

基于法布里-珀罗干涉仪的脉冲激光谱型测量

樊焱^{1**}, 林兆祥^{1*}, 程学武², 詹伟强¹

¹中南民族大学电子信息工程学院智能无线通信湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

²中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071

摘要 脉冲激光谱型是大气风温探测激光雷达的重要参数之一, 它的精确测量能够为激光雷达风温反演提供科学有效的数据。由于激光的重复频率通常为几十赫兹(重复周期为几十毫秒), 而脉冲激光宽度仅为几纳秒, 因此脉冲激光的线宽测量比连续激光困难得多。构造了一套基于法布里-珀罗干涉仪、窄脉冲信号门积分平均器、模数采样器等的脉冲激光谱型测量系统, 并利用该系统完成了钠层风温激光雷达脉冲激光线宽的测量。利用该系统测量出该脉冲激光器的输出线宽约为 123 MHz, 与国外的测量结果 120 MHz 基本一致。该系统可搭载于激光雷达上用于实时监测激光谱型, 能为确保测风激光雷达的精度和稳定性提供技术支撑。

关键词 激光光学; 脉冲激光; 谱型; 法布里-珀罗干涉仪; 激光雷达

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0804006

Pulsed Laser Spectral Pattern Detection Based on Fabry-Perot Interferometer

Fan Yi^{1**}, Lin Zhaoxiang^{1*}, Cheng Xuewu², Zhan Weiqiang¹

¹Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, College of Electronics and Information Engineering, South-Central University For Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;

²State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

Abstract The spectral pattern of pulsed laser is one of the most important parameters for atmospheric wind and temperature lidar. Accurate detection of the spectral pattern of pulsed laser can provide scientific and effective data for wind and temperature inversion. Since the repetition rate of the laser is usually a few tens of hertz (the repetition period is a few tens of milliseconds) and the pulse width of laser is only a few nanoseconds, the linewidth measurement of pulsed laser is much more difficult than that of continuous laser. In this paper, a system based on Fabry-Perot interferometer (FPI), narrow pulse signal gate integral averager and modulus sampler is built, which can detect the spectral pattern of pulsed laser. The linewidth of the sodium layer wind and temperature lidar is detected by this system. The output linewidth of the pulsed laser is measured with the system to be approximately 123 MHz, which is basically consistent with the measurement result of 120 MHz in foreign countries. This system can be mounted on the lidar for real-time monitoring of the spectral pattern of laser, which can provide technical support for ensuring the accuracy and stability of the wind measurement lidar.

Key words laser optics; pulsed laser; spectral pattern; Fabry-Perot interferometer; lidar

OCIS codes 140.3538; 120.2230; 300.3700

1 引 言

多普勒测风激光雷达能够实时提供大气温度、风速、风向等信息, 是大气科学研究、空间环境监测预报等领域的重要观测手段。国内自 2010 年中国

科学院国家空间科学中心研制出第一台窄带风温探测激光雷达以来, 中国科技大学、中国科学院武汉物理与数学研究所等多家单位相继在窄带测风激光雷达领域有了突破性的研究发展^[1-4], 目前已实现了钠层峰值区(约 91 km)风场 1 m/s 和钠层边缘(约

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-04-08; 录用日期: 2018-04-10

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项(41627804)

* E-mail: lin_zhaox@126.com; ** E-mail: fanyi9258@163.com

82 km和 103 km) 约 5 m/s 的高精度钠层风温探测^[5]。在激光雷达风场与温度的数据反演中, 激光谱型是其重要的参数, 精确测量激光线宽是提高激光雷达反演精度的主要手段。标准具或干涉仪是一种高精度波长测量器件, 已在连续光激光光谱测量中得到广泛应用^[6-7]。然而, 对于脉冲激光来说, 由于其时间很短(纳秒量级), 因此不能采用常规探测和普通低速模数(AD)采样卡, 必须采用几乎达到吉赫兹量级的高速采样卡, 这种卡一般很难购买, 而且价格不菲。在常用的激光谱型测量方法中, 波长计的测量精度在 0.1 GHz 量级, 难以满足多普勒测风激光雷达的监测需求; 采用固定法布里-珀罗(FP)标准具测量时, 需要扫描激光器输出频率, 这会影响到激光雷达的正常工作状态, 因此无法实现在线实时监测。相比之下, FP 干涉仪(FPI)兼具测量精度高和实时在线扫描的特点, 配合门积分器的 FPI 可用于窄线宽纳秒脉冲激光谱型的测量。李润华等^[8]曾使用自行搭建的扫描标准具测出三种不同结构染料激光器输出的脉冲激光线宽; 宋宝安等^[9]利用多光束干涉原理搭建了测量装置, 测出了多普勒测速雷达的线宽。这些脉冲激光谱型测量装置均以示波器或面阵电荷耦合元件(CCD)相机等作为实验记录装置, 系统集成化程度较低, 数据处理需要事后进行, 不能实时在线监测激光的谱型, 无法满足高精度测风激光雷达的探测需求。本文利用 FPI、门积分器和高性能模数采样卡等设备搭建了集成度较高的脉冲激光谱型测量系统, 该系统结合自主编写的谱型测量软件能够自动测量脉冲激光谱型。使用该套系统对测风激光雷达的激光束进行了在线测量, 监测了激光雷达光源的工作状态, 为确保激光雷达的探测精度和稳定性提供了技术保障。

2 原理与方法

本研究使用的 FPI 为扫描式共焦型 FPI, 如图 1 所示。该干涉仪主要由两块反射率大于 99.7% 的具有相同曲率半径的球面反射镜 M_1 和 M_2 组成, 其中 M_1 固定不变, M_2 固定在压电陶瓷上, 通过调整压电陶瓷的外加电压可以改变 FPI 的腔长 L 。设 FPI 腔内折射率为 n , 若入射激光波长 λ 与腔长 L 满足:

$$4nL = m\lambda, \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

则透射光强达到最大值。当腔长 L 变化 $\lambda/4$ 时, 透射光从一个极大值跳到另一个极大值, 对应频率变化一个自由光谱范围。

对于连续光激光器来说, 激光线宽的测量比较

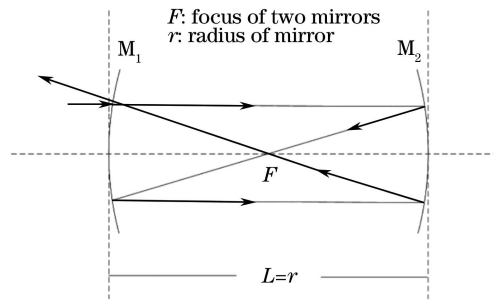


图 1 扫描式共焦型 FPI

Fig. 1 Scanning confocal FPI

容易, 但脉冲激光则不一样。由于本研究中的测量对象为脉冲激光, 脉冲频率为 30 Hz, 对应的时间宽度为 33 ms, 而其脉冲时间宽度为 8~10 ns, 占空比为 10^{-6} 量级, 也即大部分时间是没有光信号的, 因此很难直接使用数字采集卡采集。为此, 利用 Boxcar 门控积分平均器对超短脉冲信号进行积分累加处理, 将其变成直流电平信号, 便于模数转换和信号采集。在实际测量过程中, 激光脉冲具有能量差异, 因此采用在每个腔长获取多个脉冲信号进行平均的方法来消除该差异对测量精度产生的影响, 以便最终获得脉冲激光谱型。

3 系统设计

测量系统包含硬件部分和软件部分: 硬件部分由光路控制、电压控制和信号采集模块构成; 软件部分实现对 FPI 腔长的精确控制、数据处理和系统状态显示等功能。

3.1 硬件部分

该套测量系统的硬件构成如图 2 所示。

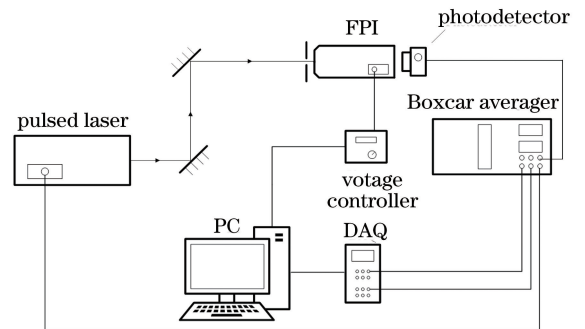


图 2 系统硬件构成

Fig. 2 System hardware composition

从激光雷达发射光束中分出的一束脉冲光束垂直进入 FP100 型高精度球面共焦腔 FPI(Toptica 公司)中, 出射光经 PDA100A 型光电探测器(Thorlabs 公司)转换成电信号, 纳秒脉冲的电信号输入到 SR250 型 Boxcar 平均器(Stanford Research

Systems 公司) 中进行平均。计算机(PC)通过 USB-6212 BNC 型高性能模数采样器(DAQ, National Instruments 公司)采集 Boxcar 平均器的

输出信号,同时通过 TPZ001 电压控制器(Thorlabs 公司)对 FPI 的腔长进行控制。该套系统中的主要硬件设备参数如表 1 所示。

表 1 主要硬件设备参数

Table 1 Parameters of main hardware devices

Device	Parameter	Value
FP100 FPI	Free spectral range /GHz	1
	Finesse	500
	Minimum spectral resolution /MHz	2
SR250 Boxcar averager	Gate width	1 ns-15 μ s
	Gate delay	1 ns-100 ms
TPZ001 piezo controller	Drive voltage /V	0-150
	Minimum precision /V	0.01
USB-6212 BNC AD sampling card	Maximum voltage range /V	-10-10
	Maximum sampling rate /kHz	400

3.2 软件部分

在 Visual Studio 2013 开发平台上使用 WPF (Windows Presentation Foundation) 编写软件, 结合硬件设备公司提供的软件开发工具包(SDK), 实现对测量系统的控制及信号的采集、处理和存储。软件流程图如图 3 所示。

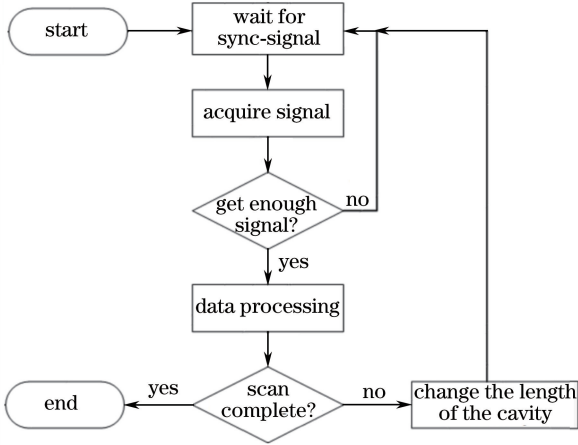


图 3 软件流程图

Fig. 3 Software flow chart

软件启动使模数采样器处于等待接收状态, Boxcar 信号平均器在完成脉冲信号处理后发出同步信号, 通知模数采样器接收数据, 计算机利用模数采样器获取足够多个脉冲信号后对数据进行二次处理, 并通过电压控制器改变 FPI 的腔长。系统在软件的自动控制下循环上述过程, 直到完成预设 FPI 扫描范围。

软件主界面如图 4 所示。在软件主界面上可以对信号采集通道、触发通道和扫描电压等进行设置, 实时显示谱型测量结果和系统状态。软件能够自动按照预设采集周期完成数据采集, 并存储测量结果。

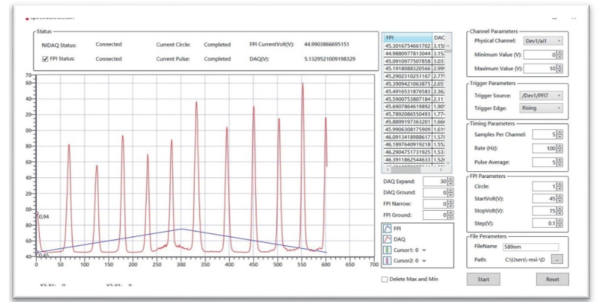


图 4 软件界面

Fig. 4 Software interface

4 测试与结果

为了验证系统的测量精度, 使用该套系统测量窄线宽为 589 nm 的连续激光。设置电压控制器的扫描范围为 45~75 V, 计算机每接收 5 个脉冲信号改变一次电压控制器的输出电压。谱型测量结果如图 5 所示。

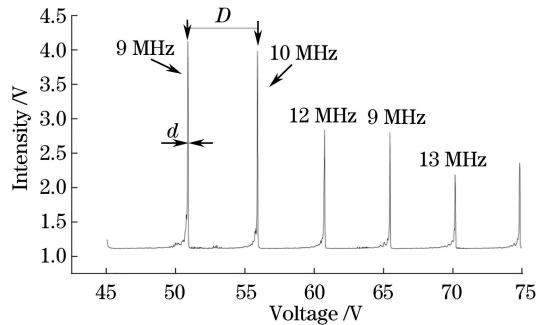


图 5 连续激光谱型测量结果

Fig. 5 Spectral pattern detection result of continuous laser

图 5 以 FPI 的扫描电压为横坐标, 以 Boxcar 平均器输出信号(FPI 透射光强)为纵坐标, 整个扫描过程出现了 6 个峰, 对应 6 个透射光强的极大值, 每

个极大值之间对应的频率变化为一个自由光谱范围。记待测峰的半峰全宽(即峰值高度一半时的峰宽度)为 d , 该峰与右侧相邻峰的峰间距为 D , 则待测峰的线宽的计算公式为

$$\omega_{1/2} = R_{fs} \cdot d/D, \quad (2)$$

式中: R_{fs} 为自由光谱范围, 本研究中所用 FPI 自由光谱范围为 1 GHz。

利用(2)式计算图中第一个峰的线宽, 其半峰全宽 $d=0.05$ V, 它与第二个峰的峰间距 $D=5.01$ V, 则第一个峰的线宽为 9.98 MHz, 约为 10 MHz。

以同样的方法计算其余峰的线宽, 结果见图 5 中标注。测得 5 个峰的平均线宽约为 11 MHz, 该结果和激光器出厂线宽(<10 MHz)、FPI 透射谱宽的卷积值一致, 说明该套测量系统的测量精度满足测量脉冲激光谱型的要求。

使用这套系统测量钠层风温激光雷达脉冲激光的线宽, 设置电压控制器的电压扫描范围为 45~75 V, 系统每接收 5 个脉冲信号改变一次电压控制器的输出电压(0.01 V)。谱型测量结果如图 6 所示。

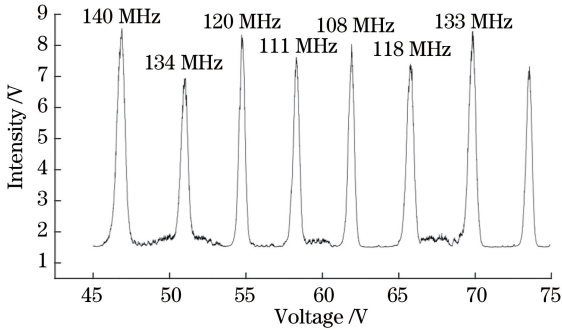


图 6 脉冲激光谱型测量结果

Fig. 6 Spectral pattern detection result of pulsed laser

图 6 以 FPI 的扫描电压为横坐标, 以 Boxcar 平均器输出信号(FPI 透射光强)为纵坐标, 在整个扫描过程中一共出现 8 个峰, 即透射光强出现 8 个极大值。

用(2)式计算图 6 中各峰的线宽, 计算结果如图 6 标注所示。测得 7 个峰(第 8 个峰无右侧相邻峰, 故不作计算)的平均线宽为 124 MHz。为了避免极端数据对线宽计算结果造成影响, 去除线宽最大值 140 MHz 和最小值 108 MHz, 最终得到平均线宽为 123 MHz。

为了与上述测量结果进行对比, 关闭电压控制器以保持 FPI 腔长 L 不变, 入射激光的输出频率以 30 MHz/s 的速度变化, 使用测量系统的信号采集

模块进行数据采集, 谱型测量结果如图 7 所示。

激光脉冲频率为 30 Hz, 每 5 个激光脉冲(≈ 0.16 s)获取一次谱型数据, 以时间为横坐标, 以 Boxcar 平均器输出信号(FPI 透射光强)为纵坐标绘出谱型图。由图 7 可以看出, 激光器自扫过程中出现了 8 个峰, 对应 8 个透射光强的极大值, 每个极大值之间相距一个自由光谱范围。同样利用(2)式计算出线宽, 去除最大线宽 141 MHz 和最小线宽 121 MHz, 得到平均线宽为 131 MHz。

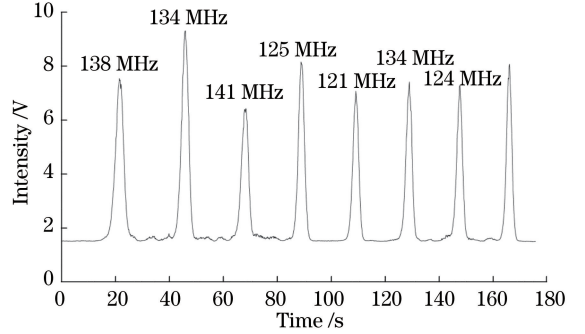


图 7 脉冲激光自扫描谱型测量结果

Fig. 7 Self-scanning spectral pattern detection result of pulsed laser

经过 FPI 扫描和激光器自扫对比测试可知, 该套测量系统测得该标准激光器的平均线宽约为 123 MHz, 与激光器出厂值 120 MHz 相当, 也与国外研究者给出的测量值近似^[10]。虽然 FPI 使用的压电陶瓷因受电压变化影响而可能存在非线性问题, 但本研究所施加的扫描电压(45~75 V)处于压电陶瓷的扫描电压范围(0~150 V)的中间段, 非线性效应影响较小, 因此将压电陶瓷形变量随电压的变化近似为线性关系。

5 结 论

多普勒测风激光雷达激光器的线宽通常在 100 MHz 量级, 脉冲时间宽度约为 10 ns, 脉冲频率小于 100 Hz, 故而在毫秒量级周期内提取纳秒量级信号在技术上具有挑战性。本研究利用高精度 FPI 和 Boxcar 平均器等光电设备构建了检测系统, 通过自主研发专门软件, 实现了脉冲激光谱型的实时在线监测。经过多次实验验证得到的测量结果和激光器的出厂值基本一致, 能满足测风激光雷达的精度要求。后续拟以该套测量系统为基础, 增加反馈模块, 直接将谱型测量结果反馈至激光雷达系统, 这样能够有效避免激光的频移和跳模对激光雷达探测的影响, 为测风激光雷达的精确测量和稳定工作提供保障。

参 考 文 献

- [1] Hu X, Yan Z A, Guo S Y, *et al.* Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region [J]. *Science Bulletin*, 2011, 56(3): 247-253.
胡雄, 闫召爱, 郭商勇, 等. 钠荧光多普勒激光雷达测量中间层顶区域大气温度 [J]. *科学通报*, 2011, 56(3): 247-253.
- [2] Li T, Fang X, Liu W, *et al.* Narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5401-5411.
- [3] Li Y J, Lin X, Yang Y, *et al.* Temperature characteristics at altitudes of 5-80 km with a self-calibrated Rayleigh-rotational Raman lidar: a summer case study [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 188: 94-102.
- [4] Xia Y, Wang Z L, Cheng X W, *et al.* All-solid-state narrowband sodium lidar system and preliminary result [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(s1): s113003.
夏媛, 王泽龙, 程学武, 等. 全固态窄带钠层荧光激光雷达系统及初步观测结果 [J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s113003.
- [5] Xia Y, Du L F, Cheng X W, *et al.* Development of a solid-state sodium Doppler lidar using an all-fiber-coupled injection seeding unit for simultaneous temperature and wind measurements in the mesopause region [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5264-5278.
- [6] Huang W C, Xie J P, Lü L, *et al.* Spectrum method of F-P etalon spacing high precision measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(8): 739-742.
黄文财, 谢建平, 吕亮, 等. 高精度测量 F-P 标准具间距的光谱方法 [J]. *中国激光*, 2003, 30(8): 739-742.
- [7] Wang Y F, Hua D X, Mao J D. Effect of propagation properties of Gaussian beam on Fabry-Perot etalon in lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(12): 3013-3018.
王玉峰, 华灯鑫, 毛建东. 高斯光束的传输特性对法布里-珀罗标准具分光的激光雷达影响 [J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3013-3018.
- [8] Li R H, Gong S S. Measurement of spectroscopic width of pulsed laser using scanning etalon [J]. *Laser Technology*, 1994, 18(6): 366-369.
李润华, 龚顺生. 高重复频率脉冲激光谱线宽度的测量方法 [J]. *激光技术*, 1994, 18(6): 366-369.
- [9] Song B A, Zhao W J, Ren D M, *et al.* Spectral measurement method for stability of pulse laser frequency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 660-662.
宋宝安, 赵卫疆, 任德明, 等. 利用光谱测量脉冲激光频率的稳定性 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 660-662.
- [10] Su L G, Collins R L, Krueger D A, *et al.* Statistical analysis of sodium Doppler wind temperature lidar measurements of vertical heat flux [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(3): 401-415.