

直接测风激光雷达外场实验稳频方法

王国成¹, 张飞飞², 钱正祥¹, 杜跃¹, 舒志峰², 孙东松²

- (1. 中国人民解放军陆军军官学院 六系, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 基于 Fabry-Perot 标准具的直接探测测风激光雷达是中高层大气风场探测的有效手段之一, 系统保持长期稳定地运行是监测风场变化的基本需求; 通过对 DWL 给出的无效探测数据进行的深入剖析, 得出是激光发射频率发生了相对漂移所致; 然后, 搭建实验验证内在机理, 得出, Nd:YAG 激光器中种子激光器工作环境温度每变化 1 °C 将导致激光发射频率产生 1.536 GHz 漂移, 可致使透过率变化最大达 46.1%, 标准具工作环境温度每变化 1 °C 相当于激光频率产生的相对漂移量 737.7 MHz; 当满足小于 1 m/s 的系统误差时, 需要建立三级温控机制, 将系统整体处于调控精度为 1 °C 的恒温环境中工作, 另外将种子激光器、标准具分别置于调控精度为 0.001 °C 的恒温箱内工作, 能够满足风场探测的要求。

关键词: 多普勒; 测风激光雷达; FP 标准具; 瑞利散射; 频率

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0906004

Frequency stabilization method in direct detection Doppler wind lidar under field experiment conditions

Wang Guocheng¹, Zhang Feifei², Qian Zhengxiang¹, Du Yue¹, Shu Zhifeng², Sun Dongsong²

- (1. Six Department, New Star Institute of Applied Technology, Hefei 230031, China;
2. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: Direct detection Doppler wind lidar based on Fabry-Perot etalon is an effective detection means of middle-upper atmospheric wind field. The long-term stabilization of system is basic requirement to perform a task. Firstly, the invalid detection data of DWL was analyzed, the relative drift of laser frequency was the main factor of invalid data. Then, the experiment was set up. To verify the mechanism of seed laser environment temperature changes and the environment temperature changes of locking etalon and the transmission of locking etalon, the result was obtained, which 1 °C temperature change of seed laser environment in Nd:YAG laser systems would cause the change of etalon transmission up to 46.1% and it was equivalent to 1.536 GHz frequency drift of laser, 1 °C temperature change of etalon environment would cause about 737.7 MHz relative drift of laser frequency. To ensure the precision less than 1 m/s resulted from system error, the method of three-step temperature control would be established. The operating room's temperature of DWL would be controlled with precision of 1 °C in the first, and then, the seed laser and the etalon would be placed in the constant temperature box with temperature control precision of 0.001 °C,

收稿日期: 2016-01-20; 修订日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(41374156); 安徽省自然科学基金(1308085MD54)

作者简介: 王国成(1975-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光雷达遥感探测技术方面的研究。Email: guochengwang@126.com

respectively, and the accuracy of wind field detection would be achieved.

Key words: Doppler; wind lidar; Fabry-Perot etalon; Rayleigh scattering; frequency

0 引言

大气风场数据是气候学和大气动力学等研究中的重要参数之一,也是临近空间大气环境的重要气象要素^[1];为了提高气象预报的准确度和对大气风场数据的应用能力,需要工作性能稳定、能够获取可靠风场数据的探测手段。基于 Fabry-Perot 干涉仪的直接探测测风激光雷达(DWL)具有时空分辨率高、测量精度高、空间覆盖范围广等特点,所采用的鉴频工具是具有高精度、高分辨能力的 Fabry-Perot(FP)干涉仪,它的透过率曲线具有陡峭的边缘,具有较强的光学频率分辨能力,探测技术与使用方法相对比较成熟,并且可以同时处理气溶胶和大气分子的散射信号,是探测全球大气风场的有效手段之一,是目前探测中高层大气风场信息行之有效的观测工具^[2-6]。

中国科学技术大学、中国海洋大学、安徽光学精密机械研究所等单位是国内在开展直接探测测风激光雷达方面做得比较成熟的单位^[3-10]。其中,中国科学技术大学激光雷达课题组分别研制了低对流层风场观测系统^[3]、车载瑞利散射 DWL^[4,7]和中高层大气风场观测系统^[8];低对流层风场观测系统于 2006 年建成,是国内首台基于 FP 双边缘标准具的 DWL,探测距离在 0.2~10 km;车载瑞利散射 DWL 的探测距离达到 40 km;中高层大气风场观测系统的探测高度可达 60 km。中国海洋大学于 1997 年组建了基于碘滤波器的可移动式直接探测激光雷达系统^[9],对米散射和瑞利散射信号进行处理;后来,研制了针对海面上空风场的高分辨率观测系统,并且参加了 2008 年北京奥运帆船比赛的气象保障活动^[10]。国际上开展直接探测测风激光雷达的研究比较早,法国的 Chain 小组在 1989 年首次报道了中层大气平均风场激光雷达的测量^[11],测量高度在 25~60 km,而后 Souprayen 又改进了该系统^[12],测量范围扩展到 8~50 km;美国 NASA 的 GLOW 系统、NOAA 的 Groundwind 系统和星载测风激光雷达的研究工作均有重要的报道^[13-14];位于北极的中层大气研究气象台(ALOMAR)于 1994 年在挪威建立了 Rayleigh Mie

Raman System,该系统能够测量 18~80 km 之间的温度和风场^[15]。激光雷达系统在工作中因部件的性能波动导致测量偏差,各研制小组分别使用了不同的办法消除偏差,法国的 Chain 小组使用垂直探测的方式来获得径向风速作为零风速的参考点,去修正其他方向的径向风速测量偏差^[2];在欧空局星载的测风激光雷达成计划中,设计了独立的种子激光器稳频控制系统,在此基础上使用了扫描激光频率进行反馈的方法,激光频率漂移控制效果好^[16]。

在欧空局星载的测风激光雷达成计划中,设计了独立的种子激光器稳频控制系统,在此基础上使用了扫描激光频率进行反馈的方法,激光频率漂移控制效果好。

中国科学技术大学研制的直接探测测风激光雷达系统长期在外场实验,一般选地偏远,昼夜温差大,对系统保持性能长期稳定提出了更加苛刻的要求,课题组深入研究了激光频率漂移的内在因素,建立了直接探测测风激光雷达外场实验稳频方法。

1 基于 FP 标准具的激光雷达测风原理

直接探测测风激光雷达系统主要包括激光发射机单元、发射和接收光学系统单元、光学接收机单元、数据采集和计算机控制单元,结构原理如图 1 所示。

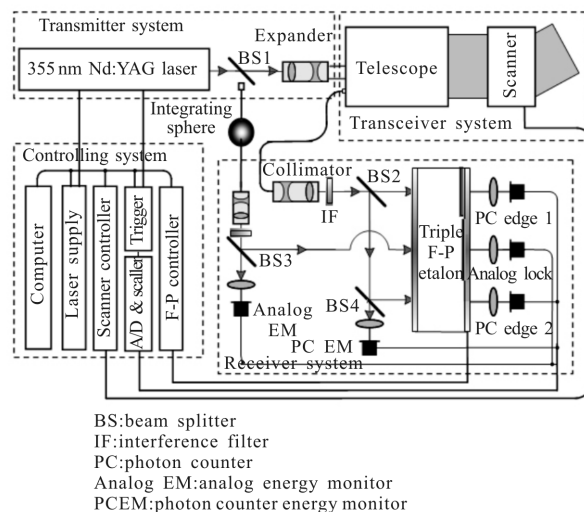


图 1 直接测风激光雷达结构示意图

Fig.1 Framework of DWL

激光发射机单元一般由激光器和扩束器组成,主要用于产生单频、稳频的激光束作为激光雷达的发射信号;发射和接收光学系统单元主要由望远镜和扫描器等组成,扫描器指向被测的大气区域,将激光发射光束导向该区域,大气中的气溶胶和分子后向散射光沿发射光束的反方向再经过扫描器后被光学望远镜接收,将散射光汇聚到位于焦点的多模光纤内;光学接收机单元是多普勒激光雷达的光学处理中心,将接收到的后向散射光经过准直、滤光和分束,然后输入标准具,进行对应的能量探测;数据处理与控制单元是激光雷达系统的大脑,可控制整个系统同步工作,并对接收机单元接收到的信号进行数据处理,得到实时的风场数据。

1.1 标准具的频率特性

直接探测测风激光雷达系统对指定的大气区域发射激光,接收后向散射光并进行鉴频,获得多普勒频移 v_d 后,使用公式(1)求得径向风速。

$$v_d = v_0 2V \cos\theta / c = 2V_r / \lambda_0 \quad (1)$$

式中: V 为粒子平均速度; v_0 为激光工作频率; v_d 为多普勒频移; $V_r = V \cos\theta$,为径向风速分量; θ 为激光发射方向与水平面的夹角。当 V_r 的方向与发射激光方向相对时,取正;反之取负。

应用 FP 标准具响应曲线的陡峭特性,可以将入射激光频率的变化转化为对应能量的变化,通过对能量的探测和反演进而实现对激光频率的分析,理想标准具的透过率函数^[17]为:

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

式中: R 为平板内表面膜层反射率; L 为光损耗; F 有效精细度; $\varphi = \frac{4\pi n \nu l}{c} \cos\theta$, l 为标准具腔长; ν 为入射光频率; θ 为入射光线与标准具平面法线之间的夹角; n 为平板间介质折射率。当满足条件 $\frac{\varphi}{2} = m\pi$ 时,标准具出射光干涉条纹为亮纹,即:

$$\frac{4\pi n \nu l}{c} \cos\theta = m\pi \quad (3)$$

当保持第 m 级条纹为亮纹时,可以通过调整标准具的入射激光频率或者调整标准具的腔长来实现;即当标准具的腔长为定值时,扫描入射激光频率可以实现完整的透过率曲线,当入射激光的频率为定值

时,扫描标准具腔长也可以实现完整的透过率曲线;腔长与激光频率之间具有定量关系,将公式(3)求取微分,当激光正入射时,即 $\cos\theta=1$, m 为常量,可得:

$$\frac{2\pi}{c} \nu dl + \frac{2\pi}{c} l d\nu = 0 \quad (4)$$

将表 1 双边缘 FP 标准具的系统参数带入公式(4),通过波长进行计算可得,标准具腔长(这里表示为 l)移动与激光频率变化的关系为:

$$\frac{\Delta \nu}{\Delta l} = -\frac{\nu}{l} = -\frac{67.6 \text{ MHz}}{1 \text{ nm}} \quad (5)$$

表 1 标准具参数

Tab.1 Fabry-Perot etalon parameters

Parameter	Value
FSR/GHz	12
Finesse	7
Bandpass/GHz	1.7
d_2-d_1 /nm	75.44
Wavelength/nm	355
Edge channel separation/GHz	5.1
d /mm	12.5

1.2 瑞利散射多普勒频率检测原理

瑞利散射谱由于分子热运动导致谱宽展宽至几个吉赫兹,而米散射谱宽仅在几十兆赫兹,在检测瑞利散射谱时使用双边缘技术,即利用频谱分布相同而中心频率分开的两个标准具作为边缘滤波器(Edge1 filter 和 Edge2 filter);发射激光谱位于两个边缘滤波器交叉点处,为了提高探测精度,采用 Locking filter 作为单边缘滤波器测量并锁定发射激光频率。例如某型直接探测瑞利散射测风激光雷达标准具参数如表 1 所示,对应的频谱分布如图 2 所示。

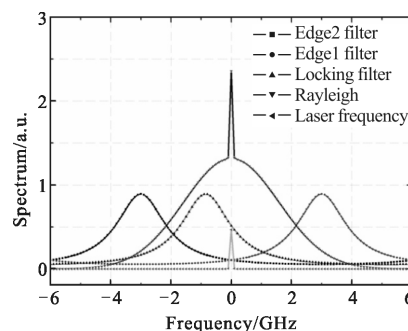


图 2 三通道标准具频谱分布

Fig.2 Spectrum distribution of three etalons

假设进入标准具的后向散射光中米散射光强为 I_M , 对应的透过率函数为 T_M , 瑞利散射光强为 I_R , 对应的透过率函数为 T_R , 则两个边缘通道标准具的输出光信号为:

$$I_1 = a_1(I_M T_{M1}(v_0 + v_d) + I_R T_{R1}(v_0 + v_d, T_a)) \quad (6)$$

$$I_2 = a_2(I_M T_{M2}(v_0 + v_d) + I_R T_{R2}(v_0 + v_d, T_a)) \quad (7)$$

式中: a_1, a_2 为校准常数; v_0 为发射激光频率; v_d 为多普勒频率; T_a 为实际大气温度。定义频率响应函数:

$$R(v, T) = T_{R1}(v, T) / T_{R2}(v, T) \quad (8)$$

可以通过合理的算法与系统的设计将信号中气溶胶信号的影响消除, 得:

$$R(v_0 + v_d, T_a) = a_2 I_1 / (a_1 I_2) \quad (9)$$

频率响应函数在系统的设计范围内, 如果大气温度是可知的, 它的频率响应反函数是单值函数, 并且可在大气风场探测前, 使用参考光扫描标准具得到 T_{M1} 和 T_{M2} 后, 进行计算获得对应的透过率函数为 T_R , 进而得到频率响应函数 $R(v, T)$ 。

同理, 使用锁定通道标准具对激光器的出射光频率进行测量, 设参考光强为 I_{M0} , 对应的能量检测为 I_{Lc} , 校准常数为 a_4 , 信号检测为 I_{Ls} , 校准常数为 a_5 , 可以得出锁定通道透过率的表达式:

$$T_L(v_0) = a_5 I_{Ls} / (a_4 I_{Lc}) \quad (10)$$

频率响应函数 $R(v, T)$ 与锁定通道透过率函数 $T_L(v)$ 关系如图 3 所示, 获得多普勒频移后, 由公式 (1) 求得径向风速, 再通过多方位径向风速测量, 由矢量合成方法获得大气风场。

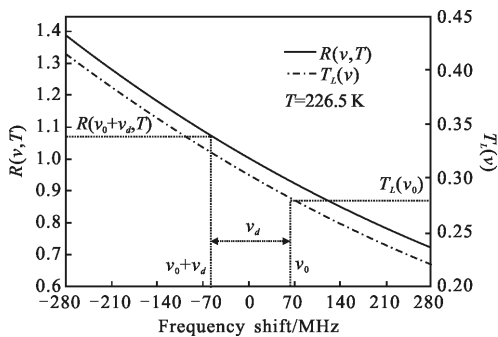


图 3 频率响应函数与锁定通道透过率函数图

Fig.3 Frequency function and transmission of locking Etalon

理论上, 直接探测测风激光雷达系统向大气发射一个激光脉冲, 即可以获得参考光和瑞利后向散射信号, 由公式 (6)~(10) 可以计算径向风速, 径向风速可表示为:

$$V_r = \frac{\lambda}{2} v_d = \frac{\lambda}{2} [R^{-1}(v_0 + v_d, T_a) - T_L^{-1}(v_0)] \quad (11)$$

式中: $R^{-1}(v, T)$ 和 $T_L^{-1}(v)$ 分别表示 $R(v, T)$ 与 $T_L(v)$ 的反函数。

径向风速(LOS)的测量误差表示为^[17]:

$$\varepsilon_v = [\theta_v \cdot (S/N)]^{-1} \quad (12)$$

式中: θ_v 为 $R(v, T)$ 的速度灵敏度, $\theta_v = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial v} = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial v}$; (S/N) 为信噪比, 可表示为:

$$(S/N) = [(S/N)_1^{-2} + (S/N)_2^{-2}]^{-1/2} \quad (13)$$

使用系统^[18]基本参数如表 2 所示。

表 2 直接探测测风激光雷达系统基本参数

Tab.2 Basic parameters of doppler wind lidar systems

	Parameter	Value
	Wavelength/nm	354.7
Transmitter	Laser energy/pulse · mJ ⁻¹	400
	Laser repetition frequency/Hz	30
	Telescope/scanner aperture/cm	45
	Field of view/mrad	0.2
Transceiver	Scan range/(°)	360×90
	Etalon free spectral range/GHz	12
	Etalon FWHM/GHz	1.7
	Edge channel separation/GHz	5.1
Receiver	Locking channel separation/GHz	1.7
	Etalon peak transmission	>60%
	CPM quantum efficiency	21%

对应系统仅发射单发脉冲时的径向风速测量误差与系统的信噪比进行数值模拟, 如图 4 所示。

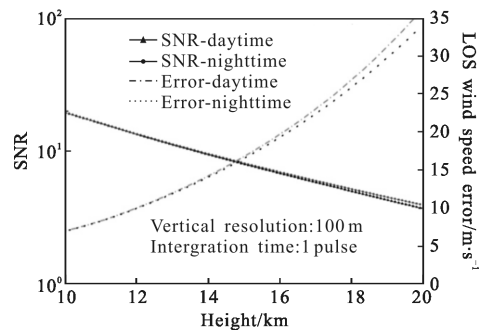


图 4 对应 1 发脉冲时系统的信噪比与径向风速探测误差

Fig.4 LOS speed error and SNR of system under the circe of a pulse

图 4 给出了在常规的大气状态、有背景光的白天和无背景光的晚上条件下,对该系统的探测状态进行了模拟,系统在仅发射 1 发激光脉冲后,10 km 高度处接收到的信号信噪比约为 11,信号几乎被来源于背景光、探测器的暗计数等多种噪声所淹没,对应的径向风速偏差很大,随着高度越高,信号更是微弱,偏差值急剧增大,无法实现对瑞利散射信号的有效探测。为了提高探测精度,需要增强信噪比,增加激光脉冲累积数量是提高信噪比的有效途径。

2 直接探测测风激光雷达系统长期稳频的实现

长时间累积激光脉冲(例如几千发脉冲,对应时间为几分钟)以提高信噪比进行风场探测,激光发射频率在脉冲累积的时间段内需要保持稳定,减少跳变^[16]。一般情况下将采取两种措施,一种是对激光器进行频率稳定,一种是使用标准具对激光器发射频率进行锁定,锁频的前提是激光发射频率比较稳定。

系统在长期的外场实验过程中,发现少量反演数据与风廓线对比数据有较大平移,调取对应时间段的锁定通道透过率及种子激光器温度监控数据如图 5 所示。

图 5 的透过率数据曲线产生漂移与剧烈抖动,该透过率曲线对应频率的定量描述为:当透过率变化 1%时,对应的频率变化为 33.3 MHz,对应的速度探测偏差为 6 m/s。在剧烈抖动的 3 个时刻,透过率变化幅度达 30%,对应的频率变化约为 1 GHz,对应的速度偏差在 180 m/s,而锁定通道带宽为 1.7 GHz,已经超出了有效探测范围,相应的探测数据是无效的。对应透

过率跳变的 3 个时刻,种子激光器的温度(heater2)均发生了跳变,幅度 $\Delta T > 1.5^\circ\text{C}$ 。对于给定的标准具,其腔长、峰值透过率和反射率是定值,影响标准具透过率的因素是入射光的频率和所在通道的间距^[12]。

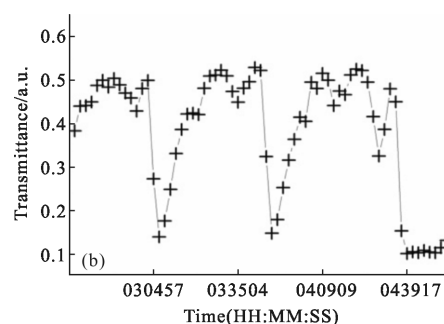
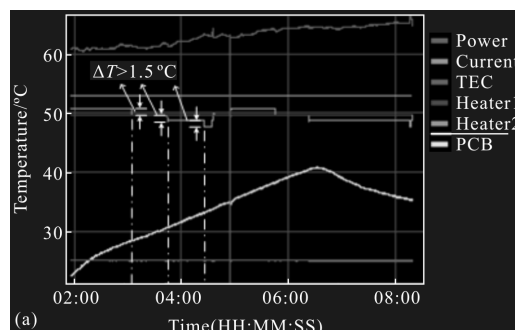


图 5 种子激光器温度监控(a)锁定通道透过率(b)

Fig.5 Temperature of seeder (a) and transmission of locking etalon (b)

2.1 实验分析

搭建实验系统,利用图 1 结构图中的部分器件和表 1 对应的标准具系统,将种子激光器、可调谐标准具分别置于两个温度可精密调控的密封箱内,激光器出射光进入标准具的锁定通道,如图 6 所示;然后,分步骤实验,分别设置温度规律变化,监测透过率等变化情况。

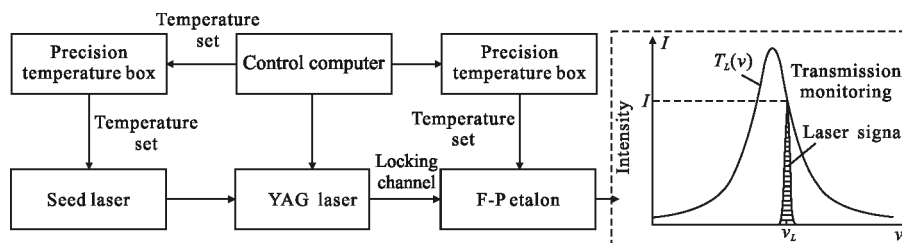


图 6 温度与透过率实验系统组成

Fig.6 Schematic setup of temperature and transmission experiment

(1) 实验准备

通过计算机控制标准具的调控单元,扫描锁定通道的标准具腔长以实现激光器三倍频激光的透过

率扫描,标准具腔长扫描最小步长为 0.082 nm,设定透过率曲线的半高宽处对出射激光进行动态锁定,如图 7 所示。

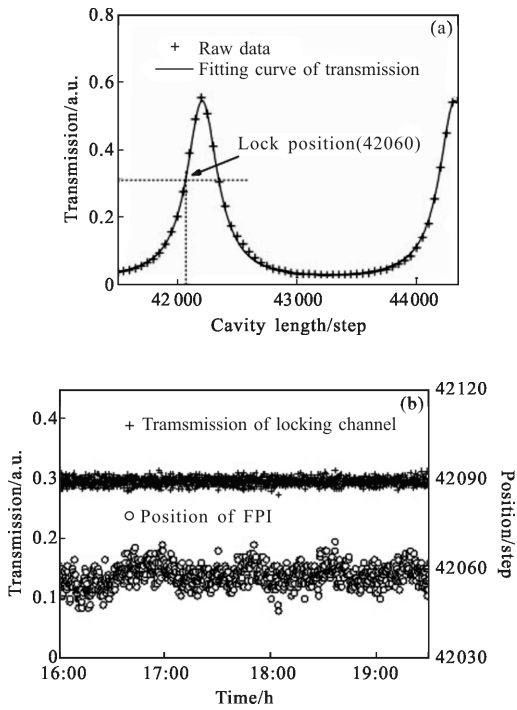


图 7 锁定通道透过率扫描(a)动态锁定(b)

Fig.7 Transmission of locking FPI (a) and locking state (b)

(2) 透过率对种子激光器温度变化响应的实验分析

将标准具对激光频率的锁定功能暂时去除,将标准具的温控箱设置为恒温(23.629℃),将种子激光器的温控箱设置为规律变化,监测标准具的透过率和腔长位置变化,如图 8 所示。

图 8(a)给出,在标准具恒温的状态下,它的腔长位置基本稳定,而它的透过率与种子激光器的温度变化呈现了对应关系;说明了种子激光器环境温度变化将影响激光器出射频率发生变化。图 8(b)是选取图 8 (a)的一部分线性区域进行拟合,分析对应的量化关系,由拟合直线计算得:当种子激光器环境温度变化 1℃时,透过率相应变化达 46.1%,进而计算得

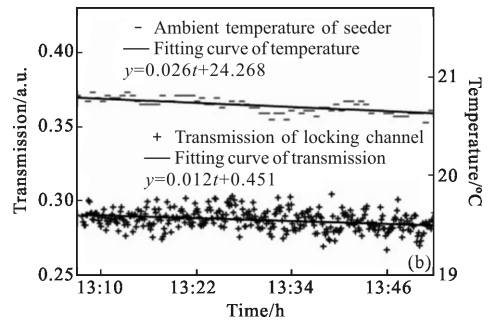
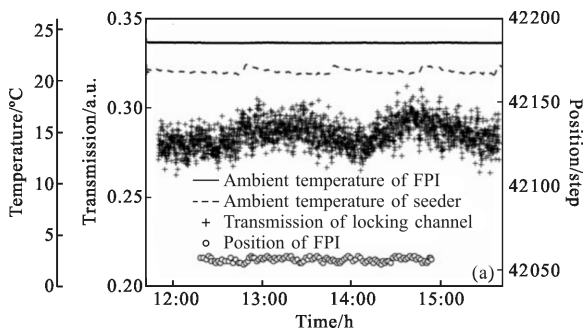


图 8 透过率与种子激光器温度值(a)线性区域拟合(b)

Fig.8 Transmission of FPI and temperature of seeder (a) fitting curve of linear area (b)

激光出射频率漂移将达到 1.536 GHz,实际实验中的频率数值可能变大也可能变小,但是均已经超过了有效探测范围。

(3) 透过率对标准具温度变化响应的实验分析
同样将标准具对激光频率的锁定功能暂时去除,将种子激光器的环境温度设为恒温,将标准具的环境温度变化设为曲线变化,观察标准具的透过率和腔长位置变化,如图 9 所示。

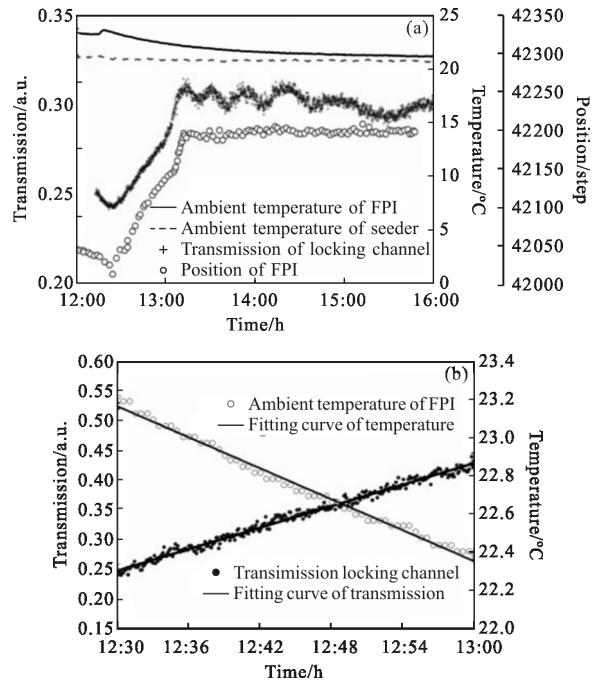


图 9 标准具的透过率与温度值(a)线性区域拟合(b)

Fig.9 Transmission and temperature of FPI (a) fitting curve of linear area (b)

图 9(a)给出,在种子激光器环境恒温的情况下,当标准具环境温度变化时,标准具的透过率以及腔长位置均发生了变化,并且随着标准具的温度趋于恒

定而变得稳定。说明:当标准具环境温度变化时,它的腔长发生了变化,导致透过率发生变化。图 9(b)对左图变化剧烈的部分进行线性拟合,分析其量化关系得,当标准具的环境温度每变化 1℃,对应的透过率变化将达 22.2%,进而计算得,相当于激光出射频率漂移 737.7MHz,同样超出了系统的有效探测范围。

2.2 建立稳频系统

直接探测测风激光雷达系统长期在外场实验,探测风廓线,需要建立稳定可靠、可实现长期稳频的方法。根据 2.1 节实验分析,可通过建立三级温度调控系统实现稳频。

(1) 种子激光器工作环境恒温控制

根据 2.1 节中的实验分析得出,种子激光器环境温度每变化 1℃,将造成出射激光频率漂移达 1.536 GHz,对应的径向风速变化达 276.6 m/s,当保持 1 m/s 以内的系统误差时,需要将种子激光器置于调控精度为 0.001℃的恒温箱内。

(2) 标准具工作环境恒温控制

根据 2.1 节中的实验分析得出,标准具的工作环境每变化 1℃,相当于出射激光频率漂移 737.7 MHz,带来的径向风速偏差为 133.2 m/s,当保持 1 m/s 以内的系统误差时,需要将标准具置于调控精度为 0.001℃的恒温箱内。

(3) 激光雷达系统恒温控制

直接探测测风激光雷达系统长期在野外工作,需要全封闭保持内部清洁,为了满足高精度温控箱工作需求,在封闭环境内设置调控精度为 1℃的空调进行温度调节,同时将激光器冷却单元的热量直接排放到密闭环境外。

三级温度调控如图 10 所示,系统达到稳频状态后,风场探测数据精度得到了很好的提升^[19]。

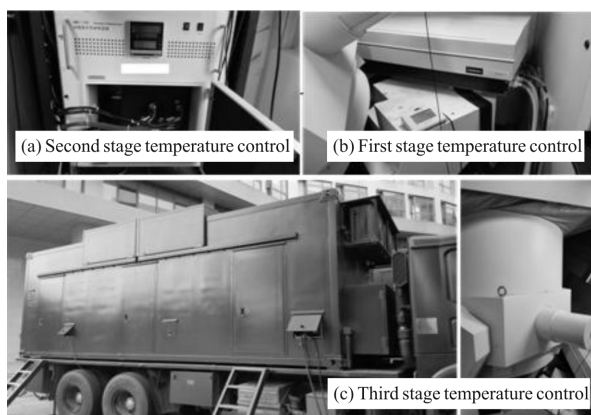


图 10 三级温度控制系统

Fig.10 Three-step temperature control systems

3 结论

文中对采用种子注入 Nd:YAG 激光器的 DWL 系统稳频方法进行了深入地探讨,通过对外场实验无效数据的分析,进而研究得出种子激光器和标准具工作环境的温度是影响出射激光频率发生相对变化的重要因素。标准具的工作环境每变化 1℃,相当于出射激光频率漂移 737.7 MHz;种子激光器环境温度每变化 1℃,将造成出射激光频率漂移达 1.536 GHz。通过建立三级温度调节系统,可以将由系统误差带来的风速偏差控制在 1 m/s 以内。

参考文献:

- [1] Lv Daren, Bian Jianchun, Chen Hongbin, et al. Frontiers and significance of research on stratospheric processes [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(3): 221-228. (in Chinese) 吕达仁, 卞建春, 陈洪滨, 等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 221-228.
- [2] Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in middle atmosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16(11): 1273-1276.
- [3] Shen Fahua, Cha Hyunki, Sun Dongsong, et al. Low tropospheric wind measurement with Mie Doppler lidar [J]. *Opt Rev*, 2008, 15(4): 204-209.
- [4] Lei Tang, Zhifeng Shu, Jihui Dong, et al. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(8): 726-731.
- [5] Xia H, Dou X, Sun D, et al. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15286-15300.
- [6] Zhang F, Dou X, Sun D, 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.
- [7] Shen Fahua, Cha Hyunki, Sun Dongsong, et al. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(7): 593-597.
- [8] Wang Guocheng, Dou Xiankang, Xia Haiyun, et al. Performance of a Rayleigh Doppler lidar for middle atmosphere wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2351-2357. (in Chinese)
- [9] Liu Zhishen, Wu Dong, Liu Jintao, et al. Low altitude

- atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with aniodine filter [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(33): 7079–7086.
- [10] Liu Zhishen, Liu Bingyi, Wu Songhua, et al. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J]. *Opt Letts*, 2008, 33(13): 1485–1487.
- [11] Chanin M L, Hauchecome A, Porteneuve J. A Doppler lidar measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16: 1273–1276.
- [12] Souprayan C, Garnier A, Hertzog A. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2422–2431.
- [13] Gentry B, Chen H. Profiling tropospheric winds with the Goddard lidar observatory for winds (GLOW) [C]//the 21st International Laser Radar Conference, 2002, 4484(74): 74–81.
- [14] European Space Agency. ADM–Aeolus Science Report: ESA SP–1311[R]. 2008, 45.
- [15] Baumgarten G. Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80km [J]. *Atmos Meas Tech*, 2010, 3: 1509.
- [16] Schröder T, Lemmerz C, Reitebuch O, 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
- [17] Korb C L, Gentry B M, Li S X, et al. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(15): 3097–3104.
- [18] Shu Zhifeng, Dou Xiankang, Xia Haiyun, 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
- [19] Wang Guocheng, Sun Dongsong, Duan Lianfei, et al. Analysis of the Doppler lidar wind profiler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 35(9): 0901003. (in Chinese)
王国成, 孙东松, 段连飞, 等. 多普勒测风激光雷达风场数据影响因素分析[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0901003.