

机载多普勒激光雷达指向影响分析及定标

李志刚¹, 孙泽中², 赵增亮², 竹孝鹏³

(1. 鲁东大学物理与光电工程学院, 山东 烟台 264000;

2. 北京应用气象研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:通过分析机载多普勒激光雷达测量模式特征, 考虑飞机姿态测量精度的影响, 仿真分析了径向速度误差, 以及多视线反演水平风场的反演精度, 按照文中仿真系统的输入参数, 不考虑雷达系统频率检测误差, 风速测量误差小于 0.3 m/s。该结果为机载多普勒激光雷达平台设计和测量模式的选择提供了参考。在此基础上, 提出了一种基于地面散射信号测量的激光指向定标方法, 并通过激光雷达实测数据进行验证, 指向定标精度优于 0.2°。

关键词:机载; 多普勒激光雷达; 风场反演; 指向定标; 地面信号

中图分类号:TN958.58 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.12.006

Influence analysis and calibration of laser pointing for airborne Doppler lidar

LI Zhi-gang¹, SUN Ze-zhong², ZHAO Zeng-liang², ZHU Xiao-peng³

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai 264000, China;

2. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China;

3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The radial velocity deviation and the horizontal wind accuracy from multi view retrieval are simulated and analysed with considering the characteristics of lidar measurement mode and the influence from the accuracy of flight attitude. The results show the wind measurement accuracy is less than 0.3 m/s under the input values in paper and disregarding the frequency discrimination error from lidar system. This is useful for the platform design of airborne lidar and the determination of wind measurement mode. Beside these, a new method based on ground return measurement for laser pointing calibration is proposed, and the calibration accuracy is better than 0.2° through the analysis of measurement data of airborne doppler lidar.

Key words: airborne; Doppler lidar; wind retrieval; pointing calibration; ground return

1 引言

大气风场是气象观测中的重要参数, 测风激光雷达是目前测量全球风场探测中最先进的技术, 它

能够以极高的时间、空间分辨率测量大气三维风场, 已经成为测风领域的发展方向, 国际上不断出现研制成功的测风激光雷达系统, 主要分为两大类: 相干

基金项目:某高分项目; 国家自然科学基金项目 (No. 41206003); 山东省自然科学基金项目 (No. ZR2012DQ010); 校基金项目 (No. LY2013028) 资助。

作者简介:李志刚 (1980 -), 男, 博士, 主要从事大气激光雷达探测方面的研究。E-mail: lizg_ldu@126.com

收稿日期:2016-05-12; **修订日期:**2016-06-19

探测激光雷达系统和直接探测激光雷达系统^[1-4]。为了提高探测空间覆盖率,机载探测系统相继产生,基于相干探测模式的机载多普勒测风激光雷达,可以实时提供 1 m/s 测量精度、~50 m 高度分辨率的大气风场信息,机载系统覆盖范围大大增强,能够有效解决大气风场探测数据的缺失,可以提高风切变和强湍流的探测、预警和预报能力保障,如日本 NICT 研发的机载 2 μm 相干激光雷达系统,德国空间中心研发的机载 2 μm 相干激光雷达系统,上海光机所研发的机载 1.5 μm 相干激光雷达系统都取得了实验性的进展^[5-8]。

机载多普勒激光雷达相比地基系统来说,高精度的解算激光指向是获得精确风场分布的前提条件,飞机姿态测量精度和初始指向偏差都会引起径向风速的测量误差,针对该问题,采用机载多普勒激光雷达的锥形扫描方式,仿真分析了飞行工作模式下的风场测量精度,并针对激光雷达初始指向偏差,提出了一种新的激光指向定标方法。

2 机载激光雷达工作模式

机载测风激光雷达通常为扫描测量方式,扫描方位、系统姿态都在不停地发生变化,由飞机运动引起的径向速度可以达几十米每秒,并叠加在径向风速之上,因此,精确地实现飞机速度校正是准确测量大气风场的首要条件。图 1 为机载多普勒激光雷达测量模式示意图及径向速度 VAD 显示(飞机速度 60 m/s,水平风 4 m/s,与飞行方向 135°夹角),可以看出,飞机速度的引入是径向速度的主要贡献来源,反演水平风场,必须从测量的激光径向速度中剔除飞机速度引入值(飞机速度校正),然后通过多个方位校正后的径向风速合成计算水平风速、风向^[9-10]。

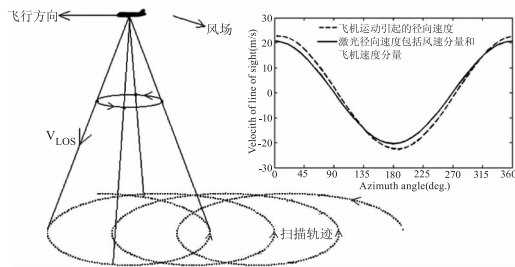


图1 机载多普勒激光雷达测量方式及径向速度显示示意图

Fig.1 The measurement model of airborne doppler lidar and the show of radial velocity

对于飞机速度校正、水平风场反演来说,激光束的指向误差是系统探测误差的主要来源,激光

束的指向误差主要源自于惯导系统的姿态测量误差和激光的初始指向偏差,因此,进行机载多普勒激光雷达测量精度的分析,主要是分析姿态误差对系统测量精度的影响,同时需要进行激光初始指向定标,获得指向修正系数,用于提高三维风场矢量反演精度。

3 激光指向误差引起的风场精度分析

机载多普勒激光雷达风场反演流程框图如图 2 所示,姿态、方位、速度信息的解算是数据预处理和数据校正的前提条件^[11-12]。

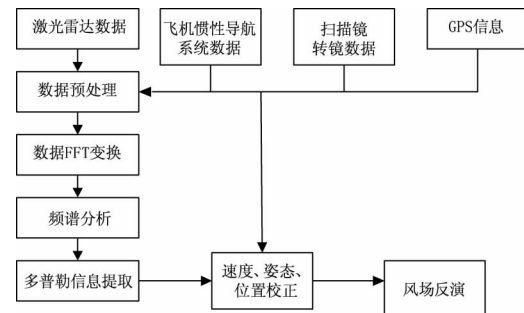


图2 机载多普勒激光雷达风场反演流程框图

Fig.2 The diagram of wind derivation by airborne doppler lidar

考虑飞机载体坐标系和地球坐标系,激光雷达系统在载体坐标系下的激光束俯仰角为 θ_0 (通常为 20°),方位角为 ϕ_0 (通常设 4 ~ 8 个方位实现圆周扫描),激光束在载体坐标系下的指向 LOS_0 为:

$$LOS_0 = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_0) \cos(\phi_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\phi_0) \\ -\sin(\theta_0) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, x_0, y_0, z_0 分别代表激光指向单位矢量在载体坐标系下三个坐标轴 x, y, z 方向的投影大小,激光雷达系统安装在飞机内部时,左右方向与机翼水平,但在飞机前后方向,为了抵消飞机正常飞行状态下的攻击角(平飞状态下仍存在 $3^\circ \sim 5^\circ$ 的攻击角),因此激光雷达系统安装到载体时通常会设置一个偏向飞机尾部的仰角 α ,激光束在载体坐标下的指向 LOS'_0 计算为:

$$LOS'_0 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta_0) \cos(\phi_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\phi_0) \\ -\sin(\theta_0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

飞机起飞和降落过程中,在飞机的前后方向存在较大的加速度,会一定程度上对角度 α 带来变化,该误差的存在也就影响了激光初始指向,

进而会加大风场测量误差,这就是为什么需要到初始指向定标的原因。在飞机飞行测量过程中,三个测量姿态角的实时变化,包括偏航角 ψ ,翻滚角 θ ,俯仰角 γ (坐标、角度定义方法与通用航空定义相同),采用欧拉角法的坐标系转换方法,得

$$A = C_3 C_2 C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\gamma - \sin\psi\cos\gamma & \sin\psi\sin\theta\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma & \cos\theta\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \sin\psi\sin\theta\cos\gamma - \cos\psi\sin\gamma & \cos\theta\cos\gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

LOS 便是激光束单位矢量在地球坐标系下三个坐标方向的分矢量。飞机速度的校正主要是从激光雷达探测的径向速度中剔除飞机速度的引入值,如公式(5)所示:

$$LOS V_w = LOS V_l - LOS V_p \quad (5)$$

其中, $LOS V_w$ 为大气水平风场在激光径向方向的分速度; $LOS V_l$ 为多普勒激光雷达探测的径向速度值(包含了风场和飞机速度的双重引入); $LOS V_p$ 为飞机速度在激光径向方向上的分速度, $LOS V_p$ 可以计算为:

$$LOS V_p = \overrightarrow{LOS} \cdot \vec{V}_p \quad (6)$$

式中, V_p 为飞机速度,利用惯性导航系统数据、GPS 测量数据整合解算。

最后,通过多个方位校正后的径向风速 $LOS V_w$ 反演水平风场。从公式(5)可以看出,风场反演误差来源包括:激光雷达径向速度 $LOS V_l$ 测量误差,该误差主要取决于激光雷达回波频谱数据的提取精度,由激光雷达系统的参数设置决定,本文不予考虑;飞机速度引入值 $LOS V_p$ 的校正误差;水平风场反演产生的误差。从上述公式(3)~(6)分析可知,飞机姿态角(ψ, θ, γ)的测量误差为风场测量的主要误差源。

图3 为仿真计算的姿态测量精度与径向风速误差的关系(设初始风场 12 m/s,初始风向北偏东 45°,飞机速度按 Y12 机型考虑巡航速度约为 70 m/s),通过增加三个姿态测量角的随机误差,统计计算由径向风速误差,当三个姿态角测量精度都为 0.5°时,径向风速误差小于 0.5 m/s。该误差主要由于姿态误差引起,大小还与飞机的飞行速度有关,与初始风场的输入大小关系不大。以常规的高精度惯性导航系统(航向精度 0.5°,横

滚/俯仰精度 0.2°)为例,飞机速度 70 m/s 时,由飞机姿态测量误差引起的激光径向风速误差小于 0.2 m/s,有效地提高姿态测量精度,能够降低大气风场的测量误差。

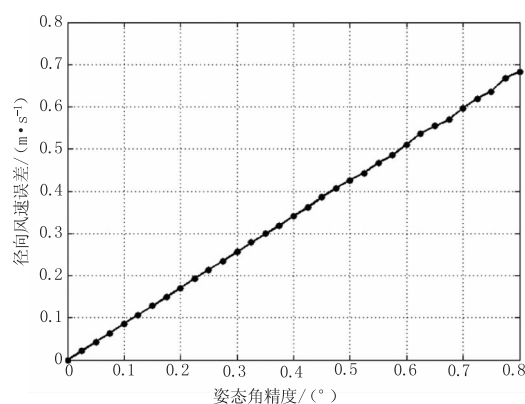


图3 姿态测量精度与径向风速误差

Fig. 3 The attitude measurement accuracy and the error of radial velocity

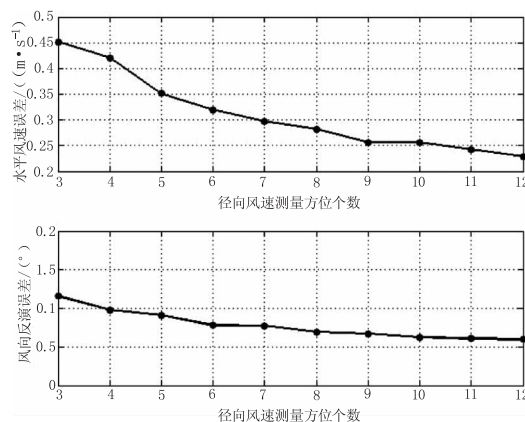


图4 径向风速测量方位个数与风场反演误差

Fig. 4 The number of radial velocity measurements and the error of wind retrieval

三维风场剖面测量是通过多组径向风速反演得到^[9-10],按照理论计算,一个周期内任意3组线

性无关的径向风速测量都可以解算一个对应的水平风场,但其反演精度与采用的视线风速的测量方位个数有关系。通过设定机载激光雷达初始参数输入并考虑姿态测量精度,如表1所示,图4表示了在20 m/s、东北风向的初始水平风场下,视线风速的测量方位个数与水平风场反演误差的对应关系,当扫描方位个数为8个时,水平风速的反演误差小于0.3 m/s (RMS),风向误差小于1° (RMS)。当扫描方位个数大于8个时,随着探测方位数量的增加,反演的精度变化不大,在实际的激光雷达测量模式中,可不予考虑。图5也给出当扫描方位个数为8个时1000次统计计算的水平风场的偏差大小,风速风向的最大偏差分别小于1 m/s和2°。

表1 仿真运算的初始参数输入

Tab.1 Initial parameters input for simulation

激光雷达系统	激光俯仰角:20.0° 测量方位角:一周按照方位个数均分
载荷平台	翻滚/俯仰角精度:0±0.2° 偏航角精度:0±0.5° 飞机飞行速度:70 m/s
初始水平风场	风速1~60 m/s,风向N-E

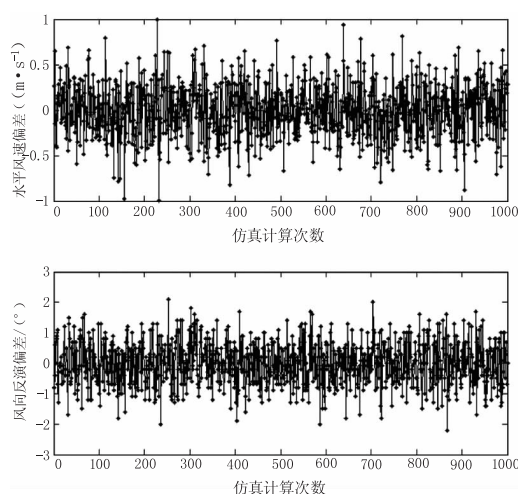


图5 8个方位扫描探测的风场反演偏差

Fig.5 The deviation of wind retrieval using 8 azimuths scanning

机载多普勒激光雷达的风场测量精度除了与平台姿态测量精度、风场测量模式有关,还与风场的测量范围有关,考虑表1中的仿真运算初始场输入参数,图6给出了不同风速条件下,利用8个方位反演的水平风速和风向误差,由结果可以看出,随着风速的提高,水平风速的反演误差变大,但到风速值60 m/s时仍小于0.4 m/s (RMS),风速误差的起伏

源于姿态角误差的存在;风向的反演误差随风速的提高而降低,低风速区域变化明显,高风速区域误差趋于稳定。

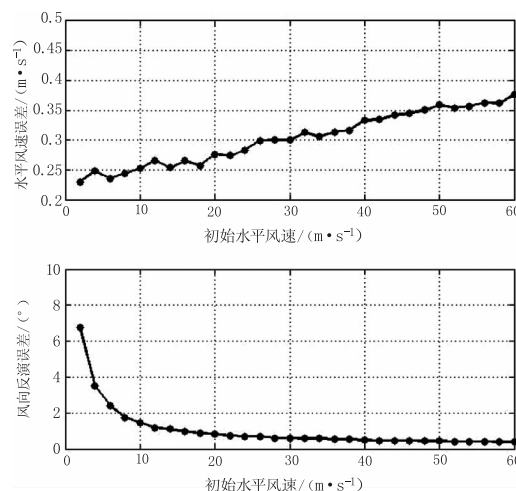


图6 风速大小与风场测量精度的关系

Fig.6 The wind speed and the accuracy of wind measurement

4 一种新的激光指向定标方法

由公式(2)可知,激光束初始指向角 α 的变化(安装误差,以及在起飞和降落时带来的变化)会引起激光指向 LOS 的计算偏差,进而会加大风场测量误差,因此必须进行激光指向定标,获得指向角度 α 修正参数。

机载多普勒激光雷达在飞机平台匀速平稳飞行过程中,探测信号包含地面强散射回波信号,通过地面信号的频谱数据可以解算激光地面作用点的径向速度 $LOS V_g$,该速度是飞机速度 V_p 在激光实际空间指向下投影的大小,意义等同于飞机速度校正,与利用飞机姿态数据计算的 $LOS V_p$ 作比较,两个结果的虽解算方法完全不同,但代表的意义相同。不考虑姿态测量误差的引入,其差值只依赖于运算 $LOS V_p$ 时的初始飞机指向角度 α 的大小。因此,可以利用 $LOS V_g$ 和 $LOS V_p$ 的偏差作为参考实现激光指向初始指向角 α 的定标。具体实现方法如图7所示。

为了提高指向定标的灵敏度($\propto (LOS V_g - LOS V_p) / \Delta \alpha$),激光雷达的光束测量方位定为朝机头方向。具体实现步骤如下:

1) 解算由飞机运动引起的径向速度 $LOS V_p$ 。利用飞机的平台姿态测量数据、光束在载体坐标系下的飞机指向数据,用公式(1)~(6)解算激光束在地球坐标下的指向以及由飞机运动引起径向速度分量 $LOS V_p$ 。

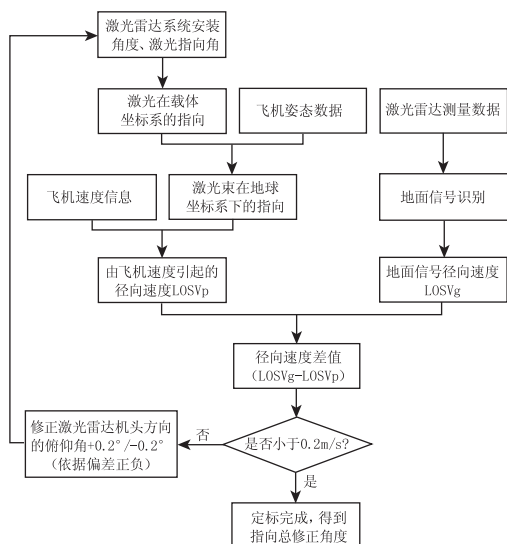


图7 机载激光雷达激光指向的标定方法

Fig.7 Calibration method of laser pointing of airborne lidar

2) 解算机载多普勒激光雷达地面信号的径向速度 $LOSV_g$ 。利用地面信号的频谱数据解算激光雷达地面信号的径向速度 $LOSV_g$ [9]。

3) 利用径向速度偏差作为参考递进修正激光初始指向角 α , 实现激光指向的定标。计算 $LOSV_p$ 与 $LOSV_g$ 的差值平均值 $LOSV_d$, 采用设定的 0.2° 的指向修正分辨率, 逐次累加修正飞机指向角 α , 直到 $LOSV_d$ 最小化, 得到激光指向的修正角, 完成激光指向的定标。

为了实验验证该方法的可行性, 本文利用了机载多普勒激光雷达的实测数据进行了具体分析。激光雷达系统为上海光机所研制的机载相干多普勒激光雷达, 工作波长 $1.5 \mu\text{m}$, 激光能量 $\sim 500 \mu\text{J}$, 重复频率 10 kHz , 望远镜口径 100 mm , 垂直分辨率 90 m 。系统飞行实验中同时获取了地面散射信号, 利用该定标方法, 计算结果如图8所示, 初始状态为定标前, $LOSV_p$ 的 $LOSV_g$ 的差值较大 ($\sim 2 \text{ m/s}$), 通过递进式修正角度 α , $LOSV_p$ 逐次逼近 $LOSV_g$, 直到 $LOSV_d$ 满足设定的阈值要求, $LOSV_p$ 与 $LOSV_g$ 具有较好的一致性, 均差 0.03 m/s , 标准偏差 0.15 m/s , 说明了姿态运算中采用的飞机指向角和激光在地球坐标下的实际指向相吻合, 通过该方法可以实现飞机指向角度 α 的修正, 完成激光指向定标。通过计算指向角度和速度差值得对应比例关系, 0.15 m/s 的速度偏差对应为 0.13° 的定标误差。

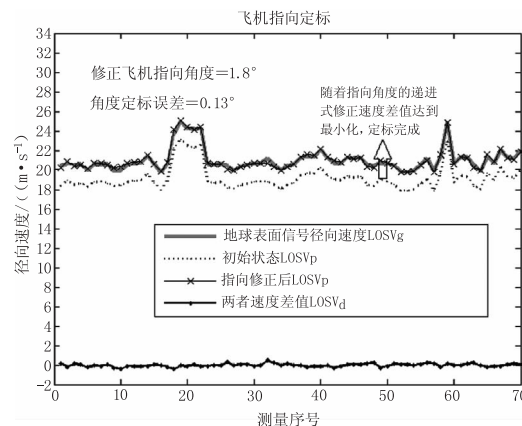


图8 机载多普勒激光雷达激光指向标定分析

Fig.8 Analysis of laser pointing calibration of airborne doppler lidar

5 结论

针对机载多普勒相干激光雷达系统的测量模式, 仿真分析了风场测量精度, 通过增加三个姿态测量角的随机误差, 统计分析了姿态测量精度与径向风速测量精度的关系、风场反演模型中径向测量方位个数与风场测量精度的关系、速度测量范围与风场测量精度的关系等, 为系统平台参数设计和测量模式的设定提供参考依据。同时, 针对机载系统的激光指向偏差问题, 提出了一种利用地面散射信号测量实现激光指向的定标方法, 将地面散射信号的径向速度作为参考, 递进式修正姿态数据解算中的初始指向角, 通过激光雷达的实测数据分析, 结果表明, 定标误差小于 0.2° 。

参考文献:

- [1] Werner C, Flamant P H, Reitebuch O, et al. Wind Infrared Doppler Lidar Instrument[J]. Optical Engineering, 2001, 40:115-125.
- [2] Liu Z S, Liu B Y, Li Z G, et al. Wind measurements with incoherent Doppler lidar based on iodine filters at night and day[J]. Appl. Phys. B, 2007, 88(2):327-335.
- [3] B M Gentry, H Chen, S X Li. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. Optics Letters, 2000, 25:1231-1233.
- [4] McKay J A, Rees D. Space-based Doppler wind lidar: Modeling of edge detection and fringe imaging Doppler analyzers[J]. Advances in Space Research, 2000, 26(6):883-891.
- [5] Scott M Spuler, Dirk Richter, Michael P Spowart, et al. Optical fiber-based laser remote sensor for airborne measurement of wind velocity and turbulence[J]. Applied Optics, 2011, 50(6):842-851.

- [6] Reitebuch O, Chinal E, Durand Y, et al. Development of an airborne demonstrator for ADM-Aeolus and campaign activities[J]. 22nd Int. Laser Radar Conference, Matera, Italy, 2004:1007 – 1010.
- [7] Kavaya M J, Beyon J Y, Koch G J, et al. The Doppler aerosol wind (DAWN) airborne, wind-profiling coherent-detection lidar system; overview and preliminary flight results[J]. J. atmos. oceanic Technol, 2014, 31(4):826 – 842.
- [8] W F Diao, X Zhang, J Q Liu, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(07):71 – 74.
- [9] DIAO Weifeng, LIU Jiqiao, ZHU Xiaopeng, et al. Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least square retrieval method and validation experiment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, (09):330 – 335. (in Chinese)
- 刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究[J]. 中国激光, 2015, (09):330 – 335.
- [10] LI Zhigang, LIU Zhishen, ZHU Jinshan, et al. Reitebuch Oliver. Wind retrieval algorithms for the wind products of the airborne coherent Doppler LIDAR[J]. Dragon 3 Mid-Term Results Symposium, 2014, V724.
- [11] ZHU Jinshan, LI Zhigang, LIU Zhishen. Horizontal wind velocity retrieval using a Levenberg-Marquardt algorithm for an airborne wind lidar[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(2):026009.
- [12] LI Zhigang, LIU Zhishen, SONG Xiaoquan, et al. Data correction algorithm of airborne Doppler lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12):196 – 201. (in Chinese)
- 李志刚, 刘智深, 宋小全, 等. 机载多普勒激光雷达数据校正算法[J]. 光学学报, 2013, 33(12):196 – 201.