

# 发射倾角对激光多普勒测速仪的性能影响

席崇宾<sup>1,2</sup>, 周 健<sup>1,2\*</sup>, 聂晓明<sup>1,2</sup>, 王 琦<sup>1,2</sup>, 金世龙<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;  
2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 发射倾角作为激光多普勒测速仪的关键结构参数, 对激光多普勒测速仪的信号质量、信号带宽以及激光多普勒测速仪的测速精度具有重要影响。尤其是在高速运行载体的速度测量中, 能否准确、合理地选择发射倾角将极大地影响激光多普勒测速仪的性能。文中从理论上对发射倾角对激光多普勒测速仪的散射光强度、多普勒信号带宽以及各种测速误差的影响进行了仿真分析。理论分析和仿真结果表明: 多普勒信号的频率会随着发射倾角的增大而减小, 为了降低系统带宽要求, 应采用大的发射倾角; 激光多普勒测速仪的信噪比会随着发射倾角的增大而增大, 当发射倾角大于  $60^\circ$  时, 这种增大的趋势会减缓。为了提升多普勒信号的信噪比, 发射倾角应大于  $60^\circ$ ; 当发射倾角大于  $80^\circ$  时, 测速误差随发射倾角的增大而迅速增大, 其中以测速分辨率引起的相对误差尤为明显。基于仿真分析结果, 针对不同的测速范围和测速精度要求, 提出了分段设置发射倾角或分段设置采样频率的测量方法, 并给出了确定不同测速区间的步骤, 同时对分段设置发射倾角和分段设置采样频率的等效性进行了说明。

**关键词:** 光学测量; 发射倾角; 激光多普勒测速仪; 信号质量; 信号带宽; 测速精度

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240279

## 0 引 言

1964 年, YEH 和 CUMMINS 首次证实了利用激光多普勒频移技术可以确定流体的速度<sup>[1]</sup>。在随后的几年里, 研究人员设计了各种不同结构的激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Velocimeter, LDV), 包括自混频光路结构和双光束差动结构<sup>[2-4]</sup>。然而, 双光束差动结构的 LDV 无法进行离焦测量, 一旦运动面超出控制体, 多普勒信号就会丢失。因此, 当其用于车辆载体的速度测量时, 车体的颠簸会导致速度信号丢失, 造成测速精度下降<sup>[5]</sup>。而自混合光路结构的 LDV 容易受外界环境影响, 测量精度较低。为了解决这些问题, 周健和龙兴武设计了一种用于车辆载体速度测量的参考光结构 LDV<sup>[6]</sup>, 这种结构的 LDV 通过测量运动表面的散射光与参考光的拍频信号获得多普勒信

号, 不存在控制体的限制, 因此可以进行离焦测量, 测量景深可以达到数十厘米<sup>[7]</sup>, 测速精度可以达到 0.05%。近年来, 参考光结构的 LDV 以其高精度和高可靠性被广泛用于振动、位移等物理量的测量<sup>[8-10]</sup> 以及在全球卫星导航系统、捷联惯性导航系统 (Strapdown Inertial Navigation System, SINS) 等构成组合导航系统, 以提升载体的测速定位精度<sup>[11-12]</sup>, 目前利用 LDV 进行组合导航的航迹推算精度已经优于 0.01%, 达到了高精度导航定位的要求<sup>[13]</sup>。除此之外, 研究人员开始将参考光结构的 LDV 用于无人机的测速定位<sup>[14]</sup> 以及超高速运行载体的速度测量<sup>[15]</sup>。可以预见, 参考光束型 LDV 有望在未来成为覆盖高低速测量、海陆空全领域的高精度独立测速装置, 在解决实际科学和工程问题中将发挥更大、更重要的作用<sup>[16]</sup>。

当参考光束型 LDV 用于陆基载体或空中载体的

收稿日期: 2024-07-01; 修订日期: 2024-09-11

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ30782)

作者简介: 席崇宾, 男, 博士生, 主要从事新型光电惯性传感技术方面的研究。

导师简介: 金世龙, 男, 教授, 博士, 主要从事新型光电惯性传感技术方面的研究。

通讯作者: 周健, 男, 副教授, 博士, 主要从事新型光电惯性传感技术方面的研究。

速度测量时,其通过敏感平行于出射光方向的速度分量来获取多普勒信号。LDV 的出射光与地面之间的夹角成为发射倾角,当被测速度保持不变时,LDV 所敏感的速度分量将依赖于发射倾角的大小,进而会影响测速仪的系统带宽。此外,散射光的强度以及速度测量误差也会受发射倾角的影响。因此,能否选择合适的发射倾角会对 LDV 的性能产生重要影响。虽然研究人员提出了多种发射倾角的标定方法<sup>[17-19]</sup>,但这些方法是在给定发射倾角的前提下对其进行精确标定,并未给出如何选择发射倾角。

文中通过理论分析和仿真研究了发射倾角对参考光束型 LDV 性能的影响,包括信号质量、信号带宽、测速精度等方面。基于理论分析和仿真结果,针对不同的测速范围和测速精度要求,提出了分段测量的方法,并给出了划分测速区间和确定不同区间发射倾角或采样率的方法,对参考光束型 LDV 的结构设计和实际应用具有重要意义。

## 1 理论分析及仿真

### 1.1 发射倾角对带宽的影响

图 1 所示为参考光束型 LDV 的结构原理示意图,采用单纵模固体激光器作为光源,光源发出的激光经过准直镜组准直后,由分光镜分为两束光。其中,由分光镜反射的光经过衰减片后入射到反射镜,反射光原路返回穿过分光镜,经过滤光片和小孔光阑滤除杂散光后到达探测器表面,称为参考光。另外一束穿过分光镜的光束经过小孔光阑后以角度  $\theta$  入射到运动表面。运动表面将产生沿各个方向的散射光,根据多普勒效应,散射光的频率将发生改变。其中沿入射光相反方向的散射光原路返回,由分光镜反射后,经过滤光片和小孔光阑到达探测器表面,称为信号光。参考光与信号光在探测器表面进行混频,生成多普勒信号。多普勒信号的频率与被测表面的速度之间的关系为<sup>[6]</sup>:

$$f = \frac{2V_D \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

式中: $f$ 为多普勒信号的频率; $V_D$ 为被测载体的运行速度; $\theta$ 为 LDV 的发射倾角; $\lambda$ 为出射激光的波长。由公式(1)可知,在被测速度一定的情况下,增加发射倾角会导致相应的多普勒频率降低,如图 2 所示。因

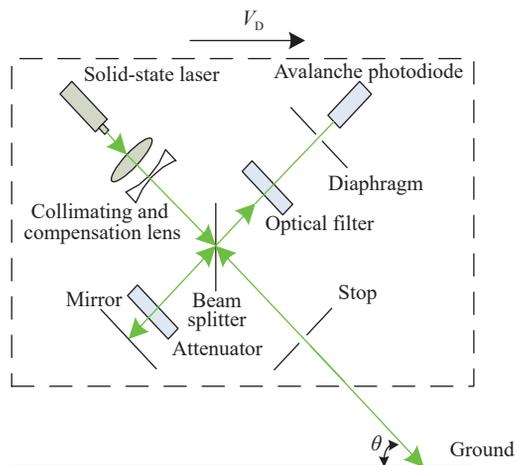


图 1 参考光束型激光多普勒测速仪结构原理示意图

Fig.1 The schematic diagram of reference-beam LDV

此,为了使 LDV 用于高速运行载体的速度测量时仍能满足系统的带宽要求,应选择较大的发射倾角,以降低后续信号处理电路的带宽要求。

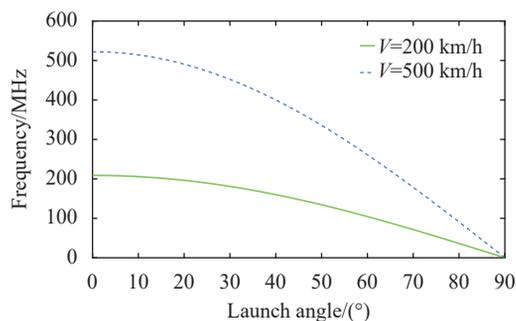


图 2 多普勒频率与发射倾角之间的关系

Fig.2 Doppler frequency corresponding to different angles

### 1.2 发射倾角对多普勒信号质量的影响

增大发射倾角不仅可以降低多普勒频率,而且可以增强入射表面的散射光功率,从而提高多普勒信号的信噪比。将入射表面分为多个 V 型槽的小面元,这些 V 型槽具有相同斜率。假设粗糙表面倾斜角度服从均值为  $\mu=0$ 、标准差为  $\sigma$  的高斯分布。垂直于照射表面的平面内的入射角和反射角分别为  $\theta_i$  和  $\theta_r$ ,令  $a=\max[\theta_i, \theta_r]$ ,  $b=\max[\varphi_i, \varphi_r]$ ,  $\varphi_i$ 、 $\varphi_r$  分别为入射光和出射光的方位角,则入射表面的辐照度可以表示为<sup>[20]</sup>:

$$L_r(\alpha_r, \alpha_i, \varphi_r - \varphi_i, \sigma) = \frac{\rho}{\pi} E_0 \cos \alpha_i [C_1(\sigma) + \cos(\varphi_r - \varphi_i) \times C_2(\alpha, \beta, \varphi_r - \varphi_i, \sigma) \times \tan \beta + (1 - |\cos(\varphi_r - \varphi_i)|) \times C_3(\alpha, \beta, \sigma) \tan\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)] \quad (2)$$

其中:

$$C_1 = 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33}$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \sin \alpha \cos(\varphi_r - \varphi_i) \geq 0 \\ 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \left[ \sin \alpha - \left( \frac{2\beta}{\pi} \right)^3 \right] \cos(\varphi_r - \varphi_i) < 0 \end{cases}$$

$$C_3 = 0.125 \left( \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \right) \left( \frac{4\alpha\beta}{\pi^2} \right)^2$$

式中:  $\rho$  为入射表面的反射率;  $E_0$  为入射光垂直入射时的辐照度。由于参考光束型 LDV 接收沿入射光相反方向的散射光, 有  $\alpha = \beta = \alpha_i = \alpha_r = \pi/2 - \theta$ ,  $\varphi_i = \varphi_r$ , 其中  $\theta$  为 LDV 的发射倾角。因此, 归一化的回波功率可以表示为:

$$P(\alpha_i, \sigma) = \frac{\rho}{\pi} \cos \alpha_i \left\{ [C_1(\sigma) + C_2(\alpha, \beta, \sigma) \tan \beta] + 0.17\rho \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.13} \times \left[ 1 - \left( \frac{2\beta}{\pi} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

将  $\beta = \alpha_i = \alpha_r = \pi/2 - \theta$  代入公式 (3) 可得:

$$P(\theta, \sigma) = \frac{\rho}{\pi} \sin \theta \left\{ [C_1(\sigma) + C_2(\theta, \sigma) \cot \theta] + 0.17\rho \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.13} \times \left[ 1 - \left[ \frac{2(\pi/2 - \theta)}{\pi} \right]^2 \right] \right\} \quad (4)$$

其中:

$$C_2(\sigma, \theta) = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \cos \theta$$

LDV 的信噪比可以表示为:

$$SNR = \frac{I_s}{I_N} \propto \frac{P\eta e}{h\nu} \quad (5)$$

式中:  $P$  为信号光的功率;  $\eta$  为探测器的量子效率;  $e$  为电子电荷量;  $h$  为普朗克常量;  $\nu$  为光波频率。由公式 (5) 可知, 增加信号光的功率可以提升激光多普勒测速仪的信噪比。根据公式 (4) 和公式 (5) 可得, 激光多普勒测速仪的信噪比与发射倾角之间的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在不同的运动表面粗糙度下, 回波功率随着发射倾角的增大而增大, 因此信噪比随着发射倾角的增大而增大。但当发射倾角大于  $60^\circ$  时, 归一化信噪比的上升趋势减缓。因此, 当只考虑回波功率的大小时, LDV 的发射倾角应大于  $60^\circ$ 。

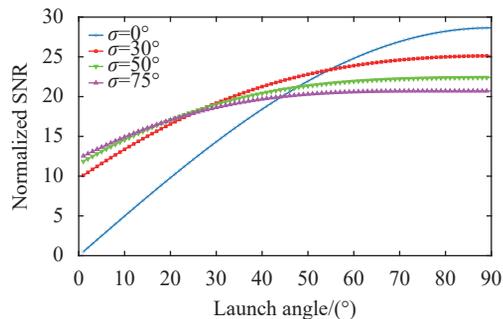


图 3 归一化信噪比与入射角之间的关系

Fig.3 The relationship between normalized SNR and incidence angle

### 1.3 发射倾角对测速误差的影响

由公式 (1) 可得, LDV 的测速灵敏度  $S$  可以表示为:

$$S = \frac{2 \cos \theta}{\lambda} \quad (6)$$

由公式 (6) 可知, LDV 的测速灵敏度与发射倾角的关系如图 4 所示。

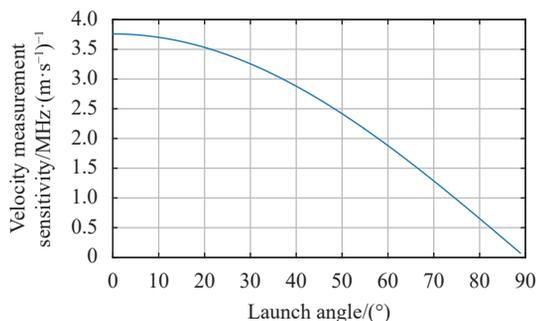


图 4 测速灵敏度与发射倾角之间的关系

Fig.4 The relationship between velocity measurement sensitivity and incidence angle

从图 4 中可以看出, 随着发射倾角的增大, 激光多普勒测速仪的测速灵敏度逐渐降低。测速灵敏度最终会影响测速的分辨率, 从而影响测速误差。假设采集卡的采样频率为  $F_s$ , 采样点数为  $N$ , 则系统的频率分辨率为:

$$R_f = F_s / N \quad (7)$$

LDV 的测速分辨率可以表示为:

$$R_v = F_s / (N \cdot S) = \frac{F_s \lambda}{2N \cos \theta} \quad (8)$$

在实际测速过程中, LDV 的相对误差比绝对误差更为重要。假设采样频率和采样点数固定, 当被测速

度为  $V$  时,由测速分辨率引起的最大相对误差为:

$$e_1 = \frac{2R_v}{V} \times 100\% = \frac{F_s \lambda}{VN \cos \theta} \times 100\% \quad (9)$$

由公式 (9) 可以看出,当采样频率和采样点数确定时,测速分辨率引起的相对误差与被测速度和发射倾角有关。在不同的被测速度下,测速分辨率引起的相对误差随发射倾角的变化如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,当发射倾角大于  $80^\circ$  时,由测速分辨率引起的相对误差随着入射角的增大而迅速增大。当发射倾角相同时,测速分辨率引起的相对误差随着被测速度的增大而减小。

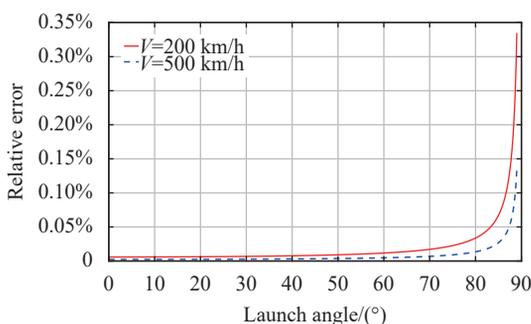


图 5 测速分辨率引起的相对误差与发射倾角之间的关系

Fig.5 The relation between the relative error caused by the velocity measurement resolution and the launch inclination

由参考光与信号光的空间相位匹配关系,可以得到参考光与信号光的最大允许偏差角为<sup>[21]</sup>:

$$\alpha_{\max} = \frac{\lambda}{r_0} \quad (10)$$

式中:  $r_0$  为探测器光敏面半径。假设参考光垂直入射到探测器表面,如图 6 所示,虚线范围内的散射光可以产生有效的多普勒信号。其中,  $L_1$  为探测器中心到分束镜上有效光斑中心的距离,  $L_2$  为待测粒子到分束镜上有效光斑中心的距离。

由图 6 中的几何关系可得:

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{L_1}{L_2} \tan \alpha_{\max}\right) \quad (11)$$

由此导致的相对测速误差可以表示为:

$$e_2 = \arctan\left[\frac{L_1}{L_2} \tan\left(\frac{\lambda}{r_0}\right)\right] / V \cot \theta \quad (12)$$

假设  $L_1=10$  cm,  $L_2=1$  m, 探测器的光敏面半径为 3 mm, 则由公式 (12) 可得,当发射倾角为  $70^\circ$  时,相对

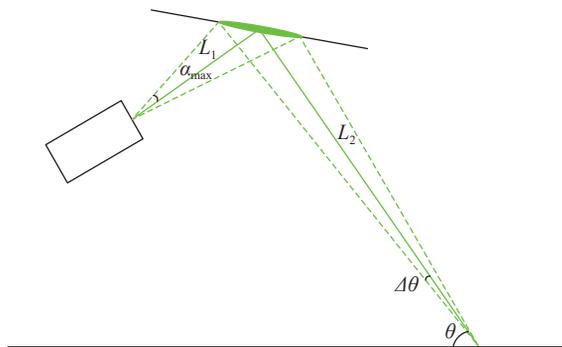


图 6 探测器有限孔径误差

Fig.6 Schematic diagram of finite aperture error of detector

误差为  $10^{-8}$  量级。

除了由测速分辨率和有限的探测器孔径造成的相对测速误差外,与发射倾角有关的主要测速误差还包括原理公式近似误差、有限渡越时间误差、激光发散角引起的误差等<sup>[22]</sup>。其中原理公式近似误差为:

$$e_3 = \frac{V \cos \theta}{2c} \quad (13)$$

假设被测速度  $V=200$  km/h, 发射倾角为  $70^\circ$ , 则原理公式近似误差为  $10^{-8}$  量级。  $e_4$  为有限渡越时间引起的相对误差:

$$e_4 = \frac{\lambda \tan \theta (\ln \sqrt{2})^{1/2}}{2\pi w(z_s)} \quad (14)$$

式中:  $w(z_s)$  为信号光传播  $z_s$  后光斑的半径,一般为 mm 量级。当发射倾角为  $70^\circ$  时,相对误差为  $10^{-6}$  数量级。激光发散角引起的误差为:

$$e_5 = \frac{\arctan\left[w_0 \sqrt{z^2/(z^2 + f^2)}\right]}{\cot \theta} \quad (15)$$

式中:  $w_0$  为束腰半径;  $z$  为测量点距束腰位置的距离,测速仪的工作距离一般为  $z_0 \pm 10$  cm,  $z_0$  为束腰位置;  $f = \frac{w_0^2 \pi}{\lambda}$  为共焦参数。当发射倾角为  $70^\circ$  时,激光发散角引起的相对误差约为  $10^{-5}$  量级。

根据以上分析,与发射倾角有关的各项相对测速误差与发射倾角之间的关系如图 7 所示。可以看出,当发射倾角超过  $80^\circ$  时,各种相对误差迅速增加。因此,综合 1.2 节中发射倾角对多普勒信号质量的影响可知,发射倾角的选择应位于  $60^\circ \sim 80^\circ$  之间。根据图 7 中相对测速误差与发射倾角之间的关系可得,由测速分辨率引起的相对测速误差为主要误差。因此,后续的分析将主要考虑测速分辨率引起的相对误差。

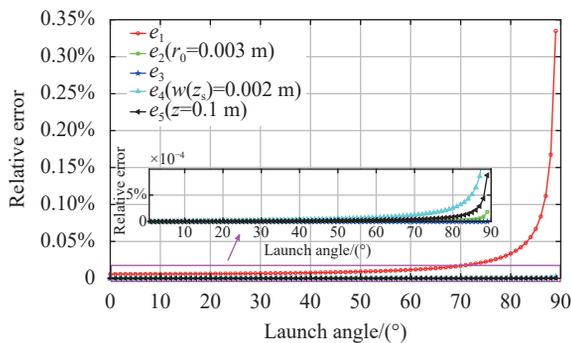


图 7 相对测速误差与发射倾角之间的关系

Fig.7 Variation of relative error with launch inclination

## 2 讨论

由公式 (9) 和图 5 可知, 发射倾角的变化导致测速分辨率引起的绝对误差变化, 由此产生的相对误差与被测速度的大小有关。不同发射倾角时, 测速分辨率引起的相对误差与被测速度的关系如图 8 所示, 可以看出, 发射倾角的变化对于低速测量影响较为显著。

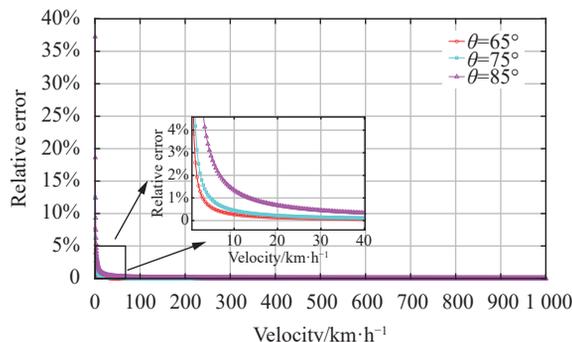


图 8 不同发射倾角时, 测速分辨率引起的相对误差与被测速度的关系

Fig.8 Variation of relative error caused by velocity resolution with measured velocity at different angles

由第 1 节的分析可知, 当测速范围较小时, 在满足信号带宽的前提下, 发射倾角的选择应处于 60°~80°之间。但当测量速度范围较大时, 采用单一的发射倾角和采样频率将无法同时满足相对误差和信号带宽的要求。由公式 (9) 可知, 在采样点数固定的情况下, 可以通过改变采样频率或改变发射倾角来满足相对误差和信号带宽的要求。

### 2.1 分段设置采样频率

假设采集卡的最大采样率为 100 MHz, 采样点数为 16384。在不同被测速度时, 最小采样频率设置为对应多普勒频率的  $k$  倍, 当被测速度为  $V$  时, 由测量分辨率引起的相对误差为:

$$e_1 = \frac{2R_v}{V} \times 100\% = \frac{F_s \lambda}{VN \cos \theta} \times 100\% = \frac{\lambda}{VN \cos \theta} \frac{k2V \cos \theta}{\lambda} \times 100\% = \frac{2k}{N} \times 100\% \quad (16)$$

由公式 (16) 可知, 此时测速分辨率引起的相对误差仅取决于采样点的个数。但在实际应用中, 对每个速度都采用对应的采样频率是无法实现的, 因此可以在特定的测速区间内采用统一的采样频率。由公式 (9) 可知, 当发射倾角一定时, 采样频率越低, 导致的相对误差越小。但为了满足奈奎斯特采样定理, 在特定测速区间内, 采样频率应至少为最大速度所对应的多普勒频率的两倍, 即:

$$F_s \geq 2 \times \frac{2V_{\max i} \cos \theta}{\lambda} \quad (17)$$

式中:  $V_{\max i}$  为第  $i$  个测速区间所对应的最大速度。取  $F_s = \frac{4V_{\max i} \cos \theta}{\lambda}$ , 则由测速分辨率引起的相对误差可以表示为:

$$e_1 = \frac{4V_{\max i}}{VN} \times 100\% \quad (18)$$

每个测量区间的起始速度可根据规定的相对误差要求确定。例如: 当相对误差要求小于 0.1%, 整个测速范围为 1.8~500 km/h。为保证被测速度为 500 km/h 时采样频率仍能满足奈奎斯特采样定理, 最小发射倾角应为 84.5°。将  $V_{\max i}=500$  km/h 代入公式 (18) 可得:

$$\frac{4V_{\max i}}{V_{\min 1} N} \times 100\% \leq 0.1\% \quad (19)$$

式中:  $V_{\min 1}$  为第一个测速区间所对应的最小被测速度。由公式 (19) 可知,  $V_{\min 1}=122.07$  km/h。因此, 第一测速区间为 122.07~500 km/h, 第一个采样间隔的采样率为 100 MHz。令  $V_{\max 2}=V_{\min 1}$ , 得到第二个测速区间的起始速度为  $V_{\min 2}=29.80$  km/h。根据  $V_{\max 2}$  可得最小采样率应为 24.44 MHz。同理可得, 整个速度范围内的测速区间分布如表 1 所示。

表 1 分段设置采样频率所得测速区间

Tab.1 The speed measurement interval obtained by setting sampling frequency in segments

Section/km·h <sup>-1</sup>	Minimum sampling rate/MHz	Incidence angle/(°)
122.07-500	100	84.5
29.8-122.07	24.44	84.5
7.28-29.8	5.97	84.5
1.78-7.28	1.46	84.5

2.2 分段设置发射倾角

由公式 (9) 可知, 发射倾角越小, 测速分辨率越高, 由测速分辨率带来的相对误差越小。因此, 适当减小发射倾角有助于减小测速分辨率带来的相对误差。但在每个测速区间内, 发射倾角应使最大被测速度所对应的多普勒频率与采样频率之间满足采样定理, 即:

$$\frac{2V_{\max i} \cos \theta_i}{\lambda} \leq \frac{1}{2} F_s \quad (20)$$

式中:  $\theta_i$  为第  $i$  个测速区间所对应的发射倾角。公式 (20) 可以表示为:

$$\cos \theta_i \leq \frac{F_s \lambda}{4V_{\max i}} \quad (21)$$

假设最大采样率为 100 MHz, 最大测量速度为 500 km/h, 根据公式 (21) 可得, 发射倾角应大于 84.5049°。根据公式 (16), 为使相对误差最小, 应取  $\theta_i=84.5049^\circ$ 。然后根据相对误差要求确定各测速区间的初始速度。例如, 为使相对误差小于 0.1%, 测速区间的初始速度应满足:

$$\frac{F_s \lambda}{V_{\min i} N \cos (84.5049^\circ)} \times 100\% \leq 0.1\% \quad (22)$$

由公式 (22) 可知,  $V_{\min i}=122.07$  km/h。因此, 为满足测速需求, 当测速间隔为 122.07~500 km/h 时, 发射倾角应为 84.5°。以 122.07 km/h 作为下一个测速区间的最大测量速度, 根据公式 (20)~(22) 可得下一个测速区间为 29.8~122.07 km/h, 发射倾角应为 66.9064°。当测速区间最大速度为 29.8 km/h 时, 无论取多大的发射倾角, 均满足公式 (21), 此时的相对测速误差主要取决于采样频率。此时的采样频率应满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_s \geq 2 \frac{2V_{\max i}}{\lambda} \geq 2 \frac{2V_{\max i} \cos \theta_i}{\lambda} \\ \frac{F_s \lambda}{V_{\min i} N \cos \theta_i} \leq \frac{F_s \lambda}{V_{\min i} N} = 0.1\% \end{array} \right. \quad (23)$$

可以得到测速区间分布如表 2 所示。

表 2 分段设置发射倾角所得测速区间

Tab.2 The velocity measurement interval obtained by setting the incident angle in stages

Section/km·h <sup>-1</sup>	Minimum sampling rate/MHz	Incidence angle/(°)
122.07-500	100	84.5049
29.8-122.07	100	66.9064
7.28-29.8	62.24	Any
1.78-7.28	15.2	Any

2.3 分段设置发射倾角与分段设置采样频率的等效性

图 9 给出了由 2.1 节和 2.2 节所得到的测速区间及相对测速误差分布图。如图中所示, 进行分段设置后的测速分辨率引起的相对测速误差相对于未分段时的相对误差明显减小。在给定最大允许相对测速误差时, 分段设置发射倾角或分段设置采样频率, 或者同时调整这两个参数所得到的测速区间及相对误差相同, 其中区间的大小和起始点取决于相对误差和最大测速范围的要求。

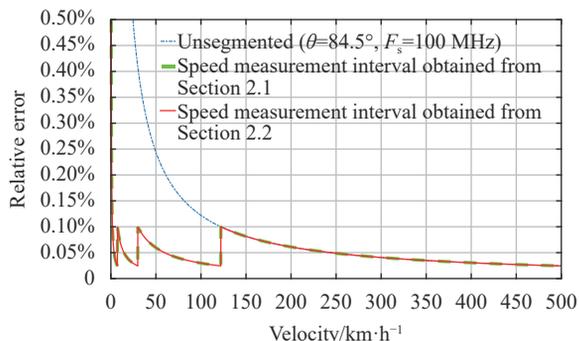


图 9 测速区间及测速误差分布图

Fig.9 Comparison of relative errors caused by velocity measurement resolution

假设第  $i$  个测速区间为  $V_{\min i} \sim V_{\max i}$ , 则第  $i$  个测速区间对应的相对误差为:

$$e_i = \frac{F_{s i} \lambda}{V N \cos \theta_i} \times 100\% \quad (24)$$

式中:  $F_{s i}$  为第  $i$  个测速区间的采样频率; 第  $i$  个测速区间的发射倾角为  $\theta_i$ 。由采样定理可知:

$$F_{s i} \geq 2 \frac{2V_{\max i} \cos \theta_i}{\lambda} \quad (25)$$

由公式 (24) 和公式 (25) 可得:

$$e_1 \geq \frac{4V_{\max i} \cos \theta_i}{\lambda} \frac{\lambda}{VN \cos \theta_i} \times 100\% = \frac{4V_{\max i}}{VN} \times 100\% \quad (26)$$

取相对误差为最小值, 即:

$$e_1 = \frac{4V_{\max i}}{VN} \times 100\% \quad (27)$$

由公式 (27) 可知, 不同被测速度时的相对测速误差与采样频率和发射倾角无关, 而与采样点数和测速区间内的最大被测速度有关。相对误差随速度的增加而减小, 分别取被测速度  $V$  为区间的最大速度和最小速度, 可以得到每个测速区间内的相对误差范围为  $\frac{4}{N} \sim \frac{4V_{\max i}}{V_{\min i}N}$ 。其中相对误差随速度的变换斜率为:

$$\frac{de_1}{dV} = -\frac{4V_{\max i}}{N} \frac{1}{V^2} \quad (28)$$

由公式 (28) 可知, 当规定了最大允许相对误差和测速范围时, 就可以确定每个测速区间的起始范围, 各测速区间内的最小相对误差为  $4/N$ 。采样频率和发射倾角的选择主要由系统带宽要求决定, 不影响测速分辨率带来的相对误差。因此, 无论是单独设置采样频率或单独设置发射倾角, 还是同时改变这两个参数, 只要最大测量速度和最大允许相对误差保持不变, 则测速区间也将保持不变。在对采样频率或发射倾角有特定要求的情况下, 可以通过修改另外一个参数来满足相对测速误差的要求。

### 3 结 论

参考光束型 LDV 的发射倾角会影响测速仪的信号质量、信号带宽和测速精度。增大发射倾角虽然可以增强信号质量, 降低信号频率, 但会导致测速分辨率引起的相对误差过大。文中通过理论分析和仿真得出, 发射倾角的选择应位于  $60^\circ \sim 80^\circ$  之间。在给定测速范围和测速精度要求时, 可以针对不同测速区间分段设置发射倾角或分段设置采样频率, 在满足系统的带宽要求的同时可以保证速度测量精度, 并从理论上分析了分段设置发射倾角和分段设置采样频率的等效性。同时, 给出了测速区间以及不同测速区间时发射倾角和采样频率的选择依据, 对于激光多普勒测速仪的结构设计以及实际应用具有重要指导意义。

### 参考文献:

- [1] YE H Y, CUMMINS H Z. Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne Laser Spectrometer [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10): 176-178.
- [2] BOND R L. Contributions of system parameters in the Doppler method of fluid velocity determination [D]. Arkansas: University of Arkansas, 1968.
- [3] RUDD M J. A laser Doppler velocimeter employing the laser as a mixer-oscillator [J]. *Guided Weapons Division, British Aircraft Corporation (Operating) Ltd, Bristol*, 1968, 1(7): 723-726.
- [4] PENNEY C M. Differential doppler velocity measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 16(4): 167-169.
- [5] FU Q, LIU Y, LIU Z, et al. High-accuracy SINS/LDV integration for long-distance land navigation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2952-2962.
- [6] ZHOU J, LONG X. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained inertial navigation system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(3): 477-483.
- [7] XI Chongbin, HUANG Rong, ZHOU Jian, et al. The quality factor of laser Doppler signal enhancement technology based on liquid lens [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0704003. (in Chinese)
- [8] ZHONG Y, ZHANG G, LENG C, et al. A differential laser Doppler system for one-dimensional in-plane motion measurement of MEMS [J]. *Measurement*, 2007, 40(6): 623-627.
- [9] DU Zhenhui, LI Shuqing, JIANG Chengzhi, et al. Small vibration measurement using laser grating Doppler effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 834-837. (in Chinese)
- [10] MARTARELLI M, EWINS D J. Continuous scanning laser Doppler vibrometry and speckle noise occurrence [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2006, 20(8): 2277-2289.
- [11] XIANG Z, ZHANG T, WANG Q, et al. A SINS/GNSS/2D-LDV integrated navigation scheme for unmanned ground vehicles [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(12): 125116.
- [12] WANG M, CUI J, HUANG Y, et al. Schmidt ST-EKF for autonomous land vehicle SINS/ODO/LDV integrated navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 8504909.
- [13] ZHU Y, WANG X, ZHENG J, et al. Using GPS time-differenced carrier phase observations to calibrate LDV/INS integrated navigation systems [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020,

- 20(1): 405-414.
- [14] CHEN Lanjian, XI Chongbin, ZHOU Jian, et al. Research and flight test on airborne laser Doppler velocimeter for unmanned aerial vehicles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(17): 1712002. (in Chinese)
- [15] XI C, ZHOU J, NIE X, et al. Dual-Doppler signal mixing laser Doppler velocimeter [J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(7): 075513.
- [16] CHEN Lanjian, XI Chongbin, ZHOU Jian, et al. Review of laser Doppler velocimeter technology for navigation and localization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 20230143. (in Chinese)
- [17] PICCATO A, FRANCESE C, MALVANO R. A portable rotating disk prototype for LDA calibration [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2014, 38: 54-61.
- [18] WANG Qi, GAO Chunfeng, ZHOU Jian, et al. Calibration method of laser Doppler velocimeter based on Janus configuration in land integrated navigation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0417003. (in Chinese)
- [19] XI C, WANG Q, NIE X, et al. Online calibration technology for a one-dimensional laser Doppler velocimeter based on a strapdown inertial navigation system [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): 1229-1237.
- [20] OREN M, NAYAR S K. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, 14(3): 227-251.
- [21] 金国藩, 李景镇. 激光测量学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [22] NIE Xiaoming. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2024. (in Chinese)

## The influence of incidence angle on the performance of Laser Doppler Velocimeter

XI Chongbin<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2\*</sup>, NIE Xiaoming<sup>1,2</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>, JIN Shilong<sup>1,2</sup>

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

### Abstract:

**Objective** The reference beam Laser Doppler Velocimeter (LDV) boasts advantages such as high accuracy, wide range, rapid response, and non-contact measurement. It is extensively employed in the measurement of physical quantities like solid surface velocity, vibration, displacement, as well as in integrated navigation systems. The reference beam type LDV measures sensitive velocity components parallel to the direction of the outgoing light, where the angle between the outgoing light of the LDV and the moving surface constitutes the emission inclination. Evidently, the magnitude of the velocity component to which the LDV is sensitive will hinge on the magnitude of the launch inclination, thereby influencing the system bandwidth. Additionally, the transmission angle also impacts the signal-to-noise ratio of the Doppler signal and the velocity measurement accuracy of the LDV. It can be discerned that the launch angle will have a significant impact on the performance of the LDV. To enable the LDV to select a rational launch angle, the effect of the launch angle on the performance of the LDV is analyzed and discussed in this paper.

**Methods** The influence of the launch angle on the performance of LDV is analyzed through theory and simulation. The relationship between the emission inclination angle and the signal frequency is obtained by the principle formula of LDV (Fig.2). Based on the irradiance formula when the laser incident on a surface with different roughness, the signal-to-noise ratio variations corresponding to different emission angles are acquired (Fig.3). Additionally, the impacts of launch inclination on velocity measurement errors were analyzed, including errors caused by velocity measurement resolution (Fig.5), the finite aperture of detector error (Fig.2), principle formula approximation error, finite transit time error and laser divergence angle error, etc. The errors caused by

velocity measurement resolution were identified as the main errors (Fig.7).

**Results and Discussions** According to the relationship between the frequency of the Doppler signal and the transmission angle (Fig.2), to reduce the signal bandwidth of the LDV, a large transmission angle should be selected as far as possible. Meanwhile, the signal-to-noise ratio of the Doppler signal also increases with the growth of the transmission inclination, and this growth trend gradually slows down when the transmission inclination is greater than  $60^\circ$  (Fig.3). Therefore, to enhance the signal-to-noise ratio of the Doppler signal, the transmission angle should be greater than  $60^\circ$ . However, increasing the launch angle will augment the velocity measurement error, especially when the launch angle is greater than  $80^\circ$ , the velocity measurement error will escalate rapidly with the increase of the launch angle (Fig.7). Based on the outcomes of the simulation analysis, the method of setting the launch angle or sampling frequency in segments is proposed for different measuring ranges and measuring accuracy requirements, and the steps of determining different measuring ranges are provided. Compared with unsegmented measurement, segmented measurement can significantly reduce the velocity measurement error of the system (Fig.9), and the equivalence of the segmented setting of the launch angle and the segmented setting of the sampling frequency is elucidated (Tab.1-Tab.2).

**Conclusions** To reduce the system bandwidth and enhance the signal-to-noise ratio of the Doppler signal, a large transmission angle should be selected. However, an excessively large launch angle will give rise to an increased velocity measurement error of the system. When choosing the actual launch angle, a balance should be struck among several factors, and the launch angle is preferably between  $60^\circ$  and  $80^\circ$ . When the range of velocity measurement is overly large, to concurrently meet the requirements of the signal bandwidth and velocity measurement error, the method of setting the transmission angle or sampling frequency in segments can be employed. It holds significant guiding significance for the structural design and practical application of LDV.

**Key words:** optical measurement; incidence angle; Laser Doppler Velocimeter; signal quality; signal bandwidth; velocity measurement accuracy

**Funding projects:** Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2021JJ30782)