

基于法布里-珀罗干涉仪多普勒测风激光雷达径向 风速漂移研究

张飞飞^{1,2} 王国成³ 孙东松^{1,2} 窦贤康^{1,2} 周颖捷^{1,2} 胡冬冬^{1,2} 李建阅^{1,2}

¹中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026

²中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026

³解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031

摘要 基于法布里-珀罗干涉仪的多普勒测风激光雷达可以实现从对流层到中层大气的高时空分辨率风场探测。然而,实际风场观测时,反演出的径向风速总会存在一个偏差,需要外部的参考风场来消除。从理论出发,分析了出现偏差的原因,得出主要影响因素是法布里-珀罗干涉仪和种子激光器的环境温度。随后对该温度的影响进行了实验研究。通过分别对种子激光器和法布里-珀罗干涉仪环境温度的精确控制,测量激光通过已标定的法布里-珀罗干涉仪的透过率来监测相对频率的漂移与温度之间的关系。实验结果表明,环境温度会影响频率漂移,理论上,对于355 nm测风激光雷达系统,控制1 m/s的径向风速漂移,种子激光器环境温度引起的频率漂移系数为1650 MHz/K,温度控制的精度须小于0.004 K;法布里-珀罗干涉仪环境的温度引起的频率漂移系数为799 MHz/K,温度控制的精度须小于0.007 K。

关键词 遥感; 激光雷达; 风; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0814002

Research on the Radial Velocity Bias in Doppler Wind Lidar Based on Fabry-Perot Interferometer

Zhang Feifei^{1,2} Wang Guocheng³ Sun Dongsong^{1,2} Dou Xiankang^{1,2} Zhou Yingjie^{1,2}
Hu Dongdong^{1,2} Li Jianyue^{1,2}

¹School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

²Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230026, China

³Army Officer Academy of PLA, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Direct detection Doppler wind lidar based on Fabry-Perot interferometer has been demonstrated for its capability of atmospheric wind detection ranging from troposphere to mesosphere with high temporal and spatial resolution. However, bias would emerge while retrieving the radial velocity during the observation and an external wind reference is needed to eliminate this bias. Reasons for this bias are theoretically analyzed and results show that the ambient temperatures of Fabry-Perot interferometer (FPI) and seeder laser are main effects. Then this effect of temperature is learned by experiment. By precise control of the ambient temperature of FPI and seeder laser separately, laser transmission through calibrated FPI, which depends upon the temperature, is studied. Using the instrumental function of the FPI, the frequency bias dependence on temperature is obtained. The experimental results show that the temperature coefficient of frequency bias for seeder laser is 1650 MHz/K while the one for FPI is 799 MHz/K, which means the precision of ambient temperature should be theoretically better than 0.004 K for

收稿日期: 2015-03-13; 收到修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(41174130,41227804,41374156)、安徽省自然科学基金(1308085MD54)

作者简介: 张飞飞(1986—),男,博士研究生,主要从事测风激光雷达方面的研究。E-mail: feizhang@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测,激光雷达遥感等方面的研究。

E-mail: sds@ustc.edu.cn

seeder laser and 0.007 K for FPI in 355 nm Doppler wind lidar system.

Key words remote sensing; lidar; wind; Fabry-Perot interferometer

OCIS codes 010.0280; 010.3640; 280.3640

1 引 言

大气风场,与温度、湿度以及气压一样,是大气的一个基本参数,用来描述大气的状态^[1]。早在1996年,世界气象组织(WMO)就提出全球风场分布对所有尺度和高度的天气预报是必要的^[2]。多普勒测风激光雷达作为多种大气风场探测手段中的一种,具有高时间与空间分辨率,高测量精度,覆盖从对流层到中层大气的大范围等优点。基于以上优势,测风激光雷达成国际和国内的研究热点,并且在近20年间,相应的研究机构报道了各自的研究成果^[3-11]。

然而,由于系统周围环境的影响,这些测风激光雷达系统测量得到的径向风速(激光视线方向速度)与该地区的真实径向风速存在一个偏差。为了修正这个偏差,法国OHP(Observatios de Haut Provence)先是增加了一套垂直的径向作为参考点,基于大气风场的垂直分量一般比水平分量小 $10^1\sim 10^2$ 量级的前提,该系统把垂直的径向风速测量作为零风速的参考点,去修正其它方向的径向风速,并且辅以外部相同地点的水平风速参考(无线电探空仪)^[3]。随后,为了在不采用外部风速参考条件下实现风速的精确测量,该研究机构对系统进行了改进,将鉴频光学放置在密闭的步进活塞装置中,通过控制装置的压力调整其中的空气折射率,进而消除偏差^[12],但没有后续的相关报道。欧洲空间局(ESA)ADM-Aeolus计划中的测风激光雷达采用的是在激光器的外部添加高精度稳频系统和扫描激光频率的方法,控制频率漂移的精度较高^[13]。中国科学技术大学(USTC)研制的车载多普勒测风激光雷达的风速测量同样需要相同地点的无线电探空数据来消除偏差^[10-11]。

本文针对以上系统存在的问题,分析产生该径向风速偏差的主要原因,通过实验着重分析设备所处环境温度对风速偏差的影响。本文内容主要分为4个部分,第1部分介绍直接测风多普勒激光雷达的基本原理,并分析了测量过程中产生偏差的原因。第2部分是针对分析进行的实验研究和结果,第4部分给出本文的结论。

2 直接测风的基本原理及问题分析

2.1 直接测风激光雷达的基本原理

作为以电磁振荡的形式存在的波动,光波动同样存在多普勒效应。基于双边缘技术的多普勒测风激光雷达(DWL)的基本原理是利用发射激光与运动的大气气溶胶和分子相互作用后的后向散射信号,经过特定的鉴频器反演后向散射信号中的多普勒频率信息,进而得到径向风速。如图1所示,三通道法布里-珀罗干涉仪(FPI)产生了三个边缘滤波器:边缘滤波器1、边缘滤波器2以及锁定滤波器。发射激光与大气中的气溶胶和分子作用后的后向散射信号(dash-dot)包含窄带的气溶胶信号和因分子热运动而变宽的分子信号。两个边缘通道对称地分布在发射激光中心频率的两侧,当回波信号为零多普勒频率时,边缘滤波器透过的能量相等,如图1(a)所示;当回波信号产生了多普勒频移,则两个边缘滤波器透过的能量出现差异,如图1(b)所

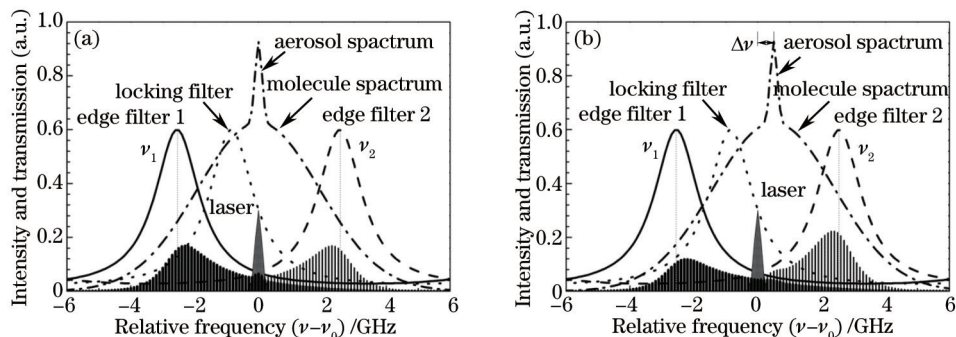


图1 基于双边缘技术 Rayleigh 多普勒测风激光雷达的基本原理。(a) 零多普勒频移;(b) 500 MHz 多普勒频移

Fig.1 Principle of double-edge technique for Rayleigh DWL. (a) Zero Doppler shift; (b) 500 MHz Doppler shift

示。比较透过两个边缘滤波器的能量的差异最终可以反演出多普勒频率,则径向(LOS)风速为:

$$V_{\text{LOS}} = \frac{\lambda}{2} \times \nu_D, \quad (1)$$

式中 V_{LOS} 是径向风速, λ 表示的是激光波长, ν_D 表示的是反演出的多普勒频率。

2.2 产生偏差的分析

由 2.1 节的论述可以得出,精确地反演多普勒频率的必要条件是准确地测量出三通道 FPI 的透过率函数,并且在观测期间透过率函数曲线及其相对位置不变。理论上,透过率函数的表达式为^[14]:

$$F_i(\nu) = \int_0^{\theta_{\max}} \frac{T_0 d\theta}{1 + 4 \left(\frac{R_{\text{fs}}}{\pi \Delta\nu_{1/2}} \right)^2 \sin^2 \left[\frac{2\pi\nu \cdot e_i \cos \theta}{c} \right]^2}, \quad i = 1, 2, L, \quad (2)$$

式中,

$$R_{\text{fs}} = \frac{c}{2L}, \quad (3)$$

$$\Delta\nu_{1/2} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}, \quad (4)$$

式中 i 代表 1、2、 L , 分别表示边缘滤波器 1、2 和锁定滤波器, θ_{\max} 表示入射到干涉仪的准直光速的发散角(半角), T_0 是 FPI 的峰值透过率, R_{fs} 表示的是三个通道透过率曲线的自由谱间距, L 是 FPI 的腔长, $\Delta\nu_{1/2}$ 表示透过率函数的半高全宽(FWHM), R 是腔内表面的反射率, e_i 表示各自通道的间距, ν 为透过 FPI 的光频率, c 表示真空中的光速。由(2)~(4)式可知,对于给定的 FPI 和入射激光波长,其腔长、峰值透过率和反射率透是定值,因而,影响 FPI 透过率函数的因素则是入射光的频率和所在通道的间距。

入射光的频率变化主要是两方面,一是激光频率的漂移和抖动^[13],另一方面是大气回波中携带多普勒频率信息。后者是径向风速探测所需要的部分,而前者则是包含在偏差里的因素。为了消除激光的长期漂移和抖动,另外一个通道,锁定滤波通道,应用到双边缘 FPI 来跟踪出射激光的频率^[15]。考虑到对于种子注入稳频固体激光器,出射激光频率是通过反馈调整主激光器内的压电陶瓷(PZT)使得主激光器激光频率与种子激光频率一致。种子激光则是通过调节内部的光纤布拉格光栅(光纤激光谐振腔)的温度来调整种子激光的频率。如果种子激光的环境温度变化较大,尤其是野外环境比较恶劣的条件下,种子激光频率产生变化,这反过来会影响 Nd:YAG 激光器输出的激光频率,进而影响多普勒频移的测量。

FPI 是由两片平行的玻璃板构成,玻璃板采用的是零膨胀玻璃,具有极小的热膨胀系数(不大于 0.05 ppm),温度的影响可以忽略。而用于调整 FPI 间距的 PZT 的热膨胀系数约为 10^{-6} K^{-1} 量级。例如,应用到 USTC 的 DWL, 1 K 的温度变化可以引起约 1 GHz, 对于 355 nm 测风激光雷达,由(1)式可以算出该频率漂移相当于约 180 m/s 的径向风速。因此,用于鉴频的 FPI 对于周围环境的温度的响应明显。

鉴于以上分析,在 DWL 系统中,当温度变化时,会影响到种子激光的中心频率和 FPI 透过率曲线相对于出射激光的位置,从而影响测量的准确性,产生偏差。如果温度变化较快,使得激光的中心频率偏离锁定滤波器的锁定区域,则反演出的径向风速将是错误的。因此,尤其是对于野外环境条件下工作的 DWL 系统,对系统中的种子激光器以及 FPI 进行温度控制显得尤为重要。

3 实验研究

3.1 实验描述

2.2 节的理论分析说明了在风速测量过程中对种子激光器和 FPI 所处环境的温度控制的重要性和必要性。本节将设计实验来分别测定种子激光和 FPI 的频率漂移随着环境温度的变化规律。

如图 2 所示,种子注入的脉冲激光器(Innolas Spitlight 2000)发射激光经过分束器后,大部分激光经过扩束器进入大气,小部分透过分束器后经过滤光片进入积分球,其作用参见文献[15]。积分球出射的光进入多模光纤分束器,其中一路直接进入 PMT(Photomultiplier Tube, Hamamatsu, R7400),另一路经过准直透镜后进入 FPI,出射光再经过透镜耦合进入 PMT。示波器(Tek DPO3034)采集 PMT 响应输出,高压模块为 PMT 提供高压。图中的滤光片的作用是滤除激光以外的杂散光。FPI 控制器根据计算机发出的指令对 FPI 的间距进

行调整。实验过程中,两个恒温种子激光器和 FPI 分别作温度控制,并使用温度记录仪对两个恒温箱内的温度进行监测,记录的数据写入计算机中。表 1 列举出了实验系统中一些主要器件的参数。

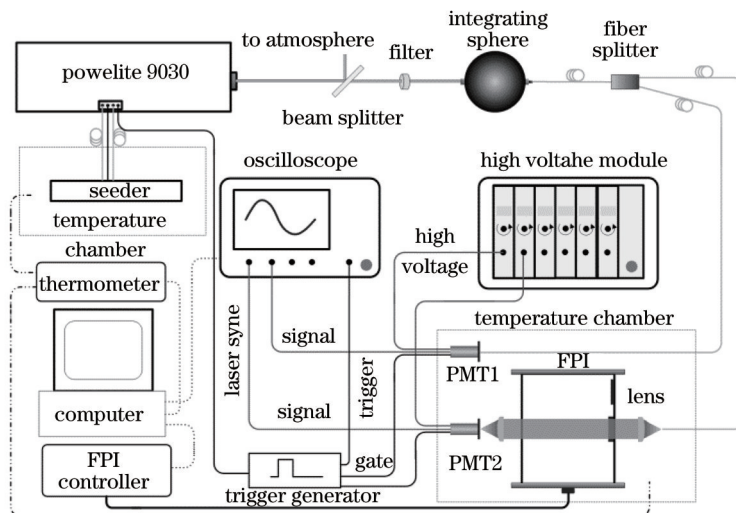


图 2 实验系统结构图

Fig.2 Schematic setup of experiment

表 1 系统中器件的参数

Table 1 Parameters of device in the setup

| Device | Parameter | Value |
|---------------------|-------------------------------|--------|
| Laser | Wavelength /nm | 354.7 |
| | Pulse duration /ns | 6~8 |
| | Repetition /Hz | 50 |
| FPI | FSR /GHz | 12 |
| | FWHM of the edge /GHz | 1.7 |
| | Edge separation /GHz | 5.1 |
| | Locking separation /GHz | 1.7 |
| | Peak transmission @ 355 nm | 60% |
| PMT | Quantum efficiency | >20% |
| Filter | Bandwidth /nm | 0.15 |
| | Transmission@355 nm | >45% |
| Fiber | Core / μm | 100 |
| | NA | 0.22 |
| Integrating sphere | Diameter /mm | 250 |
| Thermometer | Range / $^{\circ}\text{C}$ | -20~50 |
| | Accuracy / $^{\circ}\text{C}$ | 0.01 |
| Temperature chamber | Range / $^{\circ}\text{C}$ | -10~35 |
| | Accuracy / $^{\circ}\text{C}$ | 0.01 |

按照图 2 的实验结构,分别研究种子激光器和 FPI 环境温度变化与其频率漂移定量关系。首先,在恒定两个恒温箱的条件下标定 FPI 的透过率曲线。其次,在测量过程中,通过测量两个 PMT 的响应计算透过光束的透过率,同时,对比标定完毕的透过率曲线,计算出对 FPI 的调整量,计算机可以根据对比结果对 FPI 控制器发送控制指令控制通道间距。

根据以上两个条件,可以在控制种子激光的环境温度恒定的情况下,对 FPI 进行温度控制,不同温度的条件下测量激光透过 FPI 的透过率,再根据已标定的透过率曲线导出激光频率相对 FPI 的漂移量,即是 FPI 的频率的漂移量,最终可以得到 FPI 频率漂移随温度变化的规律。类似地,在控制 FPI 的环境温度恒定的条件下,操作种子激光器环境的温度,在不同温度的条件下测量种子激光透过 FPI 的透过率,再根据已标定的

透过率曲线导出激光频率相对 FPI 的漂移量,既是种子激光频率的漂移,最终可以得到种子激光频率漂移随温度变化的规律。

3.2 FPI透过率函数的标定

按照图 2 所示的光路图搭建实验系统,将所有设备接通并充分预热,两台恒温箱内的温度精确控制在 25.00 °C 并保持稳定。实验中采用的是测风激光雷达系统光学接收机中的三通道 FPI 中的锁定滤波器来跟踪激光的相对频率,该 FPI 的基本参数如表 1 所示。标定该 FPI 的透过率曲线的方法是利用 FPI 的控制器扫描 FPI 的腔长测量激光的透过率,扫描的最小步长为 0.082 nm(约 5.54 MHz),扫描范围为 0~65535 步。

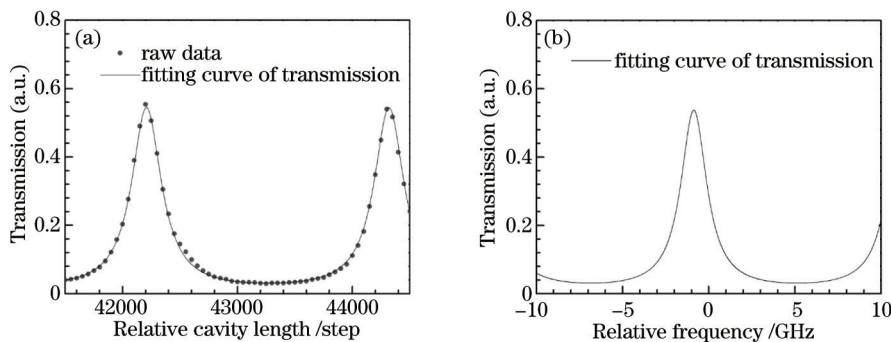


图 3 标定的 FPI 透过率曲线(a)原始的步长坐标(b)转换为频率坐标

Fig.3 Calibrated transmission of FPI with (a) original step and (b) transferred frequency

如图 3 所示,标定的 FPI 的透过率曲线。其中(a)中的点表示是扫描步距为 50 步时的测量结果,实线表示的是对该透过率曲线按照(2)式拟合的结果;(b)是在(a)中的拟合结果的基础上转换步长坐标为频率坐标,且转换时将透过率曲线的下降沿的半高处作为相对频率的 0 点,即出射激光的中心频率。这样是为了让激光频率锁定线性区域并且使相同的频率漂移产生较大的透过率变化。

3.3 实验研究与结果分析

标定完 FPI 的透过率曲线以后,设置控制程序,使得控制器始终根据测得的透过率对 FPI 进行调整,把激光频率锁定在相对频率为零的位置,且控制两个恒温箱的温度使得其按照一定规律变化,记录期间 FPI 的透过率和锁定的位置,以及两个恒温箱的温度,实验结果如图 4 所示。图中实线表示的是标准具环境温度随时间的变化,虚线表示种子激光器环境温度随时间的变化,实心方块表示透过率随时间的变化,空心圆表示 FPI 的位置随时间的变化。

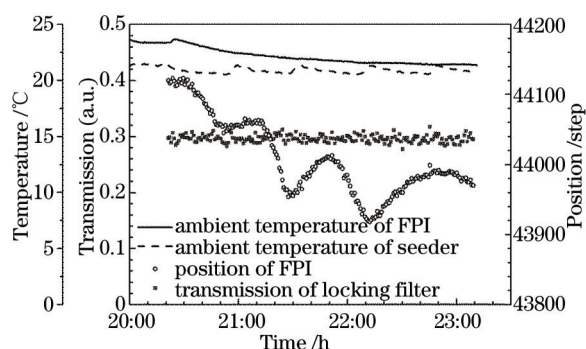


图 4 FPI 与种子激光的环境温度对频率锁定的影响

Fig.4 Effect of ambient temperature of FPI and seeder laser on frequency lock

在将近 3 个小时的监测中,FPI 周围的环境温度变化幅度约为 2.3 K,种子激光器周围环境温度变化幅度约为 0.8 K。在这段时间,激光相对 FPI 的频率漂移了约 200 步,即约为 1.1 GHz。而 FPI 的 FWHM 为 1.7 GHz,如果 FPI 或者种子激光器周围的环境温度变化在这个量级,或者更大时,频率漂移使得激光相对 FPI 的位置不再锁定区域,激光的频率跟踪失败,导致风速测量无效。因此,测量过程中,必须对 FPI 和种子激光器引入温控装置。那么,温控系统的温度控制精度要求,则需要测量出 FPI 和种子激光器频率漂移对周围环境温度变化的响应。另外,从种子激光器和 FPI 周围环境温度的变化趋势以及频率漂移的变化趋势可以看出,它们

与频率漂移具有相关性。

首先考察的是 FPI 的频率漂移随周围环境温度变化关系。设置控制程序,根据标定的 FPI 透过率曲线,设置标准具的位置,使得透过率处在相对频率为 0,即下降沿上半高的位置。设置种子激光器的恒温箱温度恒定,并设置 FPI 所在的恒温箱的温度按照一定规律变化。此时,记录恒温箱内的环境温度以及透过 FPI 透过率,结果如图 5 所示。

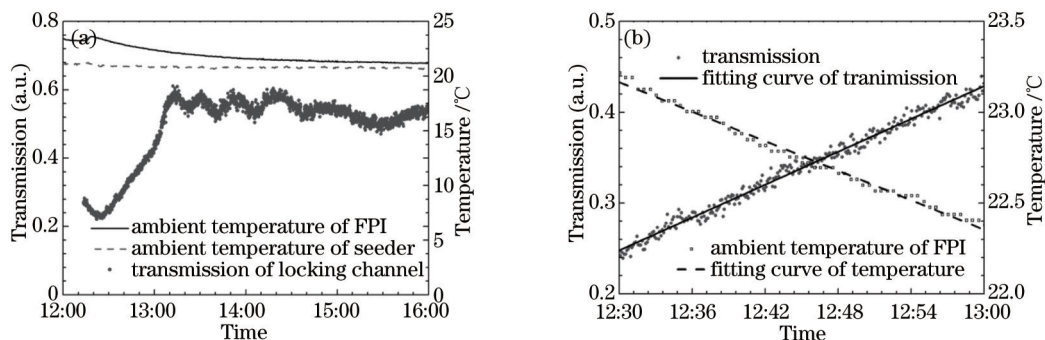


图 5 恒温箱环境温度和 FPI 的透过率监测结果。(a) 全部结果; (b) 其中线性区域结果

Fig.5 Monitoring of temperature inside the chambers and transmission of FPI. (a) All results; (b) results of linear area

由图 5(a)可以看出,在 12:30 以后, FPI 的环境温度近似呈线性变化,且 FPI 的透过率为 0.25 左右,标定的透过率曲线在这附近的区域也是近似线性变化,可以利用这一段线性变化区域来分析温度和透过率的关系。图 5(b)所示的是 12:30 到 13:00 的结果,分别对监测的透过率和 FPI 环境温度拟合,拟合参数如表 2 所示。

表 2 温度和透过率的拟合参数

Table 2 Linear fitting parameters for temperature and transmission

| | Temperature | Transmission |
|---------------|-------------|--------------|
| Intercept | 43.473 | -4.278 |
| Slope | -1.625 | 0.362 |
| Adj. R-square | 0.992 | 0.989 |

由表 2 的拟合参数可知,线性拟合的结果较好。标定的 FPI 透过率曲线的拟合参数可计算出在锁定线性区域, $dTr/d\nu = -0.279 \text{ GHz}^{-1}$ 。表 2 可知, $dTr/dt = 0.362 \text{ h}^{-1}$, $dT/dt = -1.625 \text{ K/h}$, 可得, $d\nu/dT = 799 \text{ MHz/K}$, 即 FPI 周围环境温度每变化 1 K 引起的激光相对频率的漂移量约为 799 MHz。

其次考察种子激光的频率漂移随周围环境温度变化的关系。设定 FPI 所在的恒温箱的温度恒定,设定种子激光器所在的恒温箱的温度按照一定规律变化,在测量过程中,不对 FPI 的腔长作任何操作,并记录恒温箱内的环境温度以及透过 FPI 的光的透过率。测量结果如图 6 所示。

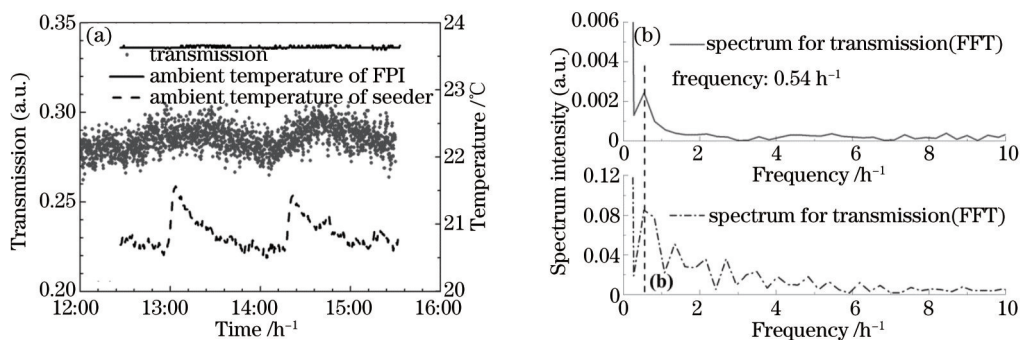


图 6 (a) 恒温箱内的温度以及 FPI 的透过率; (b) 温度和透过率的谱线

Fig.6 (a) Results of temperature inside the chambers and transmission of FPI; (b) spectrums of temperature and transmission

由图 5 可知,当保持 FPI 环境温度不变时,随着种子激光器环境温度发生周期变化时, FPI 的透过率,即频率漂移也会呈现类似的周期变化。因此,对温度和透过率做频谱分析,其谱分布如图 6(b)所示,在频率约为 0.54 h^{-1} 的振荡存在于温度与透过率中,可见环境温度是造成透过率变化的主要因素。

对 13:00~14:00 的温度和透过率数据进行线性拟合,拟合的结果如图 7 所示。相比于 FPI 的温度控制,种子光的环境温度控制精度较差,导致透过率抖动较大,因而线性拟合的 R^2 偏离 1 较大,主要原因在于种子激光本身产生热量,而 FPI 不存在这个问题。由拟合结果可知, $dTr/dt=-0.0121 \text{ h}^{-1}$, $dT/dt=-0.0263 \text{ K/h}$, 透过率曲线线性区域的斜率为 $dTr/d\nu=-0.279 \text{ GHz}^{-1}$, 则 $d\nu/dT=-1650 \text{ MHz/K}$, 即种子激光器周围环境温度每变化 1 K 引起的激光相对频率的漂移量约为 1650 MHz。

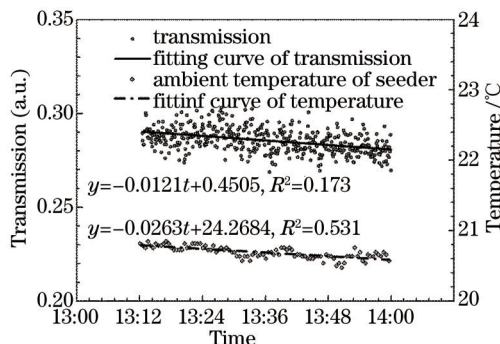


图 7 温度与透过率的线性拟合结果

Fig.7 Linear fitting curve of temperature and transmission

对于发射激光波长为 355 nm 的测风激光雷达系统, 1 m/s 的径向风速对应的多普勒频移为 5.63 MHz。由以上的测量结果可知,理论上,对于 355 nm 测风激光雷达系统,要使得 FPI 的温度引起的漂移小于 1 m/s,其温度控制精度须小于 0.007 K;要使得种子激光器的温度引起的漂移小于 1 m/s,其温度控制精度须小于 0.004 K。

4 结 论

回顾了已报道的国内外直接探测测风激光雷达系统,指出系统径向风速测量中存在偏移量的问题以及各自系统的解决方法。这些系统主要是靠外部的参考风速来校准径向风速。随后,从原理上分析了产生着个偏差的原因以及主要因素,即种子激光器的频率和 FPI 的透过率。由此提出了对种子激光器与 FPI 进行恒温控制的方法来消除频率漂移。

设计实验来分别测定种子激光和 FPI 的频率漂移随着其环境温度的变化规律。实验结果表明: FPI 周围环境温度每变化 1 K 引起的激光相对频率的漂移量约为 799 MHz;种子激光器周围环境温度每变化 1 K 引起的激光相对频率的漂移量约为 1650 MHz。对于 355 nm 测风激光雷达系统,理论上小于 1 m/s 的径向风速的频率漂移,则对于 FPI 温度控制系统,要求其控温精度为 0.007 K,而对于种子激光器温度控制系统,要求其控温的精度为 0.004 K。

参 考 文 献

- 1 European Space Agency. ADM-Aeolus Science Report: ESA SP-1311, 2008[OL].<https://earth.esa.int/pi/esa?id=3409&sideExpandedNavigationBoxId=Aos&cmd=image&topSelectedNavigationNodeId=AOS&targetIFramePage=%2Fweb%2Fguest%2Fpi-community%2Fapply-for-data%2Fao-s&ts=1402339874955&type=file&colorTheme=03&sideNavigationType=AO&table=aotarget>. [2015-6-3].
- 2 W Baker, R Atlas, C Cardinali, *et al.*. Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system[J]. B AM Meteorol Soc, 2014, 95(4): 543-564.
- 3 M L Chanin, A Garnier, A Hauchecorne, *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in middle atmosphere[J]. Geophys Res Lett, 1989, 16(11): 1273-1276.
- 4 C L Korb, B M Gentry, S X Li, *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. Appl Opt, 1998, 37(15): 3097-3104.
- 5 C Flesia, C L Korb. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. Appl Opt, 1999, 38(3): 432-440.
- 6 B M Gentry, H Chen, S X Li. Wind measurements with 355-nm molecular Doppler lidar[J]. Opt Lett, 2000, 25(17): 1231-1233.
- 7 O Reitebuch, C Lemmerz, E Nagel, *et al.*. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: Instrument design and comparison to satellite instrument[J]. J Atmos Ocean Tech, 2009, 26(12): 2501-2515.

- 8 G Baumgarten. Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in middle atmosphere up to 80 km[J]. *Atoms Meas Tech*, 2010, 3(6): 1509–1518.
- 9 Z Shu, X Dou, H Xia, *et al.*. Low stratospheric wind measurement using mobile Rayleigh Doppler wind LIDAR[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(2): 141–144.
- 10 H Xia, X Dou, D Sun, *et al.*. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method[J]. *Opt Exp*, 2012, 20(14): 15286–15300.
- 11 Dou X, Y Han, D Sun, *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler Lidar for wind an temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere[J]. *Opt Exp*, 2014, 22(s5): A1203–A1221.
- 12 C Souprayen, A Garnier, A Hertzog, *et al.*. Rayleigh–Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrument setup, validation, and first climatological results[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(12): 2410–2421.
- 13 T Schröder, C Lemmerz, O Reitebuch, *et al.*. Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded *Q*-switched Nd:YAG laser for a Doppler wind lidar[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(3): 437–444.
- 14 C Souprayen, A Garnier, A Hertzog. Rayleigh–Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(12): 2422–2431.
- 15 F Zhang, X Dou, D Sun, *et al.*. Analysis on error of laser frequency locking for fiber optical receiver in direct detection wind lidar based on Fabry – Perot interferometer and improvements[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(12): 124102.

栏目编辑: 刘丰瑞