

直接测风激光雷达中F-P标准具的频率动态锁定

董晶晶, 孙东松, 夏海云, 沈法华, 钟志庆, 王邦新, 周小林, 李颖颖

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 直接探测多普勒测风激光雷达中, 双边缘技术可分别测量回波信号中大气分子散射和气溶胶散射的成分, 因而在保持高测速灵敏度的同时, 可以减小瑞利背景噪声的影响。这决定了其在大气对流层风场观测的优势地位。直接探测双边缘技术中, 使用双通道 Fabry-Perot 标准具作为鉴频器, 将频率变换转换为信号强度变化。该技术的前提是出射激光频率始终处在双通道标准具透过率曲线的交点频率附近。提出的标准具腔长调制反馈电路方法有效解决了该问题。

关键词: 激光雷达; Fabry-Perot 标准具; 伺服稳定

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)增 C-0279-05

Servo-stabilizing circuitry for Fabry-Perot etalon in direct detection wind lidar

DONG Jing-jing, SUN Dong-song, XIA Hai-yun, SHEN Fa-hua, ZHONG Zhi-qing, WANG Bang-xin,
ZHOU Xiao-lin, LI Ying-ying

(Institute of Anhui Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: A stabilizing circuitry is designed to modulate the cavity of the Fabry-Perot interferometer with respect to a reference frequency, while simultaneously keep the parallelism of the reflecting flats. Double-edge technique allows the Rayleigh and aerosol components of the backscattered signal to be independently determined while keeping high measuring sensitivity. These advantages make it become a popular method in wind observation in troposphere and low stratosphere. The double-edge technique uses two edges with opposite slopes symmetrically located near the laser frequency, so the Fabry-Perot etalon as a frequency discriminator transforms the Doppler frequency information into intensity changes of the signal.

Key words: Lidar; Fabry-Perot etalon; Servo-stabilization

0 引言

全球风场的主动观测被世界气象组织称为最具意义和挑战性的气象观测之一^[1]。随着对风场信息重要性

收稿日期: 2006-08-15

作者简介: 董晶晶(1982-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 从事测风激光雷达光电设计方面研究。

的逐步认识, 及其在大气光学、气象和气候研究以及航空航天等领域中的应用, 测风激光雷达在近 20 年迅速发展, 并有超越传统测风方法的趋势。目前测风激光雷达可分为相干探测和直接探测两种。直接探测又可以分为条纹技术和边缘技术。在直接探测技术中, 激光频率和鉴频器件的频率随机漂移将导致较大的系统测量误差。提出一种动态的跟踪技术, 即通过调制 F-P 标准具腔长的办法始终保持出射激光频率处在双通道标准具透过率的交点附近。

1 原理

1.1 Fabry-Perot 标准具在测风激光雷达中的应用

如果设计标准具的双通道腔长不等, 可以使两标准具透过率曲线的峰值间距为 200 MHz^[2]。锁定出射激光频率在双通道响应曲线的交点位置附近, 如图 1 所示。

分别测量出射激光和大气后向散射信号相对于每一个响应曲线的强度。为了计算方便, 假定两条响应曲线的峰值都处于零频率处。即: 相对边缘 1 的峰值而言, 激光锁定在频率 ν_1 , 相对边缘 2 的峰值, 激光锁定在频率 $-\nu_2$ 。激光束发射到大气中, 一部分被气溶胶和分子后向散射回接收天线。在后向散射过程中, 风导致了激光束的多普勒频移 $\Delta\nu = 2(V/c)\nu$, 其中 V 是径向风速, c 是光速。在边缘 1 上, 大气气溶胶后向散射和分子后向散射的峰值频率为 $\nu_1 + \Delta\nu$ 。在边缘 1 上探测到的信号是:

$$I_1 = c_1 [I_A \tau_1(\nu_1 + \Delta\nu) + R_1(\nu_1 + \Delta\nu)] \quad (1)$$

式中: c_1 是准直常数; I_A 是气溶胶信号; τ_1 是气溶胶信号在边缘 1 上的透过率, 即边缘方程和激光光谱函数的卷积; $R_1(\nu_1 + \Delta\nu)$ 是瑞利光谱、激光光谱和边缘滤光器响应函数的卷积。同理:

$$I_2 = c_2 [I_A \tau_2(\nu_2 - \Delta\nu) + R_2(\nu_2 - \Delta\nu)] \quad (2)$$

根据公式 (1) 和 (2) 测量标准具透射信号的强度变化, 即可得多普勒频移 $\Delta\nu$, 最终反演出风速^[3]。

1.2 Fabry-Perot 标准具的结构与控制原理

图 2 为 Fabry-Perot 标准具结构图, 图中 a 、 b 、 c 为三个均匀分布的压电陶瓷驱动器, 通过调节它们的电压可以调节标准具前后反射面平行或者改变标准具的腔长。 Cx_1 、 Cx_2 、 Cy_1 、 Cy_2 为四个腔长探测器, 可以感应前后反射面是否平行以及腔长的改变。双通道 F-P 标准具的系统参数如表 1 所示。

理想 Fabry-Perot 标准具的透过率是一个 Airy 函数:

$$h(\nu) = \left(1 - \frac{L}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

式中: R 为反射率; L 为光损耗; c 是光速; F 是有效精细度;

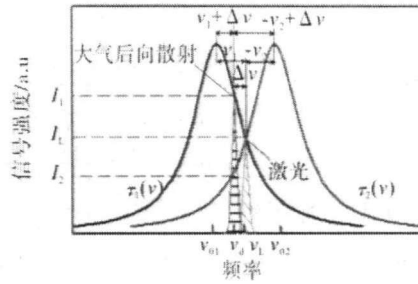


图 1 双边缘测风激光雷达原理图

Fig.1 Double-edge schematic diagram

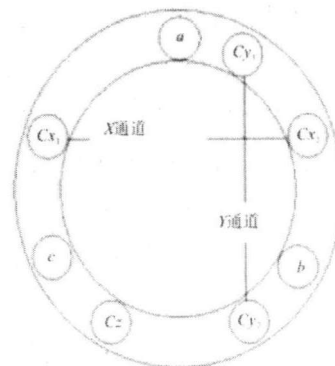


图 2 F-P 标准具结构

Fig.2 Structure of the Twin-channel F-P

φ 为相位因子。即:

$$\varphi = \frac{4\pi nvl}{c} \cos\theta \quad (4)$$

式中: l 为标准具腔长; ν 是入射光频率; θ 是入射光与标准具反射表面法线的夹角; n 为平板间介质的折射率。当满足以下条件时, 干涉条纹为亮纹。

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{2\pi\nu\cos\theta}{c} = m\pi \quad (5)$$

表 1 双通道 F-P 标准具的系统参数

Tab.1 Parameters of the twin-channel F-P etalon

腔长	双通道腔长差	腔长扫描范围	反射率	通光口径	工作波长
42 856 μm	30.4 nm	>3.5 μm	86.6% \pm 1%	50 mm	1 064 nm

若保持标准具上入射光的发散角不变且强度分布均匀, 由公式(5)可知: 对第 m 级亮条纹而言, 如果频率 ν 变小的同时标准具腔长 l 变大, 可以保持第 m 级条纹的位置不变。当正入射时, $\cos\theta=1$ 带入公式(5), 并求微分, 注意 m 不变, 可得:

$$\frac{2\pi}{c} \nu dl + \frac{2\pi}{c} l d\nu = 0 \quad (6)$$

将表 1 双通道 F-P 标准具的系统参数带入上式可知: 扫描时, 腔长改变与频率移动的关系为:

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta l} = -\frac{\nu}{l} = -\frac{6.57 \text{ MHz}}{1 \text{ nm}} \quad (7)$$

即若腔长增大 1 nm 相当于频率向低频移动 6.57 MHz。若腔长控制的精度为 0.1 nm^[4], 那么频率锁定的精度为 0.657 MHz。对标准具中的压电陶瓷, 电压升高对应于腔长增大, 1 V 电压变化 100 nm。由公式(7)知: 若想要标准具透过率中心向高频方向移动 1 MHz, 则加在压电陶瓷上的电压应该降低 1/657 V。

2 频率动态锁定的实现

给标准具的 Z 调制加电压可改变腔长, 使两个通道的透过率曲线同时向一个方向移动, 可以把双通道标准具透过率曲线的交点频率和激光器的频率动态锁定。当出射激光频率不处在双通道 F-P 标准具透过率曲线的交点时, 则信号在鉴频器上的透过率将产生较大变化。由于透过率在交点处斜率相反, 所以一个通道的透过率增大, 而另一个则减小。实际测得双通道透过率曲线如图 3 所示, 分别记双通道透过率为 T_1 和 T_2 。可以使用第二通道的透过率信号作为反馈信号。如图 4 所示, 在双通道透过率曲线交点附近, 2 通道的透过率曲线近似为线性。对虚线框内的实测透过率值采用最小二乘法线性拟合的斜率值为 0.313% /MHz。由上述频率与 PZT 电压的对应关系, 可知: 若 T_2 透过率减小 1%, 则电压应上升 4.86 mV。

综上所述, 假定系统校准时双通道透过率交点处, 双通道透过率值为 T_0 (如图 3 所示 $T_0=40\%$), 则反馈电压 V_z 与 2 通道透过率 T_2 的关系为:

$$V_z = a (T_2 - T_0) \quad (8)$$

式中: $a = -4.86 \text{ mV}/\%$ 为反馈系数。

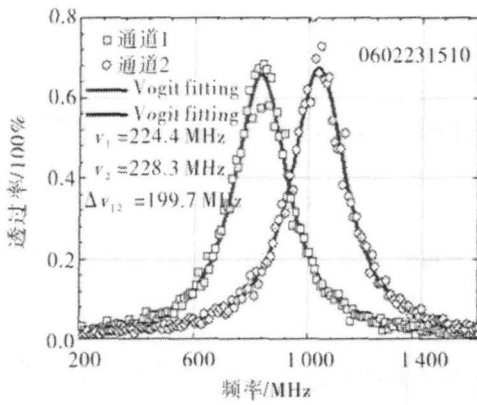


图 3 双通道透过率曲线

Fig.3 Transmission curves of the twin-channel F-P etalon

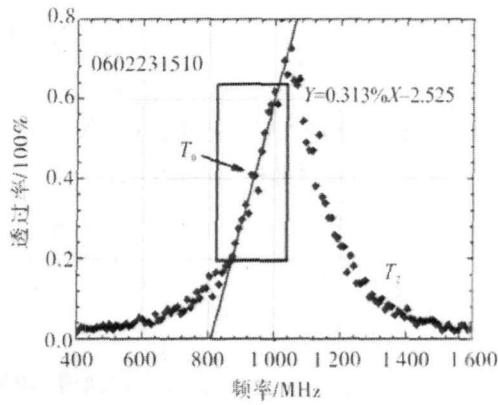


图 4 透过率 T_2 在激光器频率附近的线性拟合

Fig.4 Linear fitting of T_2 near the laser frequency

3 电路实现原理

频率锁定电路选取双通道Fabry-Perot标准具的 2 通道作为频率锁定。图 5 为频率锁定电路的原理图。出射激光的一小部分作为参考光经过一个分束片, 其中 25%的光被反射后经汇聚透镜耦合到能量探测器DetE, 75%的透射光经标准具的 2 通道后被汇聚透镜耦合到透射光探测器DetS。由于探测器输出的电压较小, 不能充分利用ADC(Analog-to-Digital Converter)的量程^[5], 因此在探测器后使用了高速差分放大器^[6](DA, Differential Amplifier)放大DetE和DetS的输出电压。同时, DA的使用抑制了探测器输出信号在传输至反馈电路时的共模噪声, 有利于提高电路的频率锁定精度。使用 14BIT、分辨率 61 μ V 的高速A/D转换器转换差分放大器的输出, 其输出数据送入先入先出存储器(FIFO, First In First Out)缓冲, 从而使低速的MCU(Micro Chip Unit,单片机)能和高速ADC匹配。MCU读取FIFO中的数据, 计算透过率值 T_2 。由公式(8)可以计算反馈电压值^[7]。计算结果送入DAC(Digital -to- Analog Converter), 经转换后输出电压, 由于转换后输出的电压是单端的电压, 不能提供负电压, 所以使用放大器把单端电压转换成双端电压。电压反馈到标准具的Z调制。

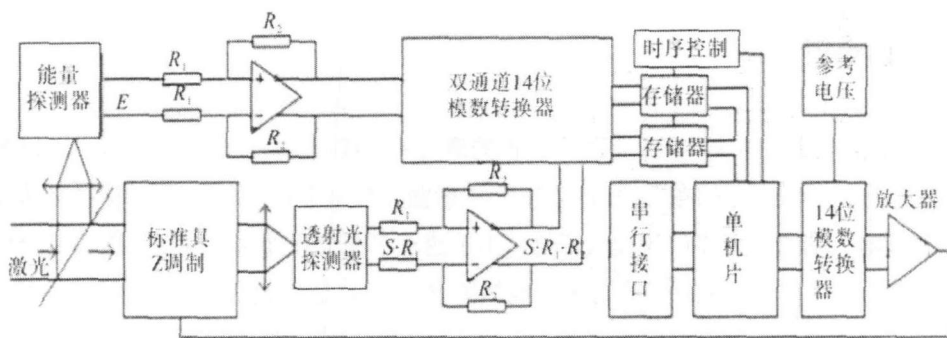


图 5 频率锁定电路原理图

Fig.5 Block diagram of the servo- stabilizing circuitry

信号采集时序如图 6 所示。在一个周期里, 对能量探测器 DetE 和透射光探测器 DetS 的输出信号都采集两次。其中, 紧跟在激光脉冲出射后的 400 ns 采集信号, 延迟 19 ms 后再次采集 400 ns 作为没有信号时的下一个周期的噪声。因使用了 14 位 DAC, 参考电压为 2.048 V, 所以腔长调制电压的分辨率为 250 μ V。对应频率

的锁定精度为 0.164 MHz。当采用文中参数的 F-P 标准具, 工作波长为 1 064 nm 时, 由此导致径向风速的测量误差为 8.7 cm/s。

4 结 论

直接测风激光雷达中使用高分辨率的 F-P 标准具作为鉴频器, 从而实现出射激光脉冲频率与大气回波信号频率的差分测量。然而, 这种测量方法的前提是:

在一次信号累积时间内, 激光脉冲频率必须处在双边缘 F-P 标准具透过率的交点上。文中根据交点处透过率近似线性的特征, 设计了频率反馈锁定电路。从而避免了激光器频率漂移或者鉴频器透过率中心频率漂移导致的系统误差。使用频率反馈锁定后, 测量径向风速的设计误差为 8.7 cm/s。

参考文献:

- [1] World Meteorological Organization. Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas. WMO Satellite Reports SAT-21[R]. WMO/TD, No.913.1998.
- [2] SUN Dong-song, ZHONG Zhi-qing, ZHOU Jun, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. Optical Review, 2005, 12(5): 409-414.
- [3] KORB C L, GENTRY B M, LI S, et al. Theory of the double-edge technique for doppler lidar wind measurement [J]. Applied Opt, 1998, 37: 3097-3104.
- [4] MCKAY J A, REES D. High-performance Fabry-Perot etalon mount for spaceflight[J]. Opt Eng, 2000, 39(1): 315-319.
- [5] 朱欣华, 姚天忠, 邹丽新. 智能仪器原理和设计[M].北京: 中国计量出版社, 2002.
- [6] 康华光. 电子技术基础: 模拟部分[M].北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] 胡伟, 季小衡. 单片机C程序设计及应用实例[M].北京: 人民邮电出版社, 2004.

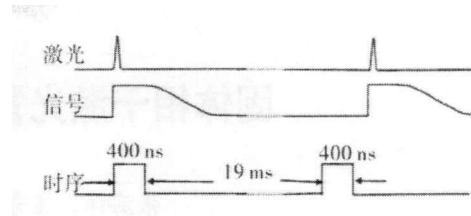


图 6 数据采集时序图

Fig.6 Timing diagram of data collection