

# 基于 Janus 配置的三光束激光多普勒测速仪

邬战军 韩凤山\* 范哲 林志立

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘要** 为了可以同时测量车辆的纵向和横向速度,提出了一种基于 Janus 配置的三光束激光多普勒测速仪(TLDV)。给出了 TLDV 的测速模型和测速公式,对其测速的相对误差进行了理论分析和数值仿真。结果表明:TLDV 对车辆颠簸、摇晃不敏感,测速误差只受上下颠簸角的影响,与左右摇晃角无关;当车辆上下起伏速度一定时,测速误差随着上下颠簸角的增大而增大,当上下起伏速度为 0.2 m/s,颠簸角为  $10^\circ$  时,测速误差小于 0.3%。最后,给出了一种 TLDV 光束方向的最佳配置方案。

**关键词** 激光技术;相干光学;相干激光雷达;多普勒测速;三光束

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.071404

## Triple-Beam Laser Doppler Velocimeter Based on Janus Configuration

Wu Zhanjun Han Fengshan Fan Zhe Lin Zhili

(School of Instrument Science and Optic-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract** In order to measure the longitudinal and lateral speeds of a vehicle simultaneously, a triple-beam laser Doppler velocimeter (TLDV) system based on Janus configuration is presented. The model and the expression of speed measurement are given. According to the analysis and simulation, some results can be obtained as follows: firstly, TLDV is less sensitive to bump and shake; secondly, the relative speed measurement error is affected only by the bump angle and has no relationship with the shake angle; thirdly, the relative error is lower than 0.3% when the bump angle is  $10^\circ$  and the velocity is 0.2 m/s. Last of all, a kind of optimal configuration of TLDV beams is given.

**Key words** laser technique; coherence optics; coherent lidar; Doppler velocimetry; triple-beam

**OCIS codes** 030.164; 140.3510; 060.1660

## 1 引言

在车辆打滑或车轮半径不同的情况下,多普勒雷达可以为车辆提供精确的速度信息<sup>[1]</sup>。在动态车辆稳定控制系统中,纵向速度和横向速度是非常重要的参量,尤其在转弯过程中,横向速度可以给出车辆的动态行为信息<sup>[2]</sup>。传统的单光束激光测速仪(LDV),在路况复杂,车辆颠簸、摇晃时会出现较大的测速误差<sup>[3]</sup>。为此,研究人员提出一种双光束激光测速仪,通过对测得的前向和后向多普勒频移做差而求得车辆的速度<sup>[3-5]</sup>。这种激光测速仪虽然在很大程度上减小了由车体振动而带来的测速误差,但却只能测量车辆的纵向速度,不能测量车辆的横向速度,不能满足车辆稳定控制系统的要求。文献[6]中提出了一种四光束测速仪,可同时测量车辆的横向和纵向速度,通过四个波束的两两结合可以分别得到横向速度和纵向速度分量的两个估计值,两个估计值经平均后可以得到该速度分量更精确的数值。但事实上基于 Janus 配置的三光束布局就已经具备测量三个速度分量的能力并且测速算法简单、测速误差较小,上述方法中的第四个波束反而增加了测速系统的复杂性和研制成本。

收稿日期: 2013-04-02; 收到修改稿日期: 2013-04-26; 网络出版日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61101007)

作者简介: 邬战军(1971—),男,副教授,主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail: for\_wzj@yahoo.com.cn

\* 通信联系人。E-mail: hfengshan@126.com

本文首先介绍了多普勒测速的基本原理,然后给出了三光束激光多普勒测速仪(TLDV)的测速模型和测速公式并分析了车辆在崎岖不平的路面上行驶时的相对测速误差。最后,根据测速敏感度的定义和最小化回光损耗原则给出了一种 TLDV 光束的最佳配置方案。

## 2 多普勒测速基本原理

激光的多普勒效应是 LDV 的理论基础。对于任何形式的波传播,由于波源、接收器、传播介质或中间反射器、散射体的运动,均会使波的频率发生变化。频率的变化与相对运动速度成简单的线性关系,所以只要获得回波光信号的多普勒频移就能反演出径向相对运动速度<sup>[7]</sup>。

激光多普勒测速原理如图 1 所示,出射光遇地面后发生反射或散射,回波光被激光多普勒测速仪接收,此过程中多普勒频移与车辆的相对运动速度成简单线性关系,即

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \mathbf{A} \cdot \mathbf{v}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{A}$  为光束在  $(x, y)$  坐标系中的单位方向矢量,  $\mathbf{v}$  为速度矢量。车辆的速度可表示为

$$\mathbf{v} = \frac{\lambda f_d}{2 \cos \gamma}, \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为车辆速度方向与光束中心线的夹角。

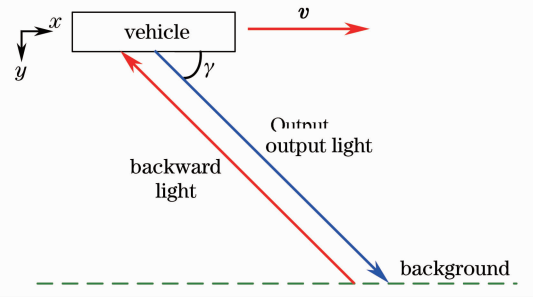


图 1 激光多普勒测速原理

Fig. 1 Principle of laser Doppler velocimetry

## 3 三光束激光多普勒测速系统

### 3.1 测速模型和测速公式

Janus 配置的 LDV 对光束发射倾角不敏感,可以大大减小地面凹凸不平、车辆颠簸引起的测速误差,测速精度远高于单光束系统<sup>[3-5]</sup>。为了保持较高的测速精度,且可同时测量车辆的纵向和横向速度,提出了一种基于 Janus 配置三光束激光多普勒测速仪,测速模型如图 2 所示。

如图 2 所示,取车体重心为原点,车头朝向为  $X$  轴,铅直向下为  $Z$  轴建立坐标系。取  $\theta_2 = \pi - \theta_1 = -\theta_3 = \theta$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$ ,光束 1、光束 2、光束 3 两两组成 Janus 配置,由图中可以得出,第  $i$  个光束( $i = 1, 2, 3$ )的单位方向向量为

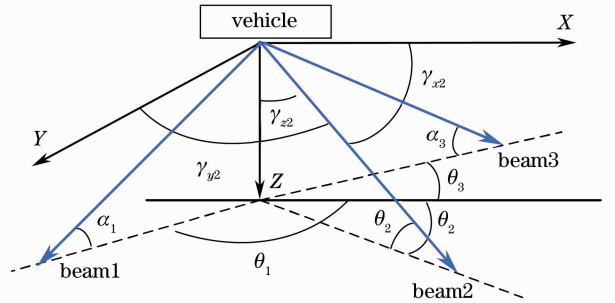


图 2 TLDV 测速模型

Fig. 2 Velocity measurement model of TLDV

$$\mathbf{A}_i = \cos \gamma_{xi} \mathbf{i} + \cos \gamma_{yi} \mathbf{j} + \cos \gamma_{zi} \mathbf{k}, \quad (3)$$

其中,方向余弦  $\cos \gamma_{xi} = \cos \alpha_i \cos \theta_i$ ,  $\cos \gamma_{yi} = \cos \alpha_i \sin \theta_i$ ,  $\cos \gamma_{zi} = \sin \alpha_i$ 。由(1)式可知,三个光束的多普勒频移分别为

$$f_1 = \frac{2}{\lambda} (-v_x \cos \alpha \cos \theta + v_y \cos \alpha \sin \theta + v_z \sin \alpha), \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{2}{\lambda} (v_x \cos \alpha \cos \theta + v_y \cos \alpha \sin \theta + v_z \sin \alpha), \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{2}{\lambda} (v_x \cos \alpha \cos \theta - v_y \cos \alpha \sin \theta + v_z \sin \alpha), \quad (6)$$

三个正交的速度分量为

$$v_x = \frac{\lambda(f_2 - f_1)}{4 \cos \alpha \cos \theta}, \quad (7)$$

$$v_y = \frac{\lambda(f_2 - f_3)}{4\cos\alpha\sin\theta}, \quad (8)$$

$$v_z = \frac{\lambda(f_1 + f_3)}{4\sin\alpha}. \quad (9)$$

可见基于 Janus 配置的 TLDV 可同时测量载体的三维速度,两个光束的频移即可确定载体某一维的速度,减小了计算量,降低了测速的复杂性和不确定性。在车辆行驶过程中,往往只对车辆的纵向速度  $v_x$  和横向速度  $v_y$  感兴趣,而在直升机垂直起降、轻型航天飞机起降、小卫星自主着陆等情况下<sup>[8]</sup>,垂向速度  $v_z$  也是非常重要的参量。

### 3.2 测速误差分析

当车辆在凹凸不平的路面上行驶时,会出现上下颠簸和左右摇晃,如图 3 所示。假定上下颠簸角为  $\beta$ ,左右摇晃角为  $\varphi$ ,当仅考虑上下颠簸时,光束矢量沿 Y 轴旋转,Y 方向的矢量分量不变,矢量变换矩阵为

$$\mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

同样,当只考虑左右摇晃时,光束矢量沿 X 轴旋转,X 方向的矢量分量不变,矢量变换矩阵为

$$\mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}. \quad (11)$$

当车辆在崎岖不平的道路上行驶时,会同时发生上下颠簸和左右摇晃,矢量变换矩阵为

$$\mathbf{R}_{pr} = \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta\sin\varphi & \sin\beta\cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\varphi & \cos\beta\cos\varphi \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由(1)式得,第  $i$  个波束( $i=1,2,3$ )的多普勒频移为

$$f'_i = \frac{2}{\lambda} \mathbf{R}_{pr} \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{v}, \quad (13)$$

即

$$f'_1 = \frac{2}{\lambda} [v'_x(-\cos\alpha\cos\theta\cos\beta + \cos\alpha\sin\theta\sin\beta\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi\sin\beta) + v'_y(\cos\alpha\sin\theta\cos\varphi - \sin\alpha\sin\varphi) + v'_z(\cos\alpha\cos\theta\sin\beta + \cos\alpha\sin\theta\cos\beta\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi\cos\beta)], \quad (14)$$

$$f'_2 = \frac{2}{\lambda} [v'_x(\cos\alpha\cos\theta\cos\beta + \cos\alpha\sin\theta\sin\beta\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi\sin\beta) + v'_y(\cos\alpha\sin\theta\cos\varphi - \sin\alpha\sin\varphi) + v'_z(-\cos\alpha\cos\theta\sin\beta + \cos\alpha\sin\theta\cos\beta\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi\cos\beta)], \quad (15)$$

$$f'_3 = \frac{2}{\lambda} [v'_x(\cos\alpha\cos\theta\cos\beta - \cos\alpha\sin\theta\sin\beta\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi\sin\beta) + v'_y(-\cos\alpha\sin\theta\cos\varphi - \sin\alpha\sin\varphi) + v'_z(-\cos\alpha\cos\theta\sin\beta - \cos\alpha\sin\theta\cos\beta\sin\varphi + \sin\alpha\cos\varphi\cos\beta)]. \quad (16)$$

考虑到  $\beta$  一般较小,  $\sin\beta \approx \beta$ ,且车辆在实际行驶过程中  $v'_z \ll v'_x$ ,经过一定的近似有

$$v'_x = \frac{\lambda(f'_2 - f'_1)}{4\cos\alpha\cos\theta\cos\beta}. \quad (17)$$

此时车辆上下颠簸角为

$$\beta \approx \arctan \frac{(f'_1 + f'_3)\cos\theta}{(f'_2 - f'_1)\tan\alpha}, \quad (18)$$

则测速误差为

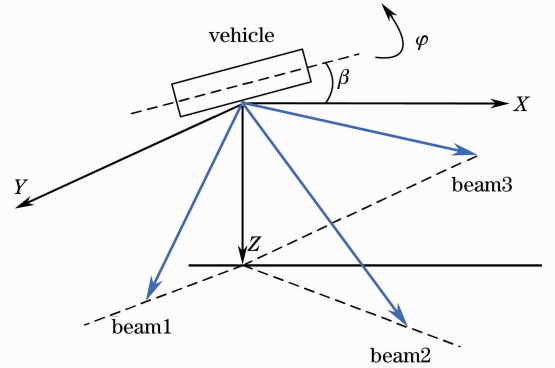


图 3 颠簸角为  $\beta$ ,摇晃角为  $\varphi$  时的测速状态  
Fig. 3 State of TLDV when bump angle is  $\beta$  and shake angle is  $\varphi$

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{v'_x - v_x}{v_x} = \frac{v_z}{v_x} \tan \beta. \quad (19)$$

由(17)式可以看出,当车辆同时存在上下颠簸和左右摇晃时,基于 Janus 配置的 TLDV 的测速误差与左右摇晃角以及横向速度无关,仅与颠簸角  $\beta$  以及  $v_z$  与  $v_x$  的比值有关。

### 3.3 误差仿真及分析

令  $v_x = 15 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 0^\circ \sim 15^\circ$ , 向上的颠簸速度  $v_z = 0, 0.2, 0.4, 0.6 \text{ m/s}$ , 得到的测速相对误差如图 4 所示。

当  $v_z = 0$  时,测速相对误差为 0,与上下颠簸角  $\beta$  无关;当  $v_z$  一定时,测速相对误差随  $\beta$  的增大而增大。当上下颠簸角  $\beta = 0^\circ$  时,测速相对误差也为 0;当  $\beta$  一定时,测速相对误差随  $v_z$  的增大而增大,并且  $v_z$  越大斜率也越大。当  $v_z = 0.2 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 10^\circ$  时,测速相对误差仅为 0.2351%,可见基于 Janus 配置的三光束测速系统对发射倾角的变化和车辆颠簸与摇晃是不敏感的。

## 4 光束方向最佳配置

将测速敏感度定义为速度变化所引起的频率变化,单位为  $\text{kHz}/(\text{cm/s})$ 。根据(7)式,前向速度的总多普勒频移为

$$f_d = \frac{4v_x}{\lambda} \cos \gamma_{x2}. \quad (20)$$

根据偏微分理论,可知测速敏感度为

$$S = \frac{\Delta f_d}{\Delta v_x} = \frac{4 \cos \gamma_{x2}}{\lambda}. \quad (21)$$

取  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $\gamma_{x2} = 40^\circ \sim 80^\circ$  时,由图 5 可知,  $\gamma_{x2}$  与测速敏感性  $S$  成简单的反比关系,  $\gamma_{x2}$  越小测速敏感性就越高。结合(8)式,假定 TLDV 对横向速度和纵向速度有相同的测速敏感度,需要  $\gamma_{x2} = \gamma_{y2}$ ,即

$$\cos \alpha \cos \theta = \cos \alpha \sin \theta, \quad (22)$$

可得  $\theta = 45^\circ$ 。

取 TLDV 系统的采样率为  $f_s = 10 \text{ MHz}$ , 采样点数为  $N = 1024$ , 频率分辨率为

$$F = \frac{f_s}{N}, \quad (23)$$

TLDV 系统对纵向速度可感知  $1 \text{ cm/s}$  速度变化时,要求

$$F \leq S, \quad (24)$$

即有  $\gamma_{x2} \leq 67.7^\circ$ 。

在 TLDV 系统中,光束的作用距离越长,回光损耗越大。令光束的作用距离为  $r$ ,由图 2 可知,

$$r \propto \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (25)$$

为使作用距离尽量短,要求  $\alpha$  角尽可能大。结合上述分析有

$$\cos \alpha \sin 45^\circ \geq \cos 67.7^\circ, \quad (26)$$

可得  $\alpha \leq 57.5^\circ$ 。考虑到 TLDV 系统的实际安装要求,可取  $\alpha = 55^\circ$ , 此时,  $\gamma_{x2} = \gamma_{y2} = 66^\circ$ , 则光束 2 的方向即可完全确定。同时,光束 1、光束 3 的方向也随之确定。

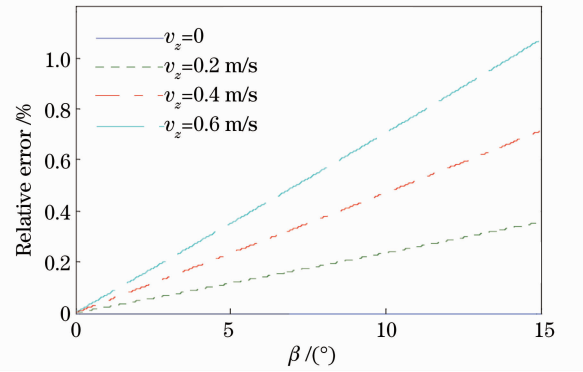


图 4 TLDV 测速相对误差

Fig. 4 Relative velocity measurement error of TLDV

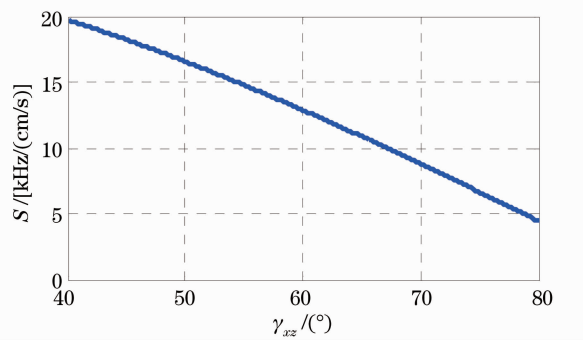


图 5  $\gamma_{x2} = 40^\circ \sim 80^\circ$  时的测速敏感度

Fig. 5 Velocity measurement sensitivity when  $\gamma_{x2}$  ranges from  $40^\circ$  to  $80^\circ$

## 5 结 论

提出了一种基于 Janus 配置的三光束激光测速仪,给出了测速模型和速度测量公式。分析了 TLDV 在颠簸、摇晃情况下的测速误差,结果表明,TLDV 前向测速误差只与颠簸角  $\beta$  和  $v_z/v_x$  有关,与侧向速度  $v_y$  和摇晃角  $\varphi$  无关且测速误差较小。方向角  $\gamma$  由  $\alpha$  和  $\theta$  共同决定,测速过程中要求较高的测速敏感性和较短的作用距离,结合以上两点给出了一种最佳光束配置方案。基于 Janus 配置的 TLDV 可同时测量车辆的纵向和横向速度,受环境影响小,实用性强,并且可推广应用到垂直起降飞行器、小卫星自主登陆等情况。

## 参 考 文 献

- 1 Ling Yongcheng, Zhao Ju. The selection of parameters on Doppler-radar speed-monitoring system for vehicles [J]. J Shenyang University, 2007, 14(4): 35–37.  
凌永成, 赵 炬. 车用多普勒雷达测速系统若干参数的选择[J]. 沈阳大学学报, 2007, 14(4): 35–37.
- 2 H Guo, Z Wu, B Xin, *et al.*. Vehicle velocities estimation based on mixed EKF [C]. Chinese Control and Decision Conference, 2011. 2030–2035.
- 3 Wang Jiqiang, Zhang Chunxi, Feng Di, *et al.*. Laser velocimetry for vehicle based on Janus configuration [J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 555–557.  
王纪强, 张春熹, 冯 迪, 等. 颠簸摇摆引起的车辆测速误差分析[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 555–557.
- 4 Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter based on Janus configuration [J]. J Optoelectronics•Laser, 2011, 22(2): 266–271.  
周 健, 龙兴武. 基于 Janus 配置的激光多普勒测速仪[J]. 光电子•激光, 2011, 22(2): 266–271.
- 5 Zhou Jian, Long Xingwu. Influence of vehicle's vibration on dual-beam laser Doppler velocimeter [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 325–328.  
周 建, 龙兴武. 载体振动对差动激光多普勒测速仪的影响[J]. 强激光与粒子数, 2011, 23(2): 325–328.
- 6 N Kees, M Weinberger, J Detlefsen. Doppler measurement of lateral and longitudinal velocity for automobiles at millimeter waves [C]. IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest, 1993. 805–808.
- 7 Hu Hailong. Application of High Accuracy Signal Processing in Laser Doppler Velocimeter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.  
胡海龙. 高精度信号处理技术在激光多普勒测速中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- 8 W R Fried. An FM-CW radar for simultaneous three-dimensional velocity and altitude measurement [J]. IEEE Trans Aerospace and Navigational Electronics, 1964, 11(1): 45–57.