

用于导航定位的激光多普勒测速技术研究进展

陈兰剑^{1,2}, 席崇宾^{1,2}, 周 健^{1,2*}, 聂晓明^{1,2}, 王 琦^{1,2}, 黄 荣^{1,2}, 向志毅^{1,2}, 金世龙^{1,2}

(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: 激光多普勒测速技术以其高精度和高可靠性得到广泛应用, 其为运动载体的导航定位提供了一种全新的独立测速手段, 在提高定位精度方面发挥了重要作用。随着应用场景的拓展, 现有的激光多普勒测速技术亟待进一步的发展和优化。文中从激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Velocimeter, LDV) 的测速原理、种类分类和导航应用研究现状三个方面入手, 对用于运动载体导航定位的 LDV 技术进行综述。可以看到, 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, 其中单光束 LDV 比双光束 LDV 更适合车载应用, 能敏感更多维度速度分量的 LDV 对导航精度提高的效果更明显。同时, 对 LDV 后续的发展方向进行了展望, LDV 与更低成本的 SINS 进行组合导航是下一步值得研究的方向。可以预见, LDV 有望在未来成为覆盖高低速测量、海陆空全域的高精度独立测速装置, 在解决实际科学和工程问题中发挥更大、更重要的作用。

关键词: 光学测量; 激光多普勒测速仪; 导航定位; 运动载体

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230143

0 引 言

传统的车式载体速度测量通常采用加速度计、里程计、全球卫星导航定位系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 等手段, 加速度计和里程计的误差随测量时间累积, 无法满足导航定位长时间高精度速度测量的要求, 而 GNSS 在丛林、城市高楼、山区涵洞等存在遮蔽的场景下, 信号易被拒止, 无法实现全天时自主速度测量的目标。

寻找一种高精度、鲁棒性强、可实现全天时多环境的速度传感手段是提高车式载体导航定位精度的迫切需求, 激光多普勒测速仪 (Laser Doppler velocimeter, LDV) 进入了研究人员的视野, 作为一种高精度的速度传感手段, 在运动载体速度获取和流体场、风场速度分布探测等领域有着重要的应用价值和前景^[1]。

LDV 的测量光束被各种固体地面散射形成的散射信号远强于在气体和液体产生的散射信号, 这对于

提取速度信号无疑是极为有利的, 也充分说明了 LDV 用于运动载体速度测量的可行性^[2]。近年来, 研究人员通过将 LDV 与捷联惯导系统 (Strapdown Inertial Navigation System, SINS) 结合进行组合导航实验, 有效修正惯性器件误差随时间的发散, 极大地提高了车式载体的定位导航精度, 同时满足了全天时自主导航的要求^[3-4], 在民用领域可有效提高轨道车辆定位精度, 降低定位成本, 进一步实现轨道车辆进站无人化控制精准停车^[5]; 为军用领域的无依托发射提供了技术支撑, 有望在未来实现“随停随打、边走边打”的目标, 极大地提高部队战斗力^[6]。

LDV 在车式载体上的成功应用展现了在导航定位领域的巨大潜力, 成为当前多传感器信息融合导航技术研究中重要的传感器。随着应用场景的拓展, LDV 有望在无人机、水下潜航器的测速定位以及高速铁路的大速度量程测量中发挥重要的作用。文中将对用于运动载体导航定位的激光多普勒测速仪技

收稿日期: 2023-03-15; 修订日期: 2023-05-29

基金项目: 湖南省自然科学基金 (2021JJ30782)

作者简介: 陈兰剑, 男, 博士生, 主要从事中远距离激光多普勒测速仪方面的研究。

导师简介: 金世龙, 男, 教授, 博士, 主要从事激光陀螺方面的研究。

通讯作者: 周健, 男, 副教授, 博士, 主要激光多普勒测速仪方面的研究。

术的研究现状进行综述。

1 LDV 的原理

激光多普勒测速仪进行速度测量的原理可用图 1 来解释,该过程的多普勒频移 f_D 可表示为:^[1]

$$f_D = f_0 \frac{\vec{v} \cdot (\vec{e}_s - \vec{e}_i)}{c} \quad (1)$$

假定光源发出激光的频率为 f_0 ,粒子的运动速度为 v ,图中光源、运动微粒和光电探测器三者的位置关系具有一般性, \vec{e}_s 为运动粒子指向探测器方向上的单位向量, \vec{e}_i 为激光器指向运动粒子方向上的单位向量。

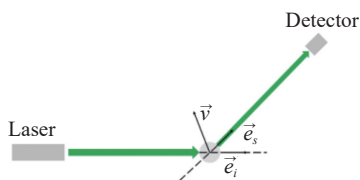


图 1 激光多普勒测速仪原理图

Fig.1 The fundamental concept of LDV

在实际应用中,由于测速仪内部光路结构设计的不同,多普勒频移的具体表达式会略有区别。第 2 节将针对不同结构的 LDV 进一步推导其对应的多普勒频移与运动速度之间的关系式。

2 LDV 的分类

根据应用背景的不同,LDV 在系统结构上存在着不同。此节将从光路结构、速度测量维度两个方面对常用于载体速度测量的 LDV 进行分类介绍。

2.1 按光路结构分类

2.1.1 传统双光束 LDV

1970 年,Penny 提出了双光束差动速度测量系统^[7]。双光束差动结构中参与外差干涉的两束散射光都发生了多普勒频移,最后根据两束散射光的频差信息来解算速度信息。图 2 为典型的双光束 LDV 的结构,两束测量光交汇的位置称为测量控制体。

$$f_D = \frac{v}{\lambda} 2 \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

根据公式 (1) 可以得到如公式 (2) 所示的双光束 LDV 中的多普勒频移 f_D 表达式^[2],式中: λ 为激光波长; θ 为两束测量光束之间的夹角。根据测量原理可

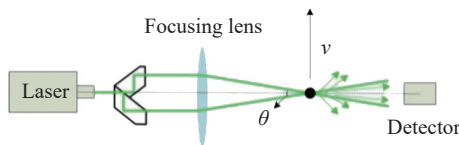


图 2 双光束 LDV 结构示意图

Fig.2 Structure diagram of dual-beam LDV

以看出,测得的多普勒频率与接收方向无关,所以对探测器的位置没有特殊要求,光路易调整,还可以采用大口径接收器接收散射光,从而提高信噪比。由于只有位于测量控制体内的运动粒子或运动表面的速度信息才能被检测到,说明控制体的大小决定了双光束 LDV 的空间分辨率,进一步可知双光束结构的 LDV 空间分辨率很高。

但实际的路面总是凹凸不平的,车辆会随着路面的起伏而发生上下颠簸,将双光束 LDV 应用于车载自速度测量中时,其测量控制体极易脱离路面,造成速度信息丢失。

2.1.2 分层多点双光束 LDV

针对路面颠簸导致的传统双光束 LDV 信号丢失问题,在车载激光多普勒测速的实际应用中,研究人员提出了多点分层的思想^[2],双光束差动系统的控制体决定了测速仪的灵敏度和空间分辨率,选择合适的光学参数可以控制其长度,当地面在控制体高度范围内时即可获得多普勒频率信息,若使用多个探头,将不同探头的控制体范围调整至不同高度,当车载系统在地面上行驶时,对各个探头的输出信号进行实时判断,就可以选出一组有效的多普勒信号,避免了车体颠簸时使用单探头以致信号丢失的情况,从而可以有效地进行离焦测量。图 3 所示为多层分点双光束 LDV 的结构示意图。

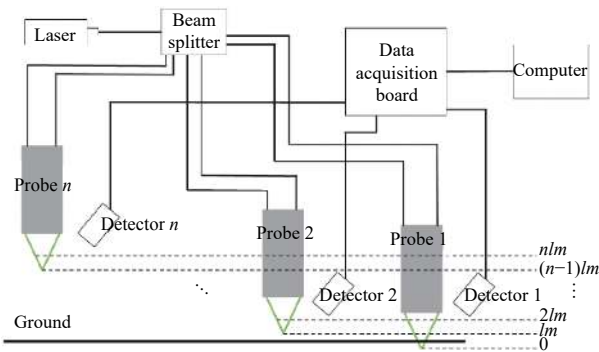


图 3 多点分层双光束 LDV 结构示意图

Fig.3 Structure diagram of multipoint layer-type dual-beam LDV

2.1.3 单光束 LDV

单光束 LDV 的概念是相较前文提到的双光束 LDV 而言的,是指系统中产生多普勒频移的只有一束测量光,另一束未发生频移的光作为参考光,这种 LDV 也可以称作参考光结构 LDV。1964 年, Yeh 和 Cummins 首次采用前向散射的单光束 LDV 对液体的流速测量开展了实验^[8],如图 4 所示。

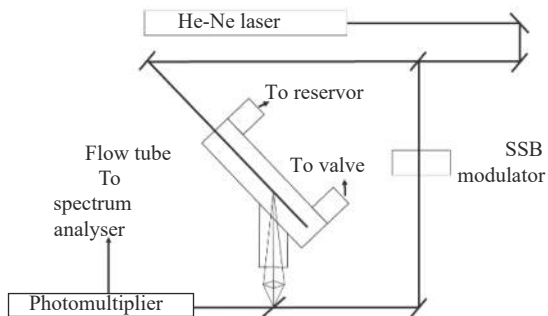


图 4 参考文献 [8] 中实验结构图

Fig.4 The experimental structure of reference [8]

激光器输出的光束由分束镜分成两束,一束测量光经流体中的悬浮粒子散射后的部分散射光与另一束本振光在探测器表面干涉形成外差拍频信号,经过信号处理即可得到多普勒频移信息。实验中测得的 0.05 cm/s 以下的速度信息与理论值吻合度很高,说明激光多普勒测速技术相较于传统的流速测量方法具有更高的精度和更宽的测量范围,同时也证实了多普勒测速技术可以用作实现非接触式速度测量。自此,激光多普勒测速技术正式走向了历史舞台。

利用参考光结构 LDV 对液体以及气体的速度进行测量时,通常采用前向散射接收系统,但是,在车载测速应用中,散射体为固体等非透明物体,前向散射接收系统显然是不适合的,故通常采用如图 5 所示的后向散射单光束结构来进行速度测量,其多普勒频率和相应的速度表达分别为式 (3) 和 (4)^[2]:

$$f_D = \frac{2v_x \cos \alpha}{\lambda} \quad (3)$$

$$v_x = \frac{\lambda f_D}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

式中: v_x 为相应的车辆沿前进方向上的速度分量; α 为测量光束与地面的夹角。

参考光结构 LDV 的优势在于其测量距离不受接收系统中透镜焦距的限制,可以进行离焦测量,在测量景深内都可以接收到较高质量的散射信号,解决了

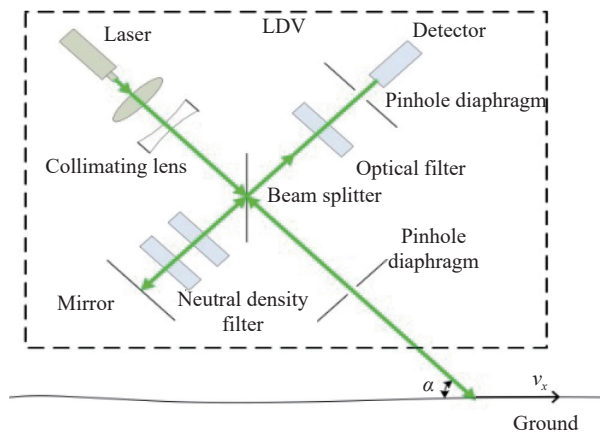


图 5 车载单光束 LDV 结构示意图

Fig.5 Structure diagram of single-beam LDV for ground vehicle

信号丢失的问题,可以更好地适应车载应用中路面起伏的问题,使得参考光结构 LDV 比双光束 LDV 更适合车载应用。

参考光结构 LDV 参与外差干涉的是发生多普勒频移的散射光与未发生多普勒频移的参考光,其外差效率取决于这两束光的准直程度,为了实现光束的严格重合,对光学器件的调整也提出了更高的要求。

研究人员为了提高参考光结构 LDV 的光能利用率,提出了分光再利用结构^[9]。在通常的参考光光路结构中,由于要与散射得到的较弱信号光光强相匹配,参考光的大部分能量都被衰减片衰减掉了,如图 5 所示。分光再利用结构在参考光的分路上增加了一个分束镜 2 将部分光能反射,这部分能量最后通过全反镜 3 入射到待测表面,从而提高光能利用率,如图 6 所示。分光再利用结构拥有更高的信噪比,是传统参考光结构 LDV 的 $(1+r)$ 倍,其中 r 为分光镜 2 的

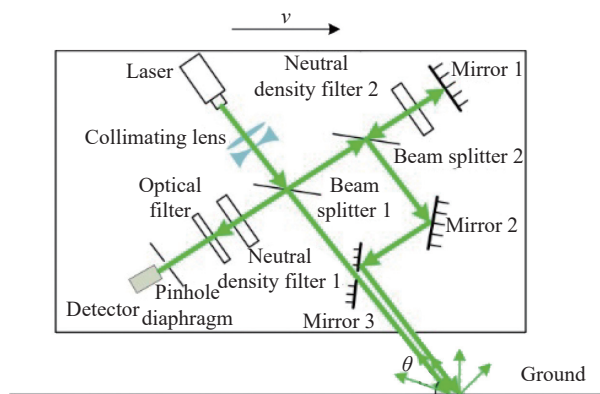


图 6 分光再利用型 LDV 结构示意图

Fig.6 Structure diagram of spectral reuse type LDV

反射率,更适用于车载测速应用。

2.1.4 Janus 配置 LDV

单光束 LDV 在安装到车式载体上时,测量光在水平方向上的投影通常与车头的前进方向是共线的,测量的是车辆前进方向上的速度分量,如图 7 所示,在行驶至凹凸不平的路面时,LDV 的发射倾角会发生变化,同时车辆会有竖直方向上的速度分量,这都会对前进方向上的速度分量测量产生串扰,导致测量误差。

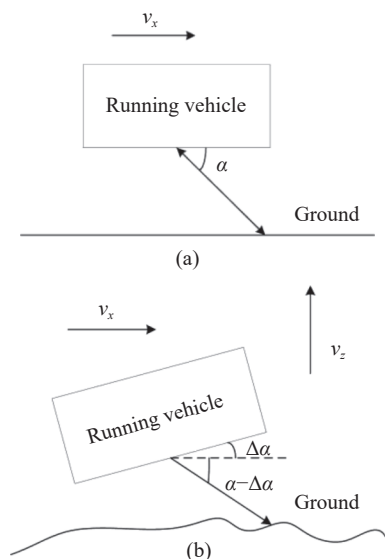


图 7 (a) 车辆行驶在平路上时 LDV 发射倾角示意图; (b) 车辆行驶在凹凸不平路面上时 LDV 发射倾角示意图

Fig.7 (a) Schematic diagram of the emission angle of LDV when the vehicle is on a flat road; (b) Schematic diagram of the emission angle of LDV when the vehicle is on a rough road

图 7 中所示的路面颠簸引起的速度测量误差为^[2]:

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{v'_x - v_x}{v_x} = \tan \alpha \sin(\Delta\alpha) + \cos(\Delta\alpha) - \frac{v_z}{v_x} [\tan \alpha \cos(\Delta\alpha) - \sin \Delta\alpha] - 1 \quad (5)$$

式中: α 为理想情况下测量光束的发射倾角; $\Delta\alpha$ 为发射倾角的变化量; v_z 为载体在竖直方向上的速度分量。

为了提高单光束 LDV 的测速精度,研究人员提出了 Janus 配置结构的单光束 LDV 来减小车辆上下起伏颠簸带来的影响^[10]。如图 8 所示, Janus 配置结构的 LDV 由两套完全相同的单光束 LDV 组成,以相同的发射倾角分别朝向车头和车尾的方向,工作时,两套 LDV 同时独立进行测速。如图 9 所示,当进入

到凹凸不平路面时,车辆颠簸起伏的影响逐渐显著。

$$f'_{D1} = \frac{2v_x \cos(\alpha - \Delta\alpha) - 2v_z \sin(\alpha - \Delta\alpha)}{\lambda} \quad (6)$$

$$f'_{D2} = \frac{2v_x \cos(\alpha + \Delta\alpha) + 2v_z \sin(\alpha + \Delta\alpha)}{\lambda} \quad (7)$$

公式 (6) 和 (7) 分别表示两套单光束 LDV 的多普勒频率 f'_{D1} 和 f'_{D2} 。

Janus 匹配的单光束 LDV 速度测量的相对误差为:

$$\frac{\Delta v_x}{v_x} = \frac{\lambda(f'_{D1} + f'_{D2})}{4 \cos \alpha \cos \Delta\alpha} - v_x = \frac{v_z}{v_x} \tan(\Delta\alpha) \quad (8)$$

假设 $v_x = 10 \text{ m/s}$, $\alpha = 30^\circ$, $\Delta\alpha = 5^\circ$, $v_z = 0.1 \text{ m/s}$, 根据公式 (5) 和 (8) 可得单光束 LDV 和 Janus 配置结构 LDV 速度测量的相对误差分别为 4% 和 0.08%。相较单独的单光束 LDV 进行速度测量, Janus 配置的测速系统大大减小了地面不平整、车辆颠簸对测量精度的影响。

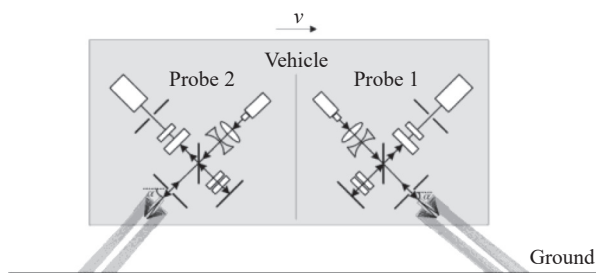


图 8 Janus 配置结构的单光束 LDV

Fig.8 Structure of Janus configuration single-beam LDV

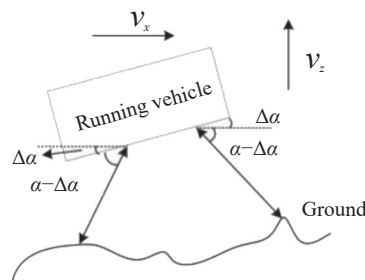


图 9 车辆行驶在颠簸路面时 Janus 配置结构 LDV 发射倾角变化示意图

Fig.9 Schematic diagram of the emission angle variation of the Janus configuration LDV when the vehicle is on a rough road

2.2 按速度测量维度分类

前文介绍的 LDV 获取的都是一维速度信息,也就是在行进方向的速度分量信息,而车辆在运动中的

速度矢量是由三个方向上的分量合成得到的, 只有对三个分量进行测量, 才能对速度信息进行完整的描述。车载 LDV 也经历了从一维测量到二维、三维测量的发展历程。

2.2.1 二维 LDV

二维 LDV 在一维 LDV 测量车辆前进后退的速度基础上增加了竖直速度分量测量的维度, 可以敏感车辆上下颠簸带来的速度变化, 二维激光多普勒测速仪由两个一维 LDV 子系统组成, 其中的子系统可以采用双光束结构, 也可以使用单光束结构, 但考虑到车载应用实际, 通常选用可以实现较大测量景深的单光束结构作为多维 LDV 中的子系统。

图 10 所示为二维 LDV 的典型结构图, 测量光束在水平面上的投影与车辆的前进方向平行。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

假设两个子系统分别测到的速度为 v_1 和 v_2 , θ_1 和 θ_2 为两个子系统的安装夹角。根据图中的几何关系, 可以将两个子系统测到的速度用前进和竖直方向的速度分量进行表示, 根据公式 (9)~(11) 即可反推出 v_x 和 v_z 。

由于二维 LDV 增加了竖直方向这一测量维度, 可以较好地反映车辆实际行驶中路面颠簸的情况, 相较于单光束 LDV 提供的一维速度信息有更高的测量精度, 更有利于后续在导航定位中的应用。

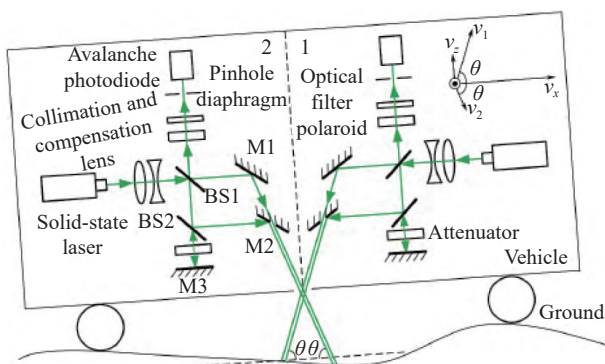


图 10 二维 LDV 结构图^[11]

Fig.10 Structure diagram of two-dimension (2D) LDV^[11]

2.2.2 三维 LDV

与二维 LDV 类似, 三维 LDV 也是由一维单光束

子系统组成, 要解算三个方向上的速度分量, 在空间中至少要有三个不共面的向量基, 也就是说至少需要三个一维单光束子系统, 基于测量冗余考虑, 三维 LDV 通常采用四个单光束子系统, 四光束的安装角度和发射倾角如图 11 所示。

各个子系统输出的速度分别为^[4]:

$$v_1 = f_{D1}\lambda/2 = v_x \sin \alpha \cos \theta - v_y \cos \alpha \cos \theta - v_z \sin \theta \quad (12)$$

$$v_2 = f_{D2}\lambda/2 = v_x \sin \alpha \cos \theta + v_y \cos \alpha \cos \theta - v_z \sin \theta \quad (13)$$

$$v_3 = f_{D3}\lambda/2 = -v_x \sin \alpha \cos \theta + v_y \cos \alpha \cos \theta - v_z \sin \theta \quad (14)$$

$$v_4 = f_{D4}\lambda/2 = -v_x \sin \alpha \cos \theta - v_y \cos \alpha \cos \theta - v_z \sin \theta \quad (15)$$

式中: f_{D1} 、 f_{D2} 、 f_{D3} 、 f_{D4} 分别为四个单光束子系统测到的多普勒频率。光束倾角均为 θ , 光束投影与 Y_m 轴夹角均为 α , 在安装角度已知的情况下即可解得车辆三个方向上的速度分量。

可以看到, 采用冗余方案的三维 LDV 在其中一个子系统无法正常工作时, 还可以对三维速度进行测量, 整体系统有较高的鲁棒性。

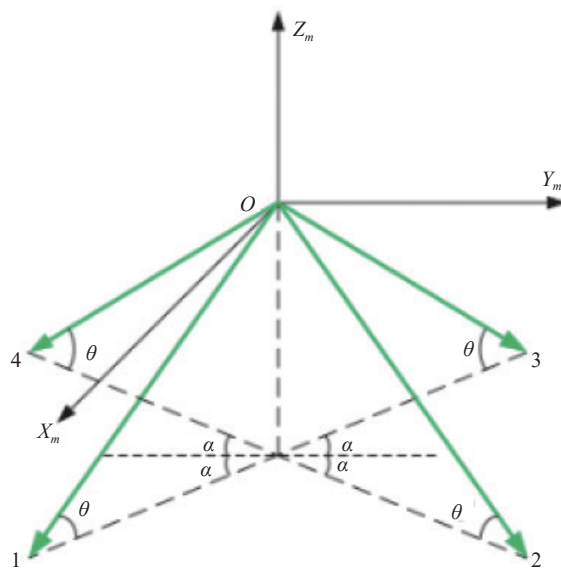


图 11 三维 LDV 出射光束结构示意图^[12]

Fig.11 Structure diagram of the three-dimension (3D) LDV beams^[12]

3 车载 LDV 应用研究现状

3.1 车载 LDV 关键技术研究现状

为了提升 LDV 的实用性, 使其能够应对载体运行的复杂环境, 为载体提供高精度速度信息, 研究人员针对测速仪的众多关键技术进行了深入研究。

对 LDV 的测速误差、比例因子等参数进行有效标定,是衡量测速仪性能的基础技术之一。最常见的标定方法是在实验室条件下采用转盘或转鼓对测速仪进行标定,这种方法被美国、德国、日本等多个国家的计量院所采用^[13-17]。国内张小跃等^[18]于 2012 年提出了一种基于转台的单波束激光测速仪标定方法,通过依靠具有稳定速率的转台,对单波束激光测速仪的比例因子及安装角进行标定。黄荣等于 2018 年提出了一种激光多普勒测速仪高精度标定系统,对标定系统的主要不确定度进行了详细的讨论分析,并利用该系统对测速精度为 0.1% 的 LDV 进行了检定^[19]。以上基于转台的标定方法具有标定精度高的优点,但其无法进行实时标定。为了弥补实验室标定方法的不足,研究人员提出了 LDV 的在线标定技术,利用卫星导航、SINS 等手段提供速度信息,通过 Kalman 滤波等方法对 LDV 的比例因子、安装误差角等参数进行在线标定^[11,20-23],提升了测速仪标定导航过程的实时性,满足运动载体的机动性要求。

多普勒信号的质量直接决定了测速仪的测速精度,研究人员用激光多普勒信号的品质因子 Q 来量化表示多普勒测速仪的信号质量,其定义为频谱上多普勒频率峰值强度值与频谱噪声基底强度的比值。席崇宾等提出了基于液体透镜的品质因子增强技术^[24]。通过控制液体透镜的驱动电流改变测速仪出射光束的腰斑位置,使多普勒信号的品质因子显著增加,扩大了激光多普勒测速仪的工作距离和可测量范围,可测量范围为 700~3 300 mm。此外,研究人员还提出了一种噪声自校正激光多普勒测速系统,在激光多普勒测速仪的出射光路上增加斩波器,对基底噪声和多普勒信号进行循环测量。通过将基底噪声的信息实时反馈给信号处理系统,实现噪声自校正,有利于多普勒信号质量判定及多普勒频率识别。

除了多普勒信号质量以外,载体运动过程中的颠簸抖动也会导致 LDV 的测速精度降低,这是因为载体的颠簸抖动使测速仪的比例因子发生了改变。虽然 2.1.4 节中提到的 Janus 配置的单光束 LDV 可以减小车辆上下起伏颠簸的影响,但由于需要采用两套完全相同的单光束 LDV 致使系统结构复杂。聂晓明和周健提出了一种新型测速仪结构^[25],这种结构的 LDV 发射两束具有一定夹角的出射光束,根据两个多普勒频率和光束之间的夹角计算载体的运动速

度。这种方法能够使 LDV 的输出不受载体俯仰角变化的影响,且相对于 Janus 配置的 LDV,结构更为简单。

在流体、固体、风场等的速度测量中,除了要求测量速度大小外,还要求辨别速度方向。M. K. Mazumder 利用旋转衍射光栅或布拉格光栅对 LDV 的两束出射光进行移频^[26],使被测速度与多普勒频率之间的关系不再为偶函数,从而实现速度方向的辨别。类似的, Koichi MAru 和 Kento Watanabe 利用 LiBbO₃ 晶体的电光效应对 LDV 的出射光束进行移频,从而实现辨向功能^[27]。但这两种方法存在频移量低、需要高电压高频电源驱动等缺点。黄荣等对原有 LDV 光路进行改进,通过对两路多普勒信号的相位进行辨别来实现辨向,这种方法原理简单,弥补了传统辨向技术的不足,有利于 LDV 的集成化、小型化发展,更有利于载体运动速度的测量。

3.2 车载导航应用现状

基于 LDV 提供的高精度速度信息,研究人员逐渐将其应用于载体的导航定位。虽然国外对 LDV 的研究起步较早,但至今鲜见将 LDV 应用于导航定位的报道;国内对车载 LDV 以及其在车载组合导航中的应用已有大量的研究成果。国防科技大学周健课题组采用 532 nm 单纵模固体激光器作为光源,先后对双光束、单光束 LDV 进行了系统研究和样机研制,后续成功研制出了适用于车载应用的一维、二维和三维 LDV^[2-4];北京航空航天大学马宗峰课题组采用全光纤化的技术路线对单光束 LDV 进行了研制,测量光源波长采用了位于人眼安全波段的 1 550 nm 激光^[28]。

2011 年,有研究人员通过理论仿真预测,若使用 LDV/SINS 的组合导航方案,当 LDV 的速度测量精度为 0.1% 时,组合导航系统的定位精度将提高两个数量级,速度精度将提高一个数量级^[29]。基于对车载 LDV 的成功研制,研究人员开始将 LDV 实际应用到车辆定位的组合导航中,LDV 与 SINS 组成组合导航系统的典型结构如图 12 所示,LDV 与 SINS 与车辆固接,以一定的工作频率输出载体的速度、姿态、位置信息,一般的,组合导航系统中,经过如 Kalman 算法等优化滤波算法处理,LDV 提供的高精度速度信息用于修正 SINS 输出数据,提高导航定位的精度。表 1 总结了目前利用 LDV 与 SINS 结合进行车载组合导航的研究现状。

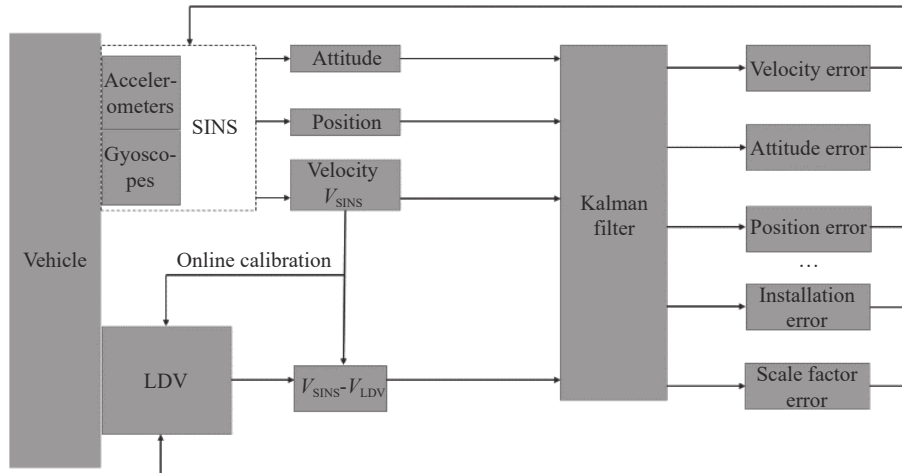


图 12 LDV/SINS 组合导航系统原理框图

Fig.12 Principle diagram of LDV/SINS integrated navigation system

表 1 LDV/SINS 车载组合导航的研究现状

Tab.1 Review of researches of LDV/SINS vehicle integrated navigation

Institution	Year	Experimental distance/km	Experimental duration/h	East error/m	North error/m	SINS-only error/m	Integrated navigation error/m	DK precision	LDV type
	2014 ^[30]	-	2	-	-	1 166	20	-	Reuse type
	2015 ^[31]	-	1	-	-	1 130	8	-	Single-beam
	2017 ^[22]	-	1.25	18	13		22.2	-	Single-beam
	2017 ^[32]	-	2	-	-	1 180	6	-	Reuse type
	2017 ^[33]	32	1	25	18	1 300	30.8	0.09%	1D
		30	2	3	8	1 180	8.5	0.02%	2D
	2017 ^[34]	-	1.2	-	-	2 000	6	-	Reuse type
	2018 ^[35]	55.6	2.1	-	-	1 020	5.8	0.01%	Janus configuration
National University of Defense Technology	2018 ^[36]	29.67	2.2	-	-		17.2	0.06%	Reuse type/one-dimension
		29.67	2.2	-	-	936	7.1	0.02%	2D
	2018 ^[11]	55.6	-	-	-	236	5.5	0.01%	2D
	2018 ^[21]	37.6	1.9	-	-	829	2.6	0.007%	2D
	2018 ^[12]	46.4	2.2	-	-	1 053	2.9	0.006%	3D
		55.4	2.1	-	-		22	0.04%	Single-beam
2019 ^[37]	55.4	2.1	-	-	253	5.2	0.009%	Janus configuration	
	2020 ^[38]	17.2	0.65	6.7	10.7	-	10.8	0.06%	Single-beam
	2020 ^[23]	25.5	0.85	-	-	-	26.6	0.1%	Single-beam
	2021 ^[39]	154	3.7	-	-	-	15.2	0.009%	Single-beam
	2022 ^[40]	47.3	1.5	-	-	1 158	8.3	0.02%	Reuse type
Beihang University	2014 ^[41]	-	0.6	190	70	-	202.4	-	
	2015 ^[42]	-	0.6	115	125	-	169.8	-	Fiber single-beam
	2016 ^[43]	105	1	45	61	-	72.4	0.07%	
Northwestern Polytechnical University	2018 ^[44]	230	4.15	20	15	-	225	0.09%	Dual-beam
Xi'an Research Institute of High Technology	2019 ^[45]	56.6	1.81	5	4	-	6.4	0.01%	Dual-beam

表中对目前各种类型 LDV 进行组合导航时航迹推算最高精度进行了加粗突出,可见利用 LDV 进行组合导航的航迹推算 (Dead Reckoning, DK) 精度已经优于 0.01%,达到了高精度导航定位的要求。整体看来,单光束 LDV 的组合导航精度普遍优于双光束 LDV,更适用于车载导航应用,同时随着速度测量维度的增加,导航精度也呈现提高的趋势。近年来,利用里程计与 SINS 进行组合导航研究的航迹推算的最高精度维持在 0.01% 左右^[46-50],与双光束 LDV 组合导航的结果相当,低于单光束 LDV 以及二、三维 LDV 的组合导航精度,这为推广 LDV 在车载导航领域的应用提供了有力的数据支撑。

LDV 为高精度的车载导航定位赋能,在军用和民用领域发挥了重要作用。但目前组合导航系统的 SINS 中的惯性测量单元 (IMU) 主要由加速计和激光陀螺或光纤陀螺组成,这两种姿态传感器本身具有较高的测量精度,而 LDV 能否与 MEMS 加速度计以及陀螺仪组成的精度相对较低的 SINS 进行组合导航,同时得到高精度的定位结果,在接下来的工作中值得分析和研究,这对于研制低成本、小型化的车载 LDV/SINS 组合导航模块有着重要的研究意义和价值。

4 展 望

随着 LDV 在车式载体上的成功应用,研究人员

看到了其在导航定位中的巨大潜力和应用价值。LDV 能否用于高速列车、无人机、水下潜航器等运动载体,日益成为关注的焦点,而应用载体的变化对 LDV 提出了新的技术要求,需要进行深入的分析与研究。下面对 LDV 应用载体的拓展进行分析和展望。

4.1 高速测量 LDV

中国高铁的目前运行时速可以达到 400 km/h。真空管道超高速磁悬浮列车理论速度可达 1000~4000 km/h,目前中国、美国、荷兰等国家已开展相关技术研究。支撑高速列车系统运行的众多关键技术中,速度位置服务已显示出其重要性。

目前使用的列车测速方法中按照参考位置的不同分为相对测速定位技术、绝对测速定位技术^[51-53]。但它们存在着或测速精度低、或不适于大规模使用的问题,而卫星测速定位方法容易受到外界干扰,关键时刻不能保证完全可靠^[54],因此急需一种高精度、高实时性、测速范围覆盖全速度域、在强电磁环境下可靠运行的测速定位系统用于高速列车交通系统。

激光多普勒测速仪所具备的非接触测量,测量精度高,动态响应速度快,抗干扰能力强、测速范围大以及可测量多维矢量速度等特点,使其与高速列车交通系统的测速需求非常契合。国外用于高速测量的激光多普勒测速仪如表 2 所示。

表 2 现有高速测量激光多普勒测速仪

Tab.2 Existing LDV for high-speed measurement

Country	Brand	Type	Range/m·s ⁻¹	Precision
USA ^[55]	Artium	LDV/PDI	-600-1 300	±0.1%
USA ^[56]	MSE	miniLDV	-50-600	0.3%
		High-precision LDV	-10-200	0.1%
USA ^[57]	TSI	FSA5800	Max 2 500	-
Germany ^[58]	Elovis	μSPEED-SMART	0.01-80	0.05%
Denmark ^[59]	Dantec dynamics	FlowExliorer LDA	Max 798	-
		FiberFlow LDA	Max 1 331	-

虽然已有的激光多普勒测速仪已经可以进行数马赫的速度测量,但其均采用双光束差动结构,这种结构只能对探测体内的运动表面速度进行测量,无法进行离焦测量。车辆行驶过程中的颠簸将导致信号丢失,因此这种结构不适用于车辆载体的运动速度测

量。而根据第 2 节中的介绍,单光束 LDV 的信号接收不受透镜焦距的限制,可以进行离焦测量,更适用于车辆载体的速度测量。目前车载 LDV 的测速上限为 250 km/h,无法满足高速列车的测速要求。因此,对参考光束型激光多普勒测速仪的测速范围进行扩

展,使其拥有足够的测速上限和测速范围,具有重要的学术意义和应用价值。

4.2 水下 LDV

光波频段在海水中的低损耗窗口为 460~580 nm^[60-61],该范围的蓝绿光在海水中的衰减系数较小、穿透能力较强,可以利用走航式 LDV 对惯导系统进行水下速度校正^[62-64]。相比于声学多普勒计程仪,激光多普勒测速仪具有衰减系数大、发散角小、光速快和隐蔽性强的优点。此外,LDV 所具备的数据更新速率高、比例因子稳定、线性度好、动态响应快等优点使得其在水下导航定位应用中有着巨大的应用潜力,值得深入研究。

4.3 机载 LDV

航空母舰作为一支强大现代海军的标志性舰艇,在我国建设海洋强国以及海军“走向深蓝”的征途中有着不可或缺的地位。海上环境复杂多变,舰载机以及飞行员的飞航安全是航母战斗力的基石,舰载机与舰体之间相对速度的精确测量对于舰载机起降成功至关重要,因此研究更高精度以及实时性好的独立测速手段显得尤为重要;另外,在深空探测领域,航天器需要在行星表面进行着陆,下降过程中持续获取其与天体表面之间的相对速度,对于保障任务顺利完成不可或缺。在前文所述的应用场景中对远距离测速手段的需求迫在眉睫。LDV 作为一种具备高精度、高可靠性的独立测速手段,很好地契合了应用需求。

2017 年,有研究人员对 LDV 在飞行器导航中的应用进行了理论分析^[65],不同于车辆在二维平面上运动,飞行器在三维空间中进行机动,其轨迹有着更大的复杂度和变化率,所以传统的车载 LDV 并不适用在该场景下,提出四光束配置的机载 LDV 用于飞行器的导航。而 LDV 成功用于飞行器的关键在于远距离条件下实现稳定高信号质量的测速,当前的激光多普勒测速仪的工作距离较短,通常局限在 10 m 以内,而飞行器的飞行高度通常在几十米到几百米,甚至上千米,这就对 LDV 的工作距离提出了更高的要求。2022 年,国防科技大学的研究人员通过对 LDV 的出射光学系统进行建模分析和仿真计算,设计了聚焦式的测量光束发射装置,成功将 LDV 的工作距离拓展至 50 m,在测量中保持了较高的信号质量和稳定性,

这种 LDV 基本满足应用在无人机等低空飞行载体上的条件,在机载 LDV 的研制上做出了有益的探索^[66]。

5 结 论

文中对用于运动载体导航定位的 LDV 研究现状进行了系统总结,其中对 LDV 的分类以及在车载导航中的应用现状进行了详细介绍。可以看到,单光束 LDV 比双光束 LDV 更适合车载应用,测量速度维度越高的 LDV 对导航精度提高的效果更明显。通过与惯性器件相组合,LDV 较好地提高了车式载体的定位精度,具有极高的应用价值,对于民生重要工程保障以及部队战斗力提升都有极为重要的意义。但现有的研究中,惯性器件通常为成本较高的激光陀螺、光纤陀螺,在保证精度的前提下,更低成本的 SINS/LDV 组合导航模块是下一步值得研究的方向。同时,随着应用场景的拓展,也对 LDV 的性能提出了更多的要求,需要对现有的 LDV 进行改进和优化,以满足如高速测量、水下测量、机载测量等更为复杂的应用需求。可以预见,随着研究的持续深入,用于运动载体导航定位的 LDV 会变得更为全面和完善,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发挥更大、更重要的作用。

参考文献:

- [1] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] Zhou Jian. Preliminary study on laser doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] Nie Xiaoming. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] Wang Qi. Research on three-dimensional laser Doppler velocimeter and its application in inertial navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] Zhang Zhenxing. Research on train location method in urban rail traffic [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [6] Zhang Yantao, Zhao Hongming, Tan Lilong, et al. Design of SINS/LDV/OD autonomous positioning system based on carrier

- constraint [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(6): 59-65. (in Chinese)
- [7] Penney C. Differential doppler velocity measurements [J]. *Appl Phys Lett*, 1970, 16(4): 167-169.
- [8] Yeh Y, Cummins H. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer [J]. *Appl Phys Lett*, 1964, 176(4): 176-178.
- [9] Zhou J, Nie X, Lin J. A novel laser Doppler velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation [J]. *Opt Laser Technol*, 2014, 64: 319-323.
- [10] Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter based on janus configuration [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(2): 266-271. (in Chinese)
- [11] Wang Qi, Gao Chunfeng, Nie Xiaoming, et al. Calibration method of two-dimensional laser Doppler velocimeter in land integrated navigation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0804004. (in Chinese)
- [12] Wang Qi, Nie Xiaoming, Gao Chunfeng, et al. Calibration of a three-dimensional laser Doppler velocimeter in a land integrated navigation system [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(29): 8566.
- [13] Kurihara N, Terao Y, Nakao S, et al. Development and uncertainty analysis of a laser Doppler velocimeter calibrator for the flow velocity standard [J]. *JSME*, 1999, 65(637): 3029-3034.
- [14] Yeh T, Hall J. An uncertainty analysis of the NIST airspeed standards [C]//ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 2007.
- [15] Strunck V, Pape N, Müller H. Measurement uncertainty of the realisation of velocity for the calibration of LDA with a rotating disk [C]//18h Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 2010.
- [16] Costa F, Ferreira F. Calibration of a laser Doppler anemometer by means of calibration disk [C]//22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013, 2176: 5480.
- [17] Piccato A, Francese C, Malvano R. A portable rotating disk prototype for LDA calibration [J]. *Flow Meas Instrum*, 2014, 38: 54-61.
- [18] 张小跃, 潘建业, 林志立, 等. 一种基于角速率台的单波束激光测速仪标定方法: 中国, 201210208258[P]. 2012-06-19.
- [19] Huang Rong, Nie Xiaoming, Zhou Jian. Laser Doppler velocimeter and its calibration system [J]. *Measurement*, 2019, 134: 286.
- [20] 张小跃, 林志立, 潘建业, 等. 一种基于导航系统的三波束激光测速仪标定方法: 中国, 201210208064[P]. 2012-06-19.
- [21] 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)
- [22] Wang Qi, Gao Chunfeng, Wei Guo, et al. Online calibration technique for LDV in SINS/LDV integrated navigation systems [C]//SPIE, 2017, 10184: 1018415.
- [23] Xi Chongbin, Wang Qi, Nie Xiaoming, et al. Online calibration technology for a one-dimensional laser Doppler velocimeter based on a strapdown inertial navigation system [J]. *Appl Opt*, 2022, 61(5): 1229-1237.
- [24] Xi Chongbin, Huang Rong, Zhou Jian, et al. Quality factor enhancement technology of laser Doppler signal based on liquid lens [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0704003. (in Chinese)
- [25] Nie X, Zhou J. Pitch independent vehicle-based laser Doppler velocimeter[J]. *Opt Laser Eng*, 2020, 131: 106072.
- [26] Mazumder M. Laser Doppler velocity measurement without directional ambiguity by using frequency shifted incident beams [J]. *Appl Phys Lett*, 1970, 16(11): 462-464.
- [27] Maru K, Watanabe K. Non-mechanical scanning laser Doppler velocimetry with sensitivity to direction of transverse velocity component using optical serrodyne frequency shifting [J]. *Opt Commun*, 2014, 319: 80-84.
- [28] Ma Zongfeng. Research on the techniques of all-fiber coherent laser radar for speed measurement [D]. Beijing: Beihang University, 2008. (in Chinese)
- [29] Wei Guo, Wang Yu, Zhou Jian, et al. Vehicle integrated navigation based on laser Doppler velocimeter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(1): 49-53. (in Chinese)
- [30] Zhou Jian, Nie Xiaoming, Lin Jun. A novel laser Doppler velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64: 319-323.
- [31] Gao Chunfeng, Wei Guo, Zhou Jian, et al. Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained navigation [C]//SPIE, 2015, 9525: 95252A.
- [32] Gao Chunfeng, Wei Guo, Long Xingwu. Terrestrial self-contained navigation system based on a novel laser Doppler velocimeter [J]. *Survey Review*, 2017, 49(353): 134-138.
- [33] Gao Chunfeng, Wang Qi, Wei Guo, et al. A highly accurate calibration method for terrestrial laser Doppler velocimeter [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(8): 1994-2003.
- [34] Ying Zhihui, Gao Chunfeng, Wang Qi, et al. Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained land navigation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12):

1204003. (in Chinese)
- [35] Wang Qi, Gao Chunfeng, Wei Guo, et al. Land integrated navigation of laser doppler velocimeter based on janus configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(8): 0828001. (in Chinese)
- [36] Chen Hongjiang, Nie Xiaoming, Wang Mengcheng. Vehicle integrated navigation system based on two dimensional laser Doppler velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1217008. (in Chinese)
- [37] Wang Qi, Gao Chunfeng, Zhou Jian, et al. Two-dimensional laser Doppler velocimeter and its integrated navigation with a strapdown inertial navigation system [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(13): 3334.
- [38] Huang Rong, Wang Qi, Nie Xiaoming, et al. One-dimensional reference-beam LDV for accurate altitude estimation in a land vehicle. *Appl Opt*, 2020, 59(34): 10667-10672.
- [39] Zhu Yingjie, Wang Xingshu, Zheng Jiaying, et al. Using GPS time-differenced carrier phase observations to calibrate LDV/INS integrated navigation systems [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(1): 405-414.
- [40] Du Xueyu, Wang Maosong, Wu Wenqi, et al. High-accuracy autonomous navigation algorithm for long-distance land navigation in GSSS-denied environments [C]//2021 ICUS, 2021: 196-202.
- [41] Zhang Xiaoyue, Lin Zhili, Zhang Chunxi. Autonomous integrated navigation method based on the strapdown inertial navigation system and lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(7): 74112.
- [42] Zhang Xiaoyue, Yin Junjie, Lin Zhili, et al. A positioning and orientation method based on the usage of INS and single-beam lidar [J]. *Optik*, 2015, 126(22): 3376-3381.
- [43] Zhang Xiaoyue, Shi Haitao, Pan Jianye, et al. Integrated navigation method based on inertial navigation system and lidar [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(4): 44102.
- [44] Fu Qiangwen, Liu Yang, Liu Zhenbo, et al. High-accuracy SINS/LDV integration for long-distance land navigation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2952-2962.
- [45] Wang Peng, Zhong Qiyuan, Tan Lilong, et al. Design of SINS/LDV/OD autonomous positioning system based on carrier constraints [J]. *J Phys: Conf Ser*, 2019, 1176: 52057.
- [46] Ouyang Wei, Wu Yuanxi, Chen Hongyue. INS/Odometer land navigation by accurate measurement modeling and multiple-model adaptive estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(1): 245-262.
- [47] Wang Maosong, Wu Wenqi, He Xiaofeng, et al. Consistent ST-EKF for long distance land vehicle navigation based on SINS/OD integration [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(11): 10525-10534.
- [48] Gao Jiaxin, Li Kui, Chen Jiyang. Research on the integrated navigation technology of SINS with couple odometers for land vehicles[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 546.
- [49] Yan Ming, Wang Zengcai, Zhang Jie. Online calibration of installation errors of SINS/OD integrated navigation system based on improved NHC [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 12602-12612.
- [50] Zhao Hongsong, Miao Lingjuan, Shao Haijun. Adaptive two-stage Kalman filter for SINS/Odometer integrated navigation systems [J]. *Journal of Navigation*, 2016, 1(2): 1-20.
- [51] Huang Susu. Combined speed and position detection of medium and low speed maglev train based on steel sleepers [J]. *Urban Mass Transit*, 2018, 21(11): 78-80. (in Chinese)
- [52] Zhang D, Long Z, Xue S, et al. Optimal design of the absolute positioning sensor for a high-speed maglev train and research on its fault diagnosis [J]. *Sensors*, 2012, 12(8): 10621-10638.
- [53] Chen Xin. Research on the position and speed measurement system based on light source coding for ultra high-speed flying train [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [54] Gu Cheng, Wang Shuai, Shen Shixiu. Theoretical research on combined speed measurement and positioning of maglev train based on GNSS and INS [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(11): 2756-2766. (in Chinese)
- [55] LAVISION. Echniques [EB/OL]. [2023-02-24]. <http://www.lavision.de/en/techniques/ldv-pdi/index.php>.
- [56] MSE. How-an-ldv-lda-works [EB/OL]. [2023-02-24]. <http://measurementsci.com/how-an-ldv-lda-works/>.
- [57] TSI. FSA Signal Processors for Laser Doppler (LDV) measurements FSA4800/5800-X [EB/OL]. [2023-02-24]. [https://tsi.com/product-components/fsa-signal-processors-for-laser-doppler-\(ldv\)-measurements-fsa4800-5800-x/](https://tsi.com/product-components/fsa-signal-processors-for-laser-doppler-(ldv)-measurements-fsa4800-5800-x/).
- [58] Elovis. μ speed-smart [EB/OL]. [2023-02-24]. <https://www.elovis.com/en/products/laser-encoder-length-measurement-and-speed-measurement-systems/%c2%b5 speed-smart/>.
- [59] Dantec Dynamics. Measurement-principles-of-lda [EB/OL]. [2023-02-24]. <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda/measurement-principles-of-lda/>.
- [60] Reghunath A, Venkataraman V, Suvishamuthu D, et al. The origin of blue-green window and the propagation of radiation in ocean waters [J]. *Defence Science Journal*, 1991, 41(1): 1-20.

- [61] Duntley S. Light in the Sea [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1963, 53(2): 214-233.
- [62] Mcewen R, Thomas H, Weber D, et al. Performance of an AUV navigation system at Arctic latitudes [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(2): 443-454.
- [63] Miller P, Farrell J, Zhao Y, et al. Autonomous underwater vehicle navigation [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(3): 663-678.
- [64] Dinc M, Hajiyeve C. Integration of navigation systems for autonomous underwater vehicle [J]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2015, 14(1): 32-43.
- [65] Li Jing, Zeng Lingdong, Yuan Shengzhi, et al. Research on the application of laser Doppler velocimeter in aircraft navigation [J]. *Applied Laser*, 2017, 37(6): 870-880. (in Chinese)
- [66] Chen Lanjian, Zhou Jian, Nie Xiaoming, et al. Measurement range expansion of single-beam laser Doppler velocimeter based on a focusing transmitter [J]. *Optik*, 2023, 272: 170383.

Review of laser Doppler velocimeter technology for navigation and localization

Chen Lanjian^{1,2}, Xi Chongbin^{1,2}, Zhou Jian^{1,2*}, Nie Xiaoming^{1,2},
Wang Qi^{1,2}, Huang Rong^{1,2}, Xiang Zhiyi^{1,2}, Jin Shilong^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 401173, China;

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

Abstract:

Significance The technology known as the laser Doppler velocimeter (LDV) has gained widespread application in both scientific research and industrial production, following years of development. This technology offers an independent means of measuring velocity, which is especially useful for the navigation and localization of vehicles. Compared to traditional velocity measuring methods such as odometers, accelerometers, and global navigation satellite systems (GNSS), LDVs have high accuracy and reliability even in all-day, all-weather conditions. These features satisfy the requirement for precise navigation and localization, thus getting the focus of attention of the researchers in this field. In order to anticipate future progress, it is essential to review the current research.

Progress The frequency shift of the Doppler effect in the probe beam of LDVs depends on the velocity of the vehicle which is based on the optical Doppler effect. When LDVs are installed on vehicles, the angle between the probe beam and the road surface remains constant. By measuring the frequency shift, it is possible to determine the velocity of the vehicles with accuracy.

LDVs can be classified into two types based on their optical structure of dual-beam and single-beam. For the dual-beam type, two probe beams intersect each other, and the point of intersection is referred to as the control volume. When traveling over a bumpy road, dual-beam LDVs often lose the signal due to the limited depth of the control volume. The researcher has proposed a multipoint layer-type LDV to address the limitations of dual-beam LDVs. This type of LDV consists of multiple dual-beam probes that are distributed in the vertical direction. Each probe's small depth of field is combined to form a larger depth of field. For the single-beam type, there is only one beam containing the Doppler frequency shift during the measurement, which is different from the dual-beam LDV. The reflected light of the probe beam is transmitted back to the detector after illuminating the uneven road surface and is mixed with the reference beam without any Doppler frequency shift. The single-beam LDV has a broad depth of field, ensuring accurate and stable measurements. It is particularly suitable for use in ground vehicles compared

to the dual-beam LDV. Improvements have been made for single-beam LDV to enhance its performance. The reuse-type single-beam LDV utilizes part of the reference beam power to illuminate the road surface, which would otherwise be wasted by an attenuator in the traditional single-beam LDV. The Janus configuration single-beam LDV eliminates the effect of vertical velocity on the velocity parallel to the direction of the vehicle's heading when ground vehicles experience vertical jolts. The speed component in the direction of the vehicle's heading cannot accurately reflect the actual state of a moving vehicle, as there are two components in the vertical and lateral directions. To deal with this, two-dimension (2D) and three-dimension (3D) LDVs are investigated by researchers. There are two probes in 2D LDV and four probes in 3D LDV. Each probe in these two multi-dimensional LDVs can be either dual-beam or single-beam type.

For years, researchers have been investigating the use of LDVs in the navigation and localization of ground vehicles. By integrating LDVs with inertial measurement units (IMUs), ground vehicles can achieve significantly improved localization and navigation precision. In particular, the highly accurate velocity data provided by LDVs can effectively suppress the measurement divergence of IMUs. As a result, the accuracy of dead reckoning has already reached an impressive 0.01%. However, to fully explore the potential of LDV technology for new applications such as high-speed trains, underwater vehicles, and aerial vehicles, further research is necessary. This will require optimization of LDV technology in terms of optical design, circuit design, and system architecture.

Conclusions and Prospects This paper reviews the current research on LDVs for the navigation and localization of ground vehicles. It demonstrates the process of development and concludes that LDV plays a significant role in achieving precise navigation and localization of vehicles. Additionally, the paper provides an outlook on the development trend of LDV and its potential applications for high-speed trains, underwater vehicles, and aerial vehicles. The perspectives provided here can serve as a guide for future LDV research.

Key words: optical measurement; laser Doppler velocimeter; navigation and localization; moving vehicles

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