

基于法布里-珀罗标准具的测风激光雷达 探测数据分析

王国成^{1,2} 孙东松³ 杜洪亮² 舒志峰¹ 唐磊¹ 胡冬冬¹ 徐文静¹ 董吉辉¹ 窦贤康³

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

² 中国人民解放军炮兵学院三系, 安徽 合肥 230031; ³ 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026

摘要 利用多普勒测风激光雷达(DWL)进行实地风场探测,对探测数据进行深入分析。介绍了基于三通道法布里-珀罗(FP)标准具的多普勒频率检测等基本原理,给出了DWL结构组成和系统参数;并分别给出了该DWL与风廓线雷达(WPR)低空对比探测数据、与气球探空仪高空对比探测数据,结果表明,低空数据的风速偏差在0.1~1.2 m/s,风向偏差在1°~9°之间,高空数据的风速偏差在0.1~2 m/s之间,风向偏差在1°~12°之间,表现出良好的一致性;对DWL数据精度进行分析,得出光束入射角、发散角、信噪比和探测器是影响精度主要因素的结论,从标准具透射率扫描拟合曲线入手,计算得出该型DWL实际探测偏差值高出理论值2.07%。

关键词 激光遥感;多普勒测风激光雷达;法布里-珀罗标准具;瑞利散射;数据分析

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0314002

Analysis of Doppler Wind Lidar Detecting Data Based on Fabry-Perot Etalon

Wang Guocheng^{1,2} Sun Dongsong³ Du Hongliang² Shu Zhifeng¹
Tang Lei¹ Hu Dongdong¹ Xu Wenjing¹ Dong Jihui¹ Dou Xiankang³

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

² Third Department, Artillery Academy of Chinese People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China

³ School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Doppler wind lidar (DWL) is the tool with high accuracy and high temporal and spatial resolution. Wind has been detected with DWL and its data are analyzed. The fundamental of transmission of laser in atmosphere based on aerosol and molecule scattered and principle of Rayleigh Doppler wind lidar discriminating frequency based on Fabry-Perot (FP) etalon, the framework and parameters of the DWL are presented. The results from DWL are compared with wind profile radar (Airdal 6000) and Balloon, in the lower atmosphere its maximum wind speed error is 1.2 m/s and direction error is 9°, its minimum wind speed error is 0.1 m/s, while in the higher atmosphere its maximum wind speed error is 2 m/s and direction error is 12°, its minimum wind speed error is also 0.1 m/s. Experimental results indicate good agreement. The precision of the DWL is analyzed, and the incidence angle, emanative angle, signal noise ratio and parameters of detector are the master factors affecting the precision. From the transmission curve of FP etalon, the actual error of DWL is calculated and it is 2.07% higher than the simulated value.

Key words laser remote sensing; Doppler wind lidar; Fabry-Perot etalon; Rayleigh scattering; data analysis

OCIS codes 010.0280; 010.1110; 010.1310

收稿日期: 2010-09-07; 收到修改稿日期: 2010-11-22

基金项目: 国家 863 计划、中国科学技术大学项目(ZC9850290093)和炮兵学院项目(2010XYJJ-072)资助课题。

作者简介: 王国成(1975—),男,博士研究生,主要从事激光遥感探测技术方面的研究。E-mail: guochengw@sina.com

导师简介: 孙东松(1962—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事多普勒测风激光雷达方面的研究。

E-mail: sds@ustc.edu.cn

1 引言

现今的气象研究、数值天气预报、国防高技术武器系统的气象保障、靶场气象探测等需求都对大气风场探测提出了较高的要求,气象预报的准确性依赖于大气时空演变的计算模型和描述大气初始状态的输入数据。传统的遥感探测模式在时间分辨率、空间分辨率、探测范围和探测精度上与新的需求都存在不同的差异,提高对大气运动状态、天气变化和大气模型等完善程度的较好办法是采用新的遥感探测方式,对传统遥感数据加以弥补。多普勒测风激光雷达(DWL)具有高精度、高时空分辨率的特征,是迄今比较成熟和有效的直接多普勒探测方法,它能够实现从地面到平流层范围的风场探测,接收机是多普勒测风激光雷达的核心器件,它的性能参数直接影响着测风激光雷达系统的时空分辨率和探测精度。

近年来,国外测风激光雷达发展很快,美国、欧洲和日本的一些研究机构已经纷纷做出测风激光雷达,分别采用地基、车载等方式应用到航空、航天的气象保障或大气研究中^[1]。典型的直接探测系统有:美国 NASA 的 GLOW 系统^[2]、美国 MAC 的 GroundWinds 系统^[3]和法国 OHP 的激光雷达系统^[4]等。其中 GLOW 采用法布里-珀罗(FP)标准具双边缘技术,测量的有效大气风廓线为 1.8~35 km 的高度,垂直分辨率为 178 m,风速测量误差在 0.4~6 m/s 之间。GroundWinds 系统接收机采用条纹 FP 标准具+CLIO 技术,水平风速误差在 8 km 高度以下小于 2 m/s;8~13 km 小于 10 m/s。OHP 系统的接收机均采用 FP 标准具双边缘技术,系统测量到了 25~60 km 的中层大气水平风速一维分量的分布。国内青岛海洋大学报道了海面上空低对流层大气风场探测系统^[5,6],它的接收机使用的是单边缘碘吸收滤波器,速度、风向测量误差在 2 km 时分别为 1 m/s 和小于 20°。中国科学院安徽光学精密机械研究所报道了关于米氏散射的测风激光雷达^[7]。

DWL 利用光的多普勒效应,测量激光光束在大气中传输其回波信号的多普勒频移来反演空间不同高度处的风速分布。本文报道了基于三通道 FP 标准具的 DWL 系统,给出了各分系统参数,并且进行了仿真。通过实地测量与对比实验,给出了对比实验结果,并且进行了深入的风速测量误差分析。

2 测风基本原理

大气中含有大量的气溶胶和分子等各种介质,

激光在大气中传输时,会受到气溶胶和分子的后向散射,激光雷达接收机接收到它的后向散射光,利用 FP 标准具对不同高度的后向散射光分别进行鉴频,求得多普勒频移。多普勒频移可表达为

$$\nu_d = \nu_0 2V \cos \theta / c = 2V_r / \lambda_0, \quad (1)$$

式中 V 为粒子平均速度, ν_0 为激光工作频率, ν_d 为多普勒频移, $V_r = V \cos \theta$ 为径向风速分量。当 V_r 的方向与发射激光方向相对时,取正;反之取负。根据(1)式求得径向风速,采用多方向扫描进行矢量合成,进而求得所需风场数据^[8]。

根据气溶胶与瑞利散射谱的特点,系统采用三通道 FP 标准具进行频率分析,首先将激光发射频率锁定在能量通道的陡峭边缘半峰全宽处,进行频率跟踪与锁定;然后使用两个边缘通道的双边缘对接收的大气后向散射激光信号进行处理并与锁定通道频率进行对比,得到多普勒频移量^[9~12]。当存在多普勒频移 ν_d 时,标准具透射率谱及气溶胶、分子后向散射谱如图 1 所示。

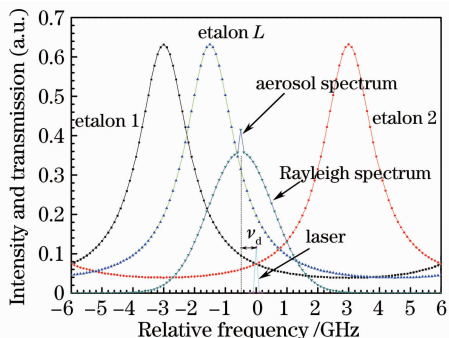


图 1 三通道标准具透射率及散射谱图

Fig. 1 Spectra of etalon transmission and backscatter

3 系统组成

DWL 系统设计探测范围为平流层风场探测,包括 4 个子系统:发射系统、接收系统、发射接收光学系统和控制系统^[13]。发射系统包括一台激光器和扩束导光系统,根据分子的后向散射能量与波长 λ^{-4} 成正比,激光器的波长选为 355 nm;发射接收光学系统包括望远镜系统和二维扫描系统;控制系统主体为一台工控机,通过程序控制激光器电源、扫描控制器、采集卡工作状态、标准具控制器;接收系统由标准具、导光系统和光电探测器等组成。系统总体结构如图 2 所示。

接收机是 DWL 的主要鉴频设备,由三通道标准具、导光系统和光子计数式探测器等组成。接收机结构示意图如图 3 所示。FP 标准具的外侧双通

道为边缘通道,中间通道为锁定通道;另外,在进入标准具前均由分光棱镜分出部分光进行能量探测。

DWL 的发射系统、收发光学系统和接收系统参数如表 1 所示。

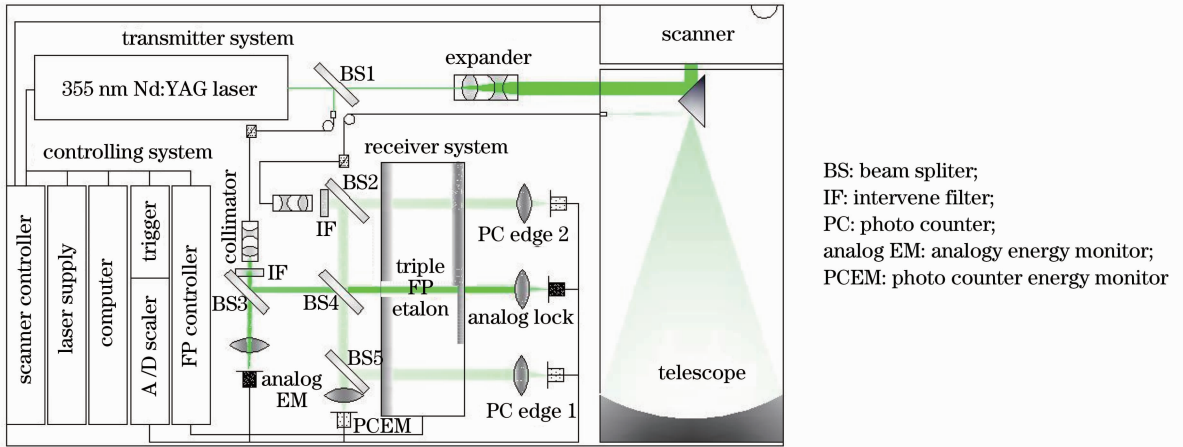


图 2 测风激光雷达系统结构示意图

Fig. 2 Framework of DWL

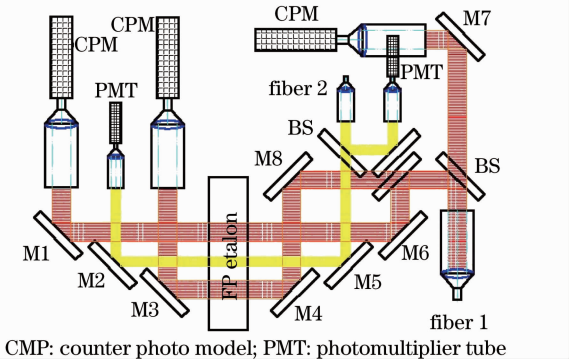


图 3 接收机结构原理图

Fig. 3 Framework of receiver

表 1 测风激光雷达系统参数

Table 1 Parameters of Doppler wind lidar systems

	Parameter	Value
Transmitter	Wavelength / nm	355
	Laser linewidth	200 MHz at 355 nm
	Laser energy (pulse) / mJ	400
	Laser repetition frequency / Hz	30
Transceiver	Telescope/scanner aperture / cm	45
	Field of view / mrad	0.2
	Optical efficiency / %	>85
	Scan range / (°)	360×90
	Filter bandwidth / nm	0.15
	Filter peak transmission / %	>40
	Etalon free spectral range / GHz	12
Receiver	Etalon FWHM / GHz	1.7
	Edge channel separation / GHz	5.1
	Locking channel separation / GHz	1.7
	Etalon peak transmission / %	>60
	CPM quantum efficiency / %	21

4 实验结果与分析

该型 DWL 分别在合肥、新疆做了实地测风实验,性能稳定,为了表征系统的探测精度,与风廓线雷达 (WPR), Balloon 分别做了对比实验。

4.1 DWL 与 WPR, Balloon 对比实验

该系统于 2009 年 12 月 5 日在合肥某研究所与 WPR (Airdal6000) 进行了对比实验,二者地理位置相距 200 m 以内。由于该型 WPR 风场探测范围在 1~8 km, 该 DWL 的设计探测高度为 10~40 km, 需要将 DWL 的探测模式调整为低对流层大气探测模式, 以实现对比实验。将激光单脉冲能量降低, 距离分辨率调整为 250 m, 单方向脉冲累积时间为 2 min, 天顶角为 60°, 采用间隔 90° 的四波束扫描方式进行矢量合成, 得到水平风速和风向。二者在

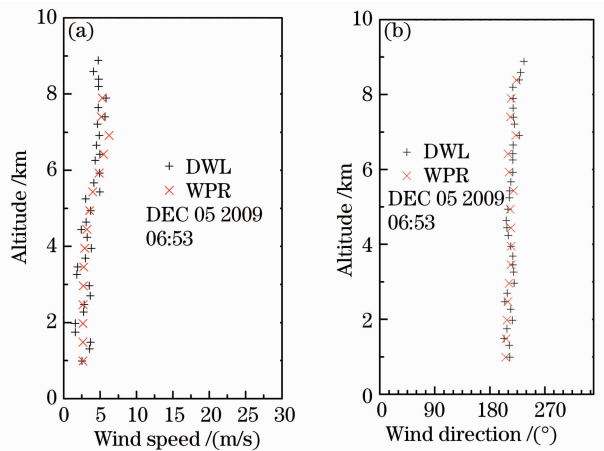


图 4 DWL 和 WPR 风场数据

Fig. 4 Horizontal wind speed and direction profiles measured by DWL and WPR

10 km以内的探测结果如图 4 所示,探测结果显示了良好的一致性。

2010 年 8 月 14 日,使用 DWL 对设计探测范围进行风场探测,将单脉冲能量加强,在 20 km 以内的距离分辨率设为 250 m,20 km 以上的距离分辨率调整为 500 m,单方向脉冲累积时间为 6 min。与实时的 Balloon 探测结果对比,验证探测结果的精确性。探测结果如图 5 所示。结果表明二者风场数据具有良好的一致性。

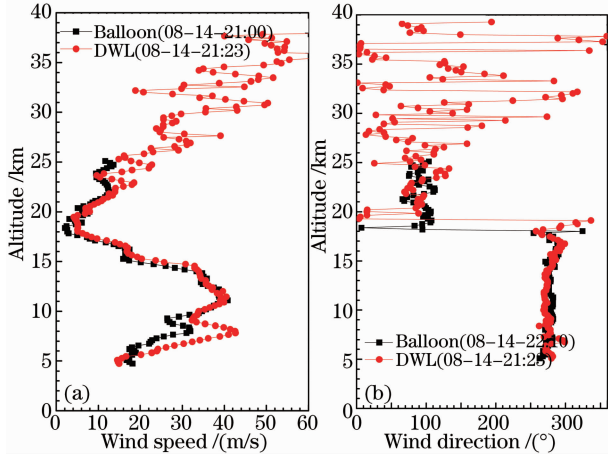


图 5 DWL 和 Balloon 风场数据

Fig. 5 Horizontal wind speed and direction profiles measured by DWL and Balloon

4.2 数据分析

图 4 的风场数据中,DWL 与 WPR 在 1~8 km 范围内探测的水平风速与风向具有较好的一致性,所有风速对比数据的偏差在 0.1~1.2 m/s 之间,风向对比数据的偏差在 1°~9°之间;从图 5 数据中可以看出,DWL 给出的数据与 Balloon 的数据吻合很好,同时探测到了当时东、西风带转换的高度与风速大小和方向,风速数据偏差位于 0.1~2 m/s 之间,风向数据偏差位于 1°~12°之间。下面针对 DWL 的风场探测数据精度进行深入分析。

4.2.1 DWL 探测偏差产生因素

该系统设计为同时对大气中的分子和气溶胶的后向散射光进行探测,大气中瑞利后向散射光、米氏后向散射光通过标准具的透射率是入射光和标准具透过函数的卷积,分别表示为

$$T_M(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{Mie}(\nu')h(\nu' - \nu)d\nu', \quad (2)$$

$$T_R(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{Ray}(\nu')h(\nu' - \nu)d\nu', \quad (3)$$

式中 f_{Mie} 是米氏散射光谱, f_{Ray} 是分子散射光谱。标

准具的透射率函数为

$$h(\nu) = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{2\pi nd\nu}{c} \cos \theta\right)}, \quad (4)$$

式中 n 是平板间介质的折射率, d 为平板间距, F 为精细度, ν 为入射光频率, R 为平板间反射率, L 为标准具平板的吸收损耗, θ 是入射光与标准具反射表面法线的夹角。系统的测量误差表示为^[9]

$$\epsilon_\nu = \frac{1}{\theta_\nu R_{SN1}}, \quad (5)$$

式中 θ_ν 为标准具的速度灵敏度, R_{SN1} 为系统的信噪比(SNR),标准具的速度灵敏度为

$$\theta_\nu = \frac{2}{\lambda T(\nu)} \frac{dT(\nu)}{d\nu}. \quad (6)$$

式中 $T(\nu)$ 为透射率函数, λ 为入射光波长。

光子计数探测方式的信噪比 R_{SN2} 可以表示为

$$R_{SN2} = \sqrt{\sum_i \left[\frac{\sqrt{m} N_i T_i(\nu)}{\sqrt{N_i T_i(\nu) + N_R + N_b}} \right]^2}, \quad (7)$$

式中 i 表示光信号入射到标准具前后的接收探测器通道数, N_R 表示接收到的瑞利信号的光子数, N_b 是接收背景光的光子数, m 是累计测量脉冲数。

应用(2)~(7)式和表 1 的参数理论计算得出该系统的径向风速测量偏差如图 6 所示。

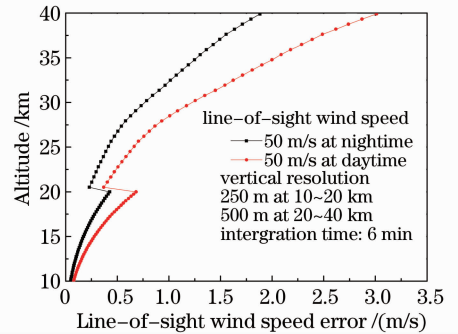


图 6 测风激光雷达的径向风速测量精度

Fig. 6 Measurement error of DWL

从测量偏差的理论计算中可以看出,影响测量结果的主要因素有:标准具设计参数、入射光与标准具法线的夹角、入射光的发散角和信噪比。其中标准具的参数在出厂时通过质量检测可以保证,入射光的入射角与发散角是光路调试的重要指标。信噪比对探测精度有重要影响,图 5 对应的信噪比如图 7 所示,系统在整个探测高度上两个边缘通道的信噪比均符合要求^[13,14],但图 5 对应的低层数据与气球探空仪给出的数据偏差较大,主要是由探测器处于饱和状态造成的。

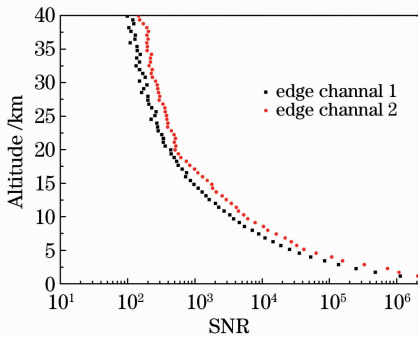


图7 测风激光雷达的边缘通道信噪比

Fig. 7 Edge channel SNR of DWL

4.2.2 FP 标准具透射率扫描曲线变化

在风场探测之前,都要使用脉冲光对标准具透射率进行扫描,扫描拟合曲线的特征体现着标准具的状态。在图5对比实验前对标准具透射率进行扫描获得的光斑如图8所示,拟合透射率曲线如图9所示。

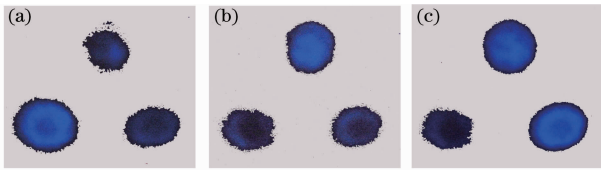


图8 三通道光斑照片

Fig. 8 Photos of three channels facula

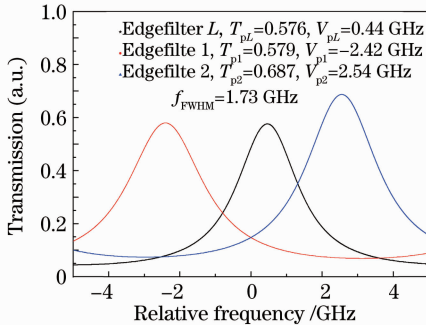


图9 透射率曲线

Fig. 9 Transmission curves scanned

图8反映了三通道标准具设计时通道峰值间隔所体现的物理特性,三通道光斑亮暗交替变化。图9反映了标准具三通道透射率的状态,三通道的半峰全宽 $f_{FWHM} = 1.73$ GHz, Edge etalon 1 的峰值位于 -2.42 GHz, Edge etalon 2 的峰值位于 2.54 GHz, 二者的峰值间距为 4.96 GHz, 对应的设计标准具参数为 1.7 GHz 和 5.1 GHz, 从而对探测精度产生了影响。

假设光斑是均匀的,在零多普勒频移的情况下,在信号散粒噪声极限下,算得径向风速的测量误

差^[12,15]为

$$\epsilon_v = \left\{ \left[\frac{N_R T_R(\nu_0, T_a)}{4} \right]^{1/2} \frac{4}{\lambda} \frac{1}{T_R(\nu, T_a)} \left. \frac{\partial T_R(\nu, T_a)}{\partial \nu} \right|_{\nu=\nu_0} \right\}^{-1}, \quad (8)$$

式中 $T_R(\nu, T)$ 为瑞利透射率函数, T_a 为温度。对于高斯分布的瑞利散射光谱信号,在理想的鉴频器下测量径向风速的极限误差(CRLB)为

$$\epsilon_{id} = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta \nu_R}{\sqrt{2N_R}}, \quad (9)$$

式中 $\Delta \nu_R$ 为瑞利谱宽。

相对测量误差定义为

$$\epsilon = \epsilon_v / \epsilon_{id}. \quad (10)$$

求得 $T_a = 226.5$ K 时的瑞利散射谱,当 FWHM 分别为 1.7 GHz 和 1.73 GHz 时,相对测量误差随两个边缘通道标准具峰值间隔的变化关系如图10所示。

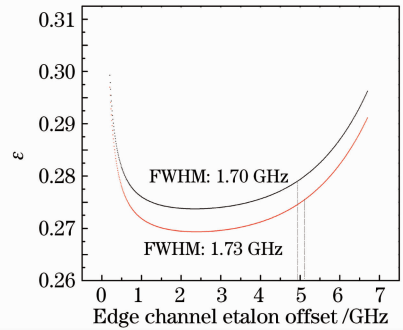


图10 1.70 GHz,1.73 GHz 带宽下相对误差随两个边缘通道标准具峰值间隔的变化关系

Fig. 10 Relation between error and interval of etalon channel at 1.70 GHz and 1.73 GHz

图10表明在设计值 FWHM 为 1.70 GHz,边缘通道峰值间隔为 5.1 GHz 时,相对误差值为 0.2751 ;在标准具透射率扫描拟合曲线 FWHM 值为 1.73 GHz,边缘通道峰值间隔为 4.96 GHz 时,相对误差值为 0.2808 。由此算得,该型 DWL 实际测量偏差值将比理论设计偏差值增大了 2.07% 。

光束入射角、发散角是引起标准具透射率曲线的 FWHM 值和边缘通道峰值间距变化的主要因素,入射角、发散角与透射率曲线的关系如图11所示。入射角使得透射率曲线峰值位置发生偏移;光束发散角影响明显,随着发散角的增大,带宽增大,峰值降低,速度灵敏度将会降低。如果将由此引起的系统测量误差控制在 1% 之内,则光束入射角、发散角均应控制在 1 mrad 以内。

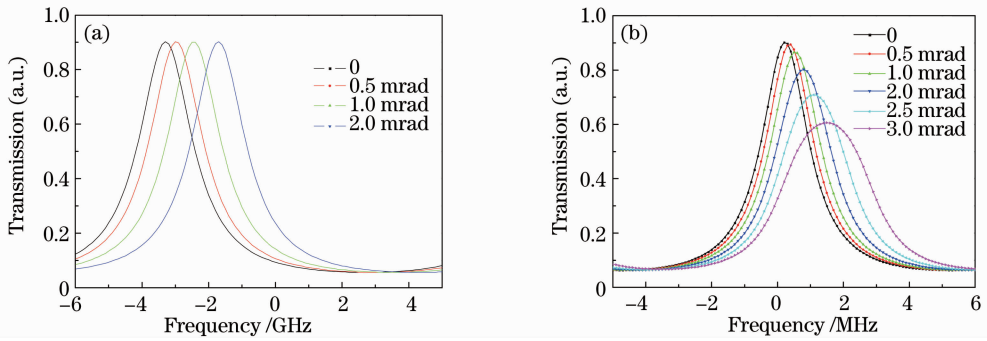


图 11 (a)透射率与光速入射角的关系,(b)透射率与光束发散角的关系

Fig. 11 (a) Relation of transmission and incidence angle, (b) relation of transmission and divergence angle

4.2.3 探测器响应

探测器的状态对多普勒测风激光雷达实验探测精度有着重要影响。该型 DWL 使用的是光子计数式探测器 MP943,在线性响应工作状态下,探测器的输出与输入的光强成正比。当输入光强达到线性响应上限时,它将处于饱和状态,输出是非线性的,并且是滞后的,会有一个非零的残余信号持续几十微秒,这将对高强脉冲后信号的探测是致命的扭曲。MP943 在工程使用中最大记数率能够达到 4 M/s。

图 4 实验中,探测模式为低对流层大气探测模式,接收的光子强度均低于探测器饱和上限;图 5 实验中,高度 9 km 以下二者对比数据相差较大,最大的风速偏差为 10 m/s,最大的风向偏差达到 30°。主要原因是:DWL 工作在高层大气探测模式,激光器单脉冲能量为 400 mJ,在 8.15 km 高度处回波光光子强度为 4.003 M/s,探测器已处于饱和状态,并且随着高度的降低,光强会愈强,所以在 8 km 以下高度的探测数据偏差较大。

从理论与实验数据分析可知,DWL 的风场探测精度受到多方面的影响,但是主要受到标准具设计参数、入射光与标准具法线的夹角、入射光的发散角、信噪比和探测器状态等因素的影响。

5 结 论

简要介绍了多普勒测风的基本原理,给出了多普勒测风激光雷达系统的组成和参数,进行了实地风场探测实验,并与微波风廓线雷达、气球探空仪分别做了低空风场探测数据对比和高层探测数据对比实验。在 DWL 风场探测数据分析中,给出了探测偏差理论影响因素,分别为标准具设计参数、入射光与标准具法线的夹角、入射光的发散角、信噪比;在实验探测中得到,探测器的状态对探测结果影响很大。对该型多普勒测风激光雷达的性能进行了分

析,从标准具透射率扫描拟合曲线特征入手,它的带宽值为 1.73 GHz,边缘通道峰值间距为 4.96 GHz,与标准具相应设计参数增加 0.03 GHz,减少 0.14 GHz,通过计算,探测误差相应增加 2.07%。

参 考 文 献

- 1 Shoken Ishii, Kohei Mizutani, Hirotake Fukuoka *et al.*. Coherent 2 μm differential absorption and wind lidar with optively cooled laser and two-axis scanning device[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(10): 1809~1817
- 2 B. Gentry, H. Chen. Profiling tropospheric winds with the goddard lidar observatory for winds (GLOW) [C]. Proc. of the 21st International Laser Radar Conference, 2002, **4484** (74): 74~81
- 3 M. Dehring, C. Nardell, J. Pavlich *et al.*. Performance and comparison of 532 nm and 355 nm ground winds lidars [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 337~347
- 4 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog *et al.*. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2422~2431
- 5 Z. S. Liu, D. Wu. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41** (33): 7079~7086
- 6 Z. S. Liu, B. Y. Liu, S. H. Wu *et al.*. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33** (13): 1485~1487
- 7 H. Xia, D. Sun, Y. Yang *et al.*. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29): 7120~7131
- 8 C. Laurence, Korb, M. Bruce *et al.*. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- 9 C. L. Korb, B. Gentry, S. Li *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(15): 3097~3104
- 10 A. Mckay. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37** (27): 6487~6493
- 11 Bruce M. Gentry, C. Laurence Korb. Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5770~5777
- 12 Fahua Shen, Hyunki Cha, Jihui Dong *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J].

- Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 593~597
- 13 Lei Tang, Zhifeng Shu, Jihui Dong *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(8): 726~731
- 14 Shu Zhifeng, Tang Lei, Dong Jihui *et al.*. Performance of the triple Fabry-Pérot etalon for wind lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1332~1336
舒志峰, 唐 磊, 董吉辉 等. 用于测风激光雷达的三通道法布里-珀罗标准具性能分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1332~1336
- 15 Shen Fahua, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Error analysis of wind lidar based on Fizeau interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1761~1765
沈法华, 孙东松, 钟志庆 等. 基于菲佐干涉仪测风激光雷达的误差分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1761~1765