

空气温度绝对探测激光雷达系统标定技术

汪丽^{1*}, 崔新月¹, 索建平¹, 赵妍¹, 赵一玄¹, 王骏¹, 宋跃辉¹, 李奕², 华灯鑫^{1**}¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省计量科学研究院, 陕西 西安 710199

摘要 为了解决接触式空气温度探测易受太阳辐射和地面辐射影响的问题, 实现空气温度的绝对测量, 提出基于 Fabry-Perot 干涉仪扫描散射谱进而反演温度的高光谱分辨率激光雷达遥感探测方法。系统参数标定是影响温度探测精度的重要因素。利用连续激光器对扫描 Fabry-Perot 干涉仪的驱动电压、半峰全宽、自由光谱范围、温度控制精度等参数进行了标定。通过标定实验, 得到 10 GHz 的频率扫描范围对应的电压幅值为 3.48 V; Fabry-Perot 腔 0.1 °C 的温度变化对应 0.21 GHz 的频率漂移。利用可控制温度和压力的散射池对激光雷达温度探测系统进行了标定, 经系统误差校正后, 反演温度与设置温度获得了较好的一致性, 这为实际温度精确探测和反演提供了基础。

关键词 传感器; 空气温度; 激光雷达; Fabry-Perot 干涉仪; 标定

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1828001

Calibration Technology of Lidar System for Air Temperature Absolute Detection

Wang Li^{1*}, Cui Xinyue¹, Suo Jianping¹, Zhao Yan¹, Zhao Yixuan¹, Wang Jun¹,
Song Yuehui¹, Li Yi², Hua Dengxin^{1**}¹School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,
Shaanxi, China;²Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an 710199, Shaanxi, China

Abstract In terms of the disadvantage that contact air temperature detection is vulnerable to solar radiation and ground radiation, a remote sensing detection method of high spectral resolution lidar is proposed, and it is based on the Fabry-Perot interferometer which scans the scattering spectrum and conducts temperature retrieval, so as to realize the absolute measurement of air temperature. System parameter calibration is an important factor affecting the accuracy of temperature detection. Parameters such as driving voltage, full width at half maximum, free spectral range, and temperature control accuracy of the Fabry-Perot interferometer are calibrated by continuous laser. Through the calibration experiment, the corresponding voltage amplitude is 3.48 V at a frequency scanning range of 10 GHz; a temperature change of 0.1 °C at the Fabry-Perot cavity corresponds to the frequency drift of 0.21 GHz. The lidar temperature detection system is calibrated by using the scattering cell which can control the temperature and pressure. After the systematic error correction, the retrieval temperature is in good agreement with the preset temperature, which lays a foundation for accurate detection and retrieval of the actual temperature.

Key words sensors; air temperature; lidar; Fabry-Perot interferometer; calibration

1 引言

气象学上把表示空气冷热程度的物理量称为空气温度, 简称气温。天气预报中的气温是在地面气象观测中 1.5 m 高度处百叶箱中的温度表上测得的。空气

温度的高低无论对人们的生产生活还是国防和经济建设都有重要的影响。而气候变化监测与高精度天气预报要求空气温度传感器的测量准确度应达到 ±0.1 K。采用 Fabry-Perot (F-P) 鉴频器扫描的方式实现空气温度绝对探测的高光谱分辨率激光雷达方法属于遥感探

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2021-12-16; 录用日期: 2022-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(61775179, 41627807)

通信作者: *wlfuyun@xaut.edu.cn; **dengxinhua@xaut.edu.cn

测,相比于接触测量法,遥感探测具有不受太阳辐射和地面辐射影响的优点,其探测原理是:基于大气温度与瑞利散射谱宽的相关性进行瑞利散射谱扫描,进而反演得到大气温度。

近年来,通过扫描光谱法得到瑞利-布里渊散射信号谱型反演温度的方法得到广泛应用。Gu等^[1-3]利用法布里-珀罗(F-P)干涉仪扫描获得不同温度和压力下的瑞利-布里渊散射谱,并用Tenti S6模型进行了拟合反演。德国的Witschas等^[4-10]采用改变激光频率或F-P干涉仪扫描的方法得到瑞利-布里渊散射谱,从而反演不同气体温度或大气温度廓线。国内南昌航空大学的何兴道团队^[11-14]对瑞利-布里渊散射谱位移受温度和压力影响的情况进行了分析,并完成了实验验证。华中科技大学的梁琨团队^[15-19]对氮气和空气的瑞利-布里渊散射谱型进行了大量分析研究。王骏等^[20]对基于固体腔扫描F-P干涉仪探测大气温度的方法也进行了前期研究。这些研究为实际空气温度的探测提供了理论基础和可行性支撑。

为了实现空气温度的探测,设计了基于脉冲激光和扫描F-P干涉仪的激光雷达系统,通过共焦F-P干涉仪扫描定点侧向散射谱进而反演空气温度。系统参数的标定是实现温度精确探测的重要一环,本文对F-P干涉仪的驱动电压、半峰全宽(FWHM)、自由光谱范围(FSR)、温度等参数进行了标定,利用可控制温度和压力的散射池进行了系统标定,下面将对标定方法及结果进行详细阐述。

2 高光谱分辨率激光雷达空气温度探测原理及系统参数

Nd:YAG脉冲激光器出射354.7 nm波长的紫外波段激光,激光与空气分子相互作用,望远镜接收侧向散射信号并将其耦合进光纤中,通过F-P干涉仪扫描得到散射谱分布,散射谱为瑞利散射、米散射和布里渊散射谱的叠加。瑞利-布里渊散射谱常用Tenti S6模型描述,其解析解^[6]的形式为

$$S(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_R} A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_R}\right)^2\right] + \frac{1-A}{2\sqrt{2\pi} \sigma_B} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x+x_B}{\sigma_B}\right)^2\right] + \frac{1-A}{2\sqrt{2\pi} \sigma_B} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_B}{\sigma_B}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中: $x = \frac{\omega}{\sqrt{2} k v_0}$ 表示光学频移, ω 是散射光和入射光之间的角频率漂移; v_0 是分子的热速率, $v_0 = \left(\frac{k_B T}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$, k_B 是玻尔兹曼常数, m 是分子质量, T 是气体温度; A 、 σ_R 、 σ_B 、 x_B 由经验值给出,以达到与Tenti S6模型的一致性,采用拟合函数得到4个参数关于碰撞频率 y 的函数^[6]:

$$\begin{cases} A(y) = 0.18526 \exp(-1.31255y) + 0.07103 \exp(-18.26117y) + 0.74421 \\ \sigma_R(y) = 0.70813 + 0.16366y^2 + 0.19132y^3 - 0.07217y^4 \\ \sigma_B(y) = 0.07845 \exp(-4.88663y) + 0.80400 \exp(-0.15003y) - 0.45142 \\ x_B(y) = 0.80893 - 0.30208 \times 0.10898^y \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $y = \frac{P}{\sqrt{2} k v_0 \eta} = \frac{\rho k_B T}{\sqrt{2} k v_0 \eta}$ 表示碰撞频率,其中 P 为气体压力, ρ 是气体分子的数密度, η 是剪切黏度, k 是波矢 k 的大小, $k = |k| = |k_s - k_i| = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$,其中 k_i 和 k_s 分别为入射光和散射光的波矢量, θ 为散射角, λ 为入射光波长。式(1)中第一项类高斯部分代表中心峰的瑞利部分,而后两项类高斯部分代表两侧的布里渊双峰。将式(2)中的4个参数代入式(1),就得到了大气分子中描述瑞利-布里渊散射谱型的完整解析式。瑞利-布里渊散射谱($T = 308.15$ K, $P = 970$ hPa)及扫描F-P透过率分布如图1所示。每一步扫描得到的能量为散射谱与扫描F-P透过率的卷积,通过对能量谱进行拟合及反演,可得到空气温度值。

高光谱分辨率激光雷达空气温度探测系统的结构示意图如图2所示。稳频后的种子光注入Nd:YAG脉冲激光器的三倍频(THG)354.7 nm波长激光作为光源,水平射入空气中,激光与大气物质相互作用,前

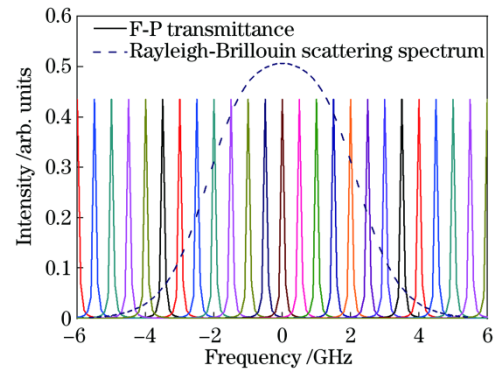


图1 瑞利-布里渊散射谱分布及扫描F-P干涉仪的透过率分布
Fig. 1 Rayleigh-Brillouin scattering spectrum distribution and transmittance distribution of scanning F-P interferometer

向光由吸收盒吸收,侧向散射光由望远镜接收并耦合入光纤中,光纤出射光经透镜L1准直并由分光镜(BS)分为两路,少部分光作为参考光路经透镜L2由

光电倍增管 1(PMT1)接收,大部分光经透镜 L3 进入扫描 F-P 干涉仪,由电压控制箱控制压电陶瓷(PZT)的驱动电压以实时改变 F-P 干涉仪的腔体长度,进而改变频率,最终实现高光谱扫描分光(扫描频率范围为 GHz 量级),光经透镜 L4 后,再由光电倍增管 2 (PMT2)探测散射谱离散点的能量信息。激光脉冲的

重复频率为 10 Hz,F-P 干涉仪的电压扫描周期可调。不同的时间周期可对应一定的脉冲个数,相同条件下进行多次扫描,采集多个脉冲。提取不同驱动电压下有脉冲经过时的谱能量值,通过拟合得到散射谱分布,进而反演得到温度值。系统参数的标称值如表 1 所示。

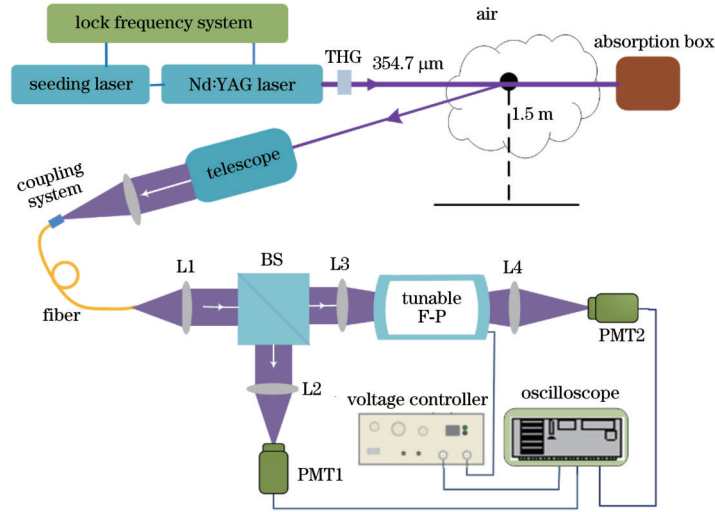


图 2 空气温度探测激光雷达系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of lidar system for air temperature detection

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Device	Parameter	Value
Laser	Wavelength /nm	354.7
	Energy /mJ	130
	Divergence angle / mrad	0.5
	Repetition frequency / Hz	10
	Spectral width /MHz	90
	Cavity length /mm	7.50
Fabry-Perot scanning interferometer	FSR /GHz	10.0
	Fineness	172
	FWHM /MHz	58

表 1 所示扫描 Fabry-Perot 干涉仪参数为厂家给定的标准值,其值受使用环境和实验条件等的影响,因此在实际探测前需对其进行标定。利用温度和压力已知可控的散射池对系统进行标定,以消除系统误差的影响。

3 Fabry-Perot 干涉仪参数标定实验及结果

3.1 F-P 扫描干涉仪驱动电压幅值和 FSR 标定

所购置 F-P 扫描干涉仪属于共焦腔结构,其自由光谱范围可表示为

$$\Delta\nu = \frac{c}{4nl}, \quad (3)$$

式中: l 为腔长; n 为腔内介质折射率; c 为光速。在施加不同的驱动电压时干涉仪的腔长产生变化。腔长变化使 F-P 扫描干涉仪的自由光谱范围产生变化。将式(3)左右两边对 F-P 扫描干涉仪腔长 l 求一阶偏导,得到 F-P 扫描干涉仪的自由光谱范围随腔长的变化量为

$$\frac{d(\Delta\nu)}{dl} = -\frac{c}{4nl^2} \times \Delta l, \quad (4)$$

式中: Δl 为腔长变化量。F-P 扫描干涉仪是通过控制压电陶瓷的外部电压改变共焦 F-P 腔的腔长,实现主极大透过率的中心波长的移动扫描。驱动锯齿波电压幅值决定了 F-P 扫描干涉仪的扫描范围。干涉仪的透过率与电压的关系可表示为

$$T(\nu, u) = \frac{1}{(1+R)^2} \frac{1}{1 + \frac{4R^2}{(1-R^2)^2} \sin^2 \left[\frac{4\pi n(\nu + c/\lambda_0)[r + l(u)]}{c} \right]}, \quad (5)$$

式中: R 为 F-P 腔反射率; λ_0 为入射激光的中心波长; $l(u)$ 为电压控制压电陶瓷导致的腔长变化; ν 为电压; u

为电压。

F-P 干涉仪控制箱输出的锯齿波电压幅值大小决

定了扫描干涉仪的频率扫描范围。354.7 nm 波长的瑞利散射谱全宽为 7.8 GHz(300 K),因此通过调整电压幅值实现 F-P 干涉仪一个 FSR(基准值为 10 GHz)的扫描范围,该范围可以覆盖一个瑞利散射谱宽。因此,需要标定 10 GHz 的扫描范围对应的电压幅值的大小。同时,在变化电压扫描过程中,腔长变化会导致 FSR 变化,电压与 FSR 之间的变化关系也需要进行标

定,因此设计了图 3 所示的系统对其进行标定。系统中采用窄线宽的标准连续激光器(CW laser)作为光源直接耦合入分光系统进行扫描。激光器的输出波长为 532 nm,谱宽小于 1 MHz, PMT1 路为参考光路,调整锯齿波电压幅值分别为 4.3, 5.0, 6.1, 10.0, 20.0 V 时得到 F-P 干涉仪的输出波形,如图 4 所示。

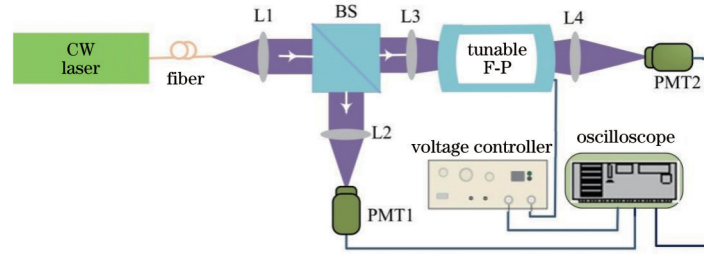


图 3 Fabry-Perot 干涉仪参数标定系统结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of parameter calibration system of Fabry-Perot interferometer

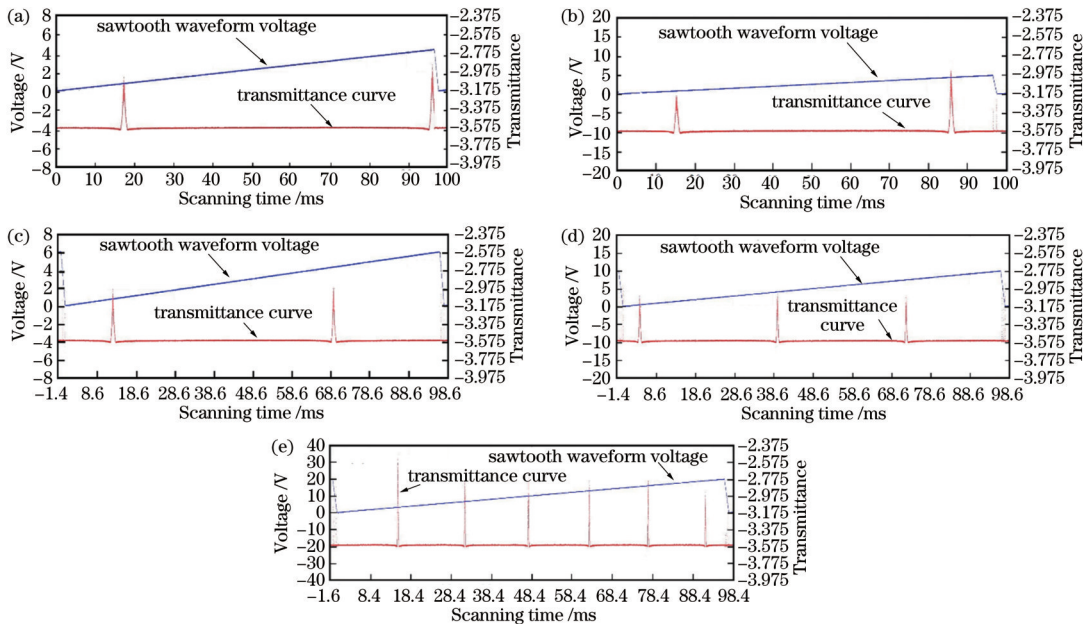


图 4 不同电压下 F-P 干涉仪的输出波形。(a) 4.3 V; (b) 5.0 V; (c) 6.1 V; (d) 10.0 V; (e) 20.0 V

Fig. 4 Output waveforms of F-P interferometer. (a) 4.3 V; (b) 5.0 V; (c) 6.1 V; (d) 10.0 V; (e) 20.0 V

从图 4 中可以看出,随着电压幅值的增大,一个电压周期对应的扫描范围增大,提取几组数据透过率峰值点对应的电压求平均值(表 2 中第 1 列),并计算相邻

峰值点的电压差值 ΔV (第 2 列)和对应的时间差值 ΔT (第 3 列),将第 1 个和第 2 个峰值之间对应的 FSR 设为 10 GHz,可以得到频率与扫描时间的标定系数为 0.55 GHz/ms,此时对应的电压差值为 3.48 V(第 2 列第 2 个数字),即得到了 10 GHz 对应的电压幅值为 3.48 V。相比于此,根据后面峰值的电压间隔可以分别得到对应的 FSR 值(第 4 列)及 FSR 变化值(第 5 列)。

表 2 FSR 随电压的变化量值
Table 2 FSR variation with voltage

Voltage / V	ΔV / V	ΔT / ms	FSR / GHz	Change in FSR / GHz
3.21	—	—	—	—
6.68	3.48	18.21	10	—
9.94	3.26	17.25	9.39	0.61
13.10	3.16	16.61	9.11	0.89
16.12	3.02	16.09	8.70	1.30

3.2 F-P 扫描干涉仪 FWHM 标定实验

购置的扫描 F-P 干涉仪的 FWHM 标称值为 58 MHz,根据 F-P 理想透过率谱分布,计算可得如图 5 (a)虚线所示的谱分布,其 FWHM 为 62 MHz,与标称值吻合。温度探测激光雷达系统(图 2)中部分激光直

接入射 F-P 干涉仪扫描后的谱线为 F-P 理想透过率函数与入射谱函数的卷积,激光谱宽为 90 MHz(表 1),理论计算得到的谱分布如图 5(a)中实线所示,其 FWHM 为 126 MHz。F-P 扫描干涉仪的透过率谱宽

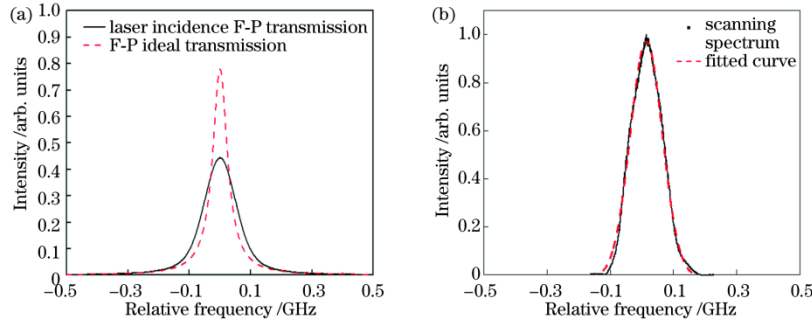


图 5 F-P 干涉仪的透过率分布曲线。(a)理论计算结果;(b)实验测试结果

Fig. 5 Transmittance distributions of F-P interferometer. (a) Theoretical calculation results; (b) experimental test results

3.3 F-P 扫描干涉仪温度控制系统标定

环境温度变化将影响扫描 F-P 干涉仪的腔长,因此需设计温度控制系统,保证扫描 F-P 干涉仪的温度稳定。共焦腔 F-P 干涉仪的中心频率随温度的变化可表示为

$$\frac{d\nu}{dT} = -\frac{qc}{4nl} \left(\frac{1}{n} \times \frac{dn}{dT} + \frac{1}{l} \times \frac{dl}{dT} \right), \quad (6)$$

式中: dn/dT 为腔内折射率 n 随温度的变化率,在标准大气压下,对于空气腔, dn/dT 的值为 $-9.22 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。F-P 干涉仪腔体采用殷钢材料,其线热膨胀系数 dl/dT 取值为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。532 nm 波长的激光对应的干涉级次 q 为 56392,将以上各参数代入式(6),可计算得到 $d\nu/dT$ 为 2.1 GHz/K,即温度每变化 1 K,干涉仪的透射峰对应的中心频率移动 2.1 GHz。设计的温控系统的控温精度为 0.003 °C,对应的频率稳定精度为 6.3 MHz,图 6 为 10 min 内的温控监测结果。连续激光直接入射,调节温控系统温度 (35.1~36.0 °C),温度间隔 0.1 °C,通过 F-P 干涉仪扫描得到的谱分布如图 7 所示。提取图中峰值移动信息,可得 0.1 °C 的温度变化对应的峰值频率移动量为 0.21 GHz,这与理论计算值一致。

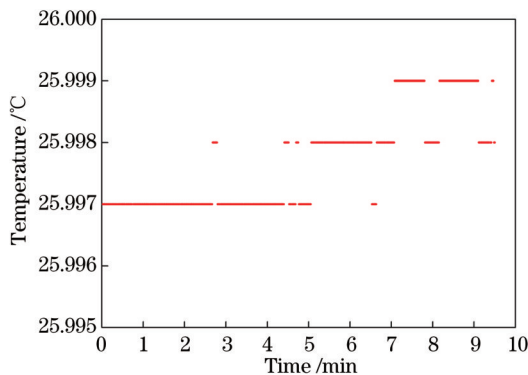


图 6 10 min 温度稳定性实验

Fig. 6 10 min temperature stability test

随着入射角度等因素发生变化,因此在特定的入射角度下需要标定 FWHM 值。调节入射角度为 0.05 rad,扫描得到 F-P 扫描干涉仪的透过率谱线如图 5(b)所示,其 FWHM 为 112 MHz。

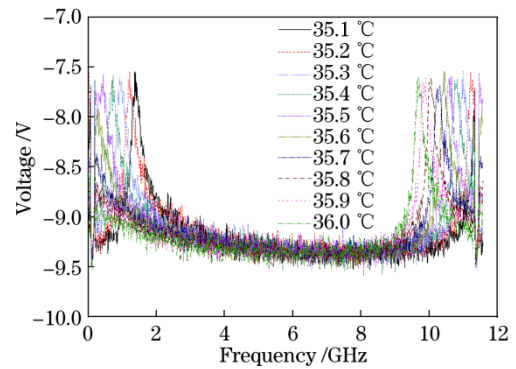


图 7 不同温度下干涉仪扫描透过率分布图

Fig. 7 Scanning transmittance distribution of interferometer at different temperatures

4 基于温度压力可控散射池的激光雷达温度探测标定实验

设计温度和压力可控制的散射池,其大气压力变化范围为 0.4~1 个大气压,气压控制精度为 $\pm 0.1 \text{ kPa}$,温度变化范围为 8~40 °C,控温精度可达到 $\pm 0.02 \text{ K}$ 。温度标定系统如图 8 所示。光源采用种子注入的 Nd:YAG 脉冲激光器,输出三倍频 355 nm 波长,接收 90° 方向散射信号进行探测。设置扫描 F-P 干涉仪的控制电压幅值为 3.48 V,锯齿波周期为 10 s,这样在一个电压周期内可以采集 100 个脉冲的数据点,扫过的频率范围为 10 GHz。

预置散射池温度分别为 25, 30, 35, 40 °C,散射池气压设置为 96 kPa, F-P 干涉仪扫描得到不同温度下的光谱数据,考虑米散射谱宽与激光谱宽一致,约为 90 MHz,而 F-P 干涉仪扫描步进为 100 MHz,因此米散射部分只能扫描一个点,忽略此点以去除米散射影响,得到的实验结果如图 9 所示。

F-P 干涉仪扫描得到的谱是由空气分子的散射谱与 F-P 扫描干涉仪透过率函数卷积得到的,与温度有

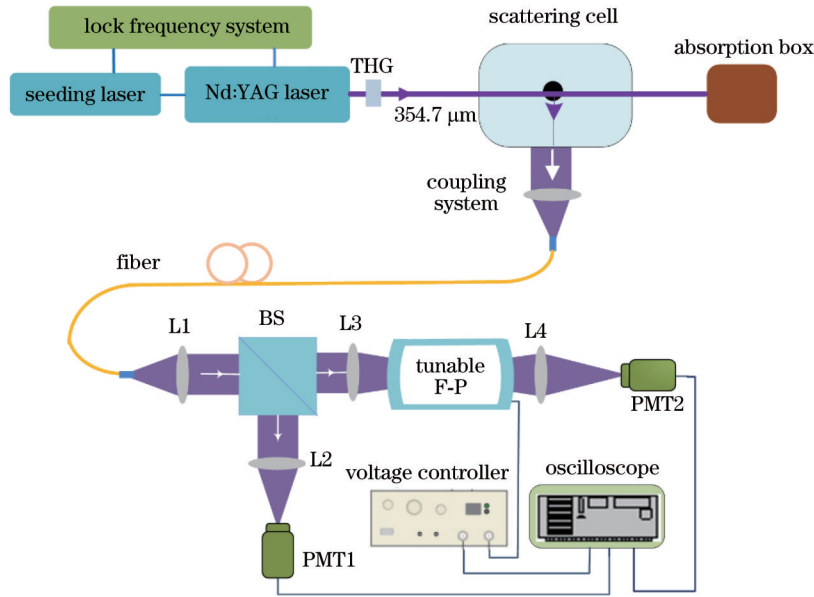


图 8 温度标定系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of temperature calibration system

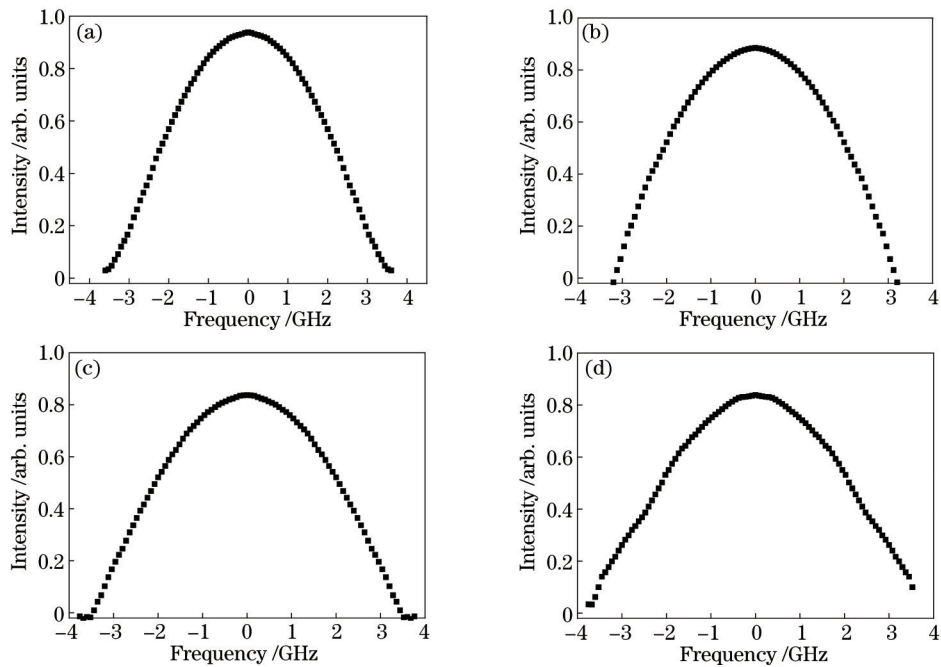


图 9 恒定压力、不同温度下的瑞利-布里渊散射谱。(a) 25 °C; (b) 30 °C; (c) 35 °C; (d) 40 °C

Fig. 9 Rayleigh-Brillouin scattering spectra at constant pressure and different temperatures. (a) 25 °C; (b) 30 °C; (c) 35 °C; (d) 40 °C

关的瑞利散射谱和与压力相关的布里渊散射谱叠加在一起。对扫描谱进行反卷积,得到瑞利-布里渊散射谱,用 Tenti S6 模型进行数据拟合对比,结果如图 10 所示。因为压力已知,在 Tenti S6 的散射模型里,由压力引起的布里渊散射谱也为已知项,不会给温度反演带来误差,因此模型拟合过程中只有温度作为变量,进行谱型拟合后可以得到反演温度数据,如表 3 所示。反演温度与设定温度之差如表 3 中第 5 列所示,其平均值为 2.98 K,将此值作为系统误差。将系统误差校正后各项残余误差如表 3 中第 6 列所示,最大

为 -0.69 K。

图 11 为对比实验反演的温度数据(圆点线)、系统误差校正后温度数据(三角线)与散射池预置的温度数据(方块线)。可见,校正系统误差后反演温度与设定温度吻合度良好,验证了系统进行空气温度探测的可行性。

5 结 论

针对空气温度的探测需求,设计了基于侧向散射的用于定点空气温度探测的 F-P 扫描激光雷达系统,

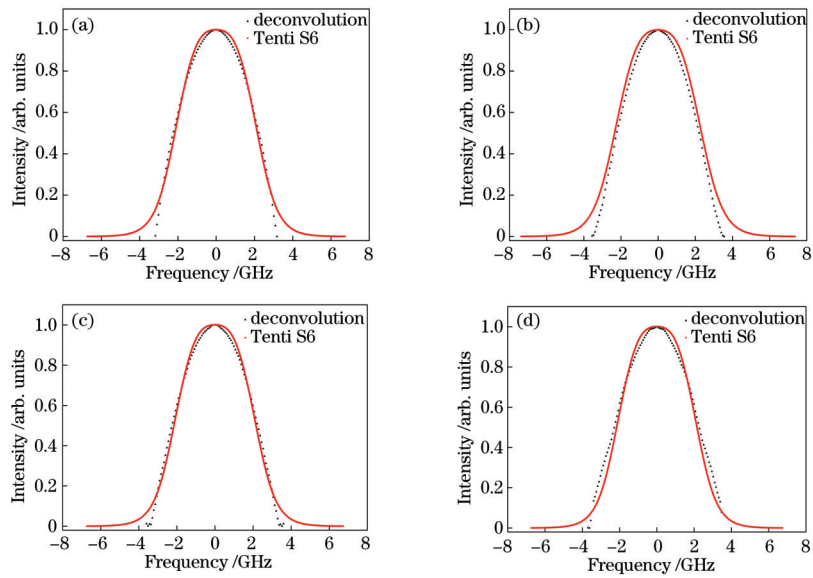


图 10 反卷积后的散射谱分布与 Tenti S6 拟合谱。(a) 25 °C; (b) 30 °C; (c) 35 °C; (d) 40 °C

Fig. 10 Deconvolution scattering spectrum distributions and Tenti S6 fitting spectra. (a) 25 °C; (b) 30 °C; (c) 35 °C; (d) 40 °C

表 3 温度反演结果

Table 3 Temperature retrieval results

Setting temperature /K	Linewidth of scattering spectrum / GHz	Linewidth of Rayleigh scattering spectrum /GHz	Retrieval temperature /K	Error /K	Error after correction /K
298.15 (25 °C)	4.441	3.8643	295.23	2.92	-0.06
303.15 (30 °C)	4.471	3.8943	299.83	3.32	0.34
308.15 (35 °C)	4.503	3.9263	304.78	3.37	0.39
313.15 (40 °C)	4.542	3.9653	310.86	2.29	-0.69

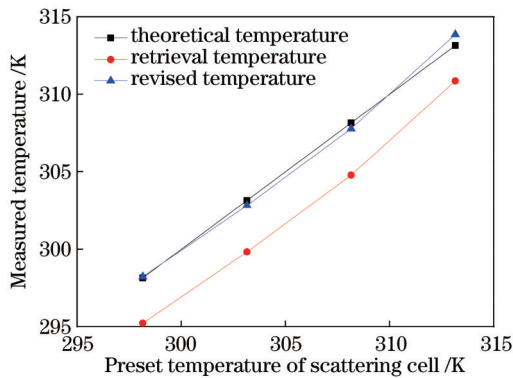


图 11 反演温度与设定温度的关系曲线

Fig. 11 Relationship between retrieval temperature and preset temperature

系统各部件的参数指标将对探测结果产生影响。基于此,本文对 F-P 扫描干涉仪的特性参数及系统的温度探测进行了标定技术研究。首先标定了 F-P 扫描干涉仪的驱动电压幅值与 FSR 之间的关系,得到 10 GHz 对应的电压幅值为 3.48 V;随着电压幅值的增加,FSR 逐渐减小。通过 FWHM 的标定实验,得到了在一定入射角度下直接扫描激光光源谱的 FWHM 值为 112 MHz。鉴于环境温度对 F-P 腔长的影响,设计了

温控系统,实现了 0.003 °C 的温度控制,通过改变温度得到 0.1 °C 的温度变化对应的峰值频率移动量为 0.21 GHz,这与理论计算值一致。最后利用可以调节温度和压力的散射池完成了系统温度探测标定实验,经过系统误差校正后,发现反演温度与预设温度吻合度良好,进一步验证了系统进行温度探测的可行性,为实际空气温度探测提供了基础。

参 考 文 献

- [1] Gu Z Y, Vieitez M O, van Duijn E J, et al. A Rayleigh-Brillouin scattering spectrometer for ultraviolet wavelengths[J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, 83(5): 053112.
- [2] Gu Z Y, Witschas B, van de Water W, et al. Rayleigh-Brillouin scattering profiles of air at different temperatures and pressures[J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4640-4651.
- [3] Gu Z Y, Ubachs W. A systematic study of Rayleigh-Brillouin scattering in air, N₂, and O₂ gases[J]. The Journal of Chemical Physics, 2014, 141(10): 104320.
- [4] Witschas B, Vieitez M O, van Duijn E J, et al. Spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering of ultraviolet light in nitrogen, dry air, and moist air[J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4217-4227.

- [5] Vieitez M O, van Duijn E J, Ubachs W, et al. Coherent and spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering in atomic and molecular gases and gas mixtures[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(4): 043836.
- [6] Witschas B. Analytical model for Rayleigh-Brillouin line shapes in air[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(3): 267-270.
- [7] Witschas B. Analytical model for Rayleigh-Brillouin line shapes in air: errata[J]. *Applied Optics*, 2011, 50: 5758.
- [8] Witschas B, Lemmerz C, Reitebuch O. Horizontal lidar measurements for the proof of spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering in the atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6207-6219.
- [9] Witschas B, Gu Z Y, Ubachs W. Temperature retrieval from Rayleigh-Brillouin scattering profiles measured in air [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29655-29667.
- [10] Witschas B, Lemmerz C, Reitebuch O. Daytime measurements of atmospheric temperature profiles (2–15 km) by lidar utilizing Rayleigh-Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1972-1975.
- [11] Xia R X, He X D, Wu T, et al. Theoretical and experimental analysis of spontaneous gaseous Rayleigh-Brillouin scattering spectra[J]. *Optik*, 2016, 127(18): 7262-7267.
- [12] Yang C Y, Wu T, Shang J C, et al. The effect of pressure on spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering spectrum in nitrogen[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(8): 970-977.
- [13] Shang J C, Wu T, Yang C Y, et al. Pressure and temperature retrieval of nitrogen respectively by analysis of spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering profiles[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 127-133.
- [14] 商景诚, 吴涛, 何兴道, 等. 气体自发瑞利-布里渊散射的理论分析及压强反演[J]. *物理学报*, 2018, 67(3): 037801.
Shang J C, Wu T, He X D, et al. Theoretical analyses of gaseous spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering and pressure retrieving[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(3): 037801.
- [15] Ma Y, Li H, Gu Z Y, et al. Analysis of Rayleigh-Brillouin spectral profiles and Brillouin shifts in nitrogen gas and air[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 2092-2104.
- [16] Liang K, Xu J Q, Zhang P, et al. Temperature dependence of the Rayleigh Brillouin spectrum linewidth in air and nitrogen[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1503.
- [17] Xu J Q, Witschas B, Kabelka P G, et al. High-spectral-resolution lidar for measuring tropospheric temperature profiles by means of Rayleigh-Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3320-3323.
- [18] Xu J Q, Witschas B, Liang K, et al. Characterization of a novel temperature lidar receiver by means of laboratory Rayleigh-Brillouin scattering measurements[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237: 07004.
- [19] Wang Y Q, Yu Y, Liang K, et al. Rayleigh-Brillouin scattering in SF₆ in the kinetic regime[J]. *Chemical Physics Letters*, 2017, 669: 137-142.
- [20] 王骏, 崔萌, 陆红, 等. 基于固体腔扫描法布里-珀罗干涉仪的大气温度绝对探测方法研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(8): 089202.
Wang J, Cui M, Lu H, et al. Investigation of the absolute detection method of atmospheric temperature based on solid cavity scanning Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 089202.