

用于自速度获取的脉冲式激光多普勒测速仪回波信号的理论模型和仿真分析*

陈兰剑¹, 周 健¹, 金世龙¹

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 激光多普勒测速仪 (Laser Doppler velocimeter, LDV) 的高精度和高可靠性在载体的自速度获取中发挥了重要的作用, 提高了运动物体定位导航的准确性。当前的 LDV 通常采用功率较低的连续式激光器作为测量光源, 外加光学系统衍射的限制, 导致其工作距离较短, 无法应用在像无人机等低空飞行载体的自速度获取中。若利用脉冲式激光器作为光源, 其峰值功率高的优势有望填补 LDV 在工作距离上的短板。本文通过拓展大气分层模型对脉冲式 LDV 的时域回波信号进行建模和仿真计算, 并与相干多普勒测风激光雷达进行了对比, 理论上验证了脉冲式 LDV 利用长脉冲进行高精度测速的可行性, 为后续的实验研究提供了理论基础。

关键词: 激光多普勒测速仪; 脉冲激光; 载体自速度获取; 大气分层模型

中图分类号: TN2 文献标志码: A 文章编号:

The model and simulations of echo signals of the pulsed LDV in time domain

CHEN Lanjian¹, ZHOU Jian¹, JIN Shilong¹

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

Abstract: Laser Doppler velocimeter (LDV) technology has been used in the own velocity acquisition of ground vehicles owing to its high accuracy, great reliability, and wide dynamic range. The LDVs currently have limited working distance for the relative low power of the continuous-wave probe beam and the restriction of optical devices, making them difficult to use on air vehicles for velocity acquisition. The pulsed laser with high peak power is expected to expand the working distance of LDVs. This paper demonstrates the model and simulations of echo signals of the pulsed LDV in time domain based on improved feuilleté model. Differences between the pulsed LDV and the coherent Doppler wind Lidar are analyzed. The feasibility of the pulsed LDV employing long pulse to acquire high-precision velocity is verified.

Keywords: Laser Doppler velocimeter; pulsed laser; velocity acquisition of vehicles; feuilleté mode

在运动物体的定位导航中, 精确的速度信息是必不可少的。里程计、加速计、GPS 和北斗等卫星定位系统都可以提供物体的运动速度信息, 但是这三者都存在各自的缺点: 里程计与加速计在测量中的误差项较多, 导致获取的速度信息精度欠佳; 对于卫星定位系统来说, 信号容易受到干扰和遮蔽, 会极大降低该系统的导航能力。相比之下, 激光多普勒测速仪 (Laser Doppler velocimeter, LDV) 具有以下独特的优势: 测速精度高, 测速范围广, 动态响应快, 测量过程稳定性高, 数据更新率高, 目前 LDV 已经在车式载体

的运动速度测量中得到了广泛应用^[1-6]。图 1 为 LDV 安装在运动的车式载体上的示意图, 在测量时, 载体的速度与激光载波的多普勒频移之间的关系可表示为

$$f_{Doppler} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

其中 θ 为 LDV 的测量光束与地面之间的夹角, 由此可以解算出载体的速度, 为军用以及民用车辆导航中的速度获取提供精度保障。

而当前的 LDV 基本采用功率较低的连续式激光器作为测量光源, 由于大气衰减等影响导致

*收稿日期: 2022-12-13

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ30782)

作者简介: 陈兰剑 (1995—), 男, 湖北恩施人, 博士研究生, E-mail: troy_elephant@163.com;

周健 (通信作者), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: wttzhoujian@163.com

其工作距离较短，极大限制其性能的发挥，虽然可以通过设计光学系统对测量光束的聚焦点进行改变，从而达到改变工作距离的目的，但由于衍射的限制，这种方式可拓展的工作距离限制在百米量级^[7]。若采用峰值功率更高的脉冲式激光器作为测量光源，有望将 LDV 的工作距离拓展至公里量级，可以满足如无人机等低空飞行载体自速度获取的应用需求。

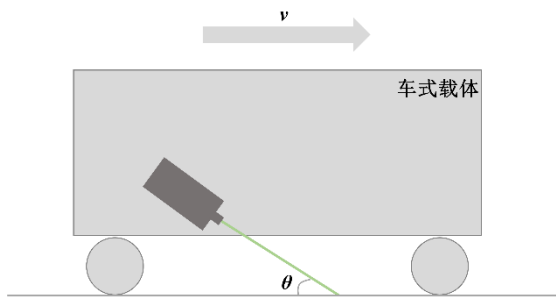


图 1 车式载体安装 LDV 测速示意图

Fig.1 A vehicle mounted with LDV

目前，对于脉冲式激光多普勒测速仪可行性的理论研究鲜有报道，本文通过将激光脉冲被硬目标散射的过程等效为“虚拟距离”的方式，结合大气分层模型（feuilleté model）来对脉冲式 LDV 的时域回波信号进行理论分析和仿真计算，从而对 LDV 工作在脉冲模式下获取高精度速度的可行性进行研究讨论。

1 理论模型

1.1 大气分层模型

脉冲式 LDV 工作的关键在于从远距离的脉冲回波中解算出速度信息，而关于相干多普勒测风激光雷达的研究可以帮助分析这个问题。

相干多普勒测风激光雷达可用于一定区域的风场扫描，进而获得该风场的风速分布信息，其解算出的风速来自大气中气溶胶的后向散射信号^[8]。大气分层模型^[9]可以用于模拟激光雷达在时域上接收到的回波信号，该模型将测量光束通过的大气分为 n 层，每层的距离为 Δr ，同时还需满足两个假设条件：

- (1) 在各个分层中，大气气溶胶分布均匀，在测量光束照射时不存在风场突变（速度、方向）；
- (2) 在测量光束照射时，相比风速导致的回波信号变化，大气后向散射系数变化引起的回波信号变化可忽略不计。

1.2 脉冲式 LDV 时域回波信号模型

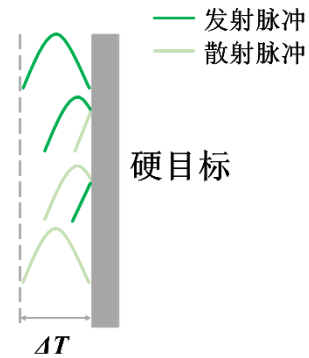


图 2 激光脉冲被硬目标散射过程示意图

Fig.2 the process of a laser pulse scattered by the hard target

不同于测风激光雷达，LDV 通常利用的是硬目标（地面、建筑物、岩石等）产生的回波信号进行速度解算^[10]，图 2 所示为 LDV 发射的测量激光脉冲从与硬目标接触到被后向散射的过程，该过程可以用距离量来表示，即假设在脉冲持续时间 ΔT 内，硬目标散射产生的信号由 $d_{vd}=c\Delta T$ (c 为光速) 这段距离内的散射粒子产生，这些散射粒子与硬目标的散射特性相同，将该距离定义为“虚拟距离”（virtual distance, d_{vd} ），这与相干多普勒测风激光雷达中距离门的划分有相似之处。将 d_{vd} 引入到大气分层模型当中，通过用大气分层模型中的分层距离 Δr 对 d_{vd} 进行划分，然后用 d_{vd} 内各分层产生的散射信号的叠加来表示硬目标产生的后向回波信号。结合大气分层模型，就可以模拟激光脉冲在大气中传输一段距离后被硬目标散射整个过程的回波信号。因此，通过引入 d_{vd} 后，我们就得到了脉冲式 LDV 时域回波信号的模型，图 3 为上述模型的示意图。

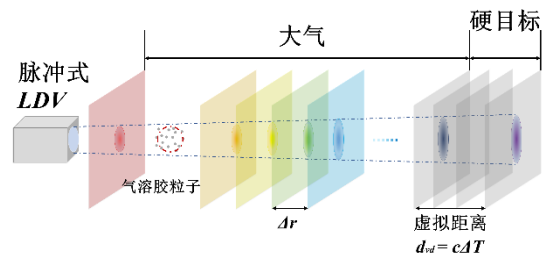


图 3 脉冲式 LDV 时域回波信号模型示意图

Fig.3 The model of received signals of the pulsed LDV

此模型中，每个分层中含有大量由气溶胶内或硬目标表面粒子产生的后向散射信号，这些散射回波在空间上是非相干的，叠加在探测面上时，会导致信号的强度和相位产生随机抖动，出现散

斑现象，利用服从零均值复高斯分布的随机因子 s_n 和 s_m 来表示大气气溶胶和硬目标表面非相干散射产生的散斑效应^[11]，以接收平面为参考，单个分层内的外差电流表达式为^[9]：

$$i_h = 2\Re \exp(j2\pi\nu_M t) \times \begin{cases} s_n \sqrt{\eta P_{LO} P_{pulse} \left(t - \frac{2R_n}{c}\right) T_n^2(R_n) \beta_n \Delta r \left(\frac{A}{R_n^2}\right) \exp(-j2k\nu_n t)} \\ s_m \sqrt{\eta P_{LO} P_{pulse} \left(t - \frac{2R_m}{c}\right) \rho_m \Delta r \left(\frac{A}{R_m^2}\right) \exp(-j2k\nu_m t)} \end{cases} \quad (2)$$

此处将外差电流分为两部分，第一部分信号由大气中气溶胶散射产生，第二部分由 d_{vd} 中的等效硬目标散射粒子产生。其中 R_n 、 β_n 、 T_n 和 ν_n 分别代表大气分层中的第 n 层的中心距离、气溶胶后向散射系数、透过率以及风速； R_m 、 ρ_m 、 Γ 和 ν_m 分别代表 d_{vd} 中第 m 层的中心距离、表面散射系数、到达硬目标前的大气衰减系数以及物体移动速度。 ν_M 、 \Re 、 P_{LO} 、 η 和 A 分别表示系统的移频量、探测器响应因子、本振光功率、系统效率和光学系统出射口的面积， P_{pulse} 为激光脉冲时域模型^[12-13]：

$$P_{pulse}(t) = \frac{2E\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}\Delta T} \exp\left(-4\ln 2 \frac{t^2}{\Delta T^2}\right) \quad (3)$$

其中， E 为激光器单脉冲的能量， ΔT 为脉冲宽度。将各 Δr 分层内的回波信号叠加，同时在探测范围将回波信号按时序排列，即可得到 LDV 回波信号的时域信号：

$$i_{total} = 2\Re \exp(j2\pi\nu_M t) \times \left[\sum_n s_n \sqrt{\eta P_{LO} P_{pulse} \left(t - \frac{2R_n}{c}\right) T_n^2(R_n) \beta_n \Delta r \left(\frac{A}{R_n^2}\right) \exp(-j2k\nu_n t)} + \sum_m s_m \sqrt{\eta P_{LO} P_{pulse} \left(t - \frac{2R_m}{c}\right) \rho_m \Delta r \left(\frac{A}{R_m^2}\right) \exp(-j2k\nu_m t)} \right] \quad (4)$$

2 仿真计算

2.1 短脉冲仿真计算

表 1 模型仿真参数

仿真参数	符号	数值
激光脉冲宽度	ΔT	400 ns
采集卡采样间隔	T	10 ns
脉冲能量	E	100 μJ
激光波长	λ	532 nm

本振光功率	P_{LO}	1 mW
大气气溶胶后向散射系数	β	$4.0 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
硬目标表面散射系数	Γ	$0.1 \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
系统效率	η	0.15
风速	ν_n	10 m/s
载体速度	ν_m	10 m/s

根据当前无人机的实际参数，飞行高度设置为 5km 左右，根据式(2)、(3)和(4)对脉冲式 LDV 回波信号时域模型进行了仿真，各项仿真参数如表 1 所示，激光脉冲的设置参考了测风激光雷达产品的参数，大气和 d_{vd} 内的分层距离为 $\Delta r=cT/2$ ， T 是系统采集卡的采样间隔。为了简便，风速和载体速度设置为常值，系统频移量 ν_M 设置为 0。

2.1.1 单脉冲发射

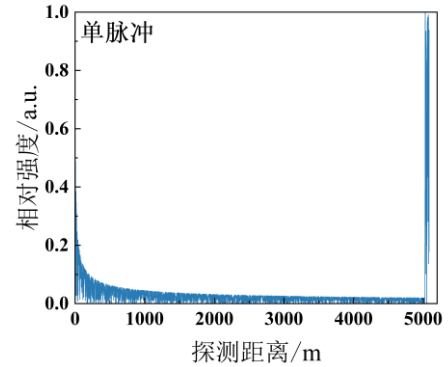


图 4 400ns 单脉冲发射时域回波信号

Fig.4 The echo signal of one 400ns laser pulse in time domain

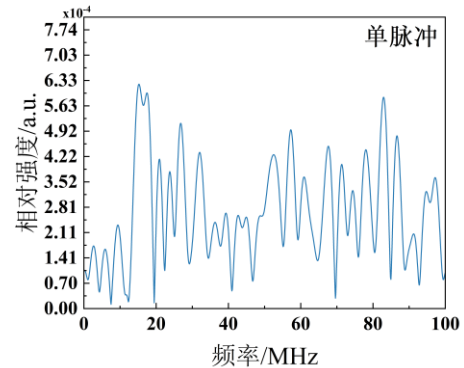


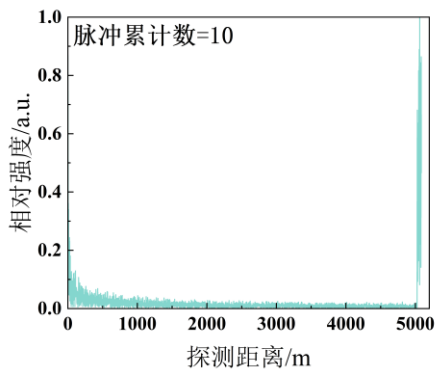
图 5 400ns 单脉冲发射频域信号

Fig.5 The echo signal of one 400ns laser pulse in frequency domain

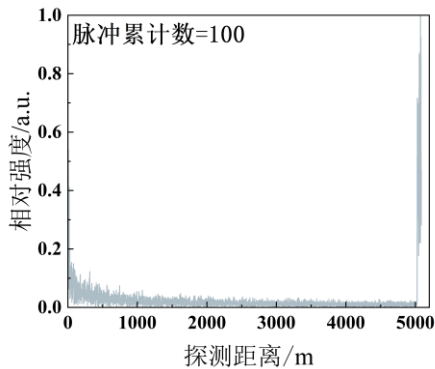
首先考察单脉冲发射的情况，将时序排列的

仿真结果转换成用探测距离表示，得到如图 4 所示的单脉冲发射回波信号结果，能直观的看到回波信号随探测距离的变化。在探测距离 5025-5145m 内，回波信号强度相较前面的探测区间回波有数量级的增强，这是因为这段回波由硬目标散射产生，该段探测距离即为上一节所定义的 d_{vd} 。然后利用这段回波信号进行载体的自速度解算，根据 d_{vd} 的定义可知，采集卡在该段回波内的采样点 $n=\Delta T/T$ ，故此时可在 d_{vd} 的回波信号内采样 40 个点，可将采样点进行补零操作提高到 1024 个，再进行快速傅里叶变换得到如图 5 所示的频谱信息，仿真结果进行了归一化处理，可以看到单个脉冲回波信号信噪比低，无法有效的提取多普勒频率，这是因为大气衰减带来了激光在往返过程中能量降低，散射回波较为微弱，另外还有散斑效应产生的相位随机抖动的影响。

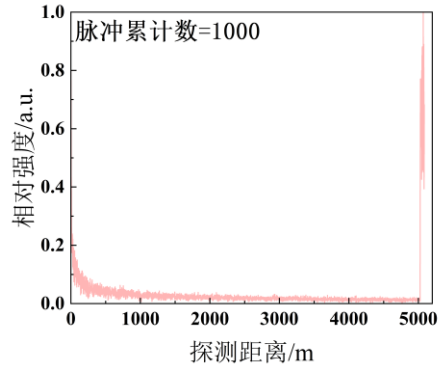
2.1.2 多脉冲累计



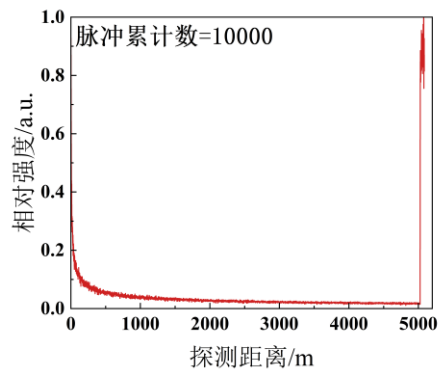
(a) 400ns 脉冲累积 10 次
(a) echo signals in time domain after 10 pulses accumulation



(b) 400ns 脉冲累积 100 次
(b) echo signals in time domain after 100 pulses accumulation



(c) 400ns 脉冲累积 1000 次
(c) echo signals in time domain after 1000 pulses accumulation



(d) 400ns 脉冲累积 10000 次
(d) echo signals in time domain after 10000 pulses accumulation

图 6 脉冲累积之后的时域回波信号

Fig.6 echo signals in time domain after pulses accumulation

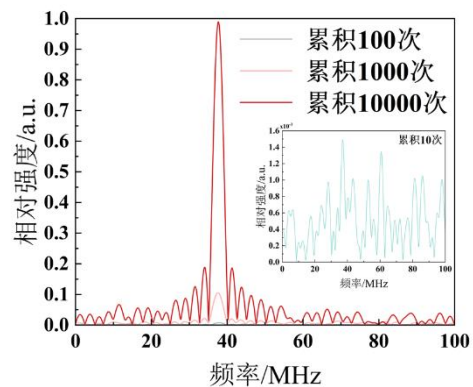


图 7 400ns 脉冲累积 10 次、100 次、1000 次和 10000 次后的频域信号

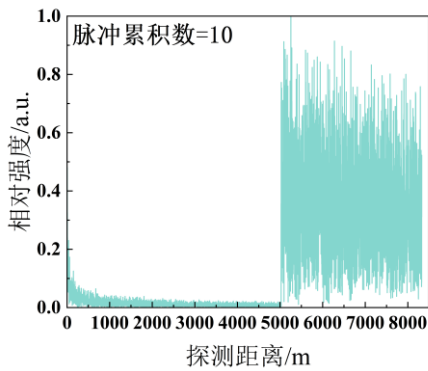
Fig.7 echo signals in frequency domain after 400ns pulses accumulation

为了提高信号的信噪比，可以对多个脉冲的回波信号进行累积后再进行速度反演^[14,15]。

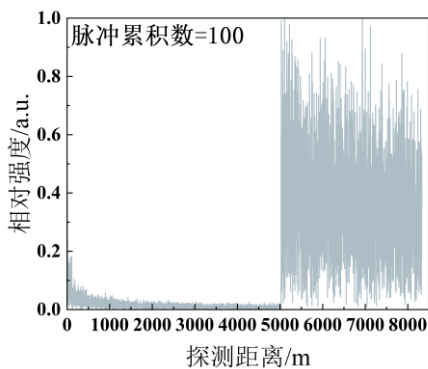
图 6 展示了经过 10、100、1000 和 10000 次

累积之后的脉冲回波信号,随着累积次数的增加,探测范围内的回波信号随机抖动变小,趋于稳定;然后对累积后的回波信号数据的采样点进行补零操作至 1024 后,经过快速傅里叶变换得到对应的频谱,结果进行了归一化处理,如图 7 所示,与载体速度相关的多普勒频率信噪比随着累积次数的增加而不断提高,更有利于速度信息的反演。在脉冲回波累积 10000 次的频谱中,峰值对应的频率为 38.46MHz,给定的载体速度值对应的多普勒频移为 37.59MHz,假设测量光束与硬目标表面的夹角为 $\theta=30^\circ$,则解算出的速度与实际值存在 0.267m/s 的偏差,这种偏差是短脉冲长度导致的 d_{vd} 内采样点数较少,以至于快速傅里叶变换后得到的频谱频率分辨率不够高。

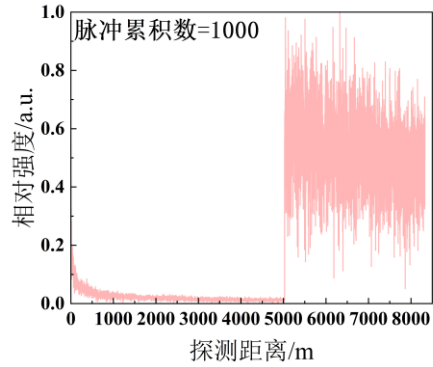
2.2 长脉冲仿真计算



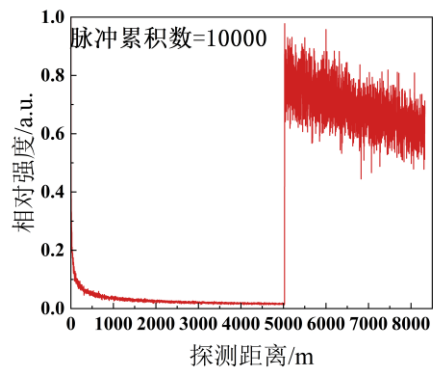
(a) $11\mu\text{s}$ 脉冲累积 10 次
echo signals in time domain after 10 pulses accumulation



(b) $11\mu\text{s}$ 脉冲累积 100 次
echo signals in time domain after 100 pulses accumulation



(c) 400ns 脉冲累积 1000 次
echo signals in time domain after 1000 pulses accumulation



(d) $11\mu\text{s}$ 脉冲累积 10000 次
echo signals in time domain after 10000 pulses accumulation

图 8 $11\mu\text{s}$ 脉冲累积之后的时域回波信号

Fig.8 echo signals in time domain after $11\mu\text{s}$ pulses accumulation

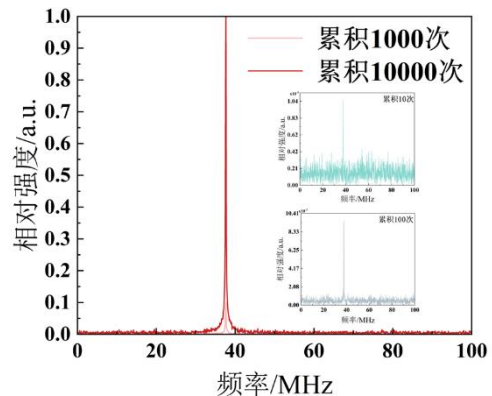


图 9 $11\mu\text{s}$ 脉冲累积 10 次、100 次、1000 次和 10000 次后的频域信号

Fig.9 echo signals in frequency domain after $11\mu\text{s}$ pulses accumulation

在相干多普勒测风激光雷达应用中,距离分辨率表达式为 $\Delta d=c \Delta T/2$,为了在较高的空间分

分辨率下对雷达视场内的风场速度信息进行探测，通常采用较短的激光脉冲，以提高其距离分辨率；在采集卡的采样率一定时，短脉冲导致单个距离门内的采样点数少，只能通过补零等方式来提高速度反演的精度。而 LDV 测量的是载体自身的速度信息，只要能从参照物的散射回波中提取多普勒频率即可，对测量的空间分辨率没有要求，因此在脉冲式 LDV 的应用当中，在采集卡性能不变的前提下，可通过发射脉宽更宽的激光脉冲来进行探测，进而提高系统的速度反演精度。

接下来对利用长脉冲探测的情况进行仿真，采集卡的采样率为 100MHz，假设在 d_{vd} 内采样点数为 1024，则脉冲时间宽度可设置为 $\Delta T=11\mu s$ ，其他仿真参数与表 1 中相同。仿真过程中同样采用了脉冲回波信号累积的方式来提高多普勒信号信噪比，结果如图 8、9 所示，数据都进行了归一化处理。探测距离 5025-8325m 区间代表了硬目标散射的回波信号，即 $d_{vd}=3300m$ ，在采用长脉冲进行探测后，脉冲累积 10 次即可提取出多普勒频移信息，降低了对脉冲累积的要求，同时频谱上的频率分辨率更高，在累计数为 10000 次的结果中，频率峰值对应于 37.61MHz，反演速度偏差为 0.006m/s，极大提高了速度反演的精度。

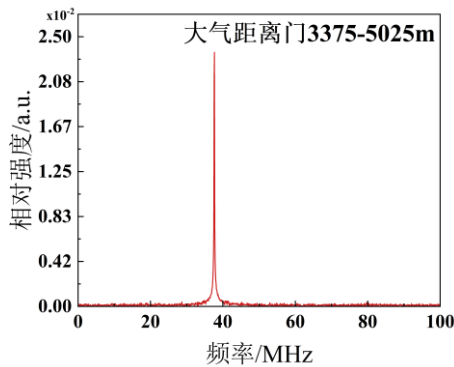


图 10 硬目标前一个大气距离门内的频谱信息

Fig.10 the frequency domain of the atmosphere gate before hard target

同时依据相干多普勒测风激光雷达中距离门的划分方式，对 d_{vd} 前（即硬目标前）的大气进行了划分，根据脉冲宽度 $11\mu s$ 可知此时的距离门长度为 1650m，对硬目标前一个大气距离门内（即探测距离 3375-5025m 区间）的回波信号进行了傅里叶变换，如图 10 所示，频谱上可以观察到与风速相关的多普勒频移信息，但信噪比远低于 LDV 接收到的硬目标散射回波。

4 讨论分析

可以看到脉冲式 LDV 与相干多普勒测风激光雷达之间的区别在于：相干多普勒测风激光雷达接收的大气的后向散射通常较弱，激光载波所携带的多普勒频移信息的信噪比较低，在反演速度时，相干多普勒测风激光雷达是通过最大似然估计法等近似的方法来对风速进行估计的^[8]；而 LDV 利用的是硬目标散射的回波信号进行速度解算，探测到的回波信号强度相较前者有数量级的提高，因而多普勒频移信息信噪比更高，而且测量光束与地面之间有固定的夹角，即信号处理得到的多普勒频移量与速度之间有确定的关系，相比前者通过近似估计的方式得到的速度信息，LDV 解算得到的速度误差更小，另外初始安装时夹角的初始标定以及载体行进间夹角在线标定技术也进一步提高了速度解算的精度。

根据本文的仿真计算可以推断，脉冲式 LDV 在理论上是可行的，通过设计长脉冲工作方式，既可以保证测速的精度，同时还可以降低速度解算时脉冲累积数的要求，在脉冲重频一定的前提下，提高单位时间速度数据的刷新率。

5 结论

本文通过引入“虚拟距离”对大气分层模型进行拓展，建立了脉冲式 LDV 的时域回波信号模型，并带入参数进行仿真计算，仿真结果表明远距离的硬目标散射产生的回波信号信噪比远高于大气气溶胶后向散射回波的信噪比，脉冲式 LDV 可以有效利用累积之后的硬目标回波信号提取多普勒频率信息进行速度反演，同时，相比于相干多普勒测风激光雷达，脉冲式 LDV 不受空间分辨率的限制，可以利用更长的激光脉宽进行探测，从而提高信号的频谱分辨率和速度反演的精度。

仿真结果还表明，脉冲式 LDV 可以探测 5km 甚至更远目标散射的回波信号，这极大拓展了当前 LDV 的工作距离，使得 LDV 可以应用在低空飞行载体组合导航、航天器行星表面着陆导航等需要远距离高精度速度测量的场景，具有广阔的发展前景。下一步将对脉冲式 LDV 进行原理实验验证，为后续样机研制打下基础。

参考文献

[1] ZHOU J, NIE X, LIN J. A novel laser Doppler

- velocimeter and its integrated navigation system with strapdown inertial navigation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64: 319-323.
- [2] NIE X, ZHOU J. Pitch independent vehicle-based laser Doppler velocimeter [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 131:106072.1-106072.3.
- [3] XIANG Z, WANG Q, HUANG R, et al. Position observation-based calibration method for an LDV/SINS integrated navigation system[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(26): 7869-7877.
- [4] 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.
- [5] HUANG R, NIE X, ZHOU J. Laser Doppler velocimeter and its calibration system [J]. *Measurement*, 2019, 134: 286-292.
- [6] XIANG Z, WANG Q, HUANG R, et al. In-motion initial alignment method for a laser doppler velocimeter-aided strapdown inertial navigation system based on an adaptive unscented quaternion h-infinite filter [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(3): 035001.
- [7] 蒋杉. 风力发电机偏航校正连续相干激光探测系统的研究 [D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2020.
JIANG S. Development of continuous wave coherent laser detection system for turbine control [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [8] 王冲. 1.5 μm 波长全光纤多功能相干多普勒测风激光雷达[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2019.
WANG C. 1.5 μm all-fiber multifunction coherent Doppler wind Lidar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [9] SALAMITOU P, DABAS A, FLAMANT P. Simulation in the time domain for heterodyne coherent laser radar[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(3): 499.
- [10] 聂晓明. 用于车载自主导航系统激光测速技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
NIE X. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] GOODMAN J. Statistical properties of laser speckle patterns [M], Berlin: Springer, 1975: 9-75.
- [12] FREHLICH R, YADLOWSKY M. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar. [J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 1994, 11: 1217-1230
- [13] FREHLICH R. Simulation of coherent Doppler lidar performance for space-based platforms. [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 245-262.
- [14] 范东倩. 激光测风雷达脉冲相干累加技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
FAN D. Experimental research on the pulse coherent accumulation technology of wind Lidar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
DING L, GENG F, CHEN J. Radar principles [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)