

## 无人机机载激光多普勒测速仪研究与飞行验证

陈兰剑<sup>1,2</sup>, 席崇宾<sup>1,2</sup>, 周健<sup>1,2\*</sup>, 聂晓明<sup>1,2</sup>, 金世龙<sup>1,2</sup>, 罗晖<sup>1,2</sup><sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;<sup>2</sup>国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073

**摘要** 无人机(UAV)通常利用全球导航定位系统(GNSS)提供的速度、位置等信息来保障其飞行安全,但GNSS的信号在复杂的城市环境中容易因高楼、树木遮挡等原因丢失,而机载激光多普勒测速仪(LDV)有望实现UAV的全天时独立高精度速度测量,从而保证导航信息的连续性。从目前实现机载LDV研制存在的瓶颈出发,通过理论分析和仿真计算,提出利用光学变换系统对机载LDV的工作距离进行拓展的方案;并对变换系统的参数进行了优化,集成了工作距离定标为50 m、测量景深为10 m的单波束机载LDV样机,将其搭载在UAV上进行了110 s的飞行实验。实验测得的UAV飞行速度经过俯仰角修正后,与GNSS记录的参照速度基本一致。飞行过程中样机输出的速度信号保持了较高的多普勒信号品质因子,初步验证了机载LDV的可行性和有效性,为后续机载LDV在UAV组合导航中的应用奠定了基础。

**关键词** 光学测量; 激光多普勒测速仪; 测速导航; 无人机

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230897

## 1 引言

激光多普勒测速仪(LDV)作为一种新型的高精度速度传感器,自诞生以来在测量流体的流场分布、固体的运动速度等方面发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。LDV所具备的非接触测量、不易受外界干扰等特性,克服了里程计、全球导航定位系统(GNSS)等传统车载速度传感手段的弊端<sup>[2]</sup>,在车辆自主导航中的速度测量方面展现出巨大的应用前景。经过十几年的发展,车载LDV已成为高精度车辆自主导航中不可或缺的传感器<sup>[2-5]</sup>。

无人机(UAV)作为一种灵巧、机动性强的低空飞行工作平台,被广泛应用于城市环境下的测绘、治安巡逻、环境监测和高层救火等场景<sup>[6]</sup>。为了安全可靠地完成工作任务,UAV通常利用GNSS和微机电系统(MEMS)捷联惯导系统(SINS)组合导航进行速度和位置的获取以及飞行轨迹的计算。不同于开阔地域,城市环境较为复杂,高楼以及树木的遮挡会导致GNSS信号丢失<sup>[7]</sup>。而且MEMS惯组的误差会随时间发散,无法长时间实时获取UAV准确的速度信息和位置信息,影响其飞航安全,甚至威胁到地面行人和车辆的安全。在GNSS的失效时间内,利用机载LDV对UAV的速度进行测量,通过对机载LDV与SINS进行组合导航,即可推算获得UAV的位置,从而有效地保障GNSS失效期间的UAV飞行安全。然而,目前鲜

有对机载LDV研制和实验的报道。与车载LDV相比,机载LDV首先需要突破的就是工作距离的限制。城市中的UAV通常工作在几十米的空中,而目前车载LDV的工作距离通常在m量级,这显然无法满足机载应用的需求。

本文搭建了单波束的机载LDV样机并将其搭载在UAV上进行了飞行实验。首先,对系统多普勒信号载噪比(CNR)的影响因素进行了理论分析,确定了利用光学变换系统对机载LDV的工作距离进行拓展的方案;然后,对变换后的测量光束束腰大小和位置与光学变换系统参数之间的关系进行了仿真计算,根据仿真中的参数设计搭建了单波束机载LDV样机,其中,测量光束的束腰定标在距离出射口50 m的位置;最后,将其搭载至UAV进行了飞行实验。实验结果验证了基于光学变换系统的机载LDV的可行性,为机载LDV的发展奠定了基础。

## 2 基本原理(实验仿真)

### 2.1 LDV CNR分析

机载LDV的工作距离增大不可避免地带来了光束能量衰减等影响,会使速度测量时多普勒信号的CNR过低,被判定为无效信号,进而导致速度信号丢失。由于机载LDV同属相干探测系统,可以参考相干激光多普勒测风雷达的CNR公式对影响LDV多普勒

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-07-19; 录用日期: 2023-07-22; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ30782)

通信作者: \*wttzhoujian@163.com

信号 CNR 的因素进行分析。假设以目标平面为原点,正向从发射平面到目标平面和反向从探测器平面到目标平面两个过程是共轭的,选择目标平面为中介,进行

单次积分即可简化计算系统的 CNR,这种方法叫作后向传播本振(BPLO)法。假设散射目标体积为  $V(x, y, z)$ ,  $CNR(R_{CN})^{[8]}$  表示为

$$R_{CN} = \frac{\eta}{h\nu BF_h} \lambda^2 \int_0^\infty P \left( t - \frac{2z}{c} \right) T^2(z) dz \iint \beta(x, y, z) I_{np}(x, y, z) I_{nb}(x, y, z) dx dy, \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为 LDV 的光学效率;  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  和  $\lambda$  分别为激光的频率和波长;  $t$  为测量光束在空气中传播的时间;  $c$  为光速;  $F_h$  和  $B$  分别为探测器的噪声系数和噪声等效带宽;  $P$  为测量光束的功率;  $T$  为测量光束发射单程的透过率;  $\beta$  为散射函数;  $I_{np}$  和  $I_{nb}$  表示测量光束和 BPLO 光束在目标面上功率归一化的辐照度。不同于相干激光多普勒测风雷达来自于气溶胶等软

目标的回波信号, LDV 通常利用地面等硬目标散射产生的回波信号进行速度解算,故散射函数  $\beta$  可表示为

$$\beta(x, y, z) = \delta(z - L) \rho(x, y), \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为冲激函数;  $L$  为光束束腰距离出射口的距离;  $\rho$  为硬目标散射面上的散射强度。将式(2)代入式(1)可得到:

$$R_{CN} = \frac{\eta}{h\nu BF_h} \lambda^2 P \left( t - \frac{2L}{c} \right) T^2(L) \iint \rho(x, y) I_{np}(x, y) I_{nb}(x, y) dx dy. \quad (3)$$

根据辐照度的定义可以得到  $I_{np}$  和  $I_{nb}$  的表达式:

$$I_{np}(x, y) = I_{nb}(x, y) = \frac{1}{S}, \quad (4)$$

$$S = \pi r^2, \quad (5)$$

式中:  $S$  为目标面上测量光束(高斯光束)光斑横截面的面积;  $r$  为高斯光束横截面上光强下降至中心光强  $e^{-2}$  的光斑半径。在目标面上, BPLO 光束和测量光束是重合的。假设硬目标散射强度  $\rho$  为一常数,将式(4)、(5)代入式(3)可得:

$$R_{CN} = \frac{\eta}{h\nu BF_h} \lambda^2 P \left( t - \frac{2L}{c} \right) T^2(L) \frac{\rho}{r^2}. \quad (6)$$

对于同一台 LDV, 其速度测量信号的 CNR 与测量光束在目标距离处的光斑半径的平方成反比,故可以通过控制目标距离处的光束半径大小来改善 LDV 远距离速度测量信号的 CNR。图 1 展示了归一化的系统测量的 CNR 与固定目标处光束半径大小的关系,目标处的探测光束半径越小,系统测量的 CNR 越高。

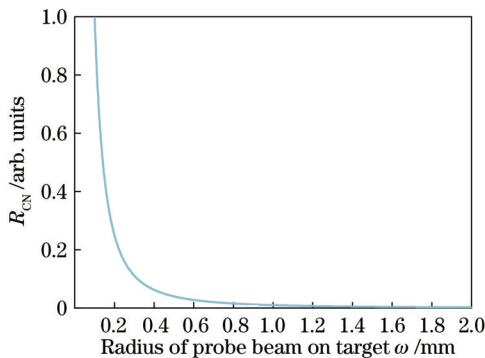


图 1 系统测量的 CNR 与目标距离处的光束半径大小的关系  
Fig. 1 Relationship between CNR measured by the system and the radius of probe beam on the target

## 2.2 光束变换原理

对于高斯光束而言,传播光轴上光束横截面的最小半径对应于其束腰位置,若能控制测量光束的束腰在目标距离处,根据式(6)即可实现最高 CNR 的测量效果。图 2 为高斯光束经过光学变换系统的示意图,其中:  $\omega_0$  为入射高斯光束束腰的半径大小; lens 1 是焦距为  $f_1$  的凹透镜, lens 2 是焦距为  $f_2$  的凸透镜;  $\Delta$  为两透镜焦点之间的离焦量;  $d_{12}$  为两透镜之间的距离;  $L_0$  为入射高斯光束束腰与 lens 1 前表面的距离。

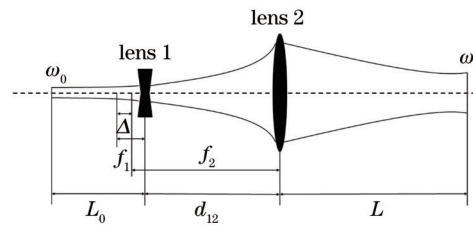


图 2 光学变换系统结构

Fig. 2 Structure of optical transformation system

经变换后,高斯光束束腰半径大小  $\omega$  和位置  $L$  (距出射口的距离)<sup>[9]</sup> 可表示为

$$\omega = \sqrt{f_2^2 \frac{(f_1 \omega_0)^2}{(L_0 - f_1)^2 + Z_0^2} / \left\{ \Delta^2 + \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{f_1^2 \omega_0^2}{(L_0 - f_1)^2 + Z_0^2} \right) \right]^2 \right\}}, \quad (7)$$

$$L = f_2 + \frac{\Delta f_2^2}{\Delta^2 + \left[ \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{f_1^2 \omega_0^2}{(L_0 - f_1)^2 + Z_0^2} \right) \right]^2}, \quad (8)$$

$$Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}, \quad (9)$$

式中： $\lambda$ 为入射激光波长； $Z_0$ 为与高斯光束束腰相关的瑞利参数。由式(7)~(9)可知，对于同一光学变换系统，当入射高斯光束的 $\omega_0$ 和 $L_0$ 确定后，调节离焦量 $\Delta$ 即可将高斯光束束腰变换至目标距离处，束腰半径大小也随之确定。因此，对变换系统中镜组的参数进行选择和设计，可以令测量光束束腰以合适的大小变换到目标工作距离处，从而达到提升LDV测量的CNR的目的。

### 3 仿真与实验

#### 3.1 仿真分析

根据理论推导，在工作距离固定的条件下，LDV测量光束经光学系统变换后，测量时CNR的高低可以用工作距离处的束腰半径大小来衡量。利用式(8)、(9)可以对满足束腰变换要求的组合镜组参数进行反推，具体过程为：当入射高斯光束的束腰大小 $\omega_0$ 和入射距离 $L_0$ 确定后，将根据LDV测量确定的目标工作距离 $L$ 和该距离处对应的变换后的束腰半径大小 $\omega$ 代入公式(8)、(9)，以 $f_1$ 和 $\Delta$ 为自变量，分别解出满足 $L$ 和 $\omega$ 取值的两个 $f_2$ 集合；将两个集合绘制在坐标系中可以得到两个空间曲面，两个曲面的交线上的点 $(\Delta, f_1, f_2)$ 就是同时满足目标工作距离 $L$ 和对应的束腰半径 $\omega$ 以及完成该变换效果对应的镜组离焦量 $\Delta$ 的镜组参数组合。

根据上述思路，前期课题组对机载LDV的结构进行了探索，设计的系统参数如表1所示，代入式(7)~(9)进行仿真计算，结果如图3所示。当离焦量 $\Delta=7.28$  mm时，测量光束的束腰位置位于 $L=50$  m处，束腰半径 $\omega=0.15$  mm。但这组设计存在以下两个问题：一是短焦距凹透镜很难被加工成大口径。如实验中用的焦距 $f_1=-4$  mm的凹透镜的口径只有4 mm，有限的口径容易对光束形成截断，导致能量的损耗；同时，凹透镜的焦距越小发散角越大，因此，需要lens 2的口径足够大，此处所用的 $f_2=600$  mm的定制凸透镜的直径为600 mm，体积非常庞大<sup>[9]</sup>。二是当离焦量

$\Delta=7.28$  mm时，整个光学变换系统的长度在663 mm左右，较长的光路长度也不利于样机的小型化集成。

表1 光学变换系统参数<sup>[9]</sup>

System parameter	Value
$\omega_0$ /mm	0.03
$L_0$ /mm	60
$f_1$ /mm	-4
$f_2$ /mm	600
$\lambda$ /nm	532

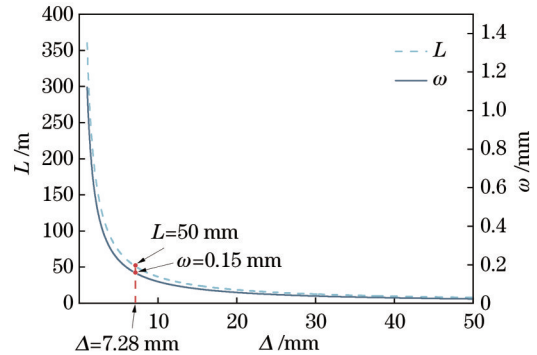


图3 使用表1中参数的光学变换系统的仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of optical transformation system using the parameters in Table 1

可以看到，优化lens 1凹透镜的参数对于后续的样机集成起到关键作用。将 $L_0$ 、 $f_2$ 和 $\Delta$ 固定，针对变换后束腰的位置 $L$ 和大小 $\omega$ 与入射光束束腰大小 $\omega_0$ 以及凹透镜焦距 $f_1$ 之间的关系进行仿真研究。仿真中使用的参数如表2所示，结果绘制在图4(a)、(b)中。可以发现，在图4(a)虚线方框圈中的区域中，当 $L_0$ 、 $f_2$ 和 $\Delta$ 固定时，变换后束腰的位置 $L$ 与 $\omega_0$ 和 $f_1$ 的变化无关，将这一区域对应到图4(b)中得出，使用较大束腰半径的入射光束配合焦距较长的凹透镜可以变换出小的束腰。这对实验有着重要的指导意义，因为焦距绝对值大的凹透镜更容易被加工成大口径，同时光束通过之后其发散角更小，克服了前述短焦距凹透镜带来的问

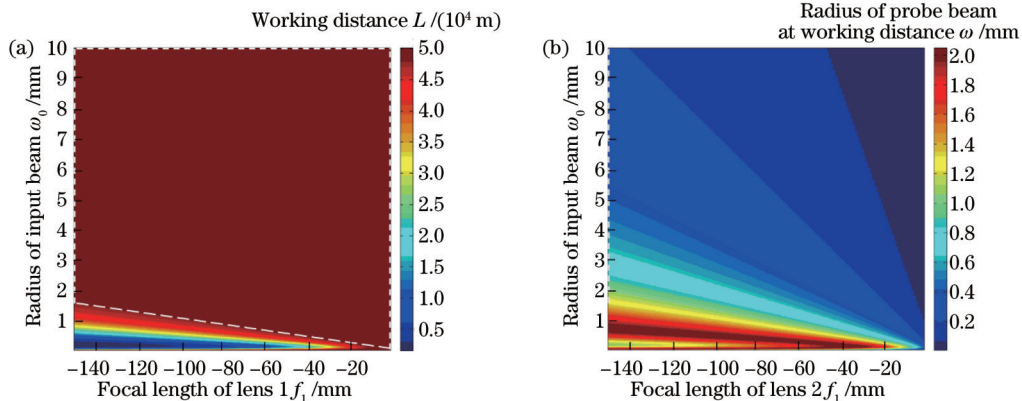


图4 当 $L_0$ 、 $f_2$ 和 $\Delta$ 固定时， $L$ 和 $\omega$ 的变化情况。(a)  $L$ 随 $\omega_0$ 和 $f_1$ 变化的情况；(b)  $\omega$ 随 $\omega_0$ 和 $f_1$ 变化的情况

Fig. 4 When the  $L_0$ ,  $f_2$  and  $\Delta$  is fixed, the variation of  $L$  and  $\omega$ . (a) Relationship among  $L$ ,  $\omega_0$  and  $f_1$ ; (b) relationship among  $\omega$ ,  $\omega_0$  and  $f_1$

题。另外使用大焦距凹透镜有利于缩短两透镜之间的距离  $d_{12}$ , 便于系统的小型化集成。

表 2 仿真中所使用的参数  
Table 2 Parameters for the simulation

Parameter in simulations	Value
$\omega_0$ /mm	[0.01, 10]
$L_0$ /mm	60
$f_1$ /mm	[-150, -4]
$f_2$ /mm	600
$\Delta$ /mm	7.28
$\lambda$ /nm	532

以表 3 中的光学变换系统设计参数进行仿真计算, 结果如图 5 所示。当测量光束的束腰位置位于  $L=50$  mm 处时, 束腰半径  $\omega=0.13$  mm, 比前述光学变换系统得到的变换效果更佳, 理论上能在同样的变换距离处实现更高 CNR 的测量效果。入射高斯光束束腰与凹透镜之间的距离为 0, 凹透镜的焦距  $f_1=-100$  mm, 整个光学变换系统的长度缩短至 507 mm 左右, 整个系统结构更为紧凑。综上所述, 在光学变换系统中, 可使用大束腰半径光束以及大焦距值凹透镜的方案对系统结构进行优化, 在保持工作距离不变的同时, 实现更好的束腰变换效果。

### 3.2 实验验证

为了验证光学变换系统参数设计的合理性, 在实

表 3 设计的光学变换系统参数

Table 3 Parameters for designed optical transformation system

System parameter	Value
$\omega_0$ /mm	10
$L_0$ /mm	0
$f_1$ /mm	-100
$f_2$ /mm	600
$\Delta$ /mm	7.28
$\lambda$ /nm	532

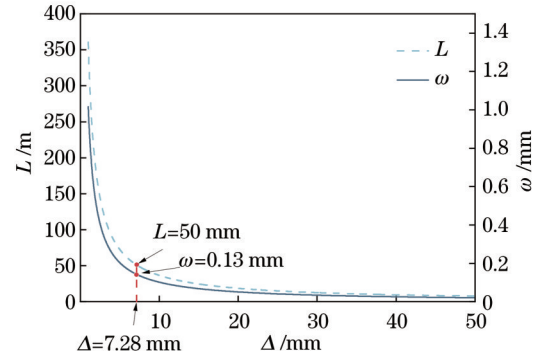


图 5 使用表 3 中参数的光学变换系统仿真结果。(a)  $L$  与  $\Delta$  的关系; (b)  $\omega$  与  $\Delta$  的关系

Fig. 5 Simulation results of optical transformation system using the parameters in Table 3. (a) Relationship between  $L$  and  $\Delta$ ; (b) relationship between  $\omega$  and  $\Delta$

验室搭建了两套参数不同的 LDV 实验系统, 如图 6 所

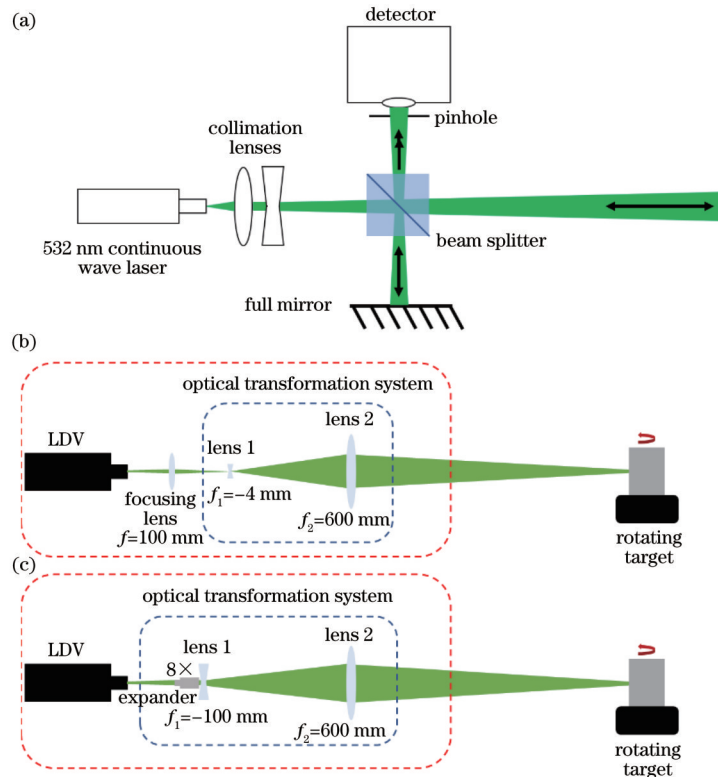


图 6 LDV 实验系统。(a) LDV 内部结构; (b) 使用表 1 中参数的实验系统; (c) 使用表 3 中参数的实验系统

Fig. 6 Experimental system of LDV. (a) Structure of LDV probe; (b) experimental system using the parameters in Table 2; (c) experimental system using the parameters in Table 3

示。LDV 内部结构如图 6(a)所示,其中参数如表 4 所示。LDV 内部使用了功率为 100 mW 的激光器(功率的提高也有利于提升测量信号的 CNR)。激光经过准直透镜组后被分束比为 98:1 的分束棱镜分为两束光,功率较低的一束被全反镜反射后再经过棱镜到达探测器表面作为参考光,另一束作为测量光束经过后续的光学变换系统照射到目标表面。散射光原路返回到达探测器表面,与前述参考光混合形成拍频信号,探测器响应后对拍频信号进行处理,从中提取多普勒频率信息。

表 4 图 6(a)中 LDV 的参数  
Table 4 Parameters for LDV in Fig. 6(a)

Output power of probe beam /mW	Laser wavelength / nm	Splitting ratio
100	532	98:1

图 6(b)、(c)中两套光学变换系统的参数设置与表 1、3 的仿真参数相对应。具体来看,图 6(b)中 LDV 的测量光束在经过变换系统前,先用焦距  $f=100$  mm 的凸透镜进行会聚,聚焦后光束束腰半径  $\omega_0=0.06$  mm;针对图 6(c)中的大束腰半径光束入射情况,先用扩束比为 8× 的准直扩束器对 LDV 测量光束进行扩束处理,光束被扩大至束腰半径  $\omega_0=10$  mm 并准直输出,再通过光学变换系统进行光学变换。

在 LDV 的研究中,通常使用多普勒信号品质因子(Q)来表征速度信号的有效性<sup>[10]</sup>,其定义为:当测量光束打在静止的物体上(或安装 LDV 的运动载体不动)时,对一段连续时间内探测器记录的电信号进行快速傅里叶变换(FFT)处理,对得到的频谱进行平均和归一化操作,将其记录为 LDV 的测量噪声基底;当测量光束照射的静止物体开始运动(或安装 LDV 的运动载体开始机动)时,经 FFT 算法处理得到的频谱上会出现明显的尖峰,尖峰所对应的频率即为与运动速度相关的多普勒频率,将多普勒频率尖峰的频谱强度值除以噪声基底的平均频谱强度值,即得到此速度信号的多普勒信号品质因子 Q。Q 的计算方法可以表示为

$$Q = P_{\text{Doppler}} / \left( \sum_i^N p_i / N \right), \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{Doppler}}$  对应于多普勒频率尖峰的频谱强度值;  $p_i$  为噪声基底中各频率值对应的频谱强度值;  $N$  为频谱上的频率点数。从多普勒信号品质因子的定义可以看出, Q 是一种可以直观表征测量信号 CNR 的参量,在实际应用中可以代表系统 CNR 的高低。因此在实验中,使用多普勒信号品质因子来表示测量信号的质量。

根据 UAV 工作时的一般飞行高度情况,将两套系统出射的测量光束束腰定标为离出射口 50 m 的位置,定标方法为:将转台放置于距离出射口 50 m 的位置,将经过光学变换系统后的 LDV 测量光束照射至转台表面,然后通过移动凸透镜镜架的位置,达到改变离

焦量  $\Delta$  的效果,进而实现缩放转台表面上光斑大小的目的;调整过程中,保持柱体一直旋转以及光斑位置稳定,观察多普勒信号品质因子 Q 的变化,当 Q 达到最高时,则 LDV 测量光束的束腰在转台表面上。定标完成后,利用两套系统对距离出射口 50 m 距离处的旋转速度源进行测量,为了模拟实际应用中的情景,旋转速度源使用了混凝土圆柱体。对测量中的速度曲线和对应品质因子进行记录,结果如图 7 所示,每组测量持续时间为 60 s。图 7(a)、(b)和(c)、(d)分别对应于图 6(b)、(c)系统的测量结果,从记录的多普勒信号品质因子来看,图 6(c)中的方案测量效果明显优于图 6(b),前者多普勒信号品质因子平均值为 3685,而后者品质因子平均值为 1789。

另外,利用光斑分析仪对两套系统在工作距离为 50 m 的光束横截面上光强下降至中心光强  $e^{-2}$  时的光斑大小进行测量,结果如图 8 所示。图 6(c)系统变换得到的光斑直径要比图 6(b)变换得到的小,但都比理论计算得到的束腰大,这是受到了镜组中球差的影响。综上所述,多普勒信号品质因子和光斑大小的测量结果都证明了仿真计算的准确性。

### 3.3 样机组装和飞行实验

为进行 UAV 机载飞行实验,对图 6(c)中的系统进行了样机集成,样机的整体结构是利用 4 根铝合金柱作为骨架的笼式结构,从而保证了系统光学元件的同轴性。如图 9 所示,从右到左分别为出射口支架、凸透镜镜架、凹透镜镜架和扩束镜镜架,最左侧的两层结构中,下层安装了激光器和探测器,上层集成了机载电脑、信号处理系统、MEMS 姿态传感器以及差分全球定位系统(GPS)接收器。在整体封装之前,对样机的工作距离(50 m)进行定标,然后使用卡扣对各镜架进行限位,防止其在实验中发生位移,影响定标效果。最后对样机的工作景深进行了测量,将旋转混凝土圆柱体在光束束腰前后各移动 5 m,对应于  $L=45$  m 和  $L=55$  m 两个位置,记录两个位置处测得的多普勒信号品质因子并取平均值,结果如图 10 所示。可以看到,在束腰附近长度为 10 m 的景深内,测量结果都保持了较高的品质因子。

UAV 在飞行过程中,姿态一直在发生变化,这就导致测量光束与地面的夹角也会实时地发生改变。为准确解算速度,样机中集成了姿态传感器(HWT6052-485MEMS)用于探测敏感 UAV 的姿态变化。如图 11 所示,XYZ 为姿态传感器的三个敏感轴,XY 轴的角度测量精度为  $0.01^\circ$ ,分别对应于机体的俯仰角和横滚角。另外,LDV 中还集成了差分 GPS 接收器,将其记录的速度数据用于对照,来判断 LDV 测速结果的有效性。LDV 输出的速度信号、MEMS 姿态传感器和 GPS 的数据都用机载电脑进行采集和记录。机载电脑和地面控制电脑通过无线路由器进行通信,可实时监测测量的速度数据和品质因子数值以及其他传感器

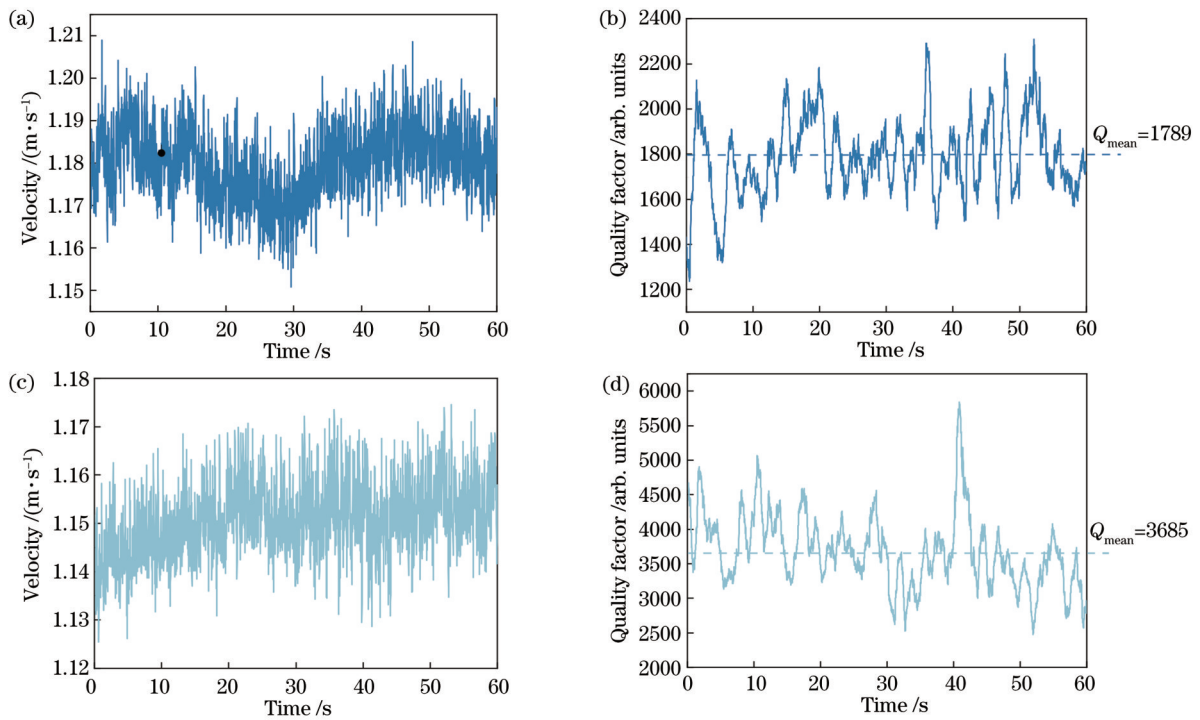


图 7 不同参数系统测得的速度与多普勒信号品质因子曲线。(a)图 6(b)系统测得的速度曲线;(b)图 6(b)系统测得的品质因子曲线;(c)图 6(c)系统测得的速度曲线;(d)图 6(c)系统测得的品质因子曲线

Fig. 7 Measured velocity and Doppler signal quality factor curves of systems with different parameters. (a) Velocity measured by system in Fig. 6(b); (b) quality factor measured by system in Fig. 6(b); (c) velocity measured by system in Fig. 6(c); (d) quality factor measured by system in Fig. 6(c)

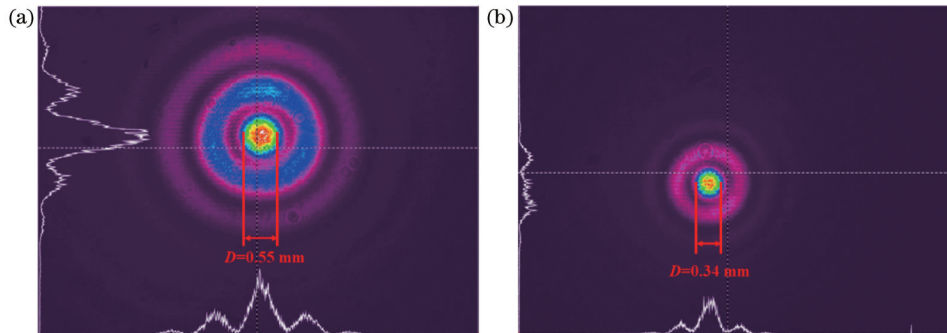


图 8 不同系统工作距离 50 m 处的光斑直径  $D$  的大小。(a)图 6(b)中系统;(b)图 6(c)中系统

Fig. 8 Spot diameter ( $D$ ) at the working distance of 50 m for different systems. (a) System in Fig. 6(b); (b) system in Fig. 6(c)

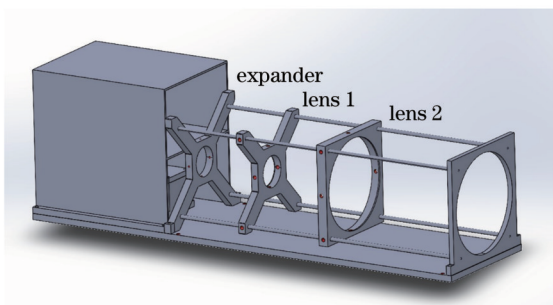


图 9 样机结构示意图

Fig. 9 Structure of LDV prototype

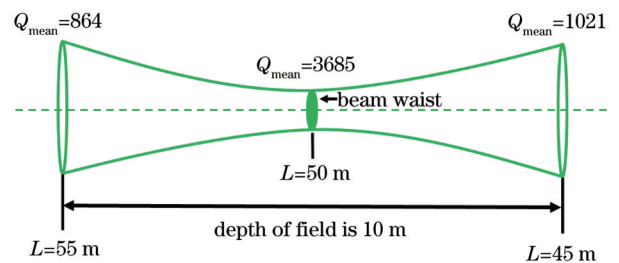


图 10 样机景深示意图

Fig. 10 Depth of field of LDV

的输出。样机挂载到 UAV 上的效果如图 12 所示,飞行平台使用的是电驱动六旋翼 UAV,该 UAV 的最大

载荷为 20 kg。样机挂载到 UAV 上时,LDV 底板通过 4 个转接器与 UAV 下的水平支撑杆相固定,同时在 LDV 的出射口处安装了夹角为  $60^\circ$  的反射镜,用于将

测量光束反射至地面上,利用地面的散射回波解算获取速度信息。

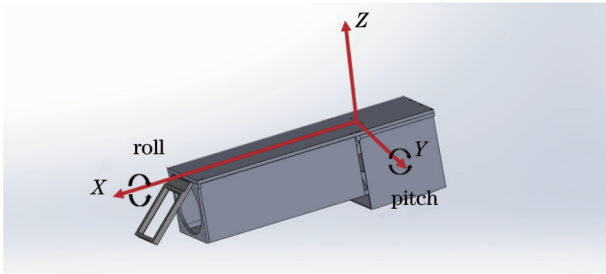


图 11 姿态传感器在 LDV 上的安装示意图

Fig. 11 Diagram of the installation of attitude sensor on LDV

假设 UAV 在飞行机动过程中的飞行方向始终沿着机头方向朝前,在空中转弯机动的半径较大(横滚角的影响可以忽略),在这种情况下,可仅考虑俯仰角对测量光束与地面之间夹角的影响。图 13 展示了 UAV 在空中悬停和机头向前飞行两种状态。

俯仰角修正后 LDV 输出的速度表示为

$$v = \frac{\lambda f_D}{2 \cos(\alpha + \beta)}, \quad (11)$$

式中:  $v$  为解算输出的速度;  $f_D$  为多普勒频移值;  $\alpha = 60^\circ$  为 UAV 悬停时光束与地面的夹角;  $\beta$  为 UAV 的俯仰角,由 MEMS 姿态传感器进行测量。

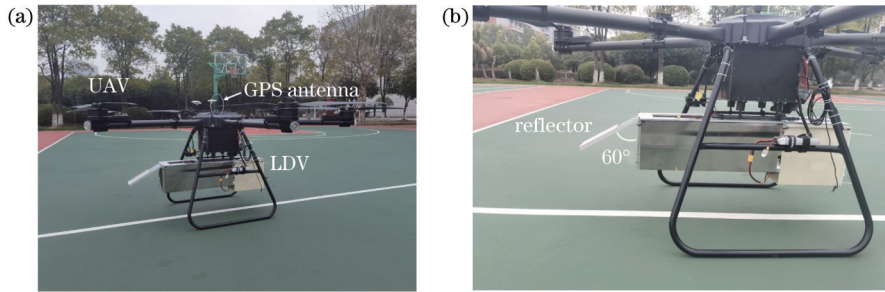


图 12 外场实验照片。(a)LDV 在 UAV 上的挂载示意图;(b)反射镜

Fig. 12 Pictures of field campaign. (a)Diagram of airborne LDV; (b) reflector

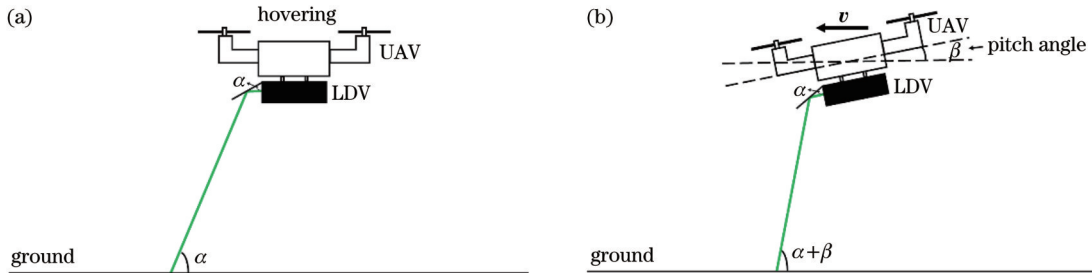


图 13 UAV 的飞行状态。(a)悬停;(b)向前飞行

Fig. 13 Statures of UAV. (a) Hovering; (b) moving forward

实验时 UAV 起飞后,控制其先爬升到一定高度后悬停,调整好姿态后,在保持高度稳定的前提下飞行。因为测量光束经过了夹角为  $60^\circ$  的反射镜后再照射到地面上,而光束的束腰定标在距离出射口 50 m 的位置,所以 UAV 保持在高度约为 46 m 飞行时,测量光束定标的束腰处在地面附近。长度为 10 m 的工作景深可以确保测量信号的有效性,避免 UAV 在飞行中可能出现的起伏导致的信号丢失。飞行过程中 UAV 的速度方向始终沿着机头,与 LDV 测量光束保持在一个平面内。图 14 是飞行高度稳定、持续时间在 110 s 左右的飞行实验结果。图 14(a)为 MEMS 姿态传感器记录的飞行过程中俯仰角相较悬停时的变化值,可以看到,在飞行过程中,机体俯仰角的变化量大部分时间稳定在  $4^\circ$  以内,最大的变化值可达到  $6^\circ$ 。图 14(b)中的点虚线和实线曲线分别对应机身俯仰角变化补偿前后

LDV 记录的速度数据,可以看到,经过角度补偿后,LDV 的速度曲线与飞行过程中 GPS 记录的速度曲线(虚线)趋势基本吻合,说明了机载 LDV 样机测速的有效性。从图 14(c)中可以看出,飞行过程中 UAV 的高度保持在 45.5~47.5 m 之间,这保证了测量光束定标的束腰处在地面附近。同时还可以看到,图 14(a)中俯仰角发生较大变化的时刻与图 14(c)中 UAV 高度的变化时刻(爬升或下降)基本是对应的。从图 14(d)中的品质因子曲线可以看出,整个飞行过程中,LDV 的测量都保持了较高的品质因子,平均数值保持在 1000 左右,个别时刻可以达到接近 60000 的水平。这是因为地面上存在散射率较高的表面,所以会出现远高于定标时测到的数值。较高水平的品质因子也说明了速度信息测量的有效性。

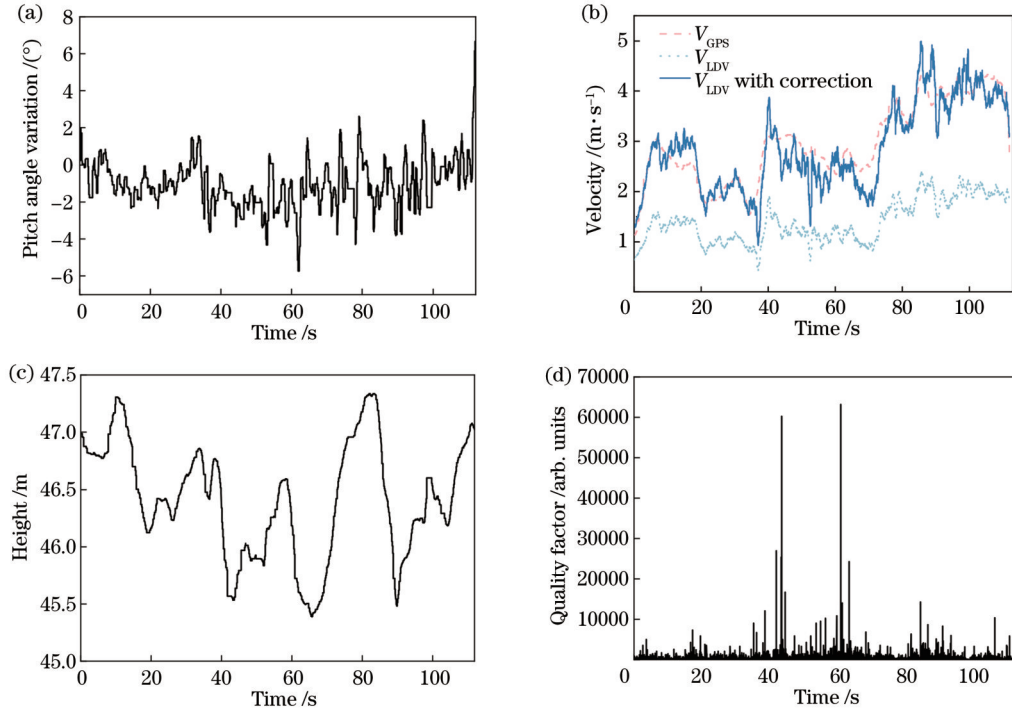


图 14 飞行实验数据。(a) MEMS 姿态传感器测到的 UAV 俯仰角变化量；(b) GPS 和 LDV 测到的速度曲线以及角度修正后 LDV 测到的速度曲线的对比；(c) 飞行过程中 UAV 离地面高度的变化示意图；(d) 飞行中 LDV 测量的品质因子曲线  
 Fig. 14 Data of flight test. (a) Pitch angle variation of the UAV measured by MEMS attitude sensor during flight; (b) comparison among  $V_{GPS}$ ,  $V_{LD}$  and  $V_{LD}$  with pitch angle correction; (c) diagram of the height variation of UAV during flight; (d) quality factor variation during flight

### 4 分析与讨论

飞行实验的结果已经初步验证了 LDV 应用于 UAV 测速的可行性。车式载体可被视作在二维平面上移动，而 UAV 等飞行器在三维空间中运动时，姿态变化较为复杂，姿态角的变化不能视作小量进行处理，所以在实验中，利用 MEMS 姿态传感器对姿态角的变化进行测量，然后对 LDV 测量的速度进行补偿。LDV 输出的速度值是运动载体的速度矢量在测量光束方向上的分量，虽然该方向上解算到的速度值具有高精度，但 MEMS 姿态传感器的角度测量精度较低，因此修正后的速度精度也会受到影响，不利于后续组合导航的应用。图 15 是一种双波束机载 LDV 在 UAV 上的安装示意图，其中： $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为 A、B 两束

探测光束与地面的夹角； $\Delta\theta$  为两光束之间的夹角； $f_A$  和  $f_B$  分别为多普勒频移。它们及该系统测得的速度  $v$  可以表示为

$$f_A = \frac{2v \cos \alpha_1}{\lambda}, \tag{12}$$

$$f_B = \frac{2v \cos \alpha_2}{\lambda}, \tag{13}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 + \Delta\theta, \tag{14}$$

$$v = \frac{\lambda f_B}{2} \sqrt{1 + \left[ \frac{1}{\tan(\Delta\theta)} - \frac{1}{\sin(\Delta\theta)} \frac{f_A}{f_B} \right]^2}. \tag{15}$$

该双波束机载 LDV 输出的速度只与两测量光束的多普勒频移和夹角有关，消除了载体俯仰角变化带来的影响，同时也避免了低精度的姿态传感器给速度修正带来的影响，这将在下一步的工作中实现。

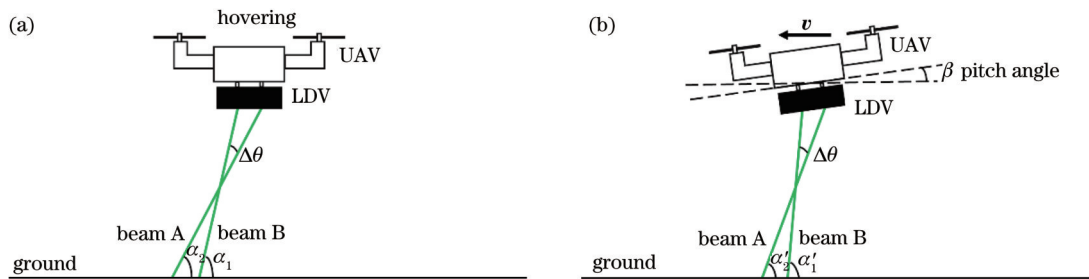


图 15 机载双波束 LDV。(a) 悬停；(b) 向前飞行  
 Fig. 15 Airborne LDV with two probe beams. (a) Hovering; (b) moving forward



对于 UAV 等低空飞行载体,最理想的速度测量装置可以实现对空间坐标系中三个方向的速度分量的测量,这样就实现了对飞行器速度的完备表征。车载 LDV 的研究也经历了从一维单波束到三维四波束的发展过程<sup>[11-12]</sup>,从中可以看到,更高维度的速度信息更有利于导航精度的提高<sup>[13]</sup>,这对于运动状态更为复杂的飞行器有更重要的研究意义。现今 UAV 已经成为军民两用领域的重要工作任务平台,未来二波束以及三维四波束机载 LDV 与 SINS 组成的组合导航系统提供的高精度自主导航信息,可以提高 UAV 在无外部导航信息环境中的生存能力,用于保障未知环境下地形勘测、人员搜救等任务的顺利实施。

## 5 结 论

基于对影响 LDV 测量信号 CNR 的因素的分析,确定了利用光学变换系统对测量光束进行变换的方案,通过对光学变换系统进行仿真和优化设计,搭建了测量光束束腰位置  $L=50\text{ m}$ 、测量景深为  $10\text{ m}$  的机载 LDV 样机,随后将其搭载在 UAV 上进行了飞行实验。对飞行实验中俯仰角的变化进行补偿后,LDV 输出的速度曲线与作为参考的 GPS 记录的速度曲线基本吻合,初步验证了机载 LDV 的可行性,且 LDV 在整个飞行过程中保持了较高的多普勒信号品质因子,确保了信号的有效性。该单波束样机的研制为机载 LDV 的发展作了有益探索,后续双波束 LDV 以及三维四波束 LDV 都可在其基础上进行研究,实现对飞行载体速度信息更完整的测量和 LDV/SINS 组合导航系统在 UAV 上的应用,提高 UAV 的全天时自主导航能力。

### 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, 2004.  
Shen X. Laser Doppler anemometry and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] 周健. 用于车载自主导航激光多普勒测速仪的初步研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 1-3.  
Zhou J. Preliminary study on laser Doppler velocimeter for vehicle autonomous navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 1-3.

- [3] Zhou J, Nie X M, Lin J. A novel laser Doppler velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 319-323.
- [4] 应智慧, 高春峰, 王琦, 等. 高精度激光多普勒测速仪在陆用自主导航系统中的应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204003.  
Ying Z H, Gao C F, Wang Q, et al. Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained land navigation system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1204003.
- [5] 王琦, 高春峰, 周健, 等. 陆用组合导航中 Janus 配置的激光多普勒测速仪的标定方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0417003.  
Wang Q, Gao C F, Zhou J, 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.
- [6] 刘光辉. 低空无人机探测技术的发展前景与趋势[J]. 现代雷达, 2022, 44(4): 99-100.  
Liu G H. Development prospect and trend of low-altitude UAV detection technology[J]. Modern Radar, 2022, 44(4): 99-100.
- [7] 李楠, 向文豪. 城市环境中无人机作战导航定位研究现状综述[J]. 无人系统技术, 2022, 5(4): 75-87.  
Li N, Xiang W H. Summary of research status of UAV combat navigation and positioning in urban environment[J]. Unmanned Systems Technology, 2022, 5(4): 75-87.
- [8] Fujii T, Fukuchi T. Laser remote sensing[M]. Boston: CRC Press, 2005.
- [9] Chen L J, Zhou J A, Nie X M, et al. Measurement range expansion of single-beam Laser Doppler velocimeter based on a focusing transmitter[J]. Optik, 2023, 272: 170383.
- [10] 席崇宾, 黄荣, 周健, 等. 基于液体透镜的激光多普勒信号品质因子增强技术[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0704003.  
Xi C B, Huang R, Zhou J, et al. Quality factor enhancement technology of laser Doppler signal based on liquid lens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0704003.
- [11] 王琦, 高春峰, 聂晓明, 等. 陆用组合导航中二维激光多普勒测速仪的标定方法[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0804004.  
Wang Q, Gao C F, Nie X M, et al. Calibration method of two-dimensional laser Doppler velocimeter in land integrated navigation system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0804004.
- [12] Wang Q, Nie X M, Gao C F, et al. Calibration of a three-dimensional laser Doppler velocimeter in a land integrated navigation system[J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8566-8572.
- [13] 陈兰剑, 席崇宾, 周健, 等. 用于导航定位的激光多普勒测速技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 20230143.  
Chen L J, Xi C B, Zhou J, et al. Review of laser Doppler velocimeter technology for navigation and localization[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 20230143.

# Research and Flight Test on Airborne Laser Doppler Velocimeter for Unmanned Aerial Vehicles

Chen Lanjian<sup>1,2</sup>, Xi Chongbin<sup>1,2</sup>, Zhou Jian<sup>1,2\*</sup>, Nie Xiaoming<sup>1,2</sup>, Jin Shilong<sup>1,2</sup>, Luo Hui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

<sup>2</sup>Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

## Abstract

**Objective** Unmanned aerial vehicles (UAVs) have emerged as a versatile platform for a wide range of civil applications, and offer flexibility and convenience in performing various tasks, like mapping, investigation, and patrolling. Accurate navigation information such as velocity and position is required to ensure the flight safety of UAVs. However, the global navigation satellite system (GNSS) is easily denied in urban environments due to the occlusion of tall buildings, which results in navigation information loss. Inertial navigation systems (INSs) are also hard to be relied on for long-scale autonomous navigation as its error accumulates over time. High-precision and independent velocity measurement methods will be beneficial for the navigation of UAVs. The laser Doppler velocimeter (LDV) has been applied to the integrated navigation of land vehicles improving localization accuracy. There is a bottleneck for LDV deployment on UAVs due to the limited working distance of LDV which is typically restricted to only a few meters. However, UAVs often operate at flight heights of dozens of meters, posing a challenge for LDV integration and utilization.

**Methods** The carrier-to-noise ratio (CNR) of LDV is analyzed concerning coherent Doppler wind lidar since both of them are coherent detection systems. For the same LDV, the CNR can be improved by reducing the size of the probe beam spot on the target. On this basis, we propose a solution to the bottleneck of implementing airborne LDV by an optical transformation system to extend the working distance of LDV. The optical transformation system comprises a concave lens and a convex lens. By passing the Gaussian probe beam through this system, the size and location of the beam waist can be adjusted by varying the distance between the two lenses. Simulation and experiments show that the size of the transformed waist can be reduced without changing the transformed location of the waist by a probe beam with a larger waist size in the optical transformation system. Before the airborne LDV prototype is assembled, the parameters of the transformation system are optimized through simulation, while considering the size and weight of the LDV. The focuses of the concave and convex lenses are chosen to be  $-100$  mm and  $600$  mm respectively. Before being input into the optical transformation system, the probe beam is expanded to  $10$  mm by an  $8\times$  expander. The entire LDV system is constructed with a sturdy cage structure, with four metal rods serving as the core skeleton to ensure the coaxial alignment of the optical transformation system. As the attitude of UAVs changes over time, a micro-electromechanical (MEMS) INS has been employed to measure and track these variations in UAV attitude. Additionally, the quality factor of the Doppler signal is defined as the ratio between the amplitude of the Doppler frequency and the mean amplitude of the base in the frequency domain, and it is adopted to represent the CNR in experiments.

**Results and Discussions** After designing, a single-beam airborne LDV prototype is fabricated with a working distance of  $50$  m and a  $10$  m depth of field. The spot diameter of the probe beam at  $50$  m is  $0.34$  mm. The quality factor has been measured to be  $3685$  at the working distance of  $50$  m and remains above  $800$  throughout the entire depth of field. The depth of field is enough to prevent signal loss and a  $110$ -second flight experiment is conducted with a UAV as the carrier. The velocity measured by the prototype is corrected for the pitch angle recorded by MEMS INS, and the corrected velocity is basically consistent with the velocity recorded by global position system (GPS) as a reference. The entire measurement maintains a high Doppler signal quality factor. However, the accuracy of MEMS INS is insufficient. Although the airborne LDV provides highly precise velocity components along the direction of the probe beam, the accuracy of velocity worsens after correction for pitch angle. The utilization of a two-beam LDV can alleviate this problem since the two beams have different angles for the ground. The velocity can be accurately determined by measuring the Doppler frequency and the angle between the two beams.

**Conclusions** The airborne LDV is designed and tested through simulation and experiments. We verify the feasibility of airborne LDV which has promising applications in UAV-integrated navigation. Our study lays a foundation for the development of multi-beam onboard LDV in the future. The acquisition of all accurate velocity components can significantly improve the navigation and localization of UAVs.

**Key words** optical measurement; laser Doppler velocimeter; velocity measurement and navigation; unmanned aerial vehicles