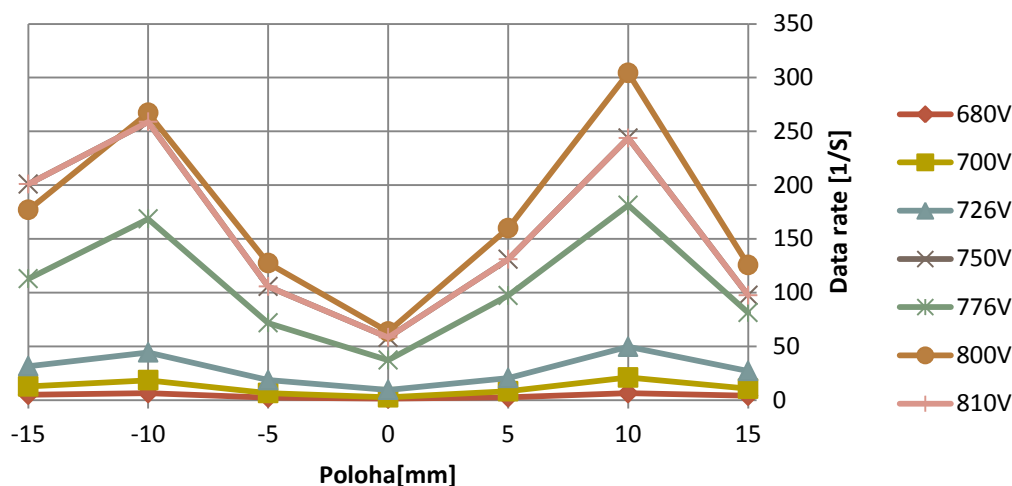
Obr. 5.2 Nastavení pro změny citlivosti

Po přeměření sedmi bodů v celé šířce spreje pro první nastavení citlivosti naměřená data vyexportujeme. Změníme hodnotu napětí fotonásobiče a měření opakujeme pro všechny zvolené hodnoty citlivosti. Máme naměřeny hodnoty popsané v 4.2.2 Výstup měření. Nyní lze porovnat vliv nastavení citlivosti na výsledky měření v jednotlivých bodech.

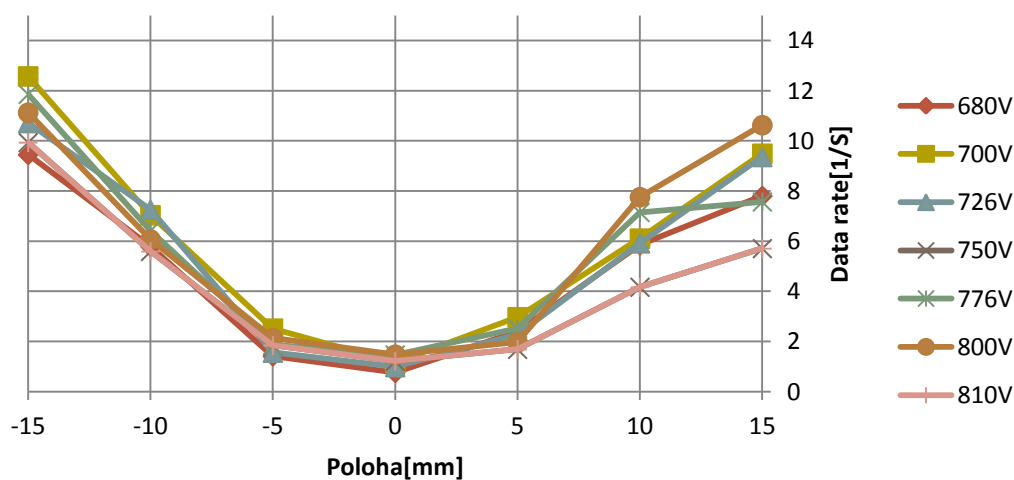
Změna nastavení se projevovala na hodnotách datového toku a validace. Tyto změny jsou níže analyzovány a je zvoleno optimální nastavení citlivosti s ohledem na oba parametry. Pro jiné aplikace se tyto hodnoty mohou lišit a je potřeba je optimalizovat. K analýze posloužilo především porovnání hodnot datového toku a validace pro všechny hodnoty citlivosti na celém testovacím úseku.

### 5.2.1 Vliv citlivosti fotonásobiče na datový tok

Sledovanou veličinou, kterou ovlivňuje změna citlivosti je datový tok. Ten udává množství detekovaných částic za sekundu. Pro ilustraci porovnáme všechny hodnoty testovaných citlivostí ve všech měřených bodech. Každá hodnota citlivosti má na obr. 5.3 a 5.4 vlastní barvu dle legendy. Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty pro oba směry měření.



Obr. 5.3 Vliv změny napětí na datový tok (Z složka rychlosti)

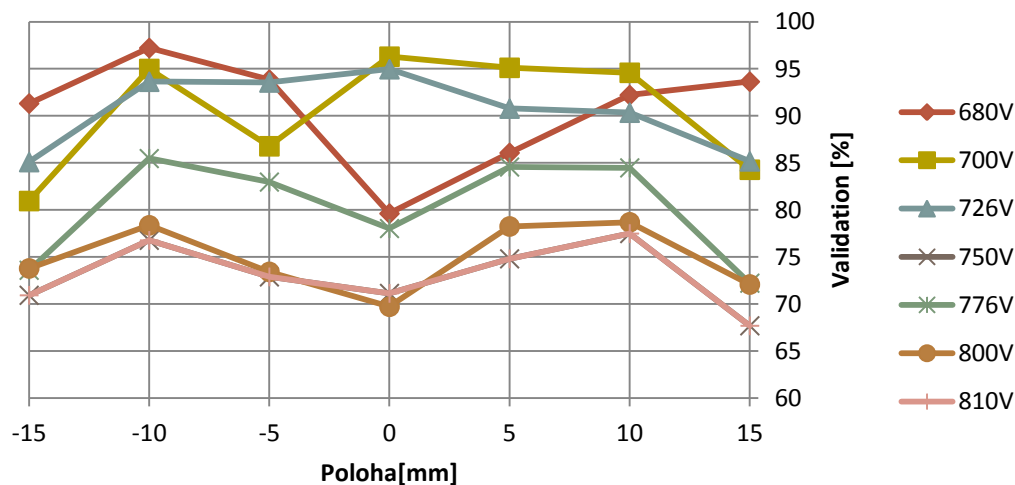


Obr. 5.4 Vliv změny napětí na datový tok (X složka rychlosti)

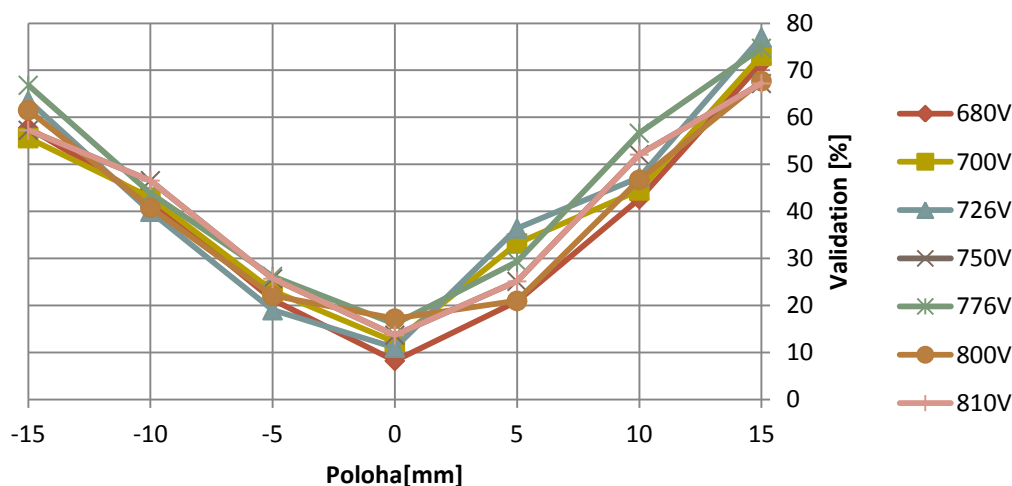
Výsledky odpovídají teoretickým očekáváním a zkušenostem získaným během seznamování se systémem. Při sledování ve směru osy Z na obr. 5.3 se hodnoty datového toku zvyšují společně s rostoucím napětím. Citlivost 810 V ovšem již v porovnání s 800 V nepřináší lepší výsledky. Ve smyslu X složky rychlosti nepozorujeme výrazný vliv napětí. Rozhodující je v tomto případě poloha bodu a s ním související počet detekovaných částic pohybujících se ve směru osy X, který je výrazně větší na okrajích spreje než v jeho středu.

### 5.2.2 Vliv citlivosti fotonásobiče na validaci

Druhou veličinou, jejíž změnu pozorujeme, je validace. Ta by se dala považovat za jakýsi ukazatel úspěšnosti měření. Její hodnoty porovnáme obdobným způsobem jako hodnoty datového toku. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 5.5 a 5.6 opět pro oba směry.



Obr. 5.5 Vliv změny napětí na validaci (Z složka rychlosti)



Obr. 5.6 Vliv změny napětí na validaci (X složka rychlosti)

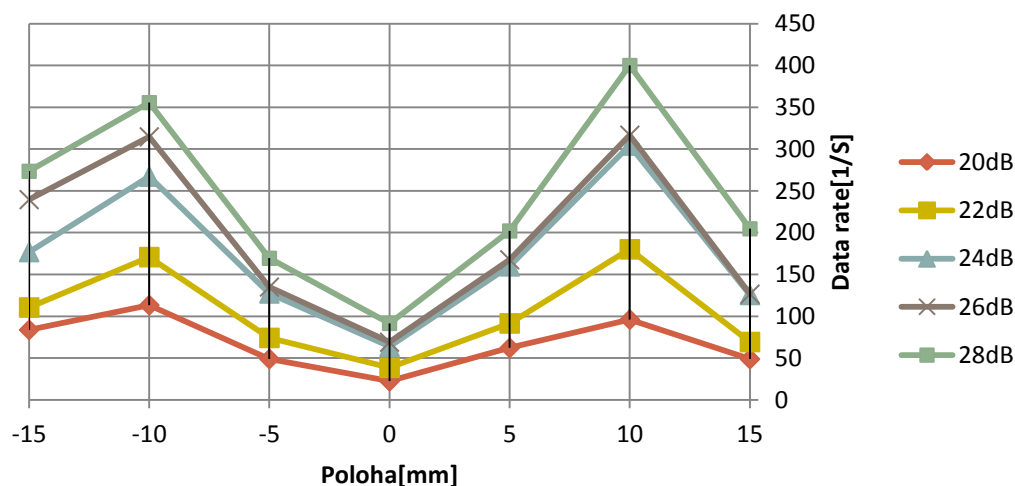
Z obr. 5.5 lze vypořadovat, že vysoké hodnoty citlivosti fotonásobiče snižují validaci. Zisk datového toku pro citlivosti větší než 776 V na obr. 5.3 je velmi výrazný a zefektivňuje tedy celý proces měření. Z obr. 5.6 pro X směr pozorování je zřejmé, že validace je v ose spreje minimální a to vlivem nízkého počtu částic v kombinaci s relativně velkým šumem.

### 5.3 Vliv zesílení fotonásobiče

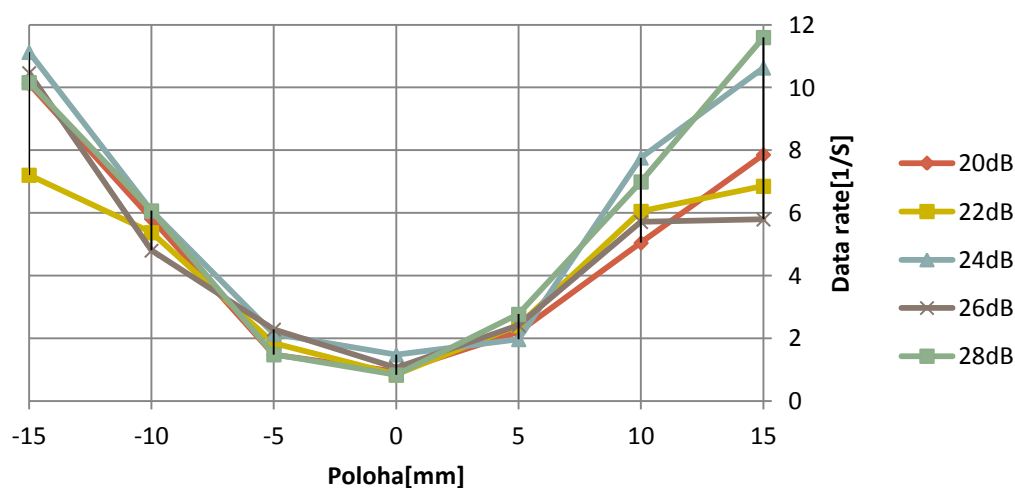
Obdobně jako vliv citlivosti fotonásobiče budeme měnit hodnotu jeho zesílení (*signal gain*). Základní nastavení je totožné jako na obr. 5.2, jako fixní hodnotu citlivosti fotonásobiče jsem zvolil 800 V a to z důvodů poznatků z předchozího měření 5.2 Vliv citlivosti fotonásobiče.

Bylo zvoleno 5 hodnot zesílení v rozmezí 20 – 28 dB s krokem 2 dB. Horní hranici opět omezoval maximální přípustný proud na anodě. Probíhalo tedy pět měření v sedmi bodech. Vlivy změn jsou znázorněny a popsány níže.

#### 5.3.1 Vliv zesílení fotonásobiče na datový tok



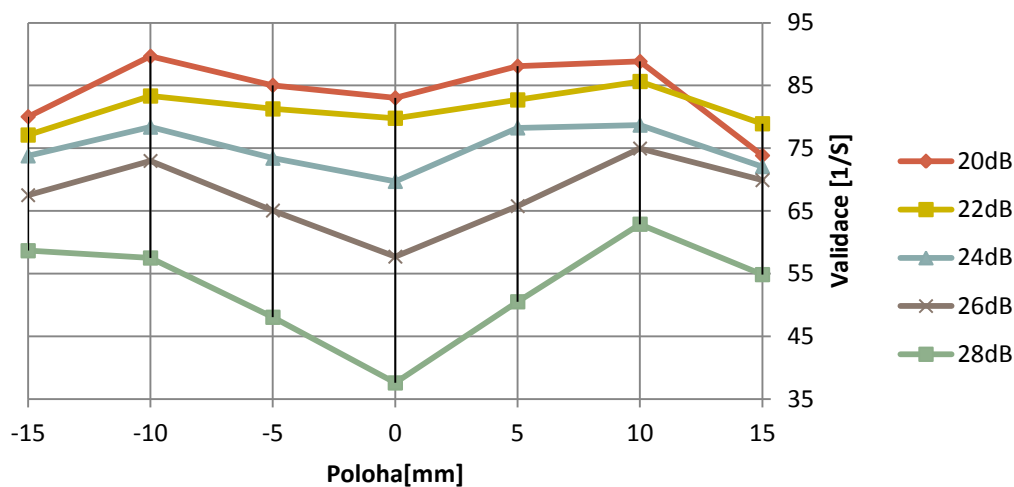
Obr. 5.7 Vliv zesílení na datový tok (Z složka rychlosti)



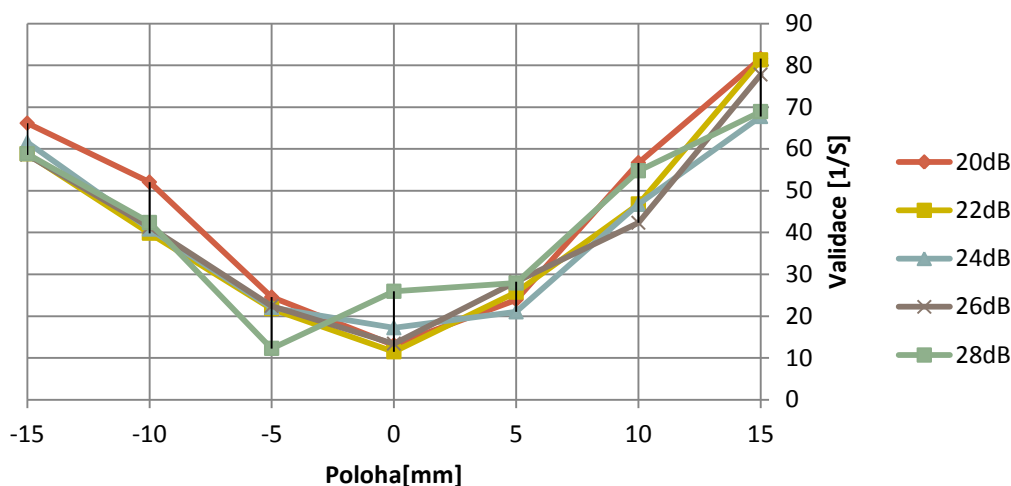
Obr. 5.8 Vliv zesílení na datový tok (X složka rychlosti)

Dle předpokladů se projevil rostoucí datový tok při zvyšování zesílení. Nejmarkantněji lze tento růst pozorovat opět na okrajích spreje. Vliv zesílení na velikost datového toku je srovnatelný s vlivem citlivosti.

### 5.3.2 Vliv zesílení fotonásobiče na validaci



Obr. 5.9 Vliv zesílení na validaci (Z složka rychlosti)



Obr. 5.10 Vliv zesílení na validaci (X složka rychlosti)

Validace se v závislosti na zesílení chová obdobně jako při změnách citlivosti. Při nižším zesílení je validace nejvyšší. Při vysokých hodnotách zesílení se pokles validace nejvíce projeví v blízkosti osy trysky.

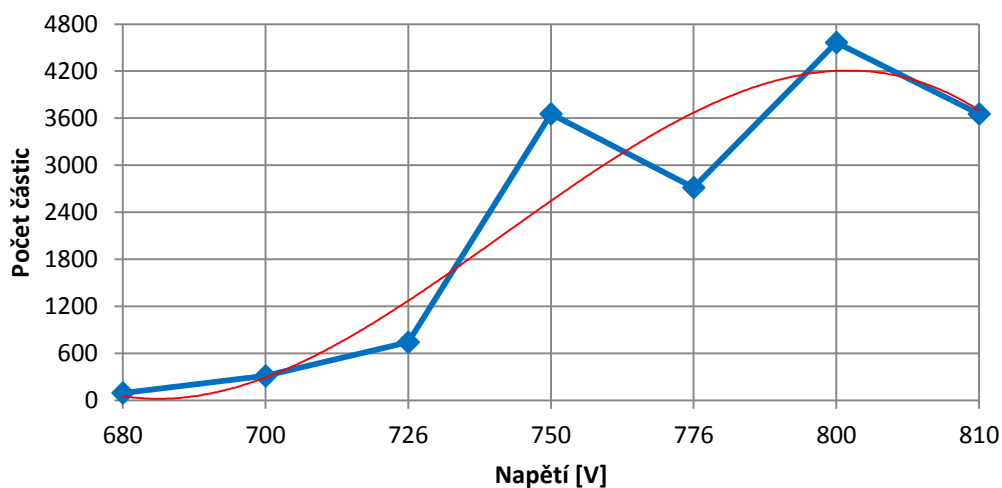
Vzhledem k pozorovaným výsledkům je zřejmé, že zvyšováním jak citlivosti tak zesílení dosáhneme zvýšení datového toku. Naopak zhoršujeme validaci, což ukazuje na přítomnost většího šumu.

## 5.4 Volba optimálního nastavení

Pro vhodnou volbu nastavení je nutné si uvědomit, že výsledná rychlost měření nevypovídá o rychlosti jediné částice, ale jedná se o statistické zpracování všech částic, které v daný okamžik prošly optickou sondou v určité poloze. Toto množství nám udává datový tok, který určuje průměrný počet validních detekcí za jednotku času. Jedná se tedy o detekce splňující podmínku validace (*level validation ratio*) na obr 5.2. Pro lepší představu poslouží celková hodnota všech zaznamenaných vzryvů v dané poloze, která se značí „*count*“.

Volba proběhla především s ohledem na měření ve směru osy Z. Detekce v tomto směru jsou logicky výrazně častější. Z předchozího měření víme, že hodnoty validace i datového toku klesají s přibližováním se k ose spreje.

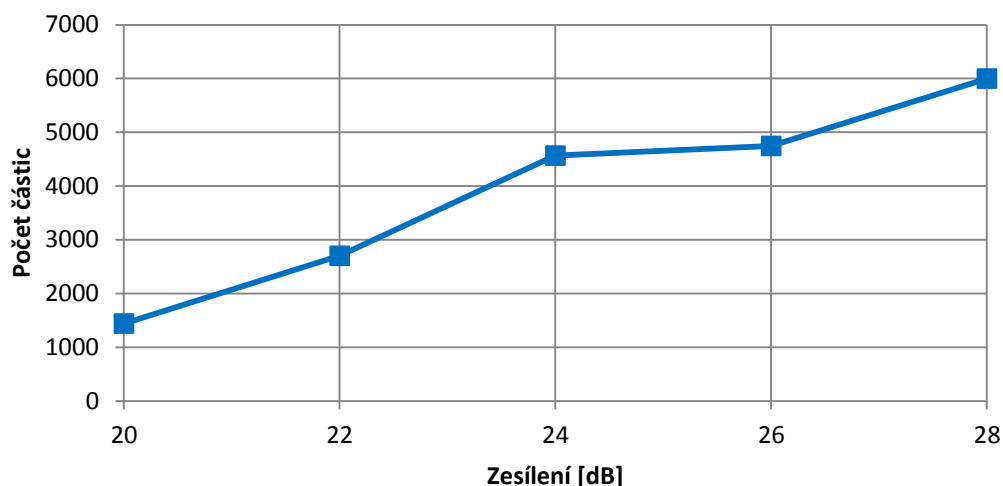
Porovnání počtu detekovaných vzryvů v určitém místě nám znázorní konkrétní vliv nastavení jak citlivosti, tak zesílení fotonásobiče. Tyto hodnoty můžeme pozorovat na obr. 5.11 a 5.12. Oba grafy se vztahují ke společnému bodu odpovídajícímu souřadnici  $X = 10$  mm, kde bylo zaznamenáno nejvíce detekcí.



Obr. 5.11 Vliv citlivosti na počet detekovaných částic

Obr. 5.11 vznikl porovnáním počtů detekovaných částic ve stejném bodě pro různé hodnoty citlivosti. Je zřejmé, že největšího počtu takovýchto částic se dosáhlo při napětí 800V. Konečný počet detekcí je rozhodující pro přesnost výsledku, protože je dále statisticky zpracováváno větší množství dat. Data odpovídající modrému průběhu byla získána díky jednomu měření. Bylo by vhodné stejných pokusů učinit více, průběh vlivu počtu částic na citlivosti by se pak mohl blížit červené křivce.

Stejně porovnání provedeme pro různé hodnoty zesílení a zhodnotíme vliv na počet detekovaných částic. Hodnoty odpovídají stejnému bodu spreje jako na obr. 5.11.



Obr. 5.12 Vliv zesílení na počet detekovaných částic

Z obr. 5.12 je patrné, že výrazného zlepšení dosahujeme při zesíleních od 24dB, hodnoty nižší snižují účinnost detekce. Při maximálním zesílení 28dB je počet detekcí nejvyšší, ovšem při měření v takových podmínkách již dochází k atakování maximálního dovoleného proudu na anodě fotonásobiče, což není pro přístroj z dlouhodobého hlediska vhodné. Velké zesílení také přináší vysoký šum, který významně snižuje validaci výsledků. Zisk počtu detekcí je v rozmezí 24 – 28 dB nižší.

Jako ideální se tedy jeví volba napětí 800 V v kombinaci se zesílením 24 dB. Při tomto nastavení se podařilo maximalizovat počet detekcí, a zachovat bezpečnou hodnotu proudu na anodě. Nehrozí tedy přetížení přístroje.

Tato kombinace nastavení zesílení a citlivosti fotonásobiče poskytuje rovnoměrnou validaci přibližně 75% po celé šířce spreje na testovacím úseku. Což značí, že do systému vnáší určitý šum. Pro zvolené nastavení je však toto snížení validace v porovnání se zvýšením datového toku malé a proto považují tuto volbu za vhodnou.

V případě měření rozmanitých rychlostí, velikostí částic nebo jiných parametrů, lze systémově zvolit různá nastavení pro každý specifický úsek proudění tekutiny. Po takovém nastavení je LDA při použití traverzovacího systému schopno samostatně měřit i velké množství bodů. Při přechodu mezi specifickými úseky systém nastavení upraví, tak jak bylo předem definováno. Dojde tak k výraznému zjednodušení při měření ve více bodech.

## 5.5 Měření rychlostního profilu

K přeměření zvolené roviny v ose spreje bylo zvoleno nastavení z obr 5.13 a to s ohledem na výsledky z kapitoly 5.4 Volba optimálního nastavení.

Range and gain	
Center velocity	13,89
Velocity span	15,88 m/s
Record length mode	Auto-adaptive
Minimum record length	64
Maximum record length	256
Sensitivity	800 V
Signal gain	24 dB
Burst detector SNR level	0 dB
Anode current limit	1500 $\mu$ A
Level validation ratio	4

Obr. 5.13 Konečné nastavení systému

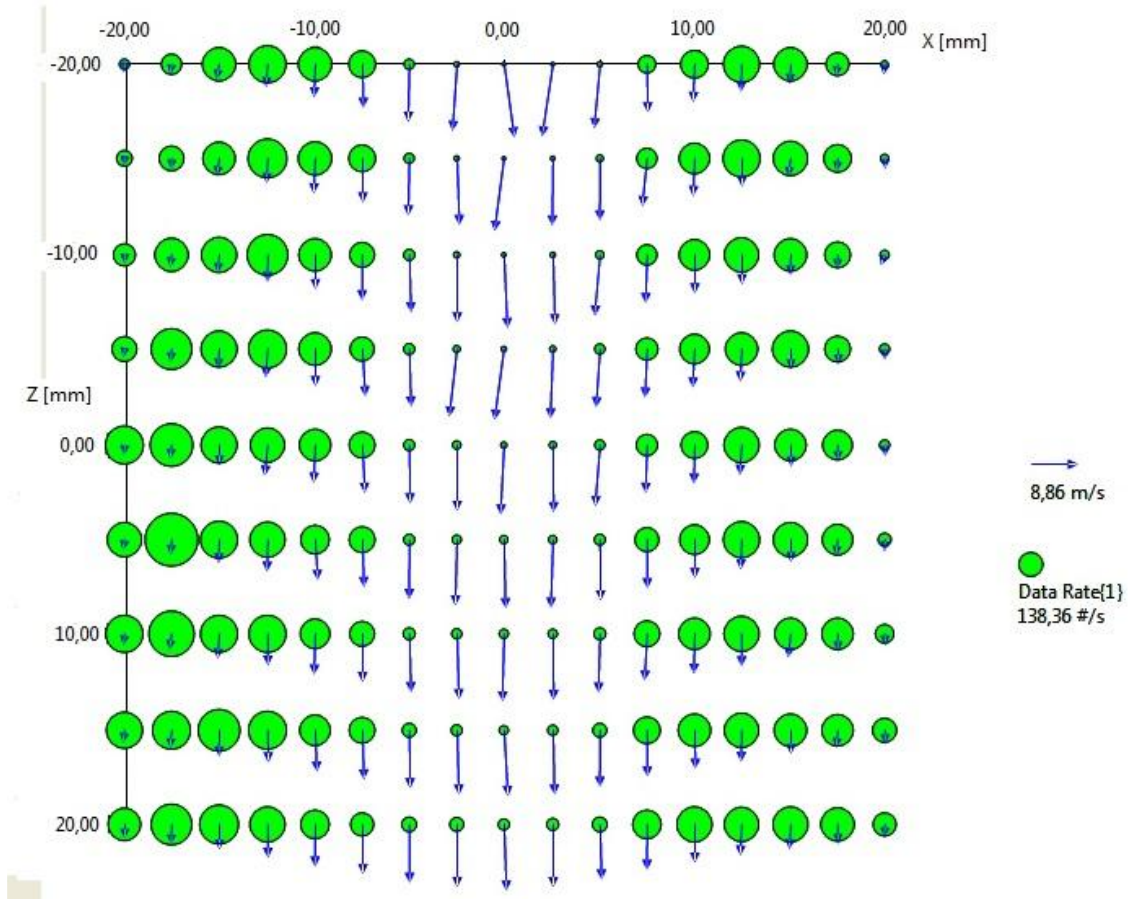
Nulový bod byl opět zvolen ve vzdálenosti 110 mm od trysky v její ose. Dále bylo potřeba zvolit vhodnou síť bodů, pro měření v rovině spreje. Traverzovací systém tedy bude tryskou spreje pohybovat ve směrech osy X (vodorovný směr) a osy Z (svislý směr) jako na obr. 5.1. Jako horní hranice pro měření byla určena souřadnice  $Z = -20$  mm (bod nejbližší k ústí trysky), naopak nejnižší měření probíhalo v poloze  $Z = 20$  mm. Výška měřeného úseku spreje tedy odpovídala 40 mm. Poté byla rozdělena na 9 stejně vzdálených výškových hladin. V ose X měření probíhalo také na úseku 40 mm (20 mm na každou stranu od osy spreje). Krok pro měření v ose X byl zvolen 2,5 mm. Výsledný soubor měření tedy obsahoval hodnoty 153 bodů jedné roviny.

Mimo zvolení hodnot z obr. 5.13 byla nastavena maximální doba měření v jednom bodě a to na 15 s. Během přesunu trysky je vyhrazen určitý čas na ustálení proudění, reálně tedy doba měření jednoho bodu odpovídala přibližně 18 s.

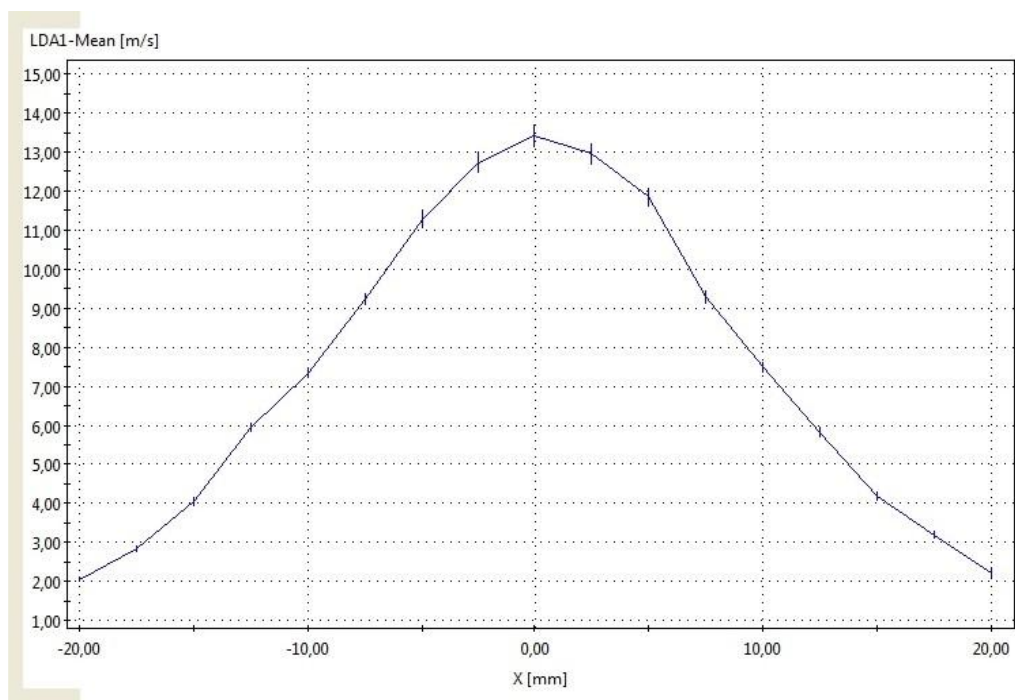
Výstupem měření je rozsáhlý soubor dat. Ten pro každou ze 153 souřadnic obsahuje veškeré informace. Vhodnější variantou prezentace výsledku než rozsáhlá tabulka je přehledný vektorový obraz, který zobrazuje velikosti a směry rychlostí v každém bodě jako je to na obr. 5.14. Současně zobrazuje i hodnotu datového toku v konkrétním bodě. Obecně je možné v systému volit veličiny, které chceme v grafu zobrazit. Také je možné vytvořit například histogram rychlostí pro danou polohu měření.

Obr. 5.15 zobrazuje rychlostní profil spreje v rovině procházející pomyslným nulovým bodem. Zvýrazněny jsou konkrétně naměřené hodnoty.

Z výsledků je patrné, že největší rychlosti dosahují kapičky spreje v blízkosti své osy. Ovšem hodnoty datového toku jsou zde nejnižší. Rozložení rychlostí v příčném řezu k ose trysky je podobné Gaussovu (normálnímu) rozložení.



Obr. 5.14 Vektorový obraz prezentující výsledky měření



Obr. 5.15 Rychlostní profil spreje

## 6 Závěr

Praktické využití metoda LDA díky optickému přístupu k místu měření nalézá v aerodynamických tunelech, kde nenaruší proudění a přesně informuje o směru i velikosti rychlosti. Vhodná je také v medicíně jako prostředek ke zkoumání proudění tekutin v těle. V tomto směru je rozhodující bezbolestnost. Výhodou obecně všech laserových anemometrů je jejich přesnost a nezávislost na okolních podmínkách. Vzhledem ke zmíněné přesnosti přístroje je důležitým faktorem volba případných stopovacích částic, které mohou výsledky částečně zkreslit vinou působení setrvačných sil.

V této bakalářské práci jsem se pokusil popsat teoretický základ metody LDA na základě literárních zdrojů, odborných článků a především materiálů společnosti Dantec včetně manuálů. Důležitým zdrojem také byla publikace Prof. Ing. Václava Kopeckého, CSc. popisující i jiné laserové anemometry. Součástí je také popis důležitých komponentů přístroje jako jsou fotonásobiče, Braggova cela nebo procesory LDA. Zmíněny jsou také způsoby zavádění stopovacích částic do proudění, příklady několika používaných materiálů a jejich vlastnosti.

Další částí práce bylo nalezení optimálního nastavení systému LDA pro provedení experimentu. Během tohoto procesu bylo potřeba analyzovat dopady různých kombinací nastavení na výsledky. Optimální nastavení LDA bylo úspěšně zvoleno s ohledem na datový tok a validaci. Dopady změn nastavení na obě veličiny působily protichůdně. Při zvyšování datového toku vlivem nastavení fotonásobiče se snižovala validace a naopak. Finální nastavení nalézá kompromis mezi oběma veličinami a je dále využito k provedení měření.

Výsledkem závěrečného měření jsou především velikosti a směry rychlostí kapiček spreje v předem určených bodech. Díky těmto výsledkům získáme představu o vlastnostech proudění v měřené oblasti. Především o rozdělení rychlostí v závislosti na vzdálenosti od ose spreje.

Použití konkrétního přístroje LDA se po úvodním seznámení stává intuitivním, což je i cílem samotného produktu. Obsluha se poté může soustředit především na zkoumání předmětu měření. Výhodou je také společný procesor i software pro více laserových anemometrů jako například PDA. Proto je možné relativně snadno využít jinou laserovou metodu lépe vyhovující danému problému.

Samotný BSA Flow Software poskytuje ještě další rozmanité možnosti publikace a zpracování výsledků měření bez nutnosti využití dalších programů. Ovšem v případě potřeby lze naměřená data exportovat do velkého množství formátů a následně je zpracování například programy MATLAB nebo MS Excel.

## 7 Seznam použité literatury

- [1] MALÍK, Michal a Jiří PRIMAS. *Anemometrické metody* [online]. Liberec, 2011 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=566](http://www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=566)
- [2] Anemometer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2001-, 1 May 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>
- [3] KOPECKÝ, Václav. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Brno: Tribun EU, 2008, 205 s. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-357-3
- [4] JANALÍK, Jaroslav. *Měření turbulentních fluktuací rychlosti* [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf>
- [5] Doppler effect. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect)
- [6] Dopplerův jev. In: *Techmania: Edutorium* [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=660](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=660)
- [7] DANTEC DYNAMICS A/S. *LDA and PDA Reference Manual*. Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark, 2011
- [8] PAVELEK, Milan, Eva JANOTKOVÁ a Josef ŠTĚTINA. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. 2. vydání. Brno, 2007 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/>
- [9] JEDLIČKA, Miroslav. Fotonásobiče (1). *Světlo*. 2009, číslo 6. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=40235](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40235)
- [10] DANTEC DYNAMICS A/S. *FlowExplorer - Installation & User's Guide*, Publication no.: 9040U2141, Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark. First edition. Printed in 2007
- [11] Světlo a barva ve fotografii. In: *Fotorádce.cz* [online]. 2010 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/blog/svetlo-a-barva-ve-fotografii-idc227>
- [12] DANTEC DYNAMICS A/S. *BSA Flow Software v5.00: User's Guide*. Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark, 2010.

## 8 Seznam použitých symbolů

$\alpha$	divergence [°]
$\beta$	úhel mezi vektory $\mathbf{v}$ a $(\mathbf{e}_{i1}-\mathbf{e}_{i2})$ [°]
$\delta_f$	rozestup interferenčních proužků [m]
$\theta$	úhel mezi dvěma paprsky [°]
$\theta_b$	Braggův úhel [°]
$\lambda$	vlnová délka zdroje světla [m]
$\mu$	dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]
$\rho_p$	hustota stopovací částice [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_p$	relaxační doba stopovací částice [s]
$c$	rychlost světla [m/s]
$d_f$	průměr laserového paprsku [m]
$d_p$	průměr částice [m]
$d_x$	výška optické sondy [m]
$d_y$	šířka optické sondy [m]
$d_z$	délka optické sondy [m]
$\widehat{e}_D$	maximální amplituda dopplerovské frekvence
$\widehat{e}_p$	amplituda nízkofrekvenční složky (pedestalu)
$f$	frekvence světla [Hz]
$\Delta f$	dopplerovský posuv [Hz]
$f_s$	frekvence rozptýleného světla [Hz]
$f_{s1}$	frekvence rozptýleného světla ve směru 1 [Hz]
$f_{s2}$	frekvence rozptýleného světla ve směru 2 [Hz]
$N_f$	počet interferenčních proužků
$u, v, w$	směry rychlostí v kartézském systému
$x_p$	relaxační dráha [m]
$\mathbf{e}_i$	jednotkový vektor ve směru dopadajícího světla
$\mathbf{e}_{i1}$	jednotkový vektor dopadajícího světla
$\mathbf{e}_{i2}$	jednotkový vektor dopadajícího světla
$\mathbf{e}_s$	jednotkový vektor ve směru detekce odraženého světla
$\mathbf{v}$	vektor rychlosti částice [m/s]