

文章编号:1001-5078(2010)01-0083-04

· 光电技术与系统 ·

测风激光雷达中 F-P 标准具频率跟踪方案及实现

蒋立辉¹, 闫朴¹, 孙东松², 唐磊², 董晶晶², 沈法华³, 冯帅¹

(1. 中国民航大学电子信息工程学院, 天津 300300; 2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

3. 盐城师范学院物理系, 江苏 盐城 224002)

摘要:在直接探测测风激光雷达中,多普勒频移由高分辨率的 Fabry-Perot 标准具检测得到。指出了激光频率与标准具腔长随环境温度的变化导致测量误差增大的问题,提出了频率跟踪的解决方案。使用散射光纤对激光脉宽进行扩展,在双通道标准具的基础上增加专用于频率跟踪的通道,使用光电倍增管检测光强,设计制作了基于采样的频率跟踪电路。仿真实验表明,该方案能够实现标准具腔长与激光发射频率的动态跟踪。

关键词:激光雷达; Fabry-Perot 标准具; 频率跟踪; 光电倍增管

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Frequency tracking solution and achievement for Fabry-Perot etalon in wind lidar

JIANG Li-hui¹, YAN Pu¹, SUN Dong-song², TANG Lei², DONG Jing-jing², SHEN Fa-hua³, FENG Shuai¹

(1. Electronic Information Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Department of Physics, Yancheng Teachers College, Yancheng 224002, China)

Abstract: A Fabry-Perot etalon with high spectral resolution is used as the frequency discriminator in the direct detection wind lidar. The laser frequency and the spacing of cavity drift as the temperature changes, which will cause the increasing of error. A frequency tracking solution is proposed. A backscatter fiber is used to expand the width of laser pulse. A locking filter is added to dual F-P etalon. Photo Multiplier Tube (PMT) is used to detect the intensity of light and a frequency tracking circuitry is designed. The results of simulation experiment indicated that, the spacing of cavity is able to lock to the laser by this method.

Key words: lidar; Fabry-Perot etalon; frequency tracking; photo multiplier tube

1 引言

多普勒测风激光雷达属于主动测量系统,它向大气发射激光脉冲并测量不同高度上返回信号的多普勒频移,根据频移量的大小计算风速。在直接探测多普勒测风激光雷达系统中,将激光回波信号入射到 F-P 标准具中,利用其频率响应函数即透过率曲线陡峭的边缘,将回波信号的频率变化转化为光强的变化。通过检测光强的大小,并根据已知的频率响应函数计算出发射激光和回波信号的频率,得到多普勒频移的大小,进一步反演出风速^[1-2]。

在实际测量中,由于温度变化以及其他因素的影响,激光器的发射频率会产生缓慢的漂移,标准具的透过率曲线也会发生平移,当二者的相对变化导致激光频率远离标准具透过率曲线陡峭的边缘,进入相对平缓的区域后,由于灵敏度下降,测量精度将会下降。另一方面,由于对光强的检测是通过累计

基金项目:中国科学院创新研究项目课题(No. cx0201)资助。

作者简介:蒋立辉(1964-),男,教授,主要研究方向为光电子技术及在航空气象探测中的应用。E-mail:jlhhit@163.com

收稿日期:2009-07-01;修订日期:2009-09-02

一段时间得到的,在这段时间内激光发射频率的突变会导致累计到不同频率的光的光强,也会增大普勒频移的测量误差。

解决方案通常有激光器稳频和频率跟踪两种。关于激光器稳频,目前已有许多成熟的方法^[3-4],但由于标准具的腔长随着环境温度的变化也在产生变化,并不能保证稳频后的激光发射频率与标准具透过率曲线的相对位置时刻保持一致。因此设计了一种频率跟踪方案,通过频率跟踪电路改变标准具的腔长,实现腔长与激光频率的动态跟踪。

2 F-P 标准具频率跟踪原理

理想的标准具透过率曲线是一个 Airy 函数^[5]:

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

式中, ν 是激光频率; l 是标准具腔长; R 是对应波长反射率; n 是平板间介质的折射率; L 是通过标准具的光损耗; θ 是入射光与标准具反射表面法线的夹角; F 是有效精细度。式(1)中对应的频谱分布如图1所示。

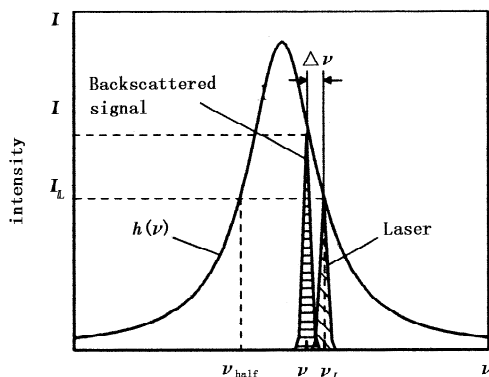


图1 F-P 标准具透过率曲线

当 ν 接近于半高频率 ν_{half} 时, $h(\nu)$ 近似为线性^[1]。在近似线性区内,将 $h(\nu)$ 写为:

$$h(\nu) = k(\nu - \nu_0) + h_0 \quad (2)$$

其中, k 为斜率; ν_0 和 h_0 为常数。当 ν_L 产生 $\Delta\nu$ 的变化时,由式(2)得:

$$\Delta\nu = (h - h_L)/k \quad (3)$$

由式(1)可知,当激光频率 ν 与标准具腔长 l 各自发生变化时,若 $(\nu + \Delta\nu)(l + \Delta l) = \nu_l$,则透过率 h 不变,即:

$$\Delta l = -\Delta\nu_l / (\nu + \Delta\nu) \quad (4)$$

因 $\Delta\nu \ll \nu$,式(4)近似为:

$$\Delta l = -\Delta\nu_l / \nu \quad (5)$$

由式(3)及式(5),有:

$$\Delta l = -(h - h_L)l/k\nu \quad (6)$$

斜率 $k = dh/d\nu$,可以通过实验测出。当透过率变化后,根据式(6)计算 Δl ,对标准具腔长进行调整,便可实现标准具腔长与激光发射频率的动态跟踪与锁定。

透过率的测量精度取决于激光能量的测量精度。光子计数探测器 (SPCM) 能够检测到单个光子,具有极高的测量精度。将激光器出射光分出两束能量非常小但相等的光,一束通过标准具后耦合到一个 SPCM,另一束直接耦合到另一个 SPCM 中,将累加结果送入计算机,通过除法运算得到透过率的大小。该方法已用于基于 F-P 标准具米氏散射多普勒测风激光雷达中,实现了透过率的高精度测量。然而,为了保证 SPCM 不会因光强过高而饱和,耦合至 SPCM 的光必须极弱。又因 Nd:YAG 激光器的出射光通常为纳秒级脉宽的脉冲光,所以每个脉冲内探测到的光子数很少,高精度的光强检测需要累加几十秒,无法实现实时跟踪。

使用上述米氏散射测风激光雷达进行为期三个月的连续观测实验。统计激光频率在 45 s 中的变化量,最大值为 19.32 MHz,均值为 2.35 MHz。若采用光子计数探测器的方式,需要累加几十秒的才能获得透过率,在此期间内,激光发射频率已经发生了数兆赫兹的变化,降低了测量精度。为了解决这个问题,选择了使用散射光纤扩展脉宽,使用光电倍增管 (PMT) 和采样电路探测光强的方案。

3 方案设计

3.1 接收机光路结构

采用三通道标准具技术的直接探测测风激光雷达接收机光路结构示意图如图2所示。在标准具的三个通道中,一个通道用于锁定,另外两个用于测量频移。Nd:YAG 激光器射出的部分光耦合至 200 m 长的散射光纤中,利用光纤的后向散射作用,将窄脉冲展宽,经分束片分为两束,一束作为参考信号耦合到光电倍增管 (PMT) 中,另一束经过标准具的锁定通道后耦合到另一个 PMT 中,对两个 PMT 的响应进行采样,通过除法运算得到透过率,经频率跟踪电路处理后改变标准具腔长控制电压的大小,通过标准具控制器实现对腔长的调整。大气后向散射光通过望远镜接收后进入接收机,经过滤光片后,由分束片分为三束,一束作为能量探测,另两束入射到标准具的两个通道。三束光最终分别耦合至三个单光子探测器 (CPM) 中,使用采集卡采集后送入计算机进行数据处理和风速反演。

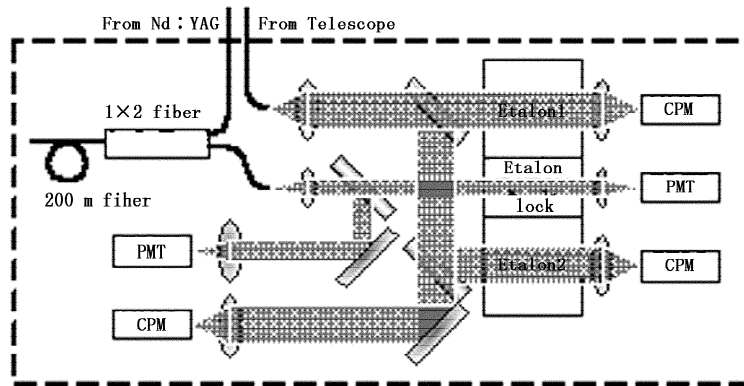


图2 接收机光路结构示意图

当激光雷达长期不工作,再次开机时,采用步进调整标准具腔长的方法,在较大的范围内找到使锁定通道透过率大约达到峰值一半的腔长位置,保证激光发射频率落在近似线性区。由于激光器发射频率的漂移及标准具腔长的变化是缓慢的,因此短时间(几秒至几分钟)的变化不会使激光频率落在近似线性区外,使用式(6)计算调整量并反馈给标准具控制器,实现频率的动态跟踪。

表1给出了标准具的设计参数^[6]。

表1 标准具的设计参数

Parameter	Value
Wavelength/nm	355
Etalon free spectral range(FSR)/GHz	12
Etalon FWHH/GHz	1.7
Etalon peak transmission/%	60

3.2 频率跟踪电路硬件结构设计柏旭光

频率跟踪电路的结构如图3所示,图中虚线框内的部分为频率跟踪电路。由于PMT输出信号为

单端信号,且输出电压较低,故采用高速差分放大器AD8139将信号放大,转为模数转换器(ADC)所需的差分信号,并抑制共模噪声。将两路差分信号送入14位、分辨率122 μV、最高采样率为20 Mps的双通道ADC中进行采样,结果送入FPGA中进行累加。累加时,按照时序分为信号部分和背景噪声部分,累加结束后,扣除背景噪声得到PMT的输出电压累加值。将两个PMT的电压累加值作浮点除法运算,得到透过率,根据式(6)计算出腔长调整量,由FPGA控制16位、分辨率为305 μV的DAC输出至标准具Z轴控制器,通过改变腔长来改变透过率,实现了频率的动态跟踪。对ADC采样的时序控制由FPGA实现,每次累加由直接探测测风激光雷达可编程门控来触发^[7]。计算机通过串口与单片机进行通信,实现对频率跟踪电路工作状态的控制,接收并监控频率跟踪电路扫描出的透过率数据。计算机端的控制跟踪程序由VC编写为动态链接库接口文件,便于其他程序调用。

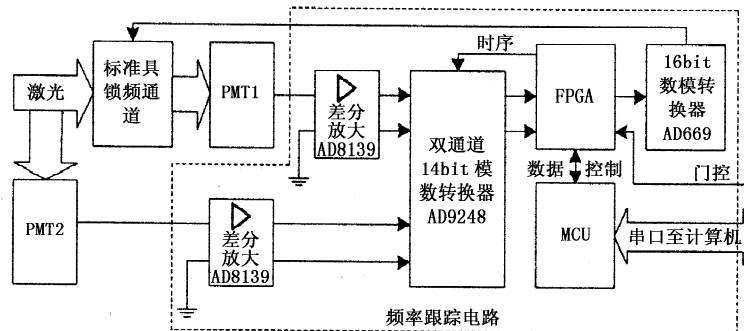


图3 频率跟踪电路结构图

电路实物图如图4所示。电路板尺寸为127 mm × 101.6 mm,固定在一个符合VXI标准A

尺寸的金属屏蔽盒中。屏蔽盒放在标准具控制器的机柜中。

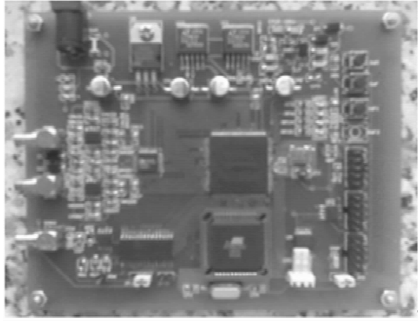


图4 电路实物图

3.3 精度和跟踪速度计算

由于 ADC 的采样分辨率为 $122 \mu\text{V}$, 单次采样时, 根据函数关系为 $N = x/y$ 的误差传递函数:

$$\frac{E_N}{N} = \sqrt{(\sigma_x/x)^2 + (\sigma_y/y)^2} \quad (7)$$

即:

$$E_N = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{x^4} y^2 + \frac{\sigma_y^2}{x^2}} \quad (8)$$

当透过率为峰值的一半时, 最小分辨率约为 6.05×10^{-4} 。式(7)中, x 为未通过标准具的光强, y 为通过标准具后的光强。采样累计 100 次后, 精度提高约 $\sqrt{N} = 10$ 倍, 即 6.05×10^{-5} 。

DAC 的分辨率为 $305 \mu\text{V}$, 由于标准具 Z 轴调节范围是 $2 \mu\text{m}$, 调节电压范围是 $-10 \sim +10 \text{ V}$, 因此 DAC 每步对应的腔长为 0.0305 nm , 根据表 1 中的参数和式(5)得对应频率为 2.062 MHz , 再根据式(3)得, 对应的透过率变化量为 9.5×10^{-4} , 远大于透过率的测量精度 6.05×10^{-5} , 因此频率跟踪的精度应当按照 DAC 的输出精度计算, 为 2.062 MHz , 对应径向风速为 0.37 m/s 。

若每个脉冲采样 20 次, 激光重复频率 30 Hz , 对采样 100 次需要 $167 \sim 200 \text{ ms}$, 加上运算时间 1 ms 和标准具响应时间 2 ms , 共计 $170 \sim 203 \text{ ms}$, 远小于光子计数探测器方法所需的几十秒的时间, 能够实现实时跟踪。

4 实验结果

为验证频率跟踪电路的性能, 对电路进行模拟测试。由 ADLINK 公司生产的 16 位, 分辨率为 0.3 mV 的数模转换卡 PCI-6208V 仿照 PMT 的响应产生两路仿真信号, 使用频率跟踪电路进行采样和处理, 得到电压比值, 并使用 ADLINK 公司生产的 14 位, 分辨率为 0.122 mV 的采样板 PCI-9820 对频率跟踪电路 DAC 的输出进行采样。以 1 mV 为步长逐步改变一路仿真信号电压 V_{in1} 的大小, 另一路电压 V_{in2} 保持不变, 得到不同的电压比值和 DAC 输出结果, 如图 5 所示。

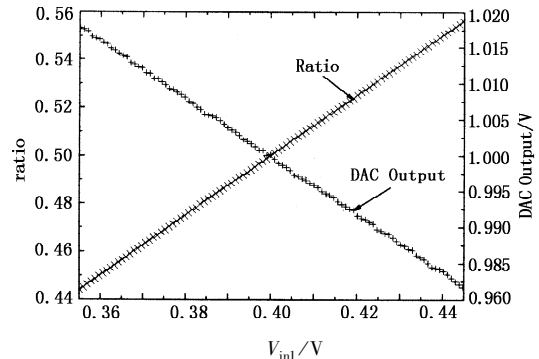


图5 电压比值和 DAC 输出结果

从图 5 中可以看出, 仿真信号的大小、电压比值和 DAC 输出结果之间呈线性关系, 当仿真信号发生变化时, 频率跟踪电路能够按照式(6)改变控制电压, 实现输出电压与输入电压的动态跟踪。

5 结论

F-P 标准具的透过率曲线具有陡峭的边缘, 在测量光的多普勒频移时具有很高的精度。然而激光频率的漂移和标准具腔长的变化会导致激光频率远离透过率曲线的边缘, 降低了测量精度。因此设计了频率跟踪方案, 采用散射光纤扩展脉宽, 增加标准具锁定通道并使用自主研发的频率跟踪电路调整标准具腔长。仿真实验表明, 该方法能够实现 F-P 标准具腔长与激光发射频率的实时动态跟踪。

参考文献:

- [1] C Laurence Korb, Bruce M Gentry, Chi Y Weng. Edge technique; theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. Appl. Opt. 1992, 31: 4202 - 4213.
- [2] C Laurence Korb, Bruce M Gentry, S Xingfu Li. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement [J]. Appl. Opt. 1998, 37: 3097 - 3104.
- [3] Peter Esherick, Adelbert Owyong. Polarization feedback stabilization of an injection-seeded Nd:YAG laser for spectroscopic applications [J]. Opt. Soc, 1987, 1: 41 - 47.
- [4] E Inbar, V Mahal, A Arie. Frequency stabilization of Nd:YAG lasers to ^{133}Cs sub-Doppler lines near 1064 nm [J]. Opt. Soc, 1996, 13: 1598 - 1604.
- [5] 夏海云, 孙东松, 钟志庆, 等. 激光雷达中 F-P 标准具的分析及性能检测 [J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 29 - 31.
- [6] 沈法华, 舒志峰, 董吉辉, 等. 瑞利散射测风激光雷达接收机的研究 [J]. 红外与激光工程. 2008, 37(增刊): 120 - 124.
- [7] 董晶晶, 岳斌, 孙东松, 等. 直接测风激光雷达中可编程门控的实现 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 125 - 128.