

# 卫星微振动对测风激光雷达信噪比影响研究

曹启鹏\*, 李永昌, 董小静, 王超, 王靖

航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

**摘要** 大气风场的测量对于全球气候变化、海上暴风探测、日常天气预报精度,乃至国家军事安全具有重要意义。天基相干测风雷达以其高时-空分辨率、高灵敏度、实时探测、体积小等优点,受到广泛关注。大多数航天器都存在微振动扰动源,会对相干测风激光雷达的信噪比有一定影响。本文在对相干测风激光雷达系统原理分析的基础上,以某型号微振动实测数据为样本,分析了卫星微振动对相干测风激光雷达的信噪比的影响。实验结果表明:卫星微振动对于相干测风激光雷达的信噪比有一定影响,在失配角为  $3.77 \mu\text{rad}$  时,信噪比在  $-1.5 \text{ dB} \sim 1.36 \text{ dB}$  之间浮动,相对来说影响较弱。从微振动的角度来讲,某卫星平台能够满足相干测风激光雷达的探测要求。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 相干测风; 微振动; 信噪比

中图分类号 P412.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.092802

## Influence of Satellite Micro-Vibration on Signal-to-Noise Ratio of Wind LiDAR

Cao Qipeng\*, Li Yongchang, Dong Xiaojing, Wang Chao, Wang Jing

China DFH Satellite CO., LTD, Beijing 100094, China

**Abstract** The measurement of atmospheric wind field is of great significance for global climate change, sea storm detection, accuracy of daily weather forecast, and even national military security. Space-based coherent wind light detection and ranging (LiDAR) has attracted wide attention due to its high time-space resolution, high sensitivity, real-time detection, and small volume. Most spacecraft have micro-vibration disturbance sources, which can influence the signal-to-noise ratio (SNR) of coherent wind LiDAR. Based on the principle analysis of coherent wind LiDAR system, this paper analyzes the influence of satellite micro-vibration on the signal-to-noise ratio of the coherent wind LiDAR, based on the measured data of a certain type of micro-vibration. The experimental results show that satellite micro-vibration has a certain effect on the signal-to-noise ratio of coherent wind LiDAR. When the mismatch angle is  $3.77 \mu\text{rad}$ , the signal-to-noise ratio fluctuates between  $-1.5 \text{ dB}$  and  $1.36 \text{ dB}$ , and the impact is relatively weak. From a micro-vibration perspective, a satellite platform can meet the detection requirements of a coherent wind LiDAR.

**Key words** remote sensing; LiDAR; coherent wind; micro-vibration; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 280.3640; 280.7250; 350.7420; 110.2960

## 1 引言

高精度的大气风场模型在改善天气预报精度、自然灾害的准确预警、大气组分和运动学的深入研究方面具有重要的作用<sup>[1,2]</sup>。当前地球大气风场测量主要依靠地面观测系统和天基大气观测系统。地球表面观测系统利用地面基站和机载系统,提供地球表层大气的风场数据;天基大气观测系统主要是

根据星载云图变化反演风场,该方式覆盖范围较广,可明显观测大范围的云层运动,但分辨率较低,对于局部气流短时间变化较难检测。

激光雷达测风作为一种新兴技术手段,以较好的时间、空间分辨率,以及响应速度快等特点受到世界各国高度重视。同时相干测风激光雷达有信噪比(SNR)、高探测精度的优势<sup>[3]</sup>。国外相干测风激光雷达发展迅速,欧美许多国家已经开展了地基和

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-09-05; 录用日期: 2019-09-26

\* E-mail: caoqipeng2004@126.com

机载相干测风激光雷达的研究。国内研究虽然起步较晚,但是目前已经有多家单位开展了航空航天、遥感测量及气象探测等领域的应用研究<sup>[4]</sup>。

卫星上一般配置动量轮、陀螺和太阳翼等转动部件,其工作时会产生一定程度的微振动。由于所产生的微振动会对相干测风激光雷达的信噪比造成的一定影响,因此,本文在对相干测风激光雷达系统原理分析的基础上,针对卫星微振动对相干测风激

光雷达信噪比的影响进行了实验验证。

## 2 基本原理

### 2.1 系统组成

不同类型不同应用的相干测风激光雷达系统的组成存在较大差异,但就大多数系统的关键器件的作用而言,基本相同,其工作原理如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

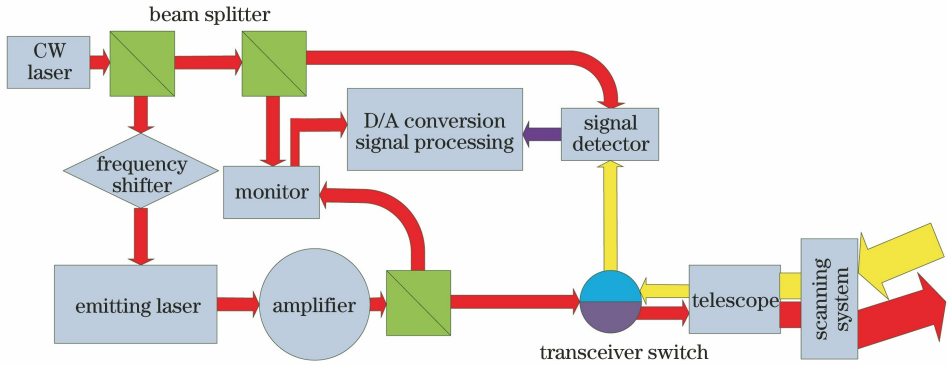


图 1 相干测风激光雷达系统原理图

Fig. 1 Principle of coherent wind LiDAR system

整个系统从连续单频激光器开始,出射的激光由分束器分成三部分。第一部分,首先经过频移器移频(或者不移频,看所用的场合),然后用于以下几种方式中的一种:1)不经过放大直接射向大气;2)经过连续激光放大器或者种子注入振荡器来放大出射能量;3)经过脉冲激光放大器得到高脉冲能量的出射激光。频移器的作用是在连续激光上面偏置一个频移量,用来在回波信号中判断频移的正负,从而反演风速的方向。第二部分,主要用来与从发射激光器出射激光的一小部分激光进行混频,由监视器进行接收,可以准确得到发射激光的频率、相位及振幅信息,从而提高后续信号的测量精度。第三部分为本振激光,主要用来与回波信号在探测器上进行混频。

### 2.2 探测激光的多普勒效应

若大气气溶胶粒子相对于光源运动,则接收气溶胶散射光的频率不仅取决于照射光的频率,还与气溶胶粒子相对于光源的运动速度、运动方向和散射角有关,其原理图如图 2 所示。因此,根据气溶胶粒子所辐射散射光的多普勒频移,就可推算出气溶胶粒子的运动速度和方向,即大气风速和风向。

如不考虑相对论(时间的相对性)的影响,则激光雷达接收速度  $v$  的气溶胶粒子散射光的多普勒频移为

$$\Delta f_D = f_s - f = \frac{c}{\lambda} \left( \frac{c - v \cdot i}{c - v \cdot s} - 1 \right), \quad (1)$$

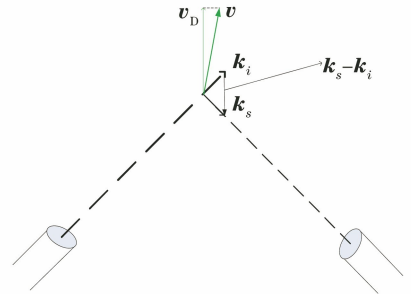


图 2 激光多普勒测风示意图

Fig. 2 Sketch map of laser Doppler wind

式中:  $f_s$  为散射光的频率;  $f$  为照射光的频率;  $c$  为光速;  $i$  为照射光方向的单位矢量;  $s$  为散射光方向的单位矢量。

由于  $|v| \ll c$ , 可得:

$$\Delta f_D = \frac{c}{\lambda} \left( \frac{c - v \cdot i}{c - v \cdot s} - 1 \right) \approx \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{v \cdot s - v \cdot i}{c} = \frac{v \cdot s - v \cdot i}{\lambda}. \quad (2)$$

令  $k_s = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot s, k_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i$ , 则有:

$$\Delta f_D = \frac{v \cdot (k_s - k_i)}{2\pi}. \quad (3)$$

若采用单端多普勒测风激光雷达测风,则  $k_i = -k_s$ , 可得:

$$\Delta f_D = \frac{v \cdot k_s}{\pi}. \quad (4)$$

令  $v_r$  为径向的风速分量,则风速可表示为

$$v_r = \pm \frac{\lambda}{2} \Delta f_D. \quad (5)$$

### 3 天基相干测风激光雷达的信噪比计算方法

#### 3.1 大气回波功率

大气回波功率描述了与测风系统距离为  $z$  的气溶胶等后向散射到达接收单元的功率大小,它融合了收发系统、目标和大气参数等信息,是反映系统探测能力的关键指标之一。

以收发同轴系统为例,如图3所示,假定激光的

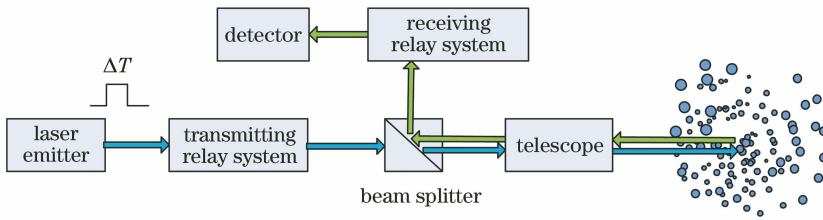


图3 收发同轴激光雷达的简化图

Fig. 3 Simple map of transceiver coaxial LiDAR

根据以上描述,假定探测目标具有均一性分布,且  $\Delta T$  很小,可得到平均大气回波功率的表达式为

$$\overline{P_s}(z) = \frac{\eta_i T_i \beta(z) [K(z)]^2 cEA}{z^2}, \quad (6)$$

$K(z)$ 一般以比尔定律表示为

$$K(z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(z) dz\right], \quad (7)$$

脉冲能量为  $E$ , 脉冲持续时间为  $\Delta T$ , 单脉冲的功率为  $E \cdot \Delta T$ ; 激光发出后, 经过中继光学系统、分束器、望远镜等光学子系统和器件(分别以  $\eta_i$  和  $T_i$  表示光学透过率及光学截断后的能量通过率), 当通过大气时, 大气分子及气溶胶与激光脉冲相互作用, 激光能量再次衰减(一次消光后能量通过率  $K(z)$  是距离  $z$  的函数); 剩余激光能量的一部分被大气分子和气溶胶反射回接收系统, 反射回光子能量的比例以后向散射系数  $\beta$  表示; 在单脉冲时间内的运行的距离为  $c \cdot \Delta T$ ; 假定目标相对于接收孔径的立体角为  $\Omega(z) = A/z^2$ , 其中  $A$  表示光学孔径的面积。

式中:  $\alpha(z)$  表示沿光束传输路径的消光系数。

后向散射系数和消光系数在不同地理位置和天气条件下也不同。结合美国标准大气模型和后向散射理论, 可得理想条件下的后向散射系数和大气消光系数为

$$\begin{cases} \beta(z) = \left[ 2.47 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{z}{2000}\right) + 5.13 \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{z-2000}{6000}\right)^2 \right] \left(\frac{532}{\lambda}\right) \text{m}^{-1} \text{sr}^{-1} \\ \alpha(z) = S \times \beta(z) \text{m}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

对于对流层大气来说,  $S = 50 \text{ sr}$ 。

#### 3.2 信噪比

风速(频率)的精度直接取决于接收到的回波信号强度与接收器的探测噪声, 对于相干系统, 信噪比定义为外差得到的信号功率与噪声功率之比, 它与大气回波功率的关系为

$$R_{\text{SNR}}(t) = \frac{\overline{P_s}(z) \eta_H(t)}{h\nu B} = \frac{\eta_i T_i \beta(z) \left\{ \exp\left[-\int_0^z \alpha(z) dz\right] \right\}^2 cEA \eta_H(t)}{h\nu B z^2}, \quad (9)$$

式中:  $h$  为普朗克常量,  $h = 6.626 \times 10^{-34}$ ;  $\nu$  表示光

子频率;  $B$  表示探测带宽;  $\eta_H(t)$  为外差效率。

针对收发合一的雷达系统, 信噪比为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\eta_i \lambda EA \beta(z) K^2(z) \eta_s(z)}{hBz^2}. \quad (10)$$

对于具体系统,  $E$ 、 $\eta_i$ 、 $\lambda$ 、 $B$  为固定值,  $\beta(z)$ 、 $K(z)$  与距离  $z$  相关。为了分析信噪比和望远镜口径之间的关系, 提取公式中与口径相关的项, 表示为

$$R_{\text{SNR}} \propto \frac{A \beta(z) K^2(z) \eta_s(z)}{z^2}. \quad (11)$$

由于采用望远系统, 光学系统聚焦在无穷远, 则  $\eta_s(z)$  为最大系统效率<sup>[6]</sup>。

$$\eta_{sm}(z) = \frac{128F^2}{\rho_m^4} \cdot \int_0^\infty \left\{ \left\{ \sum_{n=1}^N A_n \frac{1}{2\xi} \exp\left[-\frac{(2Fy)^2}{4\xi}\right] \right\} \cdot \left\{ \sum_{n=1}^N A_n \frac{1}{2\xi} \exp\left[-\frac{(2Fy)^2}{4\xi}\right] \right\}^* \right\}^2 y dy, \quad (12)$$

式中:  $F$  为菲涅耳常数,  $F = \pi R_a^2 / (\lambda z)$ ;  $R_a$  为望远镜半径;  $\rho_m$  为截断比, 这里直接采用 Rye 的优化计算结果 ( $\rho_m = 0.8$ );  $\xi$  为中间变量,  $\xi = B_n + 1/\rho_m^2 - jF$ ;  $A_n$  和  $B_n$  为孔径函数的展开系数。

## 4 卫星微振动对相干测风激光雷达信噪比的影响

### 4.1 望远镜口径和失配角对信噪比的综合影响

为了获取全球大气风场, 望远镜光轴与卫星的 +Z 方向需成  $45^\circ$  夹角, 如图 4 所示。在此, 以卫星轨道高度为 400 km, 探测对象为 0~6 km 的大气层为背景实例进行分析。

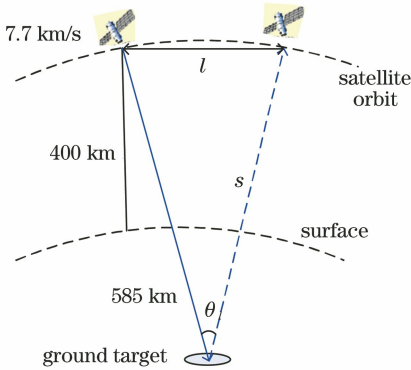


图 4 星载激光雷达测风原理图

Fig. 4 Schematic of spaceborne LiDAR wind measurement

对于相干测风激光雷达系统, 望远镜口径和失配角会影响信噪比。除此之外, 需要进一步分析微振动对信噪比的影响。

针对 400 km 轨道高度, 可以仿真出信噪比与探测距离失配角  $\theta_1$  和望远镜孔径  $D$  之间的关系<sup>[7]</sup>, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 在特定的探测点, 信噪比随着望远镜口径的增大而变强, 但存在最大值, 即存在最优的望远镜孔径值; 同时, 因为地面附近大气气溶胶的后向散射系数最强, 归一化的信噪比在地面附近的探测点具有最强的信噪比。随着失配角的增大, 最优的望远镜口径值也在不断减小。选择地面点作为评价对象, 计算最优的望远镜口径值随着失配角的变化情况, 如图 6 所示。

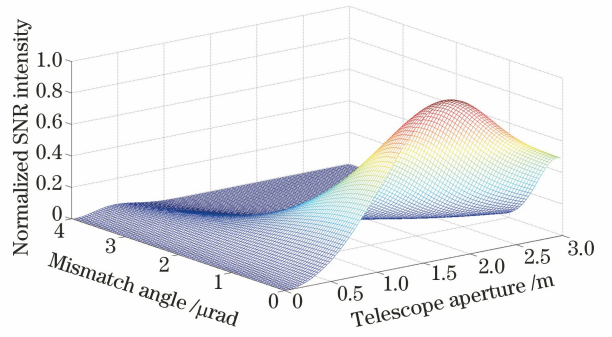


图 5 归一化的  $R_{SNR}$  随  $\theta_1$  和  $D$  变化的三维图

Fig. 5 Three-dimensional map of normalized  $R_{SNR}$  as a function of  $\theta_1$  and  $D$

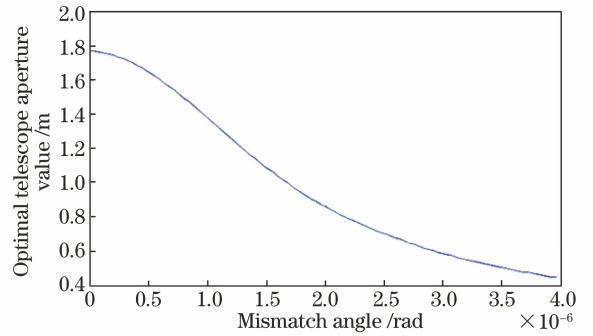


图 6 最优望远镜口径值与失配角的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between optimal telescope aperture value and mismatch angle

从图 6 可以看出, 随着失配角的增大, 望远镜的最优孔径不断减小。当失配角为  $3.77 \mu\text{rad}$  时 (在激光往返地球的时间内, 卫星两次位置对地面目标的角距), 对应的望远镜孔径约为 450 mm, 因此, 以此失配角为基准, 分析卫星平台稳定度对信噪比的影响。

根据文献[8]介绍, 由各种因素带来的失配角导致的信噪比损失模型为

$$R_{SNRI} = \exp\left(-\frac{\pi D \theta_1}{2.84\lambda}\right)^2 \cdot R_{SNR}. \quad (13)$$

根据 400 km 轨道对应的最优望远镜孔径值, 在失配角为  $3.77 \mu\text{rad}$  时, 卫星微振动导致的信噪比降低为

$$R_{SNRI_{\text{im}}} = \exp\left[-\frac{0.45\pi(3.77 + \theta_m) \cdot 10^{-6}}{2.84\lambda}\right]^2 \cdot R_{SNR}. \quad (14)$$

式中:  $\theta_m$  为微振动引起的角度变化量; 则相比于失配角为  $3.77 \mu\text{rad}$  的情况, 信噪比的比值为

$$\eta = \frac{R_{SNRI_{\text{im}}}}{R_{SNRI}} = \frac{\exp\left[-\frac{0.45\pi(3.77 + \theta_m) \cdot 10^{-6}}{2.84\lambda}\right]^2}{\exp\left(-\frac{0.45 \cdot 3.77 \cdot \pi \cdot 10^{-6}}{2.84\lambda}\right)^2}. \quad (15)$$

一般相关测风激光雷达采用波长为  $2\ \mu\text{m}$  的固体激光器<sup>[5]</sup>,可得微振动引起的角度偏差后带来的信噪比的比值曲线如图 7 所示。

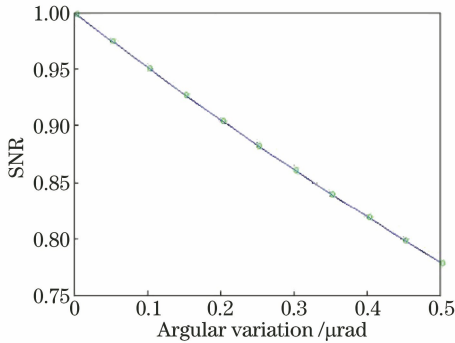


图 7 微振动引起的信噪比的比值变化仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of SNR change caused by micro-vibration

## 4.2 基于图像的卫星微振动测试原理

景物模拟器置于相机前,经过调整将黑白条纹靶标成像于相机 CCD 上。实验中通过分析靶标成像的像元位置变化,来测量微振动的大小。每行受扰振的像元偏移量为

$$W_{\text{warp}}(i) = L(i) - \frac{\sum_{i=0}^N L(i)}{N}, \quad (16)$$

式中: $L(i)$ 为每行的灰度中心位置; $N$ 为截取图像数据的行数。

## 4.3 实验数据分析

基于某型号地面微振动实验数据,采用最接近在轨工作状态的工况数据(数传天线、动量轮、陀螺、帆板转动机构、控制力矩陀螺均设置为在轨工作状态)。将像移量转变为随时间的变化量,如图 8 所示。

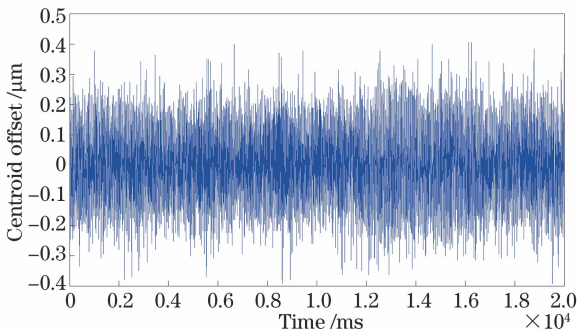


图 8 微振动测试曲线图

Fig. 8 Test curve of micro-vibration

由图 8 可知,像元偏移量随时间振荡,最大值约为  $0.406\ \mu\text{m/ms}$ ,若相机的焦距为  $4.4\ \text{m}$ ,则角度随时间的最大变化约为  $0.092\ \mu\text{rad/ms}$ ,即在  $3.77\ \text{ms}$

内角度的最大变化量约为  $0.35\ \mu\text{rad}$ 。假定未来相干测风激光雷达卫星与该卫星的微振动量级处于同一水平,以此分析评估微振动带来的影响。

根据实验数据可以得到,当失配角为  $3.77\ \mu\text{rad}$  时,微振动导致的信噪比变化如图 9 所示。由图可知,微振动导致的信噪比影响随时间变化,可能增加,也可能降低,变化范围为  $0.84 \sim 1.17$  (约为  $-1.5\ \text{dB} \sim 1.36\ \text{dB}$ )。一般认为信噪比降低不超过  $3\ \text{dB}$  时<sup>[9]</sup>,结果可接受。就信噪比的变化范围而言,该卫星平台产生的微振动引入的信噪比降低值可以接受。

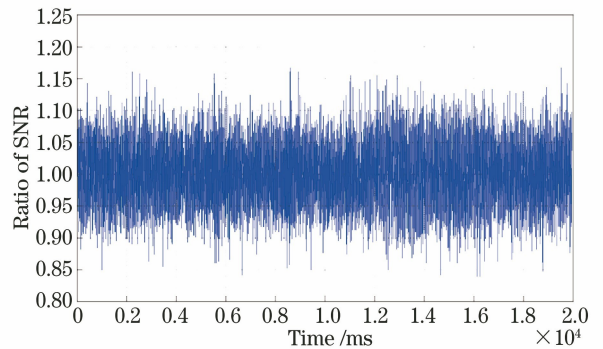


图 9 有微振动时的与无微振动时的信噪比比值

Fig. 9 Ratio of SNR with and without micro-vibration

## 5 结 论

本文开展了微振动对天基相干测风激光雷达信噪比的影响研究。首先分析了相干测风激光雷达测量风速的原理,并给出了信噪比的计算方法;随后分析了卫星微振动对相干测风激光雷达的信噪比影响,主要有两方面内容:1)最优望远镜口径值会随着失配角的变化而变化,在失配角为  $3.77\ \mu\text{rad}$  时,得出卫星的微振动引入的信噪比计算公式;2)基于某型号卫星的微振动实验数据,对相干测风激光雷达的信噪比的影响进行了分析。结果表明:当前某卫星平台产生微振动对相干测风激光雷达的信噪比有一定影响,变化范围大约在  $-1.5\ \text{dB} \sim 1.36\ \text{dB}$  之间,该影响对于卫星是可接受的。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao M, Guo P, Rui X B, et al. Wind-field vector retrieval method at low signal-to-noise ratio for coherent Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110005.  
赵萌, 郭磐, 芮训豹, 等. 低信噪比下相干多普勒激光雷达风场矢量反演算法[J]. 中国激光, 2018, 45

- (11): 1110005.
- [2] Zhang N N, Han Y L, Chen T D, et al. Design of direct detection Doppler lidar with coherent light path [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1010005.  
张楠楠, 韩於利, 陈廷娣, 等. 相干光路的直接探测多普勒激光雷达设计[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1010005.
- [3] Feng C Z, Wu S H, Liu B Y. Research on wind retrieval method of coherent Doppler lidar and experimental verification [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0410001.  
冯长中, 吴松华, 刘秉义. 相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0410001.
- [4] Zhou Y Z, Wang C, Liu Y P, et al. Research progress and application of coherent wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 020001.  
周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 020001.
- [5] Li D M, Zheng Y C, Pan J Y, et al. Index system of coherence Doppler wind lidar [J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 880-884.  
李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 880-884.
- [6] Bu Z C, Chen S Y, Zhang Y C, et al. Numerical analysis and calculation of heterodyne efficiency of coherent Doppler wind lidar [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(8): 824-827, 843.  
步志超, 陈思颖, 张寅超, 等. 相干多普勒测风激光雷达外差效率的数值计算与分析[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(8): 824-827, 843.
- [7] Bu Z C, Guo P, Chen S Y, et al. Optimization analysis of telescope aperture and truncation factor of coherent LIDAR [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 694-699.  
步志超, 郭磐, 陈思颖, 等. 相干测风激光雷达望远镜孔径及截断因子的优化分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 694-699.
- [8] Kavaya M J, Spiers G D, Frehlich R G. Potential pitfalls related to space-based lidar remote sensing of the Earth with an emphasis on wind measurement [C] // Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space: 2001. International Society for Optics and Photonics, 2001: 385-393.
- [9] Singh U N, Koch G, Yu J R, et al. Compact, high energy 2-micron coherent Doppler wind lidar development for NASA's future 3D winds measurement from space [J]. NASA Tech Rep, 2010.